



MANUAL DEL RADIOAFICIONADO DE COSTA RICA

Versión 3.0
Agosto, 2025

Tabla de contenidos

Capítulo 1 Introducción	23
1.1 La radioafición	23
1.1.1 Por qué se llama "radioafición"	23
1.1.2 Los comienzos de la radioafición	23
1.1.3 La radioafición en costa rica.....	24
1.1.4 La radioafición hoy	28
1.1.5 ¿Quién puede ser radioaficionado?	29
1.1.6 ¿Qué hacen los radioaficionados?.....	29
1.1.7 Clubes y organizaciones de radioaficionados.....	30
1.1.8 ¿Como las ondas sinusoidales, cuadradas, triangulares y de diente de sierra?.....	31
1.1.9 Radios personales sin licencia	31
1.1.10 Sistemas de radio para usos no comercial, oficial y de seguridad, socorro y emergencia	31
1.2 Actividades de los radioaficionados	32
1.2.1 Identificación y contactos	32
1.2.2 Jerga del aficionado	32
1.2.3 Usando la voz.....	32
1.3 El código del radioaficionado	35
1.4 Regulación del servicio de radioaficionados y afines en Costa Rica.....	35
1.4.1 Legislación vigente para la obtención de una licencia en el servicio de radioaficionados en Costa Rica	36
1.4.2 Legislación vigente para el permiso de uso de espectro radioeléctrico en el servicio de radioaficionados en Costa Rica.....	37
1.4.3 Del control de radioaficionados-Libro de Guardia.....	39
1.4.4 Canon de reserva del espectro	40
Capítulo 2 Fundamentos de Radio y Señales.....	41
2.1 Señales y Ondas de Radio.....	41
2.1.1 Prefijos métricos.....	41
2.1.2 Frecuencia y fase	42
2.1.3 El espectro radioeléctrico	43
2.1.4 Longitud de onda.....	45
2.1.5 Radiaciones no ionizantes (RNI).....	46
2.2 Fundamentos del Equipamiento de Radio	46
2.2.1 Organización básica de una estación	46
2.2.2 Repetidores	47
Capítulo 3 Procedimientos y prácticas operativas	49
3.1 Técnicas de operación en HF	49
3.1.1 Buenas prácticas	49
3.1.2 Selección de una frecuencia	49
3.1.3 Realización de contactos	51
3.1.4 Modos	54

3.1.5 Recepción en HF	56
3.1.6 Transmisión en HF	58
3.2 Operación en Emergencias	60
3.3 Operación General	61
3.3.1 Frecuencias HF para la categoría superior	61
3.3.2 DXing	61
3.3.3 Productividad en las Avalancha de llamadas	62
3.3.4 Propagación para DXing	63
3.3.5 Estaciones remotas	64
3.4 Satélites de Radioaficionados	64
3.4.1 Comprendiendo las órbitas satelitales	64
3.4.2 Definiciones Orbitales	66
3.4.3 Rotación de Faraday y modulación por giro	67
3.4.4 Operación de satélites	67
3.4.5 Frecuencias de operación de satélites	69
Capítulo 4 Electricidad, componentes y circuitos	70
4.1 Electricidad	70
4.1.1 Corriente y Tensión	70
4.1.2 Corriente Directa y Alterna	70
4.1.3 Circuitos	70
4.1.4 Resistencia y la Ley de Ohm	71
4.1.5 Potencia	71
4.1.6 Frecuencia	72
4.1.7 Longitud de onda	72
4.1.8 Decibeles	72
4.2 Componentes y Unidades	73
4.2.1 Componentes básicos	73
4.2.2 Transformadores	74
4.2.3 Componentes en circuitos serie y paralelo	74
4.2.4 Reactancia e Impedancia	76
4.2.5 Resonancia	77
4.2.6 Diodos y transistores	77
4.2.7 Componentes de protección	78
4.2.8 Conmutadores de los circuitos	78
4.2.9 Esquemáticos y símbolos de componentes	79
4.3 Campos Eléctricos y Magnético	80
4.4 Principios de Circuitos	82
4.4.1 Almacenamiento de Energía Eléctrica	82
4.4.2 Almacenamiento de Energía Magnética	83
4.4.3 Dirección del Campo Magnético	84
4.4.4 Constante de Tiempo	84
4.4.5 Cálculos de la constante de tiempo en circuitos RC	85

4.4.6 Ejemplos de circuitos RC	87
4.4.7 Cálculos de la constante de tiempo del circuito RL	88
4.4.8 Ángulo de fase	89
4.4.9 Relación de tensión-corriente CA en capacitores	90
4.4.10 Relación de la tensión-corriente CA en los inductores	92
4.4.11 Combinando reactancia con resistencia	94
4.4.12 Impedancia Compleja.....	95
4.4.13 Admitancia y Susceptancia	98
4.4.14 Cálculo de Impedancias y Ángulos de Fase	98
4.4.15 Potencia Reactiva y Factor De Potencia.....	98
4.4.16 Definición de la potencia reactiva	99
4.4.17 Definición y cálculo de potencia	99
4.4.18 Circuitos Resonantes	101
4.4.19 Cálculos de la frecuencia de resonancia	101
4.4.20 Energía almacenada en circuitos resonantes	103
4.4.21 Impedancia de los circuitos resonantes vs. frecuencia.....	103
4.4.22 Factor de Calidad (Q) de componentes y circuitos	104
4.4.23 Q y ancho de banda de un circuito resonante	106
4.4.24 Efecto Piel y Q.....	107
4.4.25 Autoresonancia.....	108
4.4.26 Efectos del empaquetado de componentes en RF.....	108
4.4.27 Núcleos Magnéticos.....	109
4.4.28 Forma del Núcleo – Toroides y Perlas	110
4.5 Circuitos de Radio.....	111
4.5.1 Osciladores y amplificadores	112
4.5.2 Moduladores.....	112
4.5.3 Rectificadores y fuentes de poder.....	112
4.5.4 Mezcladores	117
4.6 Potencia CA.....	117
4.6.1 RMS: definición y medición	117
4.6.2 Potencia de envolvente de pico (PEP): definición y medición	118
4.7 Reactancia, Impedancia y Resonancia	118
4.7.1 Reactancia.....	118
4.7.2 Impedancia y resonancia	122
4.7.3 Transformación de impedancia	123
4.7.4 Adaptación de impedancia	123
4.8 Componentes Activos.....	124
4.8.1 Componentes semiconductores	124
4.8.2 Tubos de vacío	126
4.8.3 Circuitos integrados analógicos y digitales	128
4.8.4 Circuitos integrados de RF.....	130
4.8.5 Microprocesadores y componentes relacionados.....	130

4.9 Equipo Básico de Prueba.....	132
4.9.1 Medidores analógicos y digitales	132
4.9.2 Osciloscopio	132
4.9.3 Mediciones de impedancia y resonancia	133
4.9.4 Medidores de intensidad de campo y potencia de RF	134
4.10 Matemática de Radio	135
4.10.1 Coordenadas rectangulares y polares	135
4.10.2 Coordenadas complejas.....	137
4.11 Dispositivos Semiconductores.....	138
4.11.1 Materiales	138
4.11.2 Diodos de unión.....	140
4.11.3 Diodos de barrera Schottky	142
4.11.4 Diodos Zener	144
4.11.5 Diodos Varactor	145
4.11.6 Diodos PIN.....	145
4.11.7 Diodos emisores de luz	147
4.11.8 Transistores bipolares	148
4.11.9 Transistores de efecto de campo	150
4.11.10 Dispositivos integrados RF	152
4.12 Optoelectrónica	153
4.12.1 Fotoconductividad	153
4.12.2 Componentes optoelectrónicos.....	155
4.12.3 Celdas fotovoltaicas	157
4.13 Lógica Digital.....	158
4.13.1 Fundamentos de lógica	158
4.13.2 Lógica secuencial y síncrona.....	163
4.13.3 Familias lógicas.....	167
4.14 Amplificadores	170
4.14.1 Amplificadores de dispositivos discretos.....	171
4.14.2 Amplificadores Operacionales (OP AMP)	173
4.14.3 Comparadores.....	176
4.14.4 Clases de operación.....	177
4.14.5 Distorsión e intermodulación	179
4.15 Procesamiento de Señales	180
4.15.1 Circuitos osciladores y sus características	180
4.15.2 Inestabilidad y oscilación parásita.....	181
4.15.3 Osciladores RF.....	182
4.15.4 Cristales para osciladores	183
4.15.5 Microfonía y deriva térmica	184
4.15.6 Sintetizador de frecuencia.....	185
4.15.7 Sintetizadores digitales directos (DDS).....	185
4.15.8 Bucles de enganche de fase (PLL)	186

4.15.9 Mezcladores	187
4.15.10 Moduladores	188
4.15.11 Modulación de amplitud y banda lateral única	189
4.15.12 Modulación de frecuencia	190
4.15.13 Pre-énfasis y de-énfasis	191
4.15.14 Detectores y demoduladores	191
4.16 Procesamiento de Señales Digitales (DSP) y Radio Definida por Software (SDR)	193
4.16.1 Procesamiento de señales digitales (DSP)	193
4.16.2 Convertidores de datos	195
4.16.3 Transformadas de Fourier	196
4.16.4 Decimación e interpolación	196
4.16.5 Sistemas de radio definidos por software (SDR)	196
4.16.6 Hardware SDR	197
4.16.7 Modulación y demodulación I/Q	198
4.17 Filtros y adaptación de impedancia	200
4.17.1 Familias de filtros y tipos de respuesta	200
4.17.2 Filtros activos y pasivos	200
4.17.3 Diseño de filtros	201
4.17.4 Filtros de cristal	203
4.17.5 Filtros activos	204
4.17.6 Filtros para procesamiento digital de señales (DSP)	205
4.17.7 Adaptación de impedancia	207
4.18 Fuentes De Poder	210
4.18.1 Reguladores de Voltaje Lineales	210
4.18.2 Reguladores en Derivación y en Serie	210
4.18.3 Eficiencia y Disipación de Potencia	211
4.18.4 Reguladores de Carga de Baterías	211
Capítulo 5 Propagación, antenas y alimentadores	214
5.1 Propagación	214
5.1.1 La ionosfera y sus capas	215
5.1.2 Propagación en ondas decamétricas	217
5.1.3 Propagación de ondas ionosféricas	218
5.1.4 Camino largo y camino corto	222
5.1.5 Efectos solares	224
5.1.6 Modos de Propagación Avanzados	228
5.2 Conceptos básicos de antenas y ondas de radio	235
5.2.1 Conceptos básicos de las antenas	236
5.2.2 El radiador isotrópico	238
5.2.3 Antenas simples y multibanda	242
5.2.4 Antenas direccionales	246
5.2.5 Antenas de bucle	250
5.2.6 Antenas apiladas y sistemas de alta ganancia	252

5.2.7 Líneas de alimentación y SWR	256
5.2.8 Relación de Onda Estacionaria (ROE/SWR) y Adaptación	261
5.2.9 Técnicas Avanzadas de Diseño	267
5.2.10 Modelado y optimización de antenas	270
5.3 Sistemas Prácticos y Aplicaciones	271
5.3.1 Elección de antenas para diferentes bandas (HF, VHF/UHF)	271
5.3.2 Antenas especializadas	271
5.3.3 Presupuestos de enlace y márgenes de potencia	272
5.3.4 Antenas para comunicaciones espaciales	273
5.4 Recomendaciones UIT sobre la influencia del entorno en la propagación de las ondas electromagnéticas	276
5.4.1 Influencia del entorno en la propagación de ondas electromagnéticas	277
5.5 Recomendaciones UIT sobre la operación del servicio de radioaficionados	287
5.5.1 Ética y Procedimientos Operativos para el Radioaficionado (IARU)	287
Capítulo 6 Equipos para radioaficionados	288
6.1 Modulación	288
6.2 Bloques fundamentales de la radio	291
6.2.1 Multiplicadores	292
6.2.2 Moduladores	292
6.3 Transmisores y Receptores	294
6.3.1 Transmisor	295
6.3.2 Receptores	298
6.4 Amplificadores	313
6.4.1 Amplificadores de Potencia RF VHF/UHF	313
6.4.2 Transversores	315
6.5 Conectores	315
6.6 Comunicaciones Digitales	317
6.6.1 Modos digitales de radioaficionados	317
6.6.2 Configuración para modos digitales	319
6.7 Fuentes de Energía y Baterías	320
6.7.1 Fuentes de energía	320
6.7.2 Baterías	321
6.7.3 Energías alternativas	322
6.8 Fenómenos adversos sobre las señales	323
6.8.1 Armónicos y Espurias	323
6.8.2 Sobremodulación	323
6.8.3 Sobre desviación	325
6.8.4 Clicks de Llave	325
6.8.5 Interferencia y Ruido	326
6.9 Instalación de estaciones de HF	332
6.9.1 Instalaciones móviles	332
6.10 Mediciones de Radio y Rendimiento	335
6.10.1 Equipos de Prueba	335

6.10.2 Analizador de espectro	341
Capítulo 7 Métodos de comunicación entre radioaficionados	347
7.1 Hacer contactos	347
7.2 Uso de repetidores	353
7.3 Redes	356
7.4 Comunicaciones para el servicio público	357
7.5 Operación por satélite	359
7.6 Modos Digitales	361
7.7 Modulación, Protocolos y Modos	370
7.7.1 Sistemas de modulación	370
7.7.2 Protocolos y modos digitales	373
7.7.3 Televisión de aficionados	386
Capítulo 8 Seguridad de la estación	393
8.1 Seguridad Eléctrica	393
8.2 Gestión de RF en su estación	398
8.3 Interferencia RF (RFI)	399
8.4 Interferencias de transmisiones de aficionados	400
8.5 Buenas prácticas en tu estación	401
8.6 Exposición RF	401
8.7 Seguridad Mecánica	407
8.8 Seguridad Eléctrica	410
8.9 Seguridad Exterior	413
8.10 Materiales Peligrosos	415
Capítulo 9 Bibliografía	417

Índice de Figuras

Figura 1. Amado Céspedes. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	24
Figura 2. Oficio N°20539-G. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	27
Figura 3. La Gaceta N° 138. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	27
Figura 4. Código Morse. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	34
Figura 5. Representación de una onda de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	42
Figura 6. Representación de la fase de una onda de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	43
Figura 7. Representación de los rangos de frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	43
Figura 8. Representación de como un radio ve la banda de AM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	44
Figura 9. Relación entre la frecuencia, longitud y velocidad de onda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	45
Figura 10. Representación en diagrama de bloques de un radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	47
Figura 11. Elementos de una estación repetidora. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	48
Figura 12. Geometría de una elipse. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	65
Figura 13. Representación de la segunda y tercer Ley de Kepler. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	65
Figura 14. Órbita de un satélite. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	66
Figura 15. inclinación de la órbita de un satélite. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	66
Figura 16. Diferencia entre el perigeo y apogeo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	67
Figura 17. Representación del transpondedor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	68
Figura 18. Diferencia entre CD y CA. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	70
Figura 19. Circuito serie (A) y paralelo (B). (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	71
Figura 20. Código de colores de las resistencias. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	73
Figura 21. Circuitos series y paralelos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	75
Figura 22. Combinación de circuitos series y paralelos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	76

Figura 23. Símbolos esquemáticos utilizados en diagramas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	79
Figura 24. Esquema de un circuito transistorizado simple. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	79
Figura 25. Campo eléctrico en un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	81
Figura 26. Campo magnético producto del paso de corriente en un conductor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	82
Figura 27. Circuito simple para cargar un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	82
Figura 28. Campo magnético alrededor de un cable conectado a una batería. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	83
Figura 29. Circuito RC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	84
Figura 30. Circuito RL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	85
Figura 31. Curva de carga y descarga del capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	85
Figura 32. Grafica de corriente en un inductor con el tiempo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	89
Figura 33. Ciclo completo de una onda senoidal. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	90
Figura 34. Tensión a través de un capacitor durante su carga en CD. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	91
Figura 35. Amplitudes relativas de corriente y tensión en CA para un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	91
Figura 36. Relación entre el campo eléctrico y la tensión en un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	92
Figura 37. Relación entre el campo magnético y la corriente en un inductor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	92
Figura 38. Amplitudes relativas de corriente y tensión en CA para un inductor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	93
Figura 39. Circuito serie y paralelo con resistencias y reactancias. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	96
Figura 40. Circuito RL valores de resistencia eje X y reactancia eje Y. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	97
Figura 41. Circuito serie RL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	100
Figura 42. Respuesta de la capacitancia e inductancia reactiva en función de la frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	101
Figura 43. Circuito RLC para cálculo de resonancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	102
Figura 44. Circuito LC paralelo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	103
Figura 45. Capacitores e inductores considerados como ideales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	105

Figura 46. Circuito ejemplo RLC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	105
Figura 47. Ancho de Banda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	106
Figura 48. Q de una inductancia y la frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	108
Figura 49. Circuito auto resonante. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	108
Figura 50. Conteo de N en un toroide. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	111
Figura 51. Transmisor de código morse. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	112
Figura 52. Dos circuitos rectificadores básicos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	113
Figura 53. Rectificador de onda completa. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	114
Figura 54. Filtro de entrada de capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	114
Figura 55. Diagrama de bloques de una fuente conmutada. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	116
Figura 56. Relación entre RMS, promedio, pico de la tensión CA. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	117
Figura 57. Potencia pico de envolvente. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	118
Figura 58. Comportamiento de un capacitor	119
Figura 59. Comportamiento de un inductor	121
Figura 60. Circuito LCR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	123
Figura 61. Circuitos LC para adaptación de impedancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	124
Figura 62. Diodo tipo PN. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	125
Figura 63. Representación del transistor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	125
Figura 64. Transistor FET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	126
Figura 65. Símbolo esquemático del tubo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	126
Figura 66. Símbolo esquemático de un CI. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	128
Figura 67. Símbolo esquemático de las funciones lógicas básicas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	130
Figura 68. Visualización en pantalla de un osciloscopio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	133
Figura 69. Ejemplo de una forma de onda del encendido y apagado de un transistor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	133

Figura 70. Coordenadas rectangulares. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	135
Figura 71. Coordenadas polares. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	136
Figura 72. Representación del plano de números complejos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	138
Figura 73. Átomos de silicio y germanio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	139
Figura 74. Átomo con 5 electrones encajan en la estructura cristalina añadiendo arsénico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	139
Figura 75. Átomo con 5 electrones encajan en la estructura cristalina añadiendo galio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	140
Figura 76. Concepto básico de un diodo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	140
Figura 77. Funcionamiento del diodo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	141
Figura 78. Tipos de carcasa para diodos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	142
Figura 79. Diodo Schottky. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	143
Figura 80. Diodo de contacto puntual. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	143
Figura 81. Diodos de contacto caliente. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	144
Figura 82. Diodo Zener. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	145
Figura 83. Diodo varactor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	145
Figura 84. Diodo PIN. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	146
Figura 85. Circuito con diodos PIN. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	147
Figura 86. Diodos LED. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	147
Figura 87. Diagrama de un transistor PNP. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	148
Figura 88. Símbolo de un transistor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	148
Figura 89. Transistor JFET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	150
Figura 90. Símbolo del JFET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)) ..	150
Figura 91. Transistor MOSFET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	151
Figura 92. MOSFET de doble puerta. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	151
Figura 93. Diagrama esquemático de un amplificador UHF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	153
Figura 94. Estructura básica de un átomo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	154

Figura 95. Diagrama esquemático de un optoacoplador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	156
Figura 96. Codificador de eje óptico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	157
Figura 97. Sección transversal de una fotocelda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	158
Figura 98. Señal binaria típica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	159
Figura 99. Representación de un búfer. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	160
Figura 100. Compuerta AND. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)) ..	160
Figura 101. Compuerta OR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	161
Figura 102. Compuerta NAND. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)) ..	161
Figura 103. Compuerta NOR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)) ..	161
Figura 104. Compuerta XOR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)) ..	162
Figura 105. Comparación de la lógica positiva y negativa. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	162
Figura 106. Función simple según la lógica elegida. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	163
Figura 107. Flip Flop. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	164
Figura 108. CC temporizador 555 configuración monoestable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	166
Figura 109. CC temporizador 555 configuración estable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	166
Figura 110. Diagrama del 7404. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	168
Figura 111. Rangos de entrada y salida para los TTL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	168
Figura 112. Rango de las señales de entrada y salida para la serie 4000 CMOS. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	169
Figura 113. Amplificador de emisor común. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	172
Figura 114. Tres configuraciones de amplificadores de tubo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	173
Figura 115. Amplificador operacional. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	174
Figura 116. Ganancia constante circuito cerrado el AMP. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	175
Figura 117. Amplificador operacional inversor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	175
Figura 118. Comparador de tensión. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	176

Figura 119. Salida vs entrada amplificador típico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	177
Figura 120. Operación de un amplificador en clase A, B, AB, C. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	178
Figura 121. Amplificador clase B en circuito push-pull. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	179
Figura 122. Circuito oscilador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	181
Figura 123. Técnica de neutralización para AMP de potencia de RF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	182
Figura 124. Circuitos de Hartley, Colpitts y Pierce. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	183
Figura 125. Circuito equivalente de un cristal. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	184
Figura 126. Diagrama de bloques de un sintetizador digital. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	186
Figura 127. Funcionamiento de un PLL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	187
Figura 128. Símbolo de un mezclador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	187
Figura 129. Mezclador pasivo de doble balance. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	188
Figura 130. Espectro de una señal AM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	189
Figura 131. SSB método del filtro. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	190
Figura 132. Diagrama de bloques de un transmisor SSB. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	190
Figura 133. Modulador de reactancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	190
Figura 134. Diagrama de bloques de un transmisor FM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	191
Figura 135. Receptor complejo y simple. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	192
Figura 136. Circuito discriminador de frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	193
Figura 137. Representación como se convierte una señal analógica a formato digital. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	194
Figura 138. Espectro de una señal analógica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	194
Figura 139. Onda de frecuencia senoidal mayor que la frecuencia muestreada. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	195
Figura 140. Diagrama de bloques de un transceptor DDC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	198

Figura 141. Modulador y demodulador I/Q. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	199
Figura 142. Sistema DSP con transformada de Hilbert. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	200
Figura 143. Clasificación de filtros. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	201
Figura 144. Curvas de respuesta que muestra el efecto del filtro. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	202
Figura 145. Filtro con cristales configuración semirretícula. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	203
Figura 146. Filtro RC activo simple. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	204
Figura 147. Diagrama de bloques filtro FIR. (Adaptado de (American Radio Relay League, 2020))	206
Figura 148. Filtro de respuesta a impulsos infinitos (IIR). (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	206
Figura 149. 4 variantes de red L. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	207
Figura 150. Red L que transforma impedancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	208
Figura 151. Red Pi. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	208
Figura 152. Red Pi y L conectadas en serie. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	209
Figura 153. Red T. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	209
Figura 154. Circuito regulador con diodo zener. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	210
Figura 155. Circuito regulador lineal en serie. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	211
Figura 156. Difracción de las ondas de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	214
Figura 157. La ionosfera. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	215
Figura 158. Propagación ionosférica para comunicación a larga distancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	216
Figura 159. Ondas terrestres a diferentes frecuencias. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	218
Figura 160. Propagación rayo de Pedersen. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	219
Figura 161. Refracción de las ondas de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	220
Figura 162. Angulo crítico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	221
Figura 163. Esquema de la Tierra que muestra la trayectoria corta y larga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	223

Figura 164. Representación de la línea gris. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	224
Figura 165. Ciclos solares 19-24. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	225
Figura 166. Correlación entre el SFI y el número de manchas solares. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	226
Figura 167. Aproximadamente 8 minutos después de ocurrir una llama solar, (American Radio Relay League, 2023))	227
Figura 168. Efecto de retrodispersión. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	229
Figura 169. Propagación NVIS. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	230
Figura 170. Horizonte visual y curvatura de la Tierra. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	231
Figura 171. Distancia del horizonte visual y la altura de la antena. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	231
Figura 172. Comunicación por horizonte a mayor altura de antena. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	232
Figura 173. Representación de la zona de Fresnel. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	232
Figura 174. Propagación multirayecto. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	233
Figura 175. Contactos realizados utilizando propagación TE. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	234
Figura 176. Ejemplos de antenas comunes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	235
Figura 177. Representación del ancho de haz. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	236
Figura 178. Patrón de radiación típico de una antena en HF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	236
Figura 179. Diagrama de radiación de una antena isotrópica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	238
Figura 180. Diagrama de radiación de un dipolo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	239
Figura 181. Variación de la impedancia del punto de alimentación y altura física del suelo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	240
Figura 182. Patrón de radiación de un dipolo en función de la variación de la altura. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	241
Figura 183. Antena de plano terrestre. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	244
Figura 184. Dipolo de media onda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	245
Figura 185. Cancelación para un par de antenas separadas una longitud de onda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	247

Figura 186. Patrón de radiación típico de una antena VHF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	248
Figura 187. Antena Yagi de 2 elementos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	248
Figura 188. Coincidencia gamma. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	250
Figura 189. Antena de bucle. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	251
Figura 190. Diagrama de antena y patrón de radiación. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	251
Figura 191. Antenas apiladas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	253
Figura 192. Arreglo de dipolos log periódico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	253
Figura 193. Antena Beverage. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	254
Figura 194. Antena multibanda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	255
Figura 195. El cable coaxial. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	256
Figura 196. Factor de velocidad y longitud eléctrica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	259
Figura 197. Línea de transmisión abierta. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	264
Figura 198. Línea de transmisión cortocircuito. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	265
Figura 199. Transformador síncrono. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	265
Figura 200. Medición del parámetro S. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	266
Figura 201. Principio de la carta de Smith. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	268
Figura 202. Carta de Smith. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	269
Figura 203. Adaptación de impedancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	272
Figura 204. Antena con polarización circular con 2 Yagis. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	274
Figura 205. Propagación por la dispersión de meteoros. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	275
Figura 206. Pérdidas en el espacio libre. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	277
Figura 207. Diagrama de los radios de Fresnel. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	280
Figura 208. Diagrama para Fresnel con transmisores a la misma altura. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	280
Figura 209. Diagrama para Fresnel con transmisores a diferente altura. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	281

Figura 210. Diagrama para pérdidas con obstáculos dentro de la zona de Fresnel (<60%). (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)	281
Figura 211. Gráfica para cálculo de atenuación específica. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017).....	283
Figura 212. Diagrama para atenuación por lluvia. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017).....	283
Figura 213. Medición de ancho de banda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	288
Figura 214. Añadir información a una señal RF modulando la amplitud. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022)).....	289
Figura 215. Señal de banda lateral única. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	289
Figura 216. Modulaci3n FM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	291
Figura 217. S3mbolo para diagrama de bloques de multiplicador y modulador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	292
Figura 218. Se3al AM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	293
Figura 219. Modulador de reactancia para crear modulaci3n por frecuencia o por fase. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023)).....	293
Figura 220. Modulador I/Q. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	294
Figura 221. Transmisor CW dos etapas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	296
Figura 222. Transmisor simple de 3 bandas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	296
Figura 223. Como crear un transmisor SSB a partir del CW. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	297
Figura 224. Transmisor FM de 2 bandas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	297
Figura 225. Receptor superheterodino. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023)).....	299
Figura 226. Receptor FM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	300
Figura 227. Roofing filter. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	306
Figura 228. Rango dinámico de bloqueo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	308
Figura 229. Potencia de salida de la se3al deseada frente a los productos de distorsi3n de tercer orden. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	310
Figura 230. Relaci3n entre los niveles de entrada, piso de ruido, rango dinámico de bloqueo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	311
Figura 231. Ruido de fase. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	312
Figura 232. Configuraci3n de una estaci3n para utilizar modos digitales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022)).....	320
Figura 233. Estaci3n digital con salida a internet. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	320

Figura 234. Señales moduladas y sobremoduladas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	324
Figura 235. Ejemplo de click de llave. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	326
Figura 236. Situación potencial de intermodulación. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	327
Figura 237. Osciladores en un sistema de repetidora. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	327
Figura 238. Arco producto del paso de la corriente por el aire. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	329
Figura 239. Filtro de línea de CA tipo brute force. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	330
Figura 240. Dos patrones típicos de envolvente. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	337
Figura 241. Diagrama de bloques de un contador de frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	338
Figura 242. Cara del CRT. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	339
Figura 243. Medición de tensión pico a pico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	340
Figura 244. Dominio de tiempo y frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	342
Figura 245. Onda cuadrada vista en un analizador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	343
Figura 246. Onda diente de sierra vista en un analizador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	343
Figura 247. Diagrama de bloques del analizador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	344
Figura 248. Configuraciones de pruebas de transmisores. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	345
Figura 249. Analizador de espectro para pruebas IMD. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	345
Figura 250. Visualización típica durante las pruebas de IMD. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	346
Figura 251. IRLP y Echolink vinculados usando VoIP. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	355
Figura 252. Conectar un transceptor de modo digital a internet. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	356
Figura 253. Comunicación utilizando el satélite. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	360
Figura 254. Representación código Baudot. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	364
Figura 255. Transmisión por paquetes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	365

Figura 256. Indicador de elipse cruzado. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	378
Figura 257. Modulación OFDM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	381
Figura 258. Señal de espectro ensanchado. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	383
Figura 259. Diagrama de constelación. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	385
Figura 260. Estación ATV básica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	387
Figura 261. Concepto de líneas de escaneo y entrelazos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	388
Figura 262. Estructura básica de un cuadro de señal de video RS-170. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	389
Figura 263. Espectro de una señal de televisión analógica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	389
Figura 264. Sistema SSTV típico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	391
Figura 265. Técnica correcta de cableado para 120 VAC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022)).....	396
Figura 266. Potencial de referencia común. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	397
Figura 267. Sistema de conexión a tierra completo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	398
Figura 268. Aplicación de filtros a varios RFI. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	399
Figura 269. Medidas de seguridad. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	405
Figura 270. Forma correcta de cableado 120 VAC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023)).....	411

Índice de Tablas

Tabla 1. Aspectos mínimos solicitados en el libro de guardia. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017).....	39
Tabla 2. Sistema Internacional de Unidades.	41
Tabla 3. Rangos del espectro RF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	43
Tabla 4. Separación de señal recomendado. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	50
Tabla 5. Modos comunes y características. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	56
Tabla 6. Ventanas de DX. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	62
Tabla 7. Modos de operación de satélites. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	69
Tabla 8. Cálculos equivalentes de valores en serie y paralelo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	75
Tabla 9. Efecto en el resultado final en componentes serie y paralelo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	75
Tabla 10. Tensión en el capacitor a lo largo del tiempo en el proceso de carga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	86
Tabla 11. Tensión en el capacitor a lo largo del tiempo en el proceso de descarga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	86
Tabla 12. Corriente en el inductor a lo largo del tiempo en el proceso de carga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)).....	89
Tabla 13. Tensión y corriente de los diodos rectificadores. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023)).....	116
Tabla 14. Características de algunas familias lógicas comunes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	129
Tabla 15. Tipos de memoria. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023)) ...	131
Tabla 16. Interfaces seriales comunes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	131
Tabla 17. Resumen del comportamiento de la señal de salida del biestable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	164
Tabla 18. Propagación HF día/noche. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	225
Tabla 19. Tipos comunes de cable coaxial. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	257
Tabla 20. Tabla para los valores de K y α en función de la frecuencia. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017).....	284
Tabla 21. Ancho de banda para diferentes señales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	290
Tabla 22. Etiquetas para la selección de la banda.	295

Tabla 23. Anchos de banda típicos para filtros IF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	306
Tabla 24. Tipos de baterías y características. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	321
Tabla 25. Mediciones CA para señales senoidales y cuadradas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	336
Tabla 26. Señales Q más comunes. (Adaptado de UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), 1995))	349
Tabla 27. Desplazamiento estándar de repetidores. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	353
Tabla 28. Sub-bandas de satélites seleccionadas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	360
Tabla 29. Frecuencias de redes inalámbricas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	368
Tabla 30. Anchos de banda para varios modos digitales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))	368
Tabla 31. Designación de la emisión para los modos habituales de radioaficionados. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	371
Tabla 32. Código Gray 3 bits. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)) ..	376
Tabla 33. Elementos principales del estándar NTSC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	388
Tabla 34. Parámetros estándar de una señal SSTV analógica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))	391
Tabla 35. Efectos de la corriente en el cuerpo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	393
Tabla 36. Capacidad nominal de algunos tipos de cable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	395
Tabla 37. Ciclos de trabajo operativo usados por radioaficionados. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))	404

Capítulo 1 Introducción

La Radioafición te sorprenderá con todas sus distintas actividades. El mundo de la radioafición revelará un universo fascinante de diversas experiencias. Quienes han experimentado la radioafición en contextos de servicio comunitario, o conocen a individuos que poseen equipos de radio en sus espacios domésticos o vehículos, ya tienen una percepción preliminar. Posiblemente se haya tenido contacto con esta disciplina a través de representaciones cinematográficas o referencias bibliográficas. Si usted es una persona que tienen interés por la ingeniería y las comunicaciones, en tal caso, descubrirá uno de los pasatiempos más versátiles y prácticos existentes. La radioafición representa un sistema de comunicaciones disponible para cualquier ciudadano particular en cualquier ubicación del planeta e incluso más allá de sus límites.

Las bandas aficionadas del espectro radioeléctrico constituyen un recurso demanial oficialmente reconocido para el desarrollo de la radioafición, la cual es una actividad que fue concebida específicamente para personas interesadas en las comunicaciones radiales. Algunos entusiastas prefieren concentrarse en los aspectos tecnológicos y científicos de la radio. Los certámenes competitivos y programas de reconocimiento atraen a otros participantes. Ciertos individuos se capacitan para utilizar la radio como apoyo en emergencias, prestar servicios públicos o mantener contacto familiar. Muchos simplemente encuentran placer en establecer comunicaciones con otros radioaficionados.

Esta sección introductoria del Manual del Radioaficionado de Costa Rica ofrecerá una perspectiva general para comprender el funcionamiento de la radio y las motivaciones que impulsan a los radioaficionados en sus actividades.

1.1 La radioafición

1.1.1 Por qué se llama "radioafición"

Con el propósito de impedir que entidades comerciales o administrativas se beneficien de las frecuencias de los aficionados, se establece una prohibición absoluta respecto a la remuneración por actividades realizadas. Esto implica que no es permisible dialogar sobre tareas laborales, por ejemplo. Si se proporciona colaboración en las comunicaciones en un evento benéfico o desfile, no se puede recibir compensación económica. Esta normativa permite que los radioaficionados exploren, perfeccionen y se capaciten sin restricciones.

1.1.2 Los comienzos de la radioafición

La radioafición tiene su origen en los primeros momentos de las comunicaciones radiales. Poco tiempo después de que las comunicaciones de Marconi atravesaran el océano Atlántico en 1901, individuos curiosos comenzaron a experimentar con la "telegrafía inalámbrica". La radioafición, de manera casi espontánea, surgió paralelamente a la radiodifusión y la telegrafía sin cables. Las primeras autorizaciones para radioaficionados se concedieron en 1912, experimentando un crecimiento exponencial. Los sistemas primitivos utilizaban "chispa", literalmente un intenso arco eléctrico ruidoso, para generar ondas radioeléctricas. Considerada inestable e ineficiente, la tecnología de chispa fue rápidamente reemplazada por transmisores con tubos de vacío significativamente más eficaces. Hacia finales de los años 20, ya se percibían tanto transmisiones vocales como señales en código Morse a través del espectro radioeléctrico. La radio se transformó en un fenómeno masivo, conectando comunidades e individuos de manera sin precedentes.

Los radioaficionados, especialistas en tecnología radial, desempeñaron funciones fundamentales durante la Segunda Guerra Mundial como operadores y profesionales técnicos. Tras el conflicto bélico, miles de personas se dedicaron profesionalmente a la radio y electrónica, impulsando significativos avances en la industria de las comunicaciones durante los años 50 y 60. La radioafición evolucionó paralelamente a la industria, la comunicación global se convirtió en algo cotidiano. Manteniendo la popularidad del código Morse, las frecuencias se poblaron de

transmisiones vocales y teletipos. Incluso desarrollaron una innovadora modalidad de transmisión visual denominada televisión de escaneo lento (slow-scan TV, por sus siglas en inglés), utilizando equipos de radiocomunicación convencionales.

El primer satélite construido por aficionados, denominado OSCAR-1, fue lanzado en 1961, transmitiendo un mensaje en código Morse durante varias semanas. En la década de 1970, los radioaficionados construyeron una extensa red de repetidoras para facilitar comunicaciones regionales mediante radios móviles y portátiles de baja potencia. Durante los años 80 y 90, los microprocesadores se integraron rápidamente a los sistemas radiales, mejorando el equipamiento e inaugurando una nueva era digital. La radio por paquetes, adaptación de redes informáticas, fue desarrollada por radioaficionados y actualmente se utiliza ampliamente en comunicaciones comerciales y de seguridad pública.

La computadora personal proporcionó a los radioaficionados una herramienta poderosa para el diseño, modelado, automatización de estaciones y gestión de registros, además de permitir redes basadas en sistemas computacionales. Finalmente, con la llegada de internet, los radioaficionados adoptaron esta tecnología tal como lo habían hecho con innovaciones previas. En cada etapa del desarrollo del mundo moderno centrado en comunicaciones, los radioaficionados han contribuido, ya sea profesionalmente o como pasión personal.

1.1.3 La radioafición en costa rica

A lo largo del tiempo, diversos ciudadanos costarricenses han proyectado la imagen de Costa Rica internacionalmente, pero posiblemente ninguno lo logró de manera tan singular como el radioaficionado Amando Céspedes Marín (Figura 1).



Figura 1. Amado Céspedes. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

Amando Céspedes nació en la ciudad de San José el 1° de agosto del año 1881. Inmediatamente después de su llegada al mundo, su núcleo familiar se desplazó hacia Puerto Limón, localidad donde el joven adquirió con remarcable celeridad el dominio del idioma inglés, gracias a los foráneos que arribaban constantemente al puerto marítimo. Aprovechando su singular competencia lingüística anglosajona, infrecuente en aquella época, el señor Céspedes generaba ingresos complementarios durante su tiempo libre impartiendo clases de inglés a los pobladores de la zona, concentrándose principalmente en trabajadores costarricenses, españoles y jamaquinos que transitaban habitualmente por el área portuaria.

El 2 de noviembre del año 1923, fundamentándose en algunos esquemas que localizó en publicaciones periódicas norteamericanas, Don Amando implementó un receptor regenerativo de tubos electrónicos, mediante el cual lograba captar las señales de emisoras como KSD, WGY, WSAI, WTAM, KFKX, KGO y CYB. Su entusiasmo resultó tan intenso que procedió a enviar QSLs (Query Station Location, por sus siglas en inglés) a las estaciones recibidas, y en el transcurso de algunos meses obtuvo su primera confirmación proveniente de una emisora mexicana. Progresivamente fueron perfeccionándose sus innovaciones tecnológicas y sus dispositivos receptores, motivando que otros compatriotas comenzaran a manifestar interés por este tipo de comunicaciones. Era frecuente que diversos individuos solicitaran a Don Amando la construcción de un radioreceptor, y tras varios años, más de 800 receptores "Amando Céspedes Marín" fueron comercializados.

En mayo de 1923, el interés por la recepción radiofónica se atenuó, cediendo terreno al deseo de emitir señales. Durante ese mes, el señor Céspedes logró fabricar un par de emisores de onda media, inspirándose en un artículo publicado en el Miami Herald sobre la construcción de una estación similar a la del reconocido físico estadounidense Thomas Alva Edison. Mediante estos dispositivos, estableció comunicación con un colega a aproximadamente 3 kilómetros de distancia. Poco tiempo después, don Amando provocó una broma a algunos conocidos locales, haciéndoles creer que estaban recibiendo una emisión proveniente de Estados Unidos (¿quizás la primera interferencia premeditada en territorio costarricense?). En enero de 1927 surgió la estación TI4NRH con un transmisor en AM, con una potencia de cinco (5) watts. El equipo no proporcionó resultados satisfactorios, por lo que don Amando optó por migrar a onda corta con la esperanza de ampliar su alcance.

La estación NRH (Nueva Radio de Heredia) logró su primera recepción internacional el 4 de mayo de 1928 en 39 metros. El transmisor, compuesto por 6 tubos, generaba una potencia de 7.5 watts, utilizando una antena rudimentaria montada sobre segmentos de bambú. De manera similar a Alexander Graham Bell, don Amando transmitió su mensaje inaugural no a un asistente de laboratorio, sino a su cónyuge, quien lo escuchó interrogándole sobre la producción de huevos de las gallinas, a una distancia aproximada de 10 metros.

En breve plazo, llegó una carta desde Gatún (Panamá), donde Henry P. Karr, un ciudadano estadounidense residente en la zona del canal, confirmó haber captado la transmisión de don Amando. Semanas posteriores se recibió un informe desde Guayaquil (Ecuador), seguido de confirmaciones provenientes del Caribe y diversas regiones de América Central y del Sur. En la edición de octubre de 1928 de Radio News, Charles Schroeder mencionó haber percibido una emisión costarricense sin lograr identificarla. Para ese momento, TI4NRH había modificado su frecuencia de 39 a 30 metros. Emisoras de todo Estados Unidos comenzaron a rastrear la célebre NRH, y don Amando recibió una avalancha de informes de señal. Schroeder finalmente identificó la estación y le remitió su QSL correspondiente. Tan agradecido quedó don Amando que le devolvió una silla fabricada con maderas autóctonas, acompañada de instrucciones de ensamblaje.

No podría omitirse, naturalmente, la crónica de los profesionales norteamericanos de ingeniería que inspeccionaron la emisora de don Amando. Para el año 1928, TI4NRH representaba la quinta estación de onda corta existente globalmente. Las cuatro estaciones precedentes operaban con potencias comprendidas entre 30000 y 50000 watts, y resultaba increíble para los especialistas que una instalación de apenas 7.5 watts pudiera alcanzar distancias tan considerables. La Corporación Westinghouse decidió satisfacer su curiosidad científica, y comisionó a dos ingenieros de la estación KDKA para corroborar la potencia de TI4NRH. Cuál no sería su asombro cuando en Pennsylvania KDKA recibió una comunicación radial de TI4NRH, donde ambos profesionales reportaron no 7.5, sino 5 watts de potencia: don Amando había sobreestimado su capacidad al no considerar ciertos aspectos relacionados con la generación eléctrica. TI4NRH transmitía con 5 watts de potencia, y una tensión en placas de 500 voltios. El ingeniero de KDKA, Mr. Evans, denominó a TI4NRH como el hermano menor de KDKA, y don Amando correspondió el gesto llamando a KDKA el hermano mayor de su emisora.

Conforme transcurrieron los años, las QSLs se incrementaron exponencialmente, hasta alcanzar miles de confirmaciones diarias. Aprovechando sus conocimientos en imprenta, don Amando diseñó artesanalmente las QSLs de su estación, y para 1939 había remitido más de 110000 reportes. Desde 1929 el Gobierno de la República declaró las transmisiones de TI4NRH como un servicio diplomático, exentándolo de gastos postales.

El 3 de julio de 1933, durante una visita a Caracas, el Radio Club Venezolano proclamó a don Amando Céspedes como miembro honorario de su institución.

La reputación de TI4NRH se expandió de manera tan significativa que comenzaron a recibirse solicitudes de emisoras internacionales interesadas en incrementar la potencia de la estación para lograr una recepción más nítida. El señor Amando inició una campaña de solicitud de colaboración entre sus colegas radioescuchas para ampliar la capacidad, y en 1938 consiguió implementar un transmisor de 500 watts. El decenio de TI4NRH fue conmemorado globalmente,

y los radioaficionados estadounidenses obsequiaron a don Amando un presente extraordinario: una estructura metálica elevada para la estación. La torre fue eximida de gravámenes por el mandatario Cortés, y su inauguración fue celebrada mediante un discurso presidencial acompañado de interpretaciones de la Banda Militar.

Sus contribuciones fueron reconocidas internacionalmente al ser propuesto para el Premio Nobel de la Paz en 1970. El 17 de marzo de 1976, don Amando emprendió un viaje costero para presenciar un evento astronómico, contrajo una infección respiratoria y falleció tres días después en su residencia en Heredia.

Tras el fallecimiento de don Amando, la práctica de radioaficionado se consolidó en Costa Rica, provocando la emergencia de numerosos entusiastas que durante el siglo XX posicionaron al país entre los más destacados en esta disciplina.

El anhelo de conocimiento sobre tecnologías emergentes (electrónica y radiocomunicación) permitió que los entusiastas de estas disciplinas las estudiaran inicialmente de manera autodidacta, siguiendo el ejemplo de don Amando Céspedes Marín (Benemérito de la Patria) y sus sucesores, quienes permanecieron en el anonimato. Otro elemento que contribuyó a la proliferación de autodidactas fue la carencia de instituciones educativas especializadas. Algunos aprovecharon programas formativos a distancia ofrecidos por centros educativos extranjeros especializados en instrucción por correspondencia. Su aporte generó múltiples beneficios y prestigio para el país.

Dentro de los personajes históricos de la radioafición, se encuentra don Carlos Manuel Reyes, quien concluye su trayectoria vital de manera ejemplar, residiendo en un establecimiento geriátrico, donde era profundamente apreciado por todos; su deceso acontece el 4 de mayo del año 2000, en la ciudad de Alajuela, siendo particularmente lamentable que en su ceremonia fúnebre la ausencia más significativa fuera su descendiente directa: la televisión costarricense.

En esta misma década, emergió Don Virgilio Lizano Saborío (TI2VL), quien estableció dos emisoras radiales. La primera la denominó Radio Liberación, inicialmente en la frecuencia de 1200 kHz, pero posteriormente le asignaron la frecuencia 1125 kHz. Permaneció transmitiendo durante dos años hasta que la transfirió al propietario del reconocido establecimiento El Pipiolo, ubicado en Plaza Víquez. La subsiguiente radioemisora recibió el nombre de Radio Victoria, misma que fue enajenada en el año 1953 a Emiliano Piedra. Resulta pertinente señalar que don Virgilio fabricaba los transformadores, dispositivos y centrales generadoras, tanto para radioafición como para estaciones radiodifusoras que posteriormente comercializaba, entre las cuales se encuentra la estación que negoció con la familia Sotela. Adicionalmente, le transfirió otra estación, diseñada y construida por él mismo, a don Rafael Machado de Alajuela.

El 22 de julio de 1991, en la publicación oficial de la gaceta número 138, el señor Expresidente Rafael Ángel Calderón Fournier expuso detalladamente los fundamentos que motivaron la suscripción del decreto, mediante el cual se estableció el 1° de diciembre de cada año como el "Día del Radioaficionado Costarricense".

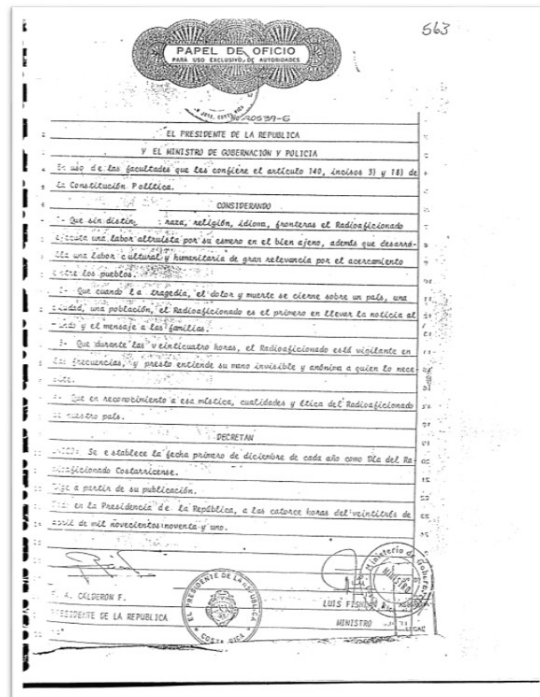


Figura 2. Oficio N°20539-G. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)



Figura 3. La Gaceta N° 138. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

En 1996, la Editorial Tecnológica de Costa Rica publicó el Manual básico para radioaficionados, cuyo autor fue el radioaficionado Ing. Manuel Enrique Murillo Rivas "QdeDG" (TI2MMR). Su fallecimiento prematuro resultó lamentable, dado que el manual nunca fue actualizado y la radioafición perdió a un escritor valioso. Resulta limitada la información sobre Manuel Enrique, ya que su muerte lo sorprendió en plena juventud, no obstante, se reconoce que su obra contribuyó significativamente al desarrollo de la radioafición nacional.

Existen múltiples aspectos adicionales sobre la historia de los radioaficionados en Costa Rica y los relevantes aportes que impulsaron dicha actividad, no obstante, algunos prefieren

mantenerse discretos y numerosos documentos permanecen resguardados en archivos familiares de personas fallecidas. Se espera que eventualmente estos registros sean revelados.

Los radioaficionados costarricenses históricamente han sido considerados un componente fundamental de la sociedad, cuya actividad fue declarada de interés nacional por el Poder Ejecutivo décadas atrás. El Radio Club de Costa Rica, representante mundial de los radioaficionados ticos, fue reconocido como "Institución de Utilidad Pública" para los intereses estatales.

En el año 2008, mediante la Ley N°8660 Ley de Fortalecimiento y Modernización de las Entidades Públicas del Sector Telecomunicaciones, publicada en el Alcance N°31 al diario oficial La Gaceta del 13 de agosto de 2008, se establecieron las competencias y atribuciones correspondientes al ministerio rector del Sector, el Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT). Adicionalmente, se constituyó la Superintendencia de Telecomunicaciones (SUTEL), organismo encargado de regular, aplicar, vigilar y controlar el marco jurídico de las telecomunicaciones.

Basándose en la información precedente, en la actualidad se identifican dos organismos que, de manera conjunta, se encargan de regular las telecomunicaciones en el territorio nacional, abarcando el servicio de los radioaficionados y sectores conexos, los cuales son:

- Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), representante el Poder Ejecutivo.
- Superintendencia de Telecomunicaciones (SUTEL), ente regulador.

1.1.4 La radioafición hoy

Las comunicaciones inalámbricas continúan a la vanguardia tecnológica. Lejos de ser desplazada por internet, la radioafición persiste innovando mediante la integración de radio e internet bajo modalidades emergentes. Los radioaficionados han desarrollado redes de transmisión inalámbrica, mecanismos de geolocalización y hasta un sistema de correo electrónico radiofónico que posibilita que incluso el *radioaficionado* más aislado pueda "*iniciar sesión*" desde cualquier punto geográfico mundial. La comunicación vocal puede transitar entre internet y radio, estableciendo conexiones entre radioaficionados ubicados en extremos planetarios utilizando transmisores portátiles con menor potencia que un dispositivo de iluminación manual.

El código Morse permanece vigente en la radioafición, donde su elegante simplicidad y extraordinaria eficiencia mantienen su atractivo. Los radioaficionados también establecen comunicaciones directas mediante equipos radiofónicos sofisticados, versiones tecnológicamente avanzadas de las CB o FRS. Los sistemas computacionales representan actualmente un componente fundamental de la radioafición: los operadores intercambian mensajes "teclado a teclado" o transmiten representaciones visuales mediante ondas radiales. ¡Incluso existen profesionales que implementan estaciones televisivas capaces de emitir contenido audiovisual con calidad profesional!

En perfecta sincronización con el sector de telecomunicaciones, los radioaficionados expanden su mirada hacia el cosmos: los satélites de radioafición orbital permiten comunicaciones vocales, transmisiones en código Morse y transferencia de datos. La Estación Espacial Internacional cuenta con una estación de radioaficionado utilizada por astronautas (mayoritariamente con licencia) y radioaficionados terrestres. Mediante aplicaciones computacionales especializadas, resulta factible redirigir señales hacia la Luna e incluso aprovechar rastros meteóricos en la atmósfera terrestre.

Ante situaciones de emergencia, los radioaficionados responden con celeridad y precisión, brindando soporte a organismos de seguridad y entidades como Cruz Roja. La radioafición constituye un elemento crítico en múltiples operaciones de auxilio y gestión de contingencias. Adicionalmente, participan masivamente en desfiles, competencias deportivas, festivales y diversos eventos de carácter público.

Aunque la radioafición surgió como un colectivo de entusiastas reunidos en sótanos y cobertizos - origen del término "radio shack" - actualmente representa un servicio de comunicaciones global con millones de personas licenciadas. Los curiosos continúan innovando, generando novedosas formas de aplicación radial. Descubrirás que la radioafición posee más dimensiones de las que inicialmente podrías imaginar.

1.1.5 ¿Quién puede ser radioaficionado?

Cualquier persona puede convertirse en radioaficionado. La edad y el conocimiento previo sobre radiocomunicaciones no representan una limitación para iniciarse. Una de las características más atractivas de esta actividad radica en el trato igualitario entre participantes, independientemente de su condición social o profesional. Sea un escolar, un ejecutivo corporativo, un explorador espacial o un transportista, todos comparten un mismo nivel de interacción. Adicionalmente, miles de personas con capacidades diferentes encuentran en la radioafición una extraordinaria ventana de conexión global.

Existen radioaficionados de todas las edades, desde menores de edad y personas que poseen edades cercanas a los cien (100) años. Aunque algunos provienen de formaciones técnicas, científicas o ingenieriles, las ondas hertzianas congregan profesionales de múltiples disciplinas. Uno de los desafíos más estimulantes de las actividades de los radioaficionados consiste en operar en configuraciones móviles o portátiles, transmitiendo desde demarcaciones territoriales poco frecuentes o localizaciones singulares. En bandas de Frecuencias muy altas (VHF, por sus siglas en inglés) y Frecuencias ultra altas (UHF, por sus siglas en inglés), la técnica denominada "*hilltopping*" representa una modalidad popular para extender el alcance de las comunicaciones. Los especialistas en microondas buscan establecer contactos de considerable distancia desde elevaciones geográficas que ofrezcan trayectorias troposféricas regulares sobre extensiones de decenas o centenares de kilómetros.

1.1.6 ¿Qué hacen los radioaficionados?

Los radioaficionados desarrollan una gran cantidad de actividades distintas. La percepción generalizada de un radioaficionado es la de un individuo con auriculares sentado frente a un conjunto de equipos radioeléctricos resplandecientes, captando voces entrecortadas de diversas partes del planeta, y sí, efectivamente esa práctica es parte de su labor, sin embargo, no es la única, ya que existe una gama mucho más amplia de actividades.

- **Hablar**

Los radioaficionados se comunican verbalmente con mayor frecuencia que mediante cualquier otro método de interacción. Fundamentalmente, este comportamiento responde a la naturaleza comunicativa inherente a los seres humanos. Por tal motivo, la mayoría de los dispositivos de radioafición están configurados para facilitar la comunicación vocal. Las estaciones repetidoras permiten a los aficionados establecer contacto a grandes distancias utilizando equipos de baja potencia, alcanzando coberturas superiores a 80 kilómetros. Adicionalmente, logran rebotar señales en las capas superiores atmosféricas, consiguiendo comunicaciones intercontinentales. Incluso existe la posibilidad de transmisión computarizada entre diferentes sistemas, ya sea en el mismo territorio o en continentes distintos.

- **Digitalizar**

Los aficionados también emplean códigos digitales para intercambiar información. Mediante la conexión de un sistema informático a un equipo de radio, es posible transmitir datos digitales por el espectro radioeléctrico. Este constituye uno de los aspectos más innovadores de la radioafición contemporánea. Una modalidad particularmente popular consiste en la comunicación interactiva similar al envío de mensajes de texto desde dispositivos móviles. Los radioaficionados se encuentran constantemente explorando y desarrollando técnicas emergentes de contacto, utilizando técnicas de modulación y codificación de vanguardia. No solamente transmiten información digital, sino que además innovan continuamente en los métodos para realizarlo.

- **Transmitir**

El procedimiento más ancestral empleado por los radioaficionados es el respetable código Morse, con más de un siglo de vigencia. Distante de ser una reliquia obsoleta, las comunicaciones mediante este sistema resultan sencillas de producir y altamente eficientes. Los entusiastas encuentran fascinante la sonoridad del "código" y han desarrollado múltiples modalidades para generarlo, desde el tradicional dispositivo de "llave recta" hasta versiones electrónicas sofisticadas e incluso mediante interfaces computacionales. El Morse posee su propio sistema lingüístico, tanto en sus tonalidades puras como en la forma en que los practicantes establecen conexión y dialogan.

- **Construir**

A diferencia de numerosos servicios de comunicaciones de radio, en la radioafición se autoriza e impulsa construir y restaurar equipamiento propio, desde dispositivos receptores hasta sistemas de antena y cualquier accesorio concebible. Los practicantes denominan a esta filosofía de "fabricación casera" como **"homebrewing"**, sintiéndose orgullosos de utilizar implementos de fabricación personal. Se observarán entusiastas desarrollando desde amplificadores de elevada potencia hasta diminutos transceptores que se adaptan en pequeños contenedores. Igualmente, han sido responsables de significativos avances en la tecnología de antenas mediante procesos experimentales y verificaciones. Quienes disfrutan comprender los mecanismos internos encontrarán numerosos colegas con perspectivas convergentes en este campo.

- **Observar**

Los radioaficionados han ideado diversas estrategias para intercambiar representaciones visuales. Anteriormente, utilizaban sistemas para transmitir imágenes construidas mediante caracteres textuales. En la actualidad, un entusiasta puede emplear dispositivos videográficos y transmitir representaciones visuales equiparables a producciones televisivas profesionales. Esta modalidad denominada televisión aficionada (ATV, por sus siglas en inglés) incluso cuenta con transmisores instalados en modelos aeronáuticos y globos que ascienden hasta los límites espaciales. Adicionalmente, fueron pioneros en implementar transmisores vocales para enviar registros fotográficos mediante "televisión de barrido lento" (SSTV, por sus siglas en inglés) a considerables distancias.

1.1.7 Comunicaciones de emergencia y servicio público

El mantenimiento de la posición privilegiada de la radioafición en el espectro radioeléctrico se fundamenta en la reconocida capacidad de los aficionados para estructurarse y reaccionar ante situaciones críticas. Debido a su independencia de infraestructuras complejas, las estaciones pueden funcionar incluso cuando las redes públicas colapsan tras desastres naturales como huracanes o terremotos.

Los aficionados se organizan en equipos especializados en responder con celeridad y establecer comunicaciones donde sean requeridas. No solo intervienen en grandes emergencias; también colaboran en eventos como desfiles, competencias deportivas o como observadores meteorológicos.

1.1.7 Clubes y organizaciones de radioaficionados

Tradicionalmente, una de las prácticas más arraigadas en la radioafición ha sido el apoyo a principiantes. Fundamentalmente, todos son "aficionados" que aprenden y se entrenan colectivamente. Prácticamente todos los radioaficionados han sido mentores de algún otro colega en determinado momento. La solidaridad dentro de esta comunidad resulta sorprendentemente generosa.

El sistema de apoyo puede configurarse mediante un compañero, un vecino radioaficionado, una agrupación local o una organización nacional. Todos constituyen recursos valiosos tanto durante la preparación para el examen como después de obtener el indicativo de llamada.

Existen diversas tipologías de clubes de radioaficionados, algunos especializados en aspectos específicos, aunque la mayoría son de carácter generalista, ideales para socializar, formarse y colaborar.

Una vez integrado, se obtendrán beneficios que trascienden la mera asistencia formativa. Se recomienda participar activamente en las actividades de los llamados clubes de radioaficionados, explorar su plataforma digital, concurrir a eventos y reuniones informales, entre otras actividades. Es fundamental presentarse ante los responsables de la agrupación.

1.1.8 ¿Como las ondas sinusoidales, cuadradas, triangulares y de diente de sierra?

Existen numerosas opciones de comunicación radial bidireccional en el mercado comercial: banda ciudadana, FRS/GMRS, radio marítima, entre otras, ¿cuál es el elemento distintivo de la radioafición? En una expresión: diversidad. Cada uno de estos servicios está concebido para propósitos específicos. La radioafición, por el contrario, presenta una extraordinaria versatilidad, con múltiples tipologías de señales y bandas de frecuencia. Como radioaficionado, es posible experimentar con total libertad y adaptar los equipos tecnológicos a cada necesidad de comunicación, eso sí, sin generar interferencias perjudiciales a otros servicios radioeléctricos u otras estaciones del mismo servicio.

1.1.9 Radios personales sin licencia

Los dispositivos FRS/GMRS, por ejemplo, representan la opción más extendida, comercializados prácticamente en cualquier establecimiento. FRS corresponde a "Family Radio Service" y GMRS a "General Mobile Radio Service". Operan mediante 22 canales en un espectro de banda reducida para comunicaciones de proximidad y trayectoria visual directa. (La operación de estos equipos queda sujeta a lo establecido en Plan Nacional de Frecuencias vigente).

La Banda Ciudadana mantiene su vigencia para comunicaciones vehiculares, embarcaciones y entornos agrícolas. Dispone de 40 canales con una cobertura confiable de varios kilómetros. En Costa Rica se debe solicitar una licencia para poder utilizarla, pero dicho proceso no requiere la realización de la prueba teórica.

Los profesionales náuticos utilizan radiocomunicadores VHF marítimos, con hasta 50 canales para interconexión entre embarcaciones o con infraestructuras costeras, igualmente efectivos en ambientes acuáticos dulces o salados, lo cuales, requieren solicitar un permiso de portación de equipos.

Estos sistemas radiales están diseñados para tareas específicas. Los radioaficionados, en contraste, poseen acceso a un espectro significativamente más amplio. Si se experimenta una sensación de limitación con los dispositivos personales, la radioafición constituye la alternativa ideal.

1.1.10 Sistemas de radio para usos no comercial, oficial y de seguridad, socorro y emergencia

Cotidianamente observamos personal de seguridad y emergencias empleando radiocomunicaciones móviles. Múltiples organizaciones corporativas implementan sistemas similares. La reglamentación vigente establece los rangos de frecuencias y las condiciones de uso bajo las que operan estos servicios de radiocomunicación privada, para los cuales se debe optar por un permiso de uso de frecuencias en las bandas asignadas. Estos usuarios del espectro requieren un permiso de uso de frecuencias, para el desarrollo de la red privada que les permitirá el intercambio de comunicaciones en atención a la naturaleza de sus labores.

Los equipos que utilizan resultan prácticamente idénticos a los empleados por radioaficionados. Numerosos entusiastas reconvierten equipamiento comercial excedente para uso aficionado. No

obstante, a diferencia de los servicios públicos, los aficionados pueden gestionar cientos de canales con funcionalidades sustancialmente más diversas.

1.2 Actividades de los radioaficionados

La radioafición brinda numerosas posibilidades, aunque tal diversidad de actividades puede generar perplejidad. Con el propósito de facilitar la comprensión sobre las motivaciones de ciertos procedimientos operativos o la estructura de las normativas, esta sección presenta conceptos elementales de la radioafición. Posteriormente se profundizarán detalles específicos, pero esta introducción abarca algunos fundamentos presentes en prácticamente todas las comunicaciones por radioafición.

1.2.1 Identificación y contactos

En el espectro radioeléctrico, la identidad personal experimenta una transformación: surge un **indicativo de llamada**, y la personalidad radial se transforma en "Juan TI2ABC" o "Maria TI5MVZ". Los radioaficionados se reconocen mediante su indicativo de llamada, frecuentemente mantenido de manera vitalicia. El indicativo resulta absolutamente exclusivo entre todos los usuarios radioeléctricos mundiales. Por ejemplo, únicamente existe un TI8PAV (Pedro en Costa Rica), ya que el prefijo de cada país también es único. Al transmitir el indicativo, otros radioaficionados identifican al emisor y su nacionalidad. Registrarse con el propio indicativo se denomina firmar. Dado que la interacción es fundamentalmente auditiva, salvo en transmisiones videográficas, el indicativo adquiere una relevancia crucial. De hecho, existe la obligación de transmitir el indicativo periódicamente durante cada contacto para garantizar la identificación del emisor.

Respecto a los contactos, cualquier diálogo entre radioaficionados en el aire se conceptualiza como contacto, y el inicio de una conversación se denomina establecer contacto. Intentar iniciar comunicación transmitiendo el indicativo constituye realizar una llamada. Si se efectúa una convocatoria general tipo "¿hay alguien disponible?", a la cual cualquier estación puede responder, se denomina llamar CQ ("CQ" significa "llamada general").

Una vez concretado el contacto, el siguiente procedimiento implica intercambiar información complementaria, como un **informe de señal**, para que la estación receptora evalúe la calidad de recepción. Posteriormente se intercambian datos personales como nombre y ubicación y desde ese momento se puede desarrollar la conversación deseada. Un diálogo extenso se conoce como **charla informal** (**ragchew** por sus siglas en inglés). Al concluir el contacto, se finaliza la comunicación con una **despedida** (**sign off**, por sus siglas en inglés).

1.2.2 Jerga del aficionado

Al igual que otras disciplinas con trayectoria histórica, como la navegación o la aeronáutica, la radioafición cuenta con una terminología especializada propia. Numerosas convenciones lingüísticas tienen su origen en la era del telégrafo. Durante ese período, cada vocablo representaba un recurso temporal valioso, por lo que los operadores desarrollaron un amplio conjunto de abreviaturas y caracteres especiales (denominados **prosigns**, por sus siglas en inglés) que permitían una transmisión de información ágil y expedita. A modo de ilustración, probablemente se haya escuchado las expresiones "break" o "breaker" en comunicaciones radiales. Originalmente estas hacían referencia a un operador telegráfico que interrumpía la línea para prevenir la transmisión de caracteres, captando la atención de otros operadores. Esta acción, conocida como **breaking in** (por sus siglas en inglés), continúa vigente en la actualidad.

Posteriormente, cuando la radio se transformó en una herramienta de comunicación global, los operadores que no compartían un idioma común emplearon **códigos Q**. Por ejemplo, "¿QTH?" significa "¿Cuál es tu ubicación?" y "QTH Puntarenas" indica "Estoy en Puntarenas". Muchos de estos procedimientos y abreviaturas permanecen en uso contemporáneo debido a su eficacia.

1.2.3 Usando la voz

El método más preponderante para establecer contactos es mediante la voz. Existen diversas modalidades de transmitir la voz utilizando señales radioeléctricas, las cuales serán explicadas más adelante. Resulta sencillo y natural conversar siguiendo los protocolos adecuados. La comunicación vocal es ampliamente utilizada por radioaficionados tanto para enlaces de proximidad como de gran distancia. Representa el modo predominante para radioaficionados en desplazamiento y durante servicios de emergencia o asistencia pública.

Con la licencia de **Novicio**, será posible realizar comunicaciones vocales directas con otros radioaficionados, así como a través de estaciones repetidoras que retransmiten señales provenientes de transmisores móviles o portátiles de baja potencia en una zona extensa. Adicionalmente, existen sistemas de repetición interconectados mediante internet que transmiten voces digitalizadas globalmente, permitiendo a los usuarios comunicarse internacionalmente utilizando únicamente un equipo portátil de reducida potencia.

Los radioaficionados generalmente emplean el inglés como lenguaje común para contactos internacionales, mientras que al interior de cada nación suelen utilizar su lengua nativa. Los intercambios vocales también representan una excelente oportunidad para practicar o perfeccionar habilidades en idiomas extranjeros.

INTERCAMBIO DE DATOS DIGITALES

El equipamiento económico de interfaces sonoras y los programas de procesamiento de señales para computadoras personales han provocado un significativo interés en las **modalidades digitales**, donde las comunicaciones se transmiten mediante secuencias de caracteres. Se emplea una **interfaz de datos** para establecer la conexión entre el equipo de radio y el dispositivo computacional. La mayoría de los contactos digitales son de tipo **teclado a teclado**, donde los operadores intercambian mensajes por turnos, similar a la mensajería de texto.

Los radioaficionados han estado en la vanguardia desarrollando innovadores métodos para transformar caracteres computacionales en señales radioeléctricas y viceversa. Estos métodos se denominan **protocolos**, identificados por sus siglas, como RTTY, PSK31 o FT8. Se implementan diversos protocolos para lograr comunicaciones más eficientes.

Uno de los sistemas de radiocomunicación digital desarrollados por aficionados permite el intercambio de correos electrónicos a través de radioafición, denominado **Winlink**, el cual presenta una notable similitud con el correo electrónico tradicional. Es utilizado cotidianamente por miles de aficionados que carecen de acceso a Internet durante viajes, navegación marítima o campamentos en zonas remotas. Adicionalmente, se emplea en comunicaciones de respuesta ante situaciones de emergencia y desastres.

USANDO CÓDIGO MORSE

El código Morse o "CW" continúa siendo ampliamente popular en la radioafición. Dado que toda la energía de la señal se concentra en una única señal de activación y desactivación, el Morse funciona eficazmente incluso con interferencias o señales de baja intensidad. Las señales Morse pueden generarse con transmisores extremadamente simples: únicamente se requiere un dispositivo que produzca una señal radioeléctrica y otro que la active y desactive, permitiendo expresar los diferentes caracteres con combinaciones de puntos y rayas tal y como se observa en la Figura 4.

A	• —	1	• — — — —	PUNTO	• — • — • —
B	— • •	2	• • — — —	COMA	— — • • — —
C	— • — •	3	• • • — —	?	• • — — • •
D	— • •	4	• • • • —	ERROR	• • • • •
E	•	5	• • • • •	DIAGONAL	— • • — •
F	• • — •	6	— • • • •	@	• — • — • •
G	— — •	7	— — • • •		
H	• • • •	8	— — — • •		
I	• •	9	— — — — •		
J	• — — — —	0	— — — — —		
K	— • —				
L	• — • •				
M	— —				
N	— •	<u>AR</u>	• — • — • (Fin del mensaje)		
O	— — —	<u>SK</u>	• • • — • (Fin de la transmisión)		
P	• — — •	<u>AS</u>	• — • • • (Pausa)		
Q	— — • —				
R	• — •				
S	• • •				
T	—				
U	• • —				
V	• • • —				
W	• — —				
X	— • • —				
Y	— • — —				
Z	— — • •				

Figura 4. Código Morse. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

Recibir y decodificar Morse (denominado **copiar el código**) solo demanda un receptor básico y percepción auditiva humana. Numerosos operadores disfrutaban del ritmo y la musicalidad del código. Representa una habilidad similar a tocar un instrumento musical que puede apreciarse intrínsecamente.

EMERGENCIAS Y SERVICIO PÚBLICO

La radioafición resulta sumamente valiosa debido a la capacidad de sus practicantes para brindar asistencia. La comunicación constituye un elemento fundamental para el éxito de cualquier iniciativa organizada, sea esta un evento conmemorativo o una respuesta coordinada ante una contingencia de origen natural. Mientras los sistemas convencionales de telecomunicaciones se restablecen, los aficionados implementan con rapidez redes provisionales destinadas a respaldar las operaciones de seguridad pública y gubernamentales. ¿Cuál es el fundamento de esta efectividad? La existencia de numerosos radioaficionados especializados en técnicas básicas que no dependen de infraestructuras de telecomunicaciones tradicionales.

Los radioaficionados pueden contribuir mediante diversas modalidades. No es indispensable estar presente físicamente para generar un aporte significativo. Independientemente de las capacidades personales y la categoría de licencia, siempre existirá una necesidad susceptible de ser cubierta:

- **Desde casa** — Utilización de equipos radioeléctricos y antenas base para proporcionar comunicaciones de largo alcance, retransmitir mensajes y ejercer como centro de control de red.
- **Desde un vehículo** — Mediante unidades móviles personales o especializadas, las estaciones portátiles facilitan funciones de retransmisión y coordinación en terreno.
- **A pie** — Desplazamiento directo hacia el escenario de los acontecimientos para suministrar informes de situación y comunicaciones operativas entre centros de control y personal de campo.

La **retransmisión de comunicaciones** representa una de las funciones más relevantes, mencionada previamente. Se trata de una labor altamente valorada que demanda precisión y eficiencia, aspectos de los cuales los aficionados se enorgullecen profundamente.

CUANDO SE OBTENGA UNA LICENCIA Y UN PERMISO DE USO DE FRECUENCIAS

Una vez que recibas tu licencia y permiso para el uso del espectro radioeléctrico, ¡es posible iniciar las transmisiones! Sin embargo, ¿cuáles son los primeros pasos por seguir? A continuación, algunas recomendaciones:

- **Sintoniza y escucha:** Observe detenidamente cómo otros operadores realizan contactos. Analice con atención el protocolo, las expresiones empleadas y los métodos de identificación.
- **Haz tu primer contacto:** Procure responder a una convocatoria de otro radioaficionado o emita su propia llamada CQ.
- **Únete a un club:** Numerosas agrupaciones locales proporcionan orientación a principiantes, desarrollan actividades colectivas y facilitan el acceso a estaciones base y sistemas de antenas.
- **Explora modos y bandas:** Experimente con diferentes modalidades de comunicación (voz, digital, Morse) y frecuencias autorizadas según su categoría de licencia.
- **Participa en redes:** Las redes constituyen encuentros periódicos en frecuencias específicas donde los radioaficionados se registran para perfeccionar destrezas e intercambiar información.

1.3 El código del radioaficionado

El ejercicio de la radioafición conlleva una responsabilidad social inherente, por lo cual, su proceder debe ajustarse a principios elementales de conducta que garanticen el aprovechamiento óptimo de los recursos limitados proporcionados mediante la habilitación correspondiente. En consecuencia, todo radioaficionado y afín deberá adherirse al siguiente código de comportamiento.

El radioaficionado y afín es:

- **CONSIDERADO...** Jamás opera deliberadamente de un modo que disminuya el disfrute de otros participantes.
- **LEAL...** Proporciona fidelidad, motivación y respaldo a otros aficionados, agrupaciones locales, la Sociedad Miembro de IARU en su territorio nacional, mediante la cual es representado en los ámbitos nacional e internacional.
- **PROGRESISTA...** Mantiene actualizada su estación. Esta se encuentra construida con eficiencia. Su práctica operativa resulta intachable.
- **AMIGABLE...** Opera con moderación y paciencia cuando se le solicita; brinda consejos frateros y orientación al novel practicante; ofrece asistencia cordial, colaboración y consideración hacia los demás. Tales son las características que definen el espíritu del radioaficionado.
- **EQUILIBRADO...** La radioafición constituye un pasatiempo que nunca interfiere con las responsabilidades familiares, profesionales, académicas o comunitarias.
- **PATRIOTICO...** Su estación y habilidades permanecen siempre dispuestas para servir a la patria y a la comunidad.

1.4 Regulación del servicio de radioaficionados y afines en Costa Rica

En Costa Rica existe una serie de leyes y reglamentos que son de acatamiento obligatorio, por lo que se requieren que sean de conocimiento por parte de todos los radioaficionados y personas que aspiren a serlo, los cuales serán detallados en la presente sección. La legislación que se requiere que sea de conocimiento obligatorio por parte de los radioaficionados es la siguiente:

- Ley General de Telecomunicaciones, Ley N°8642 (LGT).
- Reglamento a la Ley General de Telecomunicaciones (Decreto N°34765-MINAET, publicado en La Gaceta N°186 del 26 de setiembre de 2008) y sus reformas (RLGT).

- Reglamento General para la Regulación de los Trámites del Servicio de Radioaficionados y Afines (Decreto N°40639-MICITT, publicado en el diario La Gaceta según Alcance N°246 del 13 de octubre de 2017) y sus reformas (RGRR).
- Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, Decreto Ejecutivo N°44010-MICITT, publicado en el Alcance N°99 del Diario Oficial La Gaceta N°95 del 30 de mayo del 2023, y sus eventuales reformas (PNAF).

Basados en lo establecido en el RGRR, en Costa Rica existen dos requerimientos para poder operar en las bandas aficionadas y afines, las cuales se detallan a continuación:

- Obtener una licencia para el servicio de radioaficionados (en cualquiera de sus categorías) y/o para la operación de la banda ciudadana. Las categorías de la licencia de radioaficionado pueden ser: Novicio (Clase C), Intermedio (Clase B) y Superior (Clase A). Las bandas de frecuencias y las condiciones técnicas en las que puede operar cada categoría se pueden encontrar en el PNAF, siendo el operador de banda ciudadana y la categoría Novicio las que cuentan con mayores restricciones y la categoría Superior la que cuenta con acceso a todos los recursos disponibles para los radioaficionados.
- Obtener un permiso de uso del espectro radioeléctrico para el servicio de radioaficionado y/o la operación de la banda ciudadana (título habilitante). Estos permisos habilitan el uso del espectro según la categoría de la licencia emitida, basado en lo que se establece en el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, Decreto Ejecutivo N°44010-MICITT, publicado en el Alcance N°99 del Diario Oficial La Gaceta N°95 del 30 de mayo del 2023, y sus eventuales reformas (PNAF), descrito más adelante.

Es importante aclarar que, la licencia es un documento vitalicio de identificación que se le otorga al operador de banda ciudadana y/o a un radioaficionado, que ha aprobado el examen correspondiente de su categoría, indicando su condición y la categoría a la que pertenece en el caso de los radioaficionados, para su identificación y reconocimiento nacional e internacional.

Cabe destacar que, la licencia para el servicio de radioaficionado y afines NO corresponde a un título habilitante para hacer uso de las bandas del espectro radioeléctrico, es decir, para poder operar en las bandas respectivas, además de la licencia, deberán contar con el permiso de uso de frecuencias, establecido en la reglamentación vigente.

Un radioaficionado que posee una licencia, pero no un permiso vigente, no podrá operar frecuencias en el país. Cabe mencionar que, siempre que se recomienda el otorgamiento de un permiso por parte de SUTEL, se verifica la existencia de la licencia respectiva o en su defecto se recomienda la emisión de esta en paralelo con el permiso.

Seguidamente se describe la reglamentación aplicable para cada uno de los requerimientos mencionados:

1.4.1 Legislación vigente para la obtención de una licencia en el servicio de radioaficionados en Costa Rica.

La legislación vigente para obtener una licencia de radioaficionado, en cualquiera de sus categorías, es la indicada en el “*Título Segundo: Licencias*” del Reglamento General para la Regulación de los Trámites del Servicio de Radioaficionados (RGRR), el cual establece, entre otras cosas, el procedimiento a seguir por cada interesado.

Para mayor claridad y entendimiento, se recomienda consultar el documento completo del RGRR indicado, el cual está disponible en el sitio WEB: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=85038&nValor3=109851&strTipM=TC

1.4.2 Legislación vigente para el permiso de uso de espectro radioeléctrico en el servicio de radioaficionados en Costa Rica.

Para los interesados en obtener un permiso de uso de frecuencias en las bandas del servicio de radioaficionados y afines, el cual habilita la utilización del espectro radioeléctrico para fines no comerciales en el país, a los diferentes radioaficionados u operadores de la banda ciudadana, deben seguir el procedimiento establecido en el *“Título Tercero: De los permisos de uso del espectro radioeléctrico para el servicio de radioaficionado y la operación de la banda ciudadana”* del RGRR, así como tomar en cuenta y cumplir con la siguiente reglamentación en materia de telecomunicaciones.

a. Ley General de Telecomunicaciones, Ley N°8642 (LGT)

El espectro radioeléctrico es un bien de dominio público. Su planificación, administración y control se lleva a cabo según lo establecido en la Constitución Política (bien demanial), los tratados internacionales, la Ley General de Telecomunicaciones, el Plan Nacional de Desarrollo de las Telecomunicaciones, el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias y los demás reglamentos que al efecto se emitan. Asimismo, la LGT establece que el espectro radioeléctrico es un recurso escaso y que es deber de la SUTEL la optimización del uso de este recurso y asegurar un mayor beneficio para los usuarios.

Según el marco jurídico que rige las telecomunicaciones en nuestro país, específicamente lo indicado en la LGT (artículos 11, 23 y 26), existen tres tipos de Títulos Habilitantes (potestad de operar y/o prestar servicios de telecomunicaciones en la República de Costa Rica, luego de presentar la correspondiente solicitud, la cual está sujeta al trámite y los procedimientos establecidos en la Ley y sus reglamentos), los cuales se mencionan a continuación:

- **Concesiones:** Para el uso y la explotación de las frecuencias del espectro radioeléctrico que se requieran para la operación y explotación de redes de telecomunicaciones. Dicha concesión habilitará a su titular para la operación y explotación de la red. Cuando se trate de redes públicas de telecomunicaciones, la concesión habilitará a su titular para la prestación de todo tipo de servicio de telecomunicaciones disponibles al público. La concesión se otorgará para un área de cobertura determinada, regional o nacional, de tal manera que se garantice la utilización eficiente del espectro radioeléctrico.
- **Autorizaciones:** Se establecen para personas físicas y jurídicas que:
 - Operen y exploten redes públicas de telecomunicaciones que no requieran uso del espectro radioeléctrico.
 - Presten servicios de telecomunicaciones disponibles al público por medio de redes públicas de telecomunicaciones que no se encuentren bajo su operación o explotación. El titular de la red pública que se utilice para este fin deberá tener la concesión o autorización correspondiente.
 - Operen redes privadas de telecomunicaciones que no requieran uso del espectro radioeléctrico o que se emplee espectro de uso libre según el PNAF.
- **Permisos:** Para el uso de las bandas de frecuencias a que se refieren los incisos b), c) y d) del artículo 9 de la LGT, se requerirá un permiso, el cual será otorgado por el Poder Ejecutivo previa recomendación de la SUTEL y el cumplimiento de los requisitos que se definan reglamentariamente. La vigencia de los permisos será de cinco años, renovable por períodos iguales a solicitud del interesado. Los permisos para fines científicos o experimentales se otorgarán por una sola vez, por un plazo máximo de cinco años. Para los efectos de la LGT, son causales de extinción, caducidad y revocación de los permisos, las señaladas en el artículo 25 de dicha Ley, en lo que sean aplicables.

Para el caso específico que nos ocupa, según lo dispuesto en el artículo 9, inciso b) de la LGT, la utilización de bandas de frecuencias para operar la banda ciudadana o radioaficionados, le corresponde la clasificación como “Uso no comercial”, a través de la figura de título habilitante fundamentada mediante el artículo 26 de la misma Ley (permiso).

En este respecto la LGT, establece un principio básico para el uso del espectro radioeléctrico, al ser este un recurso escaso, el cual implica que su utilización debe regirse por la eficiencia según se extrae: *“Optimización de los recursos escasos: asignación y utilización de los recursos escasos y de las infraestructuras de telecomunicaciones de manera objetiva, oportuna, transparente, no discriminatoria y eficiente, con el doble objetivo de asegurar una competencia efectiva, así como la expansión y mejora de las redes y servicios”*. Por lo que cualquier usuario del espectro debe procurar en sus actividades la optimización de este recurso.

Cabe resaltar que, es deber de cada concesionario y permisionario del espectro, conocer y seguir a cabalidad lo indicado en la legislación vigente en materia de telecomunicaciones en nuestro país, para lo cual, deberá considerar el servicio que está habilitado a utilizar, así como el hecho que el Estado dispone del espectro radioeléctrico para múltiples usos y atribuciones, los cuáles deben de coexistir de manera óptima, sin provocar interferencias perjudiciales y asegurando la eficiencia en la utilización del recurso escaso.

Asimismo, en complemento de la Ley descrita, se referencia la demás legislación vigente aplicable en Costa Rica con respecto al permiso de radioaficionados, en cuanto a requisitos para la obtención de los permisos en cualquiera de sus categorías y en la banda ciudadana, normas operativas, prohibiciones, solicitudes especiales para concursos, bandas de frecuencia, características técnicas de los equipos y demás consideraciones para la correcta operación de las estaciones.

b. Reglamento a la Ley General de Telecomunicaciones (Decreto N° 34765-MINAET, publicado en La Gaceta N°186 del 26 de setiembre de 2008) y sus reformas (RLGT)

El RGLT es el conjunto de disposiciones que desarrolla y detalla la aplicación de la LGT en Costa Rica. Establece los procedimientos, requisitos y lineamientos técnicos y administrativos para la gestión, operación y prestación de servicios de telecomunicaciones en el país. Entre sus contenidos se incluyen normas para el uso y administración del espectro radioeléctrico, homologación de equipos, interconexión de redes, derechos y obligaciones de los operadores, así como disposiciones específicas para determinados servicios, como el de radioaficionados, radiodifusión y comunicaciones por satélite.

El reglamento también regula los aspectos relacionados con licencias, permisos, concesiones y el régimen de sanciones. Define el papel de la SUTEL como ente encargado de aplicar y supervisar el cumplimiento de las normas, así como de promover el uso eficiente y ordenado de los recursos limitados, como el espectro. En esencia, este reglamento funciona como el marco operativo que permite implementar de forma práctica los principios y objetivos establecidos por la LGT, asegurando transparencia, competencia y desarrollo en el sector de telecomunicaciones costarricense.

c. Reglamento General para la Regulación de los Trámites del Servicio de Radioaficionados y Afines (Decreto N°40639-MICITT, publicado en el diario La Gaceta según Alcance N°246 del 13 de octubre de 2017) y sus reformas (RGRR)

El RGRR, además de regular lo concerniente a las licencias indicadas en el presente documento, complementa la regulación para los permisos del servicio de radioaficionado y la operación de la banda ciudadana, estableciendo procedimientos para los diferentes trámites, de acuerdo con lo regulado en los artículos 9 inciso b) y 26 de la LGT.

Adicionalmente, este reglamento establece el procedimiento para:

- Obtención de indicativos especiales.
- Operación desde la Isla del Coco.
- Permisos de uso del espectro radioeléctrico para extranjeros.
- Permiso de uso del espectro radioeléctrico para el servicio de radioaficionado de cortesía.
- Permiso de uso de espectro para las asociaciones de radioaficionados.
- Permiso de instalación de estaciones repetidoras en el servicio de radioaficionados.
- Control de transmisiones por medio del Libro de guardia.

d. Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, Decreto Ejecutivo N°44010-MICITT, publicado en el Alcance N°99 del Diario Oficial La Gaceta N°95 del 30 de mayo del 2023, y sus eventuales reformas (PNAF)

El PNAF, tal y como lo establece en su artículo 1, es un instrumento que permite la regulación nacional de manera óptima, racional, económica y eficiente del espectro radioeléctrico nacional, para satisfacer oportuna y adecuadamente las necesidades de frecuencias, tanto para el desarrollo de las actuales redes de telecomunicaciones, como para responder eficientemente a la demanda de segmentos de frecuencias para las redes que hagan uso dicho espectro; para tal efecto se proveerán la utilización de tecnologías que optimicen su uso. Todo lo anterior, de conformidad al marco legal y reglamentario vigente, así como de los acuerdos y convenios internacionales ratificados por Costa Rica. De acuerdo con la LGT, el PNAF será de acatamiento obligatorio para todos los usuarios del espectro radioeléctrico.

Asimismo, según el artículo 3 del PNAF, es competencia del Poder Ejecutivo ejecutar dicho Plan, evacuar las consultas que sobre éste surjan y realizar la interpretación técnica de sus disposiciones, así como su periódica revisión y actualización. El PNAF deberá ser concordante con el Plan Nacional de Desarrollo de las Telecomunicaciones, la demanda de los nuevos segmentos de frecuencias para redes de telecomunicaciones para la aplicación de nuevas tecnologías, así como los acuerdos internacionales que estén en vigor o sean ratificados por Costa Rica en el futuro, en virtud de las funciones y facultades que le asigna la LGT, la Ley N°8660 y la demás normativa vinculante.

En cuanto a materia específica de los radioaficionados y afines, debe remitirse al APÉNDICE III DEL SERVICIO DE AFICIONADOS y el APÉNDICE IV BANDA CIUDADANA del Plan mencionado, donde el APÉNDICE III indica las frecuencias y condiciones técnicas que pueden ser utilizadas según la categoría de radioaficionado, así como las características técnicas para la operación de repetidoras en este servicio; y el APÉNDICE IV especifica las frecuencias y condiciones de operación de la banda ciudadana.

1.4.3 Del control de radioaficionados-Libro de Guardia

Tal y como se indica en el artículo 30 del RGRR, los radioaficionados deben poseer y tener al día un libro de guardia con hojas numeradas, donde anotarán aquellos comunicados realizados en frecuencias inferiores a 30 MHz, el cual podrá ser físico o electrónico con el formato mostrado en la tabla 1, incluyendo como mínimo los datos ahí indicados.

Tabla 1. Aspectos mínimos solicitados en el libro de guardia. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

Fecha			Estación corresponsal	Hora inicial		Tipo de emisión	Banda de frecuencias	RST	
DD	MM	AAAA		Local	UTC			Señal recibida	Señal transmitida

- Fecha: El día, mes y año en el cual se realiza el comunicado
- Estación corresponsal: La estación de radioaficionado con la cual se hace el comunicado.
- Hora (Inicial): La hora local y UTC del inicio del comunicado.
- Tipo de emisión: El tipo de emisión utilizado en el comunicado (Por ejemplo: CW, SSB, PSK, etc.)
- Banda de frecuencias: Segmento de frecuencias asignado para el servicio de radioaficionados en el cual se está operando.

- RST de la señal recibida y transmitida: El intercambio de reporte de las señales recibidas y dadas en el formato RST.

Las anotaciones en el Libro de Guardia deben ser en letra clara y fácilmente entendible, asimismo cada radioaficionado puede agregar los datos adicionales que estime conveniente a su operación.

Finalmente, cabe señalar que, la distribución mostrada en la tabla anterior es solamente un ejemplo y puede ser modificada por el radioaficionado (agregar parámetros), siempre y cuando contenga los parámetros mínimos solicitados en el RGRR.

1.4.4 Canon de reserva del espectro

De conformidad con el artículo 63 de LGT, los operadores de redes y los proveedores de servicios de telecomunicaciones deberán cancelar, anualmente, un canon de reserva del espectro radioeléctrico. Serán sujetos pasivos de esta tasa los operadores de redes o proveedores de servicios de telecomunicaciones, a los cuales se haya asignado bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico, independientemente de que hagan uso de dichas bandas o no.

El objeto del canon es para la planificación, la administración y el control del uso del espectro radioeléctrico y no para el cumplimiento de los objetivos de la política fiscal. La recaudación de esta contribución no tendrá un destino ajeno a la financiación de las actividades que le corresponde desarrollar a la SUTEL, conforme a los artículos 7 y 8 de la LGT.

El monto por pagar por parte del contribuyente de este canon será determinado por éste mediante una declaración jurada, correspondiente a un período fiscal año calendario. El plazo para presentar la declaración y pago vence dos meses y quince días posteriores al cierre del respectivo periodo fiscal. Es decir, a manera de ejemplo, el pago del canon de espectro correspondiente al periodo 2025 debe realizarse a más tardar el 15 de marzo del 2026.

Los montos por pagar por cada contribuyente pueden ser consultados en el sitio web: <https://consulta-canonespectro.sutel.gub.uy/>, proporcionado por la SUTEL, donde se puede verificar el monto a pagar, los periodos pendientes y el histórico de pagos realizado.

En cumplimiento de estas disposiciones, la SUTEL mediante la resolución establecida para el procedimiento de cálculo del canon de reserva del espectro radioeléctrico, dispone la metodología y condiciones para determinar el aporte de cada concesionario y permisionario vigente por el uso del espectro radioeléctrico.

Capítulo 2 Fundamentos de Radio y Señales

En este capítulo, se profundizará en los mecanismos que permiten el funcionamiento de la radio, iniciando con las propias señales y posteriormente se explorará el equipo fundamental de radio. En los capítulos subsiguientes, se abordarán temas de electrónica, operación y protocolos de seguridad.

Abordar inicialmente los aspectos técnicos facilitará la comprensión de las normativas y procedimientos operativos. El resultado será un radioaficionado más competente y seguro. Se comenzará desde los fundamentos más elementales, avanzando de manera gradual y sistemática.

2.1 Señales y Ondas de Radio

Iniciaremos examinando las transmisiones de señales que circulan entre dispositivos radiofónicos. Cada componente del equipo de comunicación radial está concebido para producir o procesar señales radioeléctricas. Una señal radioeléctrica puede manifestarse como energía eléctrica dentro del aparato de radio o como una onda electromagnética que se desplaza a través del espacio.

El origen de una onda radioeléctrica acontece en una antena, estructura encargada de transformar una señal eléctrica en ondas que se propagan a la velocidad de la luz. Durante su trayectoria, cuando la onda atraviesa proximidades de otras antenas, genera réplicas de la señal eléctrica original.

Posteriormente, un dispositivo receptor decodifica la señal captada, traduciéndola en manifestaciones como comunicación vocal, información digital o incluso transmisiones mediante código Morse.

El procedimiento de conversión de la señal de emisión en ondas radioeléctricas que se irradian mediante la antena se denomina radiación.

El término "radiación" no debe generar inquietud. La radiación proveniente de una antena difiere completamente de la radiación ionizante asociada a fenómenos radioactivos.

2.1.1 Prefijos métricos

Las unidades de medición empleadas en comunicaciones radioeléctricas utilizan el sistema métrico de prefijos. La elección de este sistema obedece a la necesidad de representar un espectro extenso de valores numéricos. La Tabla 2 ilustra los prefijos métricos, sus símbolos correspondientes y significados. Estos prefijos permiten ampliar o reducir las unidades mediante factores específicos consignados en la tabla.

Tabla 2. Sistema Internacional de Unidades.

Prefijo	Símbolo	Factor multiplicativo
Tera	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
Giga	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
Mega	M	$10^6 = 1\,000\,000$
Kilo	k	$10^3 = 1\,000$
Hecto	h	$10^2 = 100$
Deca	da	$10^1 = 10$
Deci	d	$10^{-1} = 0.1$
Centi	c	$10^{-2} = 0.01$
Mili	m	$10^{-3} = 0.001$
Micro	μ	$10^{-6} = 0.000\,001$
Nano	n	$10^{-9} = 0.000\,000\,001$
Pico	p	$10^{-12} = 0.000\,000\,000\,001$

Por ejemplo, un kilómetro (km) representa mil unidades métricas y un milímetro (mm) constituye una fracción de metro equivalente a una milésima parte.

Los prefijos más habituales que se pueden identificar en el ámbito radial son: **pico (p)**, **nano (n)**, **micro (μ)**, **mili (m)**, **centi (c)**, **kilo (k)**, **mega (M)** y **giga (G)**.

Resulta fundamental emplear la escritura con la **capitalización apropiada**. Por ejemplo, M simboliza un millón, mientras que m representa una milésima. Emplear la escritura incorrecta podría provocar desviaciones significativas.

2.1.2 Frecuencia y fase

De manera análoga a una onda de agua, una onda radioeléctrica experimenta una variación constante en su intensidad o amplitud, similar a la representación senoidal ilustrada en la Figura 5. Este cambio continuo se denomina oscilación. Cada secuencia completa de elevación y descenso se identifica como un ciclo.

La cantidad de ciclos por segundo constituye la frecuencia de la señal, simbolizada mediante una f minúscula. El hertzio (hertz), abreviado como Hz, representa la unidad de medición para la frecuencia. El período del ciclo (representado por T mayúscula) corresponde a su duración. La inversa del período, $1/T$, equivale a la frecuencia, f .

Un ciclo por segundo es equivalente a un hertzio, o 1 Hz. Conforme la frecuencia se incrementa, se emplean unidades como:

- kilohertz (1 kHz = 1000 Hz)
- megahertz (1 MHz = 1000 kHz = 1,000,000 Hz)
- gigahertz (1 GHz = 1000 MHz = 1,000,000,000 Hz)

Según se aprecia en la sección inferior de la Figura 5, un armónico constituye una señal cuya frecuencia representa un múltiplo ($\times 2$, $\times 3$, $\times 4$, etc.) de una frecuencia fundamental. El armónico que duplica la frecuencia fundamental recibe el nombre de segundo armónico; el que la triplica, tercer armónico, y así sucesivamente. No existe un "primer armónico".

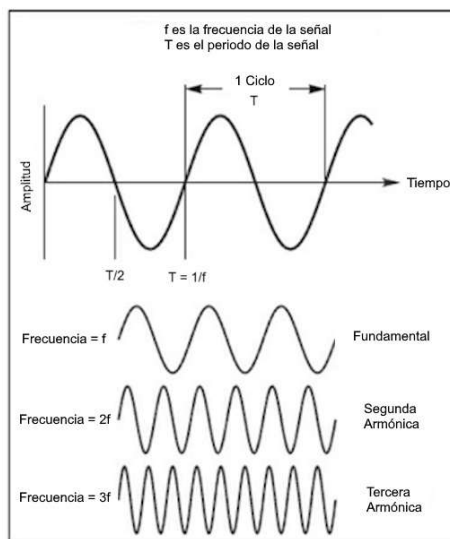


Figura 5. Representación de una onda de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Cada secuencia de la señal presenta una configuración fundamental idéntica: experimenta un ascenso, descenso y reinicia su trayectoria. La ubicación dentro de una secuencia se denomina fase, representada gráficamente en la Figura 6. La fase se emplea para establecer comparaciones sobre la sincronización temporal de las ondas sinusoidales.

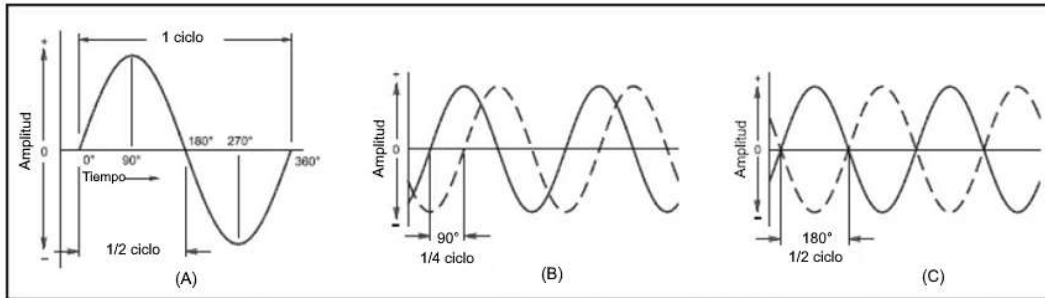


Figura 6. Representación de la fase de una onda de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

La fase se cuantifica mediante grados, existiendo 360 grados en un ciclo completo de una onda sinusoidal. Cuando dos ondas sinusoidales presentan una diferencia de fase de 180 grados, de manera que una experimenta ascenso mientras la otra desciende, se considera que están desfasadas o fuera de fase. Las ondas que carecen de diferencia de fase, ascendiendo y descendiendo simultáneamente, se encuentran en fase.

2.1.3 El espectro radioeléctrico

Al conectarse a un altavoz, las señales con frecuencias inferiores a 20 kHz generan ondas sonoras perceptibles por el ser humano, denominándose por ello señales de frecuencia de audio o AF (audio frequency, por sus siglas en inglés).

Las señales con una frecuencia superior a 20.000 Hz (o 20 kHz) reciben la denominación de señales de radiofrecuencia o RF (radio frecuencia).

El intervalo de frecuencias de las señales radioeléctricas se denomina espectro radioeléctrico.

Su rango se inicia en 20 kHz y se extiende hasta varios cientos de GHz, representando una magnitud un millón de veces superior en frecuencia. Para facilitar su comprensión, el espectro radioeléctrico de la Figura 7 se segmenta en intervalos de frecuencias con características análogas, según se ilustra en la Tabla 3.

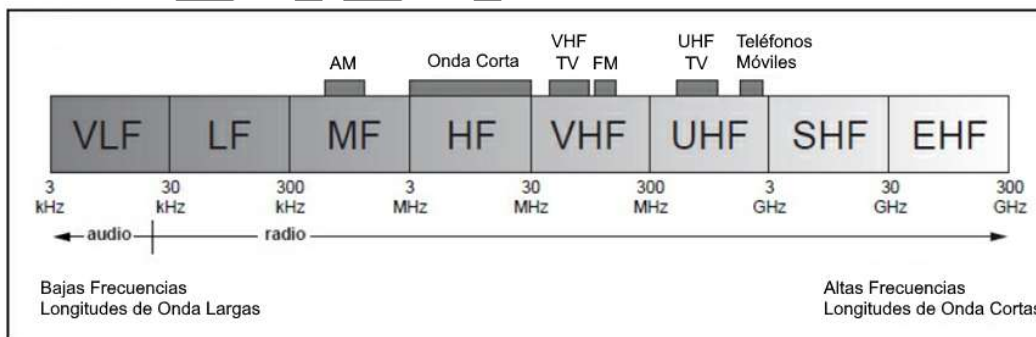


Figura 7. Representación de los rangos de frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Tabla 3. Rangos del espectro RF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Nombre del Rango	Abreviación	Rango de frecuencia
Muy Baja Frecuencia (Very Low Frequency)	VLF	3 kHz - 30 kHz
Baja Frecuencia (Low Frequency)	LF	30 kHz - 300 kHz
Frecuencia Media (Medium Frequency)	MF	300 kHz - 3 MHz
Alta Frecuencia (High Frequency)	HF	3 MHz - 30 MHz

Nombre del Rango	Abreviación	Rango de frecuencia
Muy Alta Frecuencia (Very High Frequency)	VHF	30 MHz - 300 MHz
Ultra Alta Frecuencia (Ultra High Frequency)	UHF	300 MHz - 3 GHz
Super Alta Frecuencia (Super High Frequency)	SHF	3 GHz - 30 GHz
Extremadamente alta frecuencia (Extremely High Frequency)	EHF	30 GHz - 300 GHz

Un intervalo determinado de frecuencias en el cual las señales se emplean para un objetivo común o presentan características equiparables se denomina una banda.

En Costa Rica, la banda de radiodifusión AM se extiende de 525 a 1705 kHz y la banda de radiodifusión FM abarca de 76 a 108 MHz. Las bandas de frecuencia utilizadas por los radioaficionados se denominan bandas de aficionados.

Las frecuencias superiores a 1 GHz se consideran generalmente como microondas. Por ejemplo, los hornos microondas funcionan en 2.4 GHz. Los radioaficionados usan principalmente frecuencias que abarcan desde MF hasta UHF y la región de microondas, aunque también poseen bandas en la región de LF.

La Figura 8 ilustra cómo un receptor convencional de radiodifusión AM "percibe" la banda de radiodifusión AM. Partiendo desde la frecuencia más baja en el extremo izquierdo, si el receptor se sintoniza a frecuencias más elevadas, inicialmente detecta una señal en 570 kHz, la sobrepasa para localizar la siguiente señal, y así progresivamente. El receptor está configurado para recuperar información (la programación de la estación) de una única señal simultáneamente, siempre y cuando posee una frecuencia precisa.

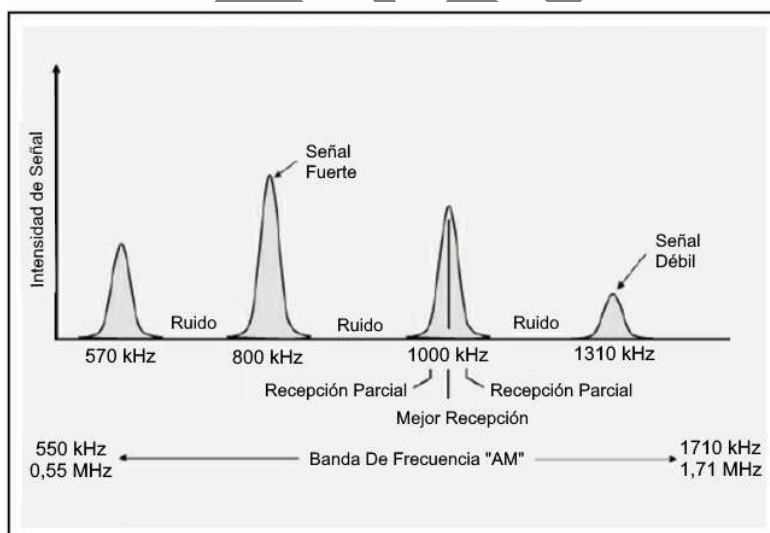


Figura 8. Representación de como un radio ve la banda de AM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

La Figura 8 presenta, además, una modalidad innovadora para representar gráficamente las señales. En contraste con la representación de la Figura 5, donde se ilustraba la variación de la amplitud señal respecto al tiempo en un desplazamiento horizontal, esta representación espectral organiza los componentes de la señal según sus características frecuenciales. El eje horizontal despliega las frecuencias, mientras que el eje vertical cuantifica la intensidad de la señal. Este método constituye un procedimiento estándar para caracterizar el espectro radioeléctrico o una señal determinada.

2.1.4 Longitud de onda

La longitud de onda de una onda radiofónica corresponde a la distancia recorrida durante un ciclo completo de propagación. El símbolo representativo es la letra griega lambda (λ). La Figura 9 ilustra la interrelación existente entre la frecuencia de la onda, su longitud de onda y su velocidad de propagación.

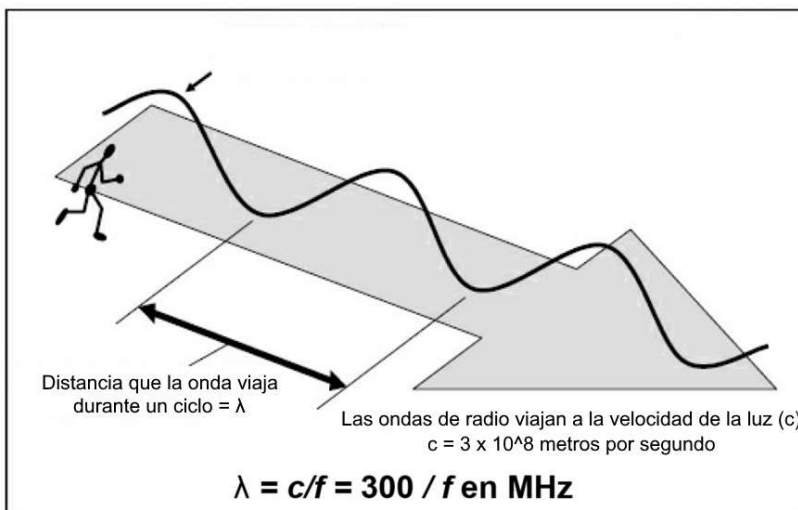


Figura 9. Relación entre la frecuencia, longitud y velocidad de onda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Todas las ondas radioeléctricas se propagan a la velocidad de la luz (representada con la letra **c** en minúscula) en el medio de propagación, como el aire. La velocidad de la luz en el espacio y en el aire es prácticamente 300 millones de metros por segundo (300,000,000 o 3×10^8 metros por segundo).

Considerando que las ondas radioeléctricas se desplazan a velocidad invariable, su longitud de onda se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Esto implica que cuando la frecuencia aumenta, la longitud de onda disminuye, ya que son inversamente proporcionales.

Debido a esta correlación, las bandas de radioaficionados suelen denominarse por su longitud de onda. Por ejemplo, se escucharán expresiones como: "Te contactaré en 2 metros. Probemos en 146,52 MHz." La banda de frecuencia se denomina "2 metros" porque las ondas radioeléctricas en esa banda miden aproximadamente esa longitud. Posteriormente, la frecuencia exacta indica con precisión dónde sintonizar dentro de la banda.

Las ondas con frecuencias muy altas tienen longitudes de onda muy cortas, como las microondas, que tienen frecuencias superiores a 1 GHz.

Para ondas en el aire o en el espacio, la fórmula para calcular la longitud de onda en metros es:

$$\lambda(m) = \frac{300}{f(MHz)}$$

Por ejemplo, la longitud de onda de una onda de radio de 1 MHz (como las de una emisora de AM) es:

$$\lambda = \frac{300}{f} = 300 \text{ metros}$$

Claramente, esta forma abreviada es más conveniente al trabajar con señales de radiofrecuencia.

2.1.5 Radiaciones no ionizantes (RNI)

Las radiaciones no ionizantes son formas de energía electromagnética que no tienen suficiente energía para arrancar electrones de los átomos ni alterar la estructura molecular de los materiales. A diferencia de las radiaciones ionizantes (como los rayos X o gamma), estas no provocan ionización.

En el ámbito de la radioafición, las señales de radiofrecuencia (RF), microondas, luz visible e infrarroja son ejemplos de radiación no ionizante. Aunque no causan daño celular directo, una exposición prolongada o intensa puede generar efectos térmicos, como el calentamiento de tejidos, por lo que, estas emisiones deben cumplir con límites definidos de conformidad con las recomendaciones internacionales de seguridad.

En Costa Rica, la exposición a radiaciones no ionizantes está regulada por el *“Reglamento para Regular la Exposición a Campos Electromagnéticos de Radiaciones No Ionizantes, emitidos por Sistemas Inalámbricos con Frecuencias de Hasta 300 GHz”* (Decreto Ejecutivo N°44737-S-MICITT). Esta normativa, vigente desde noviembre de 2024, fue emitida por el Ministerio de Salud y el MICITT, y establece límites de exposición basados en estándares internacionales como los de la ICNIRP y la UIT. Su objetivo es garantizar un desarrollo tecnológico seguro, protegiendo la salud de la población ante fuentes de este tipo de emisiones que incluyen las antenas y equipos terminales de telecomunicaciones, redes WiFi y equipos de radiofrecuencia, entre ellos las emisiones de las estaciones de radioaficionados.

Para interponer una denuncia relacionada con radiaciones no ionizantes en Costa Rica, el procedimiento se realiza ante el Ministerio de Salud, que es la autoridad encargada de velar por el cumplimiento del Reglamento para Regular la Exposición a Campos Electromagnéticos de Radiaciones No Ionizantes (Decreto Ejecutivo N°44737-S-MICITT).

El proceso puede iniciarse de las siguientes formas:

- En línea: A través del sitio web del Ministerio de Salud o mediante la plataforma de atención al consumidor en www.consumo.gg.cr, aunque esta última no admite denuncias contra servicios públicos o telecomunicaciones.
- Vía telefónica: Llamando al 800-CONSUMO (800-266-7866) para orientación sobre cómo proceder.
- Presencialmente: Acudiendo a una oficina regional del Ministerio de Salud, donde se puede presentar la denuncia con los documentos de respaldo.

Es importante reunir pruebas como fotografías, mediciones de campo electromagnético (si se dispone), ubicación exacta de la fuente emisora y una descripción clara de los hechos. La denuncia debe indicar cómo la exposición afecta la salud o el entorno, y puede ser presentada por cualquier ciudadano.

Los radioaficionados como usuarios de redes de telecomunicaciones deben apegarse a las disposiciones establecidas en el PNAF y están igualmente sometidos al citado reglamento (Decreto Ejecutivo N°44737-S-MICITT), así como a las disposiciones de su respectivo título habilitante y licencia, con el propósito de no generar emisiones que puedan generar interferencias perjudiciales o daños a la salud pública.

2.2 Fundamentos del Equipamiento de Radio

En el ámbito de la radioafición, ciertos términos pueden presentar ligeras variaciones respecto a su uso habitual. Posteriormente se abordarán los pormenores operativos y procedimentales.

2.2.1 Organización básica de una estación

Los tres componentes fundamentales de una estación de radioaficionado, independientemente de su dimensión, son:

- Transmisor

- Receptor
- Antena

Un transmisor (abreviado XMTR) produce una señal que transporta voz, código Morse o información digital. Un receptor (abreviado RCVR) decodifica y recupera voz, código Morse o datos transmitidos en una señal. Seguidamente se ilustran los componentes descritos.

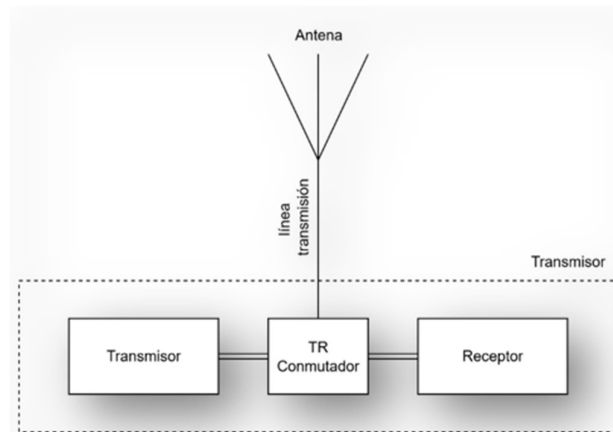


Figura 10. Representación en diagrama de bloques de un radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

La mayoría del equipamiento de radioaficionados integra el transmisor y el receptor en un único dispositivo denominado transceptor (abreviado XCVR). Los transceptores también reciben las denominaciones de equipos. Un transceptor concebido para instalación vehicular se identifica como equipo móvil.

Una antena transforma las señales radioeléctricas de un transmisor en energía que se propaga por el espacio como onda radioeléctrica. Igualmente captura ondas radioeléctricas y las convierte en señales procesables por el receptor.

Un cable de alimentación establece la conexión entre la antena y el transmisor o receptor. A los cables de alimentación también se les denomina líneas de transmisión, al igual que los cables energéticos. Un conmutador de transmisión-recepción (TR) permite que un transmisor y un receptor compartan una antena común.

2.2.2 Repetidores

Los repetidores comprenden un receptor y un transmisor que retransmiten simultáneamente la información de una señal recibida en una frecuencia o canal diferente. Este proceso se conoce como comunicación dúplex.

La Figura 11 ilustra los componentes fundamentales de una estación repetidora. Dado que un repetidor recibe y transmite de manera simultánea, en lugar de un conmutador TR, utiliza un dúplexor. Los repetidores se emplazan en infraestructuras elevadas, torres o elevaciones para maximizar su cobertura.

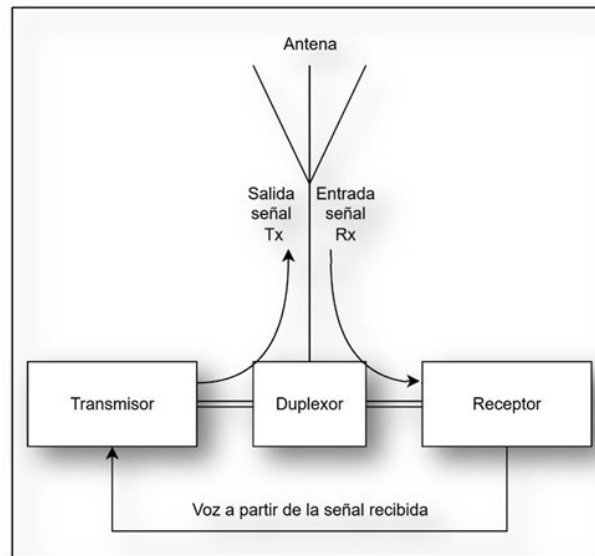


Figura 11. Elementos de una estación repetidora. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Los repetidores facilitan las comunicaciones entre estaciones móviles y portátiles de reducida potencia.

El propósito de un repetidor consiste en suministrar una transmisión robusta y nítida, susceptible de ser percibida con nitidez y comprendida con facilidad, particularmente durante situaciones de contingencia. En general los repetidores están concebidos para retransmitir señales acústicas en modulación de frecuencia (FM) y formatos digitales. Igualmente existen dispositivos repetidores destinados a la transferencia de información y contenidos visuales.

Capítulo 3 Procedimientos y prácticas operativas

3.1 Técnicas de operación en HF

3.1.1 Buenas prácticas

Casi todo el conocimiento relacionado con la cortesía operativa y protocolos adecuados en VHF y UHF resulta igualmente aplicable a las comunicaciones en HF. Naturalmente, existen variaciones sutiles en la terminología empleada.

La operación en HF guarda similitud con las comunicaciones en las porciones inferiores de las bandas VHF y UHF. Los procedimientos más frecuentemente implementados son SSB simplex, CW y modalidades digitales. Como profesional técnico, probablemente se cuente con experiencia previa en HF específicamente en la banda de 10 metros o potencialmente en CW en las bandas de 80, 40 y 15 metros. La Categoría Intermedia, con su respectivo título habilitante, proporciona acceso a un espectro más amplio de frecuencias, modalidades y actividades.

Un aspecto que resultará inmediatamente reconocible es la utilización de fonética para contactos de comunicación vocal en HF, análogamente a lo practicado en repetidores. Se recomienda enfáticamente el empleo del alfabeto fonético OTAN, ya que es el oficialmente adoptado por la UIT, siendo este el sistema más universalmente adoptado.

El código fonético OTAN es el siguiente:

Alfa	Bravo	Charlie	Delta	Echo	Foxtrot
Golf	Hotel	India	Juliet	Kilo	Lima
Mike	November	Oscar	Papa	Quebec	Romeo
Sierra	Tango	Uniform	Victor	Whiskey	Xray
		Yankee	Zulu		

Los radioaficionados costarricenses utilizarán únicamente el código fonético OTAN sin sustituirlo por otros.

3.1.2 Selección de una frecuencia

Seleccionar una frecuencia de operación constituye un paso fundamental. El operador puede explorar el espectro y localizar otra estación mediante la realización de un CQ o participando en un QSO. Es posible responder o interrumpir según se analiza en el presente documento. Ante cualquier duda, se recomienda observar a otras estaciones y replicar sus prácticas efectivas. Igualmente, el operador puede generar su propio CQ siguiendo el procedimiento que se describe en este manual.

Dentro de los márgenes de frecuencia apropiados, se debe sintonizar para identificar un canal disponible. En un repetidor o canal simplex, simplemente será necesario aguardar la conclusión de los QSOs en desarrollo antes de efectuar la llamada. En HF, no obstante, encontrar una frecuencia completamente despejada resulta excepcional. Siempre existirá cierto nivel de ruido y eventualmente se percibirán señales de estaciones alternas. El objetivo primordial consiste en seleccionar una frecuencia donde las transmisiones minimicen las interferencias perjudiciales entre estaciones contiguas y viceversa.

La

Tabla 4 presenta los espaciamientos recomendados entre estaciones para diversos modos bajo condiciones estándar.

Tabla 4. Separación de señal recomendado. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Modo	Separación Recomendada
CW	150 – 500 Hz
SSB	2,5 – 3 kHz
RTTY	250 – 500 Hz
PSK31	150 – 500 Hz

Después de localizar una frecuencia aparentemente disponible, es fundamental corroborar si alguna otra estación la está utilizando. De manera similar a un contacto simplex en VHF, podría resultar imposible percibir simultáneamente a ambas estaciones involucradas en un QSO. Se recomienda iniciar con una escucha preliminar de 10 a 20 segundos. En comunicación fonética, se sugiere consultar: "¿Está ocupada la frecuencia? Aquí [su indicativo de llamada]", una o dos veces antes de iniciar su CQ. En CW y en modos digitales, resulta suficiente transmitir: "QRL? DE [su indicativo de llamada]". QRL representa una señal Q que los radioaficionados emplean para interrogar: "¿Está ocupada esta frecuencia?"

Cuando una estación esté monitoreando, típicamente responderá con "Sí, lo está" o transmitirá "C", "R", o efectuará alguna comunicación para indicar que la frecuencia se encuentra ocupada. En tal caso, se recomienda migrar a otra frecuencia e intentar nuevamente.

Si se participa en un QSO y una estación solicita utilizar la frecuencia para una actividad programada, se aconseja intentar cambiar a otra frecuencia.

Todas las partes deben comprender que ningún grupo o radioaficionado posee acceso prioritario a frecuencia alguna, salvo en comunicaciones de emergencia. Se requiere flexibilidad, aprovechando la capacidad única de la radioafición para utilizar cualquier frecuencia dentro de los rangos atribuidos.

En resumen, seleccionar una frecuencia resulta sumamente sencillo:

- Verificar que la frecuencia esté autorizada según la categoría de la licencia.
- Seguir el plan de bandas en circunstancias convencionales.
- Monitorear la frecuencia para prevenir interferencias con comunicaciones en curso.

Es habitual que la propagación experimente modificaciones durante un contacto, pudiendo generarse interferencias. Potencialmente, reorientar su antena direccional o conmutar a otra antena podría contribuir a mitigar dichas interferencias y proseguir con el contacto. Alternativamente, podría considerarse cambiar de frecuencia si resulta viable. Independientemente de las circunstancias, se debe procurar resolver el problema de interferencia con las restantes estaciones de manera mutuamente satisfactoria.

Para radioaficionados categoría Superior, se espera una adaptabilidad integral a toda condición en la banda. Es fundamental aprender estrategias para completar un contacto programado incluso si la frecuencia planificada está ocupada. Siempre conviene disponer de un "plan B" con frecuencia o programación alternativa.

Se recomienda utilizar los recursos accesibles para todos los radioaficionados con el fin de estructurar las actividades. A modo de ejemplo, existen numerosos calendarios de concursos disponibles en internet, como los proporcionados por:

- www.arrl.org/contests
- www.contestcalendar.com

Es recomendable verificar la existencia de competencias significativas antes de establecer una programación definitiva. Las estaciones de eventos especiales y las expediciones podrían aparecer eventualmente en una frecuencia preferida durante períodos específicos.

Si se desempeña como estación de control o administrador de red (net), es fundamental garantizar que la red cuente con una frecuencia alternativa cuando la banda se encuentre

saturada o presente condiciones adversas. Se recomienda practicar la transición hacia el plan B para estar preparado cuando sea estrictamente necesario.

OPERACIÓN EN FRECUENCIA DIVIDIDA O DOBLE FRECUENCIA

Cuando una estación poco común o atractiva está transmitiendo y múltiples estaciones intentan establecer contacto, es habitual que opere en frecuencia dividida (Split, por sus siglas en inglés). Este procedimiento implica configurar un transceptor para recibir en una frecuencia y transmitir en otra.

Al transmitir en una frecuencia y permitir que los solicitantes transmitan en una frecuencia diferente, estos pueden monitorear la estación y mantenerse sincronizados para lograr una operación más organizada y eficiente.

Muchos transceptores pueden recibir una segunda frecuencia de manera independiente respecto a la frecuencia principal de recepción. Si se busca establecer contacto con una estación DX, esto permite escuchar simultáneamente tanto la estación DX como el conjunto de estaciones que la están intentando contactar (avalancha de llamadas). Como consecuencia, es posible identificar rápidamente la frecuencia apropiada para transmitir.

3.1.3 Realización de contactos

Aunque invocar "CQ" resulta inusual en los canales de frecuencia modulada de muy alta (VHF) y ultra alta frecuencia (UHF), ese es el método mediante el cual se inician numerosos contactos en alta frecuencia. Los radioaficionados exploran las bandas y responden a estaciones que convocan "CQ" o que están desarrollando un QSO de interés.

Para solicitar "CQ" mediante transmisión vocal, se pronuncia: "CQ CQ CQ, aquí [su indicativo repetido múltiples veces empleando fonética]". Posteriormente se realiza una pausa para detectar si alguna estación responde a la convocatoria. En caso de ausencia de respuesta, se reitera la llamada "CQ" según lo demanden las condiciones.

En telegrafía (CW), se sustituye "esta es" por la abreviatura "DE", obviamente sin utilizar fonéticas. Múltiples estaciones emplean "from" (desde) en lugar de "esta es" durante las transmisiones vocales. "DE" también se usa comúnmente en modalidades digitales, aunque algunas estaciones pueden escribir "from".

Variaciones del CQ incluyen:

- **CQ DX**, donde DX significa "estaciones distantes": por ejemplo, si una estación en Costa Rica expresa "CQ DX", implica que busca estaciones fuera del territorio continental nacional. En alta frecuencia, "DX" generalmente se refiere a cualquier estación externa al país del emisor.
- **CQ** para estaciones que participan en competencias o eventos especiales: manifestarán algo como "CQ contest", "CQ test" o "CQ desde estación de evento especial..."
- **CQ** para estaciones de una región específica: como "CQ Norteamérica" o "CQ Centroamérica".

Incorporarse a un QSO en desarrollo o interrumpir también es frecuente. En transmisiones vocales, el procedimiento habitual consiste en mencionar únicamente el indicativo durante una pausa conversacional. En telegrafía o modalidades digitales, se transmite "BK" (break, interrupción) seguido del indicativo.

Se observará que el estilo acelerado de las competencias resulta bastante popular en alta frecuencia (HF). Las regulaciones, como la identificación de la estación, continúan aplicándose durante estos eventos competitivos.

Debido a que los contactos en competencias son sumamente breves, las normas de identificación se cumplen al proporcionar el indicativo una única vez al inicio del contacto.

Los planes de banda pueden hacer referencia a una ventana DX, un segmento de algunos kilohercios de amplitud en ciertas bandas. Estas ventanas fueron originalmente diseñadas para proporcionar a los radioaficionados de países con privilegios limitados un espacio en la banda para realizar contactos de larga distancia fuera de su propia nación o región.

Conforme las asignaciones de frecuencia globales se han vuelto más estandarizadas, estas ventanas DX resultan menos necesarias, aunque continúan formando parte de la práctica en algunas bandas.

REDES Y HORARIOS

Diversas actividades de comunicación radial se planifican anticipadamente, incluyendo encuentros interpersonales entre allegados (denominados "*skeds*") y conexiones (*nets*) con periodicidad establecida. Para garantizar el funcionamiento fluido de estos encuentros programados, se requiere adaptabilidad por parte de todos los participantes.

Si el responsable de la programación es el propio interesado, debe evitar las frecuencias saturadas y las zonas más concurridas del espectro. Es recomendable utilizar los calendarios de eventos para prevenir la congestión.

Siempre es prudente contar con un "Plan B", como una alternativa temporal o de frecuencia para la actividad. Por ejemplo, si la estación de control de una red (*net control station*, por sus siglas en inglés) detecta que la frecuencia seleccionada está ocupada, se debe buscar una frecuencia cercana disponible para realizar la comunicación, o bien migrar a la frecuencia de contingencia.

CONCURSOS

Los concursos, también denominados radio deportes, se desarrollan principalmente durante los fines de semana con el objetivo de establecer la mayor cantidad posible de contactos dentro del período del evento. Se recomienda escuchar estaciones que emitan "*CQ contest*" o CQ seguido del nombre específico del concurso.

Estos eventos generalmente evitan completamente las bandas de 60, 30, 17 y 12 metros, y típicamente se ejecutan en un único modo operativo, lo que facilita su identificación y eventual evasión si así se desea.

Prácticamente todos los concursos permiten la participación de cualquier estación bajo alguna modalidad. Se sugiere utilizar calendarios de concursos en línea para conocer los detalles del intercambio de información. Una referencia destacada es el sitio proporcionado por WA7BNM en www.contestcalendar.com, que ofrece información integral, incluyendo procedimientos para remitir el registro del concurso (*contest log*).

La participación en concursos representa una excelente oportunidad para perfeccionar destrezas operativas, comprender fenómenos de propagación, acumular contactos para reconocimientos y optimizar el rendimiento de la estación.

Cada contacto en un concurso incorpora su propio conjunto informativo (denominado intercambio) que los participantes intercambian mutuamente. La mayoría de los intercambios comprenden indicativos de llamada, reportes de señal, número secuencial del contacto (denominado número de serie) o ubicación.

Concursos en VHF y UHF, ocasionalmente denominados concursos VHF+, se ejecutan en zonas de "señales débiles" en los segmentos inferiores de las bandas VHF, UHF y microondas. La mayor actividad se concentra próxima a las frecuencias de llamada para CW y SSB.

Es habitual que los operadores de HF intercambien tarjetas QSL o registros digitales para validar un contacto. (QSL significa "confirmando recepción"). Coleccionar estas tarjetas diversas y coloridas de diferentes latitudes resulta muy atractivo, ya sea para certificar comunicaciones con fines de reconocimiento o como elemento conmemorativo personal. Los registros computarizados

simplifican la búsqueda, clasificación de información de QSOs y el seguimiento de envíos y recepciones de QSL.

MANEJO DE INTERFERENCIAS

Las frecuencias de HF en radioafición carecen de canalización y presentan alta densidad de usuarios. Por lo que puede ser usual encontrarse con interferencias. La interferencia surge no solo por saturación, sino también por condiciones de propagación y preferencias individuales. Independientemente de su origen, todo radioaficionado requiere habilidades para gestionar interferencias. Esta sección proporcionará estrategias para manejar interferencias provenientes de otras señales de radioaficionados.

Cuando las bandas están densamente ocupadas, especialmente durante fines de semana con mayor actividad de concursos, búsqueda de comunicaciones DX o contactos generales, se encontrarán menos frecuencias disponibles y mayor probabilidad de interferencias incidentales.

TIPOS DE INTERFERENCIA

Según el artículo 90 del RLGT se entiende por interferencia toda señal radioeléctrica u otro medio de emisión que comprometa, degrade, interrumpa, o impida el funcionamiento de un servicio de telecomunicaciones que opere de acuerdo con las características técnicas de título habilitante, este reglamento y la LGT.

La mayoría de las perturbaciones provocadas por señales de otros radioaficionados son fortuitas y no significativamente disruptivas. Tras adquirir cierta experiencia, resultará sencillo captar una señal deseada a pesar de un ligero QRM (interferencia) proveniente de una señal adyacente.

Puede experimentarse una interferencia accidental cuando otra estación comienza a transmitir en o muy próximo a una frecuencia que se está utilizando.

No obstante, existen dos categorías de interferencia que no se gestionan tan simple:

- **Interferencia perjudicial:** Interferencia que compromete el funcionamiento de un servicio de radionavegación o de otros servicios de seguridad, o que degrada gravemente, interrumpe o impide el funcionamiento de un servicio de radiocomunicación explotado de acuerdo al Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT (RR-UIT).
- **Interferencia perjudicial de origen maliciosa, deliberada o intencional:** Interferencia generada de manera voluntaria y consciente con el objetivo de afectar otros servicios y afectar a sus usuarios. Este tipo de interferencia puede corresponder a una interferencia perjudicial.

EVITAR LA INTERFERENCIA

El método más efectivo para prevenir interferencias radica en actuar con inteligencia y aplicar el conocimiento del servicio de radioaficionados, partiendo de expectativas realistas. Identifique qué bandas presentan mayor saturación y en qué momentos, comprenda las particularidades de cada banda respecto a propagación y ruido, domine el manejo del equipo y reconozca sus capacidades y limitaciones. Consulte calendarios publicados para evitar sorpresas en eventos operativos relevantes. Con esta información, se obtendrá una comprensión más precisa de las condiciones esperables e incrementará las probabilidades de una experiencia satisfactoria.

Posteriormente, perfeccione las técnicas de selección de frecuencias. Existen numerosas fuentes de predicciones de propagación que facilitan la elección de la banda u horario óptimo para operar. Los planes de banda y frecuencias de llamada están ampliamente disponibles en plataformas digitales y publicaciones impresas. Las frecuencias de redes (nets) también pueden consultarse en línea y directorios. Con una breve investigación, es posible evitar múltiples fuentes potenciales de interferencia y operar en una frecuencia adecuada al propósito.

Durante la transmisión, se debe operar de manera que se maximice el disfrute de otros operadores. Utilice un nivel de potencia apropiado para cada tarea. Evite emplear bandas de

larga distancia para contactos de corto alcance. Y especialmente, garantice que la señal transmitida sea "limpia", es decir, libre de señales espurias excesivas susceptibles de generar interferencias.

CÓMO REACCIONAR ANTE LA INTERFERENCIA

En algún momento inevitablemente se experimentarán interferencias. Para lo cual, de tomar en cuenta el siguiente procedimiento:

- Inicie manteniendo tus alternativas disponibles y mostrándote adaptable. Ningún individuo posee un derecho exclusivo sobre una determinada frecuencia, y frecuentemente la solución más práctica consiste en modificar la frecuencia para evadir una señal perturbadora.
- Desarrolle habilidades para utilizar tu receptor con el propósito de descartar interferencias provenientes de señales próximas o intensas.
- Elabore una estrategia anticipada, siempre contemplando un método alternativo de operación. Esta consideración resulta particularmente crucial para comunicaciones programadas y redes. Todos los participantes deben conocer el protocolo a seguir si la frecuencia principal está comprometida o si la propagación presenta deficiencias. El momento idóneo para establecer estos protocolos es previamente al contacto, nunca durante el mismo.

Sobre todo, conserve la serenidad. En ocasiones, la interferencia perjudicial puede derivar en interferencia premeditada cuando las emociones nos dominan. No permita que un individuo mal humorado le contagie la negatividad. Aunque pueda resultar frustrante, evita reaccionar ante un saboteador o alguien que genere interferencias deliberadas, pues tal respuesta únicamente los estimula. En determinadas circunstancias, la mejor opción consiste simplemente en desconectar el equipo y dedicarse a otra actividad.

Motive a sus colegas radioaficionados a seguir estas pautas elementales y todos resultarán beneficiados.

CÓMO PRESENTAR UNA DENUNCIA DE INTERFERENCIA

Según el artículo 90 del RLGT, es responsabilidad de la SUTEL investigar toda interferencia perjudicial, emanada de aparatos, motores, vehículos e instalaciones eléctricas de cualquier clase, que encuentre durante las inspecciones o que se le denuncie por escrito. En este último caso deberá apersonarse a las instalaciones correspondientes a indagar sobre la denuncia, en un plazo no mayor de veinticuatro horas, sin necesidad de previa notificación al titular.

Por lo que cualquier radioaficionado que considere que está siendo afectado por una interferencia perjudicial puede interponer una denuncia ante SUTEL por interferencias perjudiciales del espectro radioeléctrico. Para esto puede acudir al enlace: <https://www.sutel.go.cr/pagina/denuncias-por-interferencias> para descargar los formularios vigentes, que indican todos los requisitos necesarios para poder presentar la denuncia y que esta sea atendida.

3.1.4 Modos

Los radioaficionados emplean una gran diversidad de métodos de transmisión, mayor que cualquier otro servicio, autorizado o no. La creación, implementación y administración de los distintos sistemas representan ejemplos fehacientes de cómo la radioafición cumple su propósito de contribuir a mejorar el arte radiofónico. Esta sección presenta algunas de las convenciones asociadas con cada modalidad y establece comparaciones entre ellas.

CW

El código Morse, denominado "CW" por *continuos wave* (onda continua), se localiza en las secciones inferiores de cada banda de HF debido a que se prohíben las señales vocales (phone) y datos en esas zonas. Frecuentemente se omite que el CW puede transmitirse en cualquier

segmento de las bandas de HF (con excepción de 60 metros), incluyendo el área asignada a operaciones vocales. No obstante, la mayoría de los operadores de CW tienden a trabajar en los segmentos de banda destinados específicamente a CW y transmisión de datos.

TELEFONÍA AM Y SSB

En las bandas de HF, la banda lateral única (SSB) constituye, indiscutiblemente, el método vocal o de telefonía más preponderante. Introducida originalmente en los años 1950, la SSB desplazó a la AM como el procedimiento preferencial de modulación vocal en HF. SSB utiliza un espacio espectral más reducido que AM, una señal SSB correctamente ajustada ocupa aproximadamente 3 kHz, mientras que una señal AM requiere 6 kHz. La portadora y la banda lateral adicional de la señal AM se suprimen al generar una señal SSB, canalizando toda la potencia hacia la información vocal, esto incrementa la eficiencia. El resultado implica que, bajo condiciones equivalentes, una señal SSB presentará mayor alcance que una señal AM. El empleo aficionado de AM continúa siendo habitual entre diversos grupos en las bandas cotidianas.

¿Cuál de las dos bandas laterales se emplea? Por consideraciones técnicas en los diseños iniciales de radios SSB, la práctica recomendada en radioafición consiste en utilizar la banda lateral superior (USB) en frecuencias superiores a 9 MHz (bandas de 20 a 10 metros), y la banda lateral inferior (LSB) en las restantes, con excepción de 60 metros. En VHF y UHF se implementa la banda lateral superior.

La FM, generalmente no se utiliza en HF debido al elevado nivel de ruido, factor que compromete la inteligibilidad. Sin embargo, los repetidores FM pueden encontrarse en las frecuencias más altas de la banda de 10 metros (por encima de 29 MHz), donde resulta factible establecer contactos de larga distancia cuando la banda presenta condiciones óptimas.

VOZ DIGITAL

Un novedoso tipo de señal vocal emerge en las bandas de HF es la voz digital. La voz del operador se transforma hacia y desde un flujo informativo digital mediante un módem o tarjeta de sonido, de manera similar a las señales digitales generadas por computadora. El módem o tarjeta de sonido se conecta a la entrada de micrófono y la salida de altavoz o audífonos de un transceptor SSB convencional. Las transmisiones de voz digital exhiben una fidelidad comparable a las señales SSB tradicionales, pero resultan menos susceptibles al desvanecimiento y presentan menor ruido en la señal recuperada. Esta modalidad de transmisión probablemente incrementa su popularidad conforme se perfeccionen las técnicas. Los dos modos de voz digital más frecuentes son FreeDV (freedv.org) y un protocolo desarrollado por G4GUO, compatible con equipos AOR.

MODOS DIGITALES

Potencialmente, se han empleado sistemas de radio por paquetes en bandas de VHF o UHF para la transmisión de datos digitales. Adicionalmente, existen numerosas señales digitales en HF. Actualmente, FT8 representa el protocolo más difundido, siendo parte del paquete de aplicaciones WSJT-X.

Los protocolos PSK31, PSK63 y FT8 demuestran una notable eficiencia incluso con bajos niveles de potencia y son ampliamente implementados. El radioteletipo o RTTY (comúnmente pronunciado como "ritty" por los radioaficionados), constituye el método más antiguo que continúa utilizándose. Los sistemas PACTOR y WINMOR se implementan para transmisiones semi-automatizadas y automatizadas, permitiendo además transferencias de archivos de reducido tamaño.

En frecuencias HF, los equipos de Single Side Band (SSB) facilitan el envío y recepción de señales digitales, las cuales se transmiten mediante tonos auditivos. La diversidad de modos digitales resulta significativamente superior en HF comparado con VHF.

MODOS DE IMAGEN

Las transmisiones de imágenes en HF codifican representaciones visuales mediante tonalidades específicas. Los tonos recibidos se reconstruyen visualmente en una pantalla. Estos modos de transmisión están autorizados en zonas donde se permiten comunicaciones vocales, con excepción de la banda de 60 metros.

La televisión de barrido lento (SSTV) representa el método de imagen más frecuente en HF. Cada representación visual requiere varios segundos para su transmisión, justificando su denominación de "barrido lento".

Los sistemas computacionales y tarjetas de sonido han simplificado sustancialmente la operación de modos de imagen, existiendo aplicaciones de SSTV fácilmente accesibles.

La televisión aficionada de barrido rápido (ATV), que posibilita video con movimiento completo, permanece restringida a frecuencias de 432 MHz y superiores debido a su amplio ancho de banda.

COMPARACIÓN DE MODOS

La Tabla 5 presenta un compendio de modos habituales, estableciendo un análisis comparativo de sus características fundamentales.

Los detalles específicos de estos protocolos serán explorados en este documento. La tabla pretende sintetizar la perspectiva general.

Tabla 5. Modos comunes y características. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Modo	Ancho de Banda	Ejemplos	Tasa de Datos	Notas
CW	Hasta 150 Hz		Hasta 60 PPM	Puede tener mayor fidelidad que SSB
AM	6 kHz			
SSB	3 kHz			
HF Digital de Banda Estrecha	Hasta 500 Hz	RTTY, PSK31, JT65 o FT8	Hasta 100 PPM	Teclado a teclado
HF Digital de Banda Ancha	Hasta 2,3 kHz	FACTOR, WINMOR	Hasta 1200 baudios	Teclado a teclado y transferencia de archivos
VHF/UHF Digital	Hasta 100 kHz	Paquete, D-STAR, SystemFusion		El ancho máximo de banda varía según la banda
Imagen de Banda Estrecha	3 kHz máx en HF	SSTV		
Video (movimiento completo)	6 MHz máx	NTSC, HDTV		Solo UHF y microondas

3.1.5 Recepción en HF

En VHF, los dispositivos receptores de modulación de frecuencia FM presentan tres mandos fundamentales: sintonización (o canal), sistema de supresión de ruido y modulación sonora.

Los receptores de bandas laterales únicas/código continuo poseen una configuración de ajustes mucho más compleja, puesto que están concebidos para operar mediante sintonización continua y no canalizada. Estos equipos requieren capacidad para captar señales específicas en entornos con presencia de ruidos e interferencias procedentes de canales adyacentes.

La selectividad es la facultad para diferenciar señales con frecuencias muy próximas. En HF resulta más crucial que la capacidad receptiva, que es la habilidad para percibir una señal.

Esta característica se fundamenta en que la perturbación atmosférica (denominada QRN) presenta niveles significativamente superiores en las bandas HF comparadas con VHF o UHF. El QRN proviene de fenómenos meteorológicos, procesos atmosféricos naturales o fuentes artificiales como descargas eléctricas generadas por motores y sistemas de transmisión eléctrica.

Los amplificadores previos raramente resultan indispensables, salvo en las bandas HF superiores como las de 15 a 10 metros.

REPORTE DE SEÑAL

Durante el establecimiento inicial de comunicación entre estaciones, uno de los primeros elementos informativos intercambiados corresponde al reporte de señal. Este procedimiento permite a cada estación comprender la calidad de recepción de su transmisión, posibilitando ajustes operativos consecuentes.

El método de reporte de señal más generalizado es el sistema numérico RST (Readability, Strength, Tone o Legibilidad, Intensidad, Tono).

- La legibilidad se evalúa en una escala de 1 a 5, considerando 5 como la valoración óptima.
- La intensidad y el tono se cuantifican en una escala de 1 a 9.
- Una intensidad de 9 equivale aproximadamente a una lectura S9 en el receptor.
- El tono refleja la pureza de la señal; valores inferiores a 9 sugieren alguna anomalía en el transmisor. (El tono únicamente se reporta en comunicaciones CW y modos digitales).
- Una "C" añadida al final del RST indica una señal inestable o con "chirp", una fluctuación de frecuencia al inicio de cada punto o raya.

En comunicación fonética (voz), múltiples estaciones utilizan el sistema de evaluación cualitativa con números del 1 al 5, que representan claridad e inteligibilidad de la señal.

Los receptores HF implementan filtros precisos para rechazar señales no deseadas.

- Los receptores analógicos emplean módulos de filtrado basados en cristales de cuarzo o ensamblajes mecánicos.
- El procesamiento digital de señales (DSP) también se utiliza para realizar filtraciones, y algunos equipos combinan filtros discretos con DSP.

Un receptor convencional dispone al menos de una configuración de filtro para SSB, otra para CW, y una tercera para AM o FM. Dado que la operación en HF no está canalizada, es probable encontrar señales lo suficientemente próximas como para percibirse como fragmentos vocales agudos o graves, o tonos CW. Esto es lo que se conoce como interferencia o QRM según el Código Q. Complementariamente al control principal de sintonización (VFO), los receptores HF ofrecen la posibilidad de ajustar con precisión la frecuencia de recepción sin modificar la frecuencia de transmisión, para optimizar la captación de señales deseadas y minimizar o evadir el QRM. Este procedimiento se conoce como sintonización incremental del receptor o RIT (Receiver Incremental Tuning, por sus siglas en inglés).

Algunos transceptores también permiten modificar la frecuencia de transmisión sin alterar la de recepción, denominado sintonización incremental del transmisor o XIT (Transmitter Incremental Tuning, por sus siglas en inglés). Un tono constante proveniente de una estación en ajuste o de una portadora de radiodifusión puede eliminarse mediante un filtro de muesca (notch filter) que suprime un rango estrecho de frecuencias del canal.

Para prevenir efectos análogos a la interferencia provocados por saturación o intermodulación (cuando las señales se mezclan y generan subproductos no deseados), la ganancia del receptor debe regularse de manera que sea precisamente lo suficientemente sensible para la labor específica. Funcionalidades como eliminadores de ruido (noise blankers) y preamplificadores pueden facilitar la sobrecarga del receptor y deben utilizarse únicamente cuando resulte estrictamente necesario.

3.1.6 Transmisión en HF

Esta sección aborda los procedimientos para operar un transmisor de HF. Los procedimientos detallados sobre el ajuste del transmisor se desarrollarán más adelante en el presente documento.

FONÍA

En HF para comunicación vocal, existen diversos métodos para activar el modo de transmisión en un transceptor (proceso denominado activación o pulsación del transmisor). Para quienes están familiarizados con radios FM portátiles o móviles, el sistema de pulsar para hablar (PTT) presenta una operatividad idéntica a la de FM.

El PTT resulta óptimo cuando se opera en entornos acústicamente complejos. Ciertos operadores de HF prefieren emplear un pedal de pie en lugar del botón PTT del micrófono, especialmente durante sesiones prolongadas de comunicación.

Igualmente, extendido está el empleo de transmisión activada por voz, denominada simplemente VOX. Un circuito especializado en el transmisor utiliza el audio del micrófono para activar automáticamente la transmisión cuando el operador emite sonido.

El VOX permite una operación sin intervención manual, resultando conveniente durante extensos periodos de comunicación. Los operadores en movilidad implementan VOX para mantener ambas manos en el volante.

CW (MORSE)

Los contactos mediante código Morse son significativamente más frecuentes en HF que por encima de los 30 MHz. Las secciones dedicadas al código en bandas abiertas suelen presentar intensa actividad. El Morse permanece vigente y dinámico en las bandas de radioaficionados. Quien decida aprender "el código" incorporará una herramienta extraordinariamente potente a su conjunto de competencias.

Habitualmente, los operadores CW inician con un manipulador convencional, aunque muchos evolucionan hacia un manipulador electrónico. El manipulador se opera mediante una paleta para generar automáticamente secuencias de puntos y rayas del código Morse. La utilización de un manipulador con paleta simplifica notablemente la transmisión a velocidades superiores comparado con un manipulador tradicional. Algunos equipos de radio incorporan manipuladores integrados.

Hay dos modalidades fundamentales de configurar un transceptor para conmutar entre transmisión y recepción al emplear Morse:

- **Semi break-in**: implementando el circuito VOX similar a la comunicación fonética, el dispositivo retornará automáticamente a recepción cuando concluya el intervalo de retardo de VOX. Este lapso puede configurarse para interrumpirse entre palabras, o prolongarse para que la transmisión prosiga durante todo el periodo de emisión.
- **Full break-in (QSK)**: en determinados escenarios resulta beneficioso percibir lo que acontece entre caracteres Morse, particularmente si la estación remota requiere interrumpir o existe interferencia. Mediante el full break-in, el equipo alterna entre transmisión y recepción en milisegundos, posibilitando la recepción de señales entrantes entre cada carácter transmitido.

PROCEDIMIENTOS CW

De manera análoga a los mensajes de texto, redactar cada palabra completa demanda tiempo, por lo que los telegrafistas desarrollaron un extenso repertorio de abreviaturas y señales procedimentales denominadas prosigns. Los prosigns consisten en dos letras transmitidas conjuntamente como un único carácter, identificado mediante una barra horizontal superpuesta, por ejemplo, el prosign AR (di-dah-di-dah-dit) significa conclusión del mensaje.

Responda a un CQ a la máxima velocidad que pueda decodificar cómodamente, hasta equiparar la velocidad de la estación transmisora.

- Si no logra recibir adecuadamente a esa velocidad, transmita la señal Q "QRS" (envíe más pausadamente) previamente al cierre con "K".
- Si desea una transmisión más acelerada, utilice "QRQ" (envíe más rápidamente).

Asegúrese de sincronizar su frecuencia de transmisión con la señal recibida. Este procedimiento se denomina "zero beat", debido a que ambas señales generan idéntica tonalidad en el receptor.

Durante la comunicación, emplee el prosign KN en lugar de K para impedir que otras estaciones interrumpen: significa únicamente la(s) estación(es) con la que está estableciendo contacto deben responder.

- Si le consultan sobre su disponibilidad para recibir, "QRV" significa estar preparado para recibir mensajes.
- Una vez decodificado el mensaje, "QSL" indica recepción confirmada.

Para concluir el QSO, utilice el prosign SK para señalar que el contacto ha finalizado: TI2XXX DE TI2YYY SK. Recuerde transmitir su indicativo de llamada cada 10 minutos y al término del contacto.

Hay tres controles fundamentales para el sistema VOX de un transceptor:

- **Ganancia VOX:** regula la receptividad del circuito VOX respecto a la voz.
- **Retardo VOX:** determina la duración de la activación del transmisor tras finalizar la locución.
- **Anti-VOX:** impide que las señales acústicas provenientes del altoparlante o auriculares activen el sistema.

Estos controles se describen en el manual de tu radio. (Numerosos equipos implementan menús de software para la parametrización VOX). Es recomendable familiarizarse con estos controles para lograr una configuración precisa del sistema.

El VOX también puede emplearse para transmisiones CW y digitales.

- Para CW, al cerrar el conmutador externo se activa el VOX, de manera idéntica a la fonía.
- En CW, la amplificación y el anti-VOX carecen de incidencia.
- Para modalidades digitales, la señal acústica de salida de un módem o tarjeta de sonido provoca la activación del VOX de forma equivalente a la voz. Los tres controles VOX operan de manera similar en modos digitales y fonía.

PROCEDIMIENTOS Y ABREVIATURAS EN FONÍA

El lector ya conoce señales como "CQ" y "Break". Si se utiliza FM, se comprende cuándo expresar "Over" (cambio) y "Clear" (libre). La operación en HF fonía emplea estas señales y algunas adicionales. Es fundamental proporcionar el indicativo de llamada cada 10 minutos y al concluir el contacto.

Se escuchará a numerosos operadores utilizando señales Q en fonía, aunque originariamente fueron concebidas para CW. No obstante, resultan tan ampliamente comprendidas como QRM y QRN, previamente mencionadas, que resultan muy provechosas, especialmente cuando se comunica con alguien que no domina completamente el idioma. De hecho, las señales Q fueron desarrolladas precisamente con ese propósito: facilitar la comunicación entre interlocutores con diferentes lenguas maternas.

Se recomienda evitar "códigos 10" como "10-4", puesto que están obsoletos incluso para personal policial y de bomberos. Los profesionales de la radio han adoptado un lenguaje directo para una mejor comprensión. Si se planea modificar la frecuencia o desconectar la estación, debe comunicarse de manera explícita.

VELOCIDADES Y AYUDA PARA CW

Las velocidades en CW presentan variaciones:

- Desde 5 a 10 palabras por minuto (WPM) para principiantes,
- Hasta 15 a 30 WPM en la mayoría de los contactos habituales,
- Los concursos pueden desarrollarse aún a mayor celeridad, aunque los operadores suelen reducir la velocidad si se les solicita.

Las señales más lentas típicamente se localizan en el extremo superior de los segmentos de banda CW y de datos. Para iniciarse en Morse, se pueden consultar organizaciones como:

- FISTS (www.fists.org)
- CWOps (cwops.org)

Ambas proporcionan programas de capacitación y operación para CW.

EJEMPLO DE LLAMADA CQ EN CW

La práctica de invocar CQ en Código Morse (CW) mantiene una estructura idéntica a la empleada en comunicaciones fonéticas. La abreviatura "DE" representa la preposición "from" (de), mientras que el prosign K sustituye la expresión "over":

CQ CQ CQ DE TI2XXX TI2XXX TI2XXX K

Una contestación típica se estructuraría de la siguiente manera:

TI2XXX DE TI2YYY TI2YYY K

No resulta necesario reiterar el indicativo de llamada de la estación que realiza la convocatoria más de una ocasión, salvo en situaciones de interferencia o señal tenue. Cuando las transmisiones presentan una intensidad y claridad óptimas, basta con transmitir el indicativo de llamada una o dos veces.

ABREVIATURAS HABITUALES EN MORSE:

- "AND" se transforma en ES,
- "GOING" se convierte en GG,
- "WEATHER" se simplifica en WX, etc.

Esta práctica permite economizar tiempo y esfuerzo significativamente. Las operaciones digitales reproducen múltiples convenciones, empleando idénticos "prosigns" y abreviaturas.

3.2 Operación en Emergencias

Prestar servicio a la comunidad constituye un elemento fundamental en la motivación de numerosos individuos para incorporarse al mundo de la radioafición y más significativamente, para permanecer en él. Los acontecimientos recientes a escala global demuestran de manera inequívoca que la radioafición resulta indispensable, siendo las comunicaciones de emergencia un componente esencial de nuestra actividad, al igual que la experimentación técnica y la pericia del operador.

Los radioaficionados deben estar completamente familiarizados con los protocolos y procedimientos de emergencia para poder contribuir de manera eficiente cuando los canales de comunicación convencionales no se encuentren disponibles. Incluso si no se está directamente involucrado en la situación de emergencia o desastre, es posible recibir comunicaciones de emergencia provenientes de otro aficionado que sí esté afectado. Las comunicaciones de emergencia, en cualquier modalidad, prevalecen sobre todos los demás tipos de comunicación de radioaficionados. Con independencia de lo que acontezca en una frecuencia específica, todos los operadores deben interrumpir sus transmisiones y aguardar la conclusión de la comunicación de emergencia. Es imperativo estar preparado para responder de manera efectiva.

Dado que los aficionados operan desde diversas localizaciones y en múltiples frecuencias, en ocasiones reciben llamadas de socorro. Es crucial que cada aficionado conozca el procedimiento adecuado para gestionar una llamada de auxilio o cómo iniciarla.

La responsabilidad primordial consiste en reaccionar y realizar el máximo esfuerzo para obtener asistencia para la estación en peligro. Inicialmente, se debe suspender de manera inmediata cualquier comunicación en curso. Posteriormente:

- Reconocer de inmediato a la estación que solicita ayuda, confirmando que se está escuchando.
- Permanecer a la espera para recibir información sobre la ubicación de la emergencia y la naturaleza de la asistencia requerida.
- Retransmitir la información a las autoridades competentes y mantenerse en la frecuencia para recibir información adicional o hasta la llegada del auxilio.

Si eres quien necesita solicitar auxilio:

- En modo de voz, pronunciar: "Mayday Mayday Mayday"; en CW o modo digital, transmitir: "SOS SOS SOS", seguido de: "any station come in please" ("cualquier estación, responda por favor"). (Nota: "Mayday" no debe confundirse con "Pan-Pan", que indica urgencia, pero no peligro inmediato).
- Identificar la transmisión con el indicativo de llamada.
- Indicar la ubicación con suficiente precisión para facilitar la localización, describiendo la naturaleza de la situación.
- Explicar el tipo de asistencia necesaria y proporcionar cualquier información adicional relevante.

Una estación en peligro y que requiera ayuda puede utilizar cualquier medio de comunicación radial disponible para solicitar auxilio. Cualquier frecuencia, cualquier modo, o cualquier potencia necesaria puede emplearse mientras persista la emergencia, incluso fuera de los privilegios normales de la categoría que se posea.

Se permiten incluso transmisiones sin identificación fuera de las bandas de radioaficionados, si resultan necesarias para localizar la señal mediante radiogoniometría o dirección. Asimismo, si se escucha una llamada de socorro, se autoriza responder utilizando cualquier medio necesario.

3.3 Operación General

3.3.1 Frecuencias HF para la categoría superior

Las diminutas extensiones complementarias del espectro HF accesibles únicamente para los titulares de licencia de categoría Superior pueden parecer insignificantes en los registros de distribución de frecuencias del PNAF, sin embargo, representan territorios altamente codiciados para los operadores de HF.

La metodología tradicional de operación establece que los contactos DX tienden a desarrollarse más próximos al límite inferior de las bandas. Los extremos superiores de las bandas generalmente constituyen el escenario donde se concentran los QSOs de carácter nacional y las operaciones de redes.

3.3.2 DXing

El DXing constituye una porción fundamental de la esencia de la radioafición: la optimización permanente de equipamiento, sistemas radiantes, comprensión de fenómenos de propagación y destrezas operacionales. La indagación de un poco más de alcance o aquella oportunidad extraordinaria de propagación impulsa numerosos adelantos técnicos y operativos.

La conceptualización personal de DX probablemente variará según las bandas de operación. Para los operadores de HF, DX generalmente representa cualquier estación externa al territorio

nacional. En las bandas de VHF y UHF, sin embargo, DX puede significar estaciones ubicadas más allá de 80 o 160 km (50 o 100 millas), sobrepasando el horizonte radioeléctrico.

El DX incluso trasciende los límites terrestres: ¡existen radioaficionados que reflejan señales en la Luna para establecer contactos prácticamente intercontinentales en frecuencias de microondas!

Tras concretar algunos contactos DX, eventualmente podría interesar perseguir algún reconocimiento o distinción. Para validar los contactos establecidos puede intercambiar una QSL convencional impresa.

Aunque remitir la tarjeta directamente resulta expedito, y utilizar el sistema de bureaux QSL resulta económico, múltiples estaciones DX emplean los servicios de un QSL Manager, quien certifica los contactos y distribuye las tarjetas en representación de la estación DX.

Algunas DXpediciones también implementan sistemas digitales como el Online QSL Request System (OQRS, por sus siglas en inglés) (www.m0urx.com/oqrs), que adicionalmente aceptan contribuciones para solventar gastos.

VENTANAS DX Y "WATERING HOLES"

La actividad DX tiende a concentrarse predominantemente en los segmentos inferiores de las bandas, aglutinándose alrededor de frecuencias de llamada y ventanas DX.

Tabla 6. Ventanas de DX. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Banda	Frecuencia (MHz)
160 metros	1,830 – 1,835
80 metros	3,505
75 metros	3,795 – 3,800
40 metros	7,005 (CW)
20 metros	14,005 y 14,020 (CW)
20 metros	14,190 – 14,200 (Teléfonos)
15 metros	21,005 y 21,020 (CW)
15 metros	21,195 y 21,295 (Teléfonos)
10 metros	28,495 (Teléfonos)
6 metros	50,100 – 50,130
6 metros	50,125 (Frecuencia de llamada en EEUU)
2 metros	144,200

Una ventana DX constituye un segmento reducido del espectro radioeléctrico donde se establecen comunicaciones (QSOs) entre naciones o regiones continentales que potencialmente no comparten idénticas asignaciones espectrales o poseen espacios radioeléctricos para radioaficionados extremadamente restringidos.

A modo de ilustración, en la banda de 160 metros existían previamente múltiples distribuciones espectrales globalmente dispersas, originadas por interferencias con sistemas de radionavegación.

La franja comprendida entre 1830 y 1835 kHz representaba un estrecho corredor compartido por muchos países. Conforme tales interferencias se desvanecan y las asignaciones espectrales alcancen progresivamente una armonización mundial, simultáneamente se diluirá la necesidad de mantener una ventana DX específica.

3.3.3 Productividad en las Avalancha de Llamadas

Si se sintoniza y se monitorean diversos canales repitiendo constantemente sus indicativos de llamada, y se percibe un intervalo después de que una estación transmite su identificación y un reporte de señal, seguido por múltiples estaciones intentando establecer contacto, prácticamente se ha detectado una concentración de comunicaciones DX.

Prestar atención si algún operador menciona el indicativo de la estación DX durante un intercambio, por ejemplo:

- En fonía: "TI2XXX DE TI2YYY, se encuentra bien"
- En CW: " TI2XXX DE TI2YYY 5NN"

Primero es fundamental poder recibir claramente la señal de la estación DX antes de intentar contactarla. De lo contrario, únicamente se generará QRM (interferencia).

Si todas las estaciones se encuentran en una misma frecuencia o muy próximas entre sí, probablemente la estación DX está operando en modo simplex. Si las estaciones están dispersas varios kilohertzios, entonces presumiblemente la estación DX está trabajando en modo "Split".

Localizar a la estación DX unos kilohertzios por encima o por debajo, especialmente si transmite en una frecuencia fuera de la banda autorizada. Esta práctica separa las señales de los operadores que realizan llamadas de la estación DX, reduciendo interferencias y optimizando la eficiencia.

Observar a las estaciones que logran establecer comunicación. ¿Cuál es su método de operación? ¿Pertenece a su zona geográfica? ¿La estación DX permanece estática o se desplaza buscando contactos? Seguir ese patrón. En general, proporcionar el indicativo de llamada completo una o dos veces (utilizando fonética estándar en fonía), y posteriormente hacer una pausa para escuchar a la estación DX.

Hay que recordar que escuchar brevemente proporcionará grandes beneficios, si se está transmitiendo, no se puede estar recibiendo simultáneamente.

3.3.4 Propagación para DXing

El radioaficionado dedicado a establecer comunicaciones a larga distancia (DX) pronto comprende la veracidad del antiguo aforismo: "¡No puedes contactar con ellos si no puedes escucharlos!" Este principio hace que comprender la propagación resulte fundamental para lograr éxito en comunicaciones DX.

Durante los periodos de alta actividad de manchas solares, serán un intervalo caracterizado por transformaciones veloces en las condiciones de alta frecuencia, lo cual dirigirá la atención del radioaficionado que hace DX hacia rangos de frecuencias más elevadas.

No obstante, resulta trascendental entender las variaciones fundamentales de propagación a gran distancia que acontecen hora tras hora, diariamente y según la estación del año.

Es posible incrementar el disfrute operativo prestando atención meticulosa a las condiciones de la banda. Esto facilitará determinar cuándo modificar la frecuencia o explorar señales provenientes de distintas regiones geográficas. Tal consideración resulta particularmente relevante durante periodos de reducida actividad solar, puesto que las bandas de mayor frecuencia pueden inhabilitarse completamente después del ocaso, imposibilitando la recepción de estaciones DX.

Para obtener información sobre condiciones solares, se recomienda visitar:

- www.spaceweather.com
- www.swpc.noaa.gov/communities/radio-communications
- www.hfradio.org

El radioaficionado aprenderá rápidamente qué observar elementos conforme evolucionen las condiciones ionosféricas y solares, mediante la escucha de balizas activas globalmente, permitirá correlacionar expectativas con comportamientos efectivos.

La Red de Balizas Invertidas (www.reversebeacon.net) y plataformas como DX Maps (www.dxmaps.com) pueden ilustrar acontecimientos en tiempo real.

Se sugiere suscribirse a boletines de propagación y consultar columnas especializadas en revistas y sitios web. Complementariamente, se recomienda monitorear reportes de avistamientos DX internacionales para obtener una perspectiva integral de propagación en diversas áreas.

Emplear software de predicción de propagación es útil, más conviene recordar su naturaleza estadística, pudiendo las condiciones reales divergir significativamente de las proyecciones. Dichas herramientas computacionales resultan tan precisas como sus modelos de campo geomagnético terrestre, por consiguiente, podrían no anticipar aperturas excepcionales.

3.3.5 Estaciones remotas

Anteriormente constituían un recurso poco generalizado, pero la implementación de estaciones gestionadas mediante control remoto se ha transformado en una práctica habitual. Inclusive existen plataformas que pueden utilizarse mediante modalidad de suscripción. Aunque esta modalidad transforma fundamentalmente las condiciones de operación, particularmente en procesos de certificación y competencias, la utilización de una estación remota posibilita que múltiples radioaficionados sin capacidad de instalar un sistema eficiente en su domicilio puedan acceder (o mantenerse) en transmisión. Para la mayoría de las configuraciones remotas, el único requisito para su operación es disponer de conexión internet y un navegador web. Existen radioaficionados que incluso han operado durante vuelos comerciales.

La capacidad de gestionar una estación potencialmente ubicada en cualquier coordenada geográfica, mientras el operador puede encontrarse en una ubicación distante, implica consideraciones éticas y regulatorias adicionales. Es indispensable contar con habilitaciones para transmitir desde esa ubicación específica y obtener permiso para utilizar dicha estación.

Resulta obligatorio identificar las transmisiones según los protocolos operativos vigentes en la ubicación del transmisor, especialmente si difieren de aquellos aplicables en la zona donde se encuentra el operador.

3.4 Satélites de Radioaficionados

La configuración esférica del planeta Tierra y diversos condicionantes topográficos restringen las comunicaciones terrestres en VHF y UHF. La transmisión a grandes distancias en estos rangos espectrales podría demandar una potencia radiada efectiva (ERP, por sus siglas en inglés) superior, o incluso resultar completamente inviable. El radio de alcance de las estaciones de radioaficionados se amplía significativamente mediante el empleo de repetidores, transpondedores o sistemas de almacenamiento y retransmisión integrados en satélites que orbitan el globo terráqueo. Diversos satélites de radioaficionados operativos facilitan comunicaciones, complementados por el equipamiento de radioaficionado presente en la Estación Espacial Internacional (ISS, por sus siglas en inglés) y múltiples “CubeSats” (satélites pequeños) experimentales. La mayoría de estos dispositivos espaciales pueden ser accedidos o utilizados para retransmitir señales con equipamiento relativamente sencillo. (Información adicional sobre la utilización de satélites de radioaficionados disponible en www.amsat.org).

3.4.1 Comprendiendo las órbitas satelitales

Dos elementos fundamentales inciden sobre un cuerpo que se desplaza en trayectoria orbital alrededor del planeta Tierra: el desplazamiento progresivo (inercia) y la atracción gravitacional.

El movimiento progresivo tiende a mantener al cuerpo en trayectoria rectilínea, en la dirección instantánea de su desplazamiento. Si el cuerpo se ubica sobre la superficie terrestre, esa línea recta lo conduciría hacia el espacio exterior. La gravedad, por el contrario, atrae al cuerpo hacia el centro del planeta. Cuando la inercia y la gravitación se encuentran equilibradas, el objeto

describe una trayectoria estable alrededor de la tierra. Una órbita se conceptualiza como una revolución completa alrededor del planeta (período orbital).

Johannes Kepler fue pionero en la descripción matemática de la mecánica de las órbitas planetarias. Sus tres principios del movimiento planetario, denominados "Leyes de Kepler", también describen la órbita lunar y las trayectorias de satélites artificiales.

Las Leyes de Kepler pueden expresarse mediante fórmulas matemáticas, y si se conocen determinados parámetros orbitales (denominados elementos keplerianos), es posible calcular la posición de un satélite en cualquier momento temporal. Dichos elementos se encuentran disponibles en el portal web de AMSAT: www.amsat.org. Seguidamente se describen de manera general dichas Leyes.

- **Primera Ley de Kepler:** Todas las órbitas satelitales presentan una configuración elíptica, situándose el centro terrestre en uno de los focos de la elipse. La excentricidad de una órbita elíptica representa la relación entre la distancia desde el centro al foco y el semieje mayor. Si el foco coincide con el centro, la excentricidad es 0 y la órbita resulta circular. Cuanto mayor sea la excentricidad, más "aplanada" resultará la elipse. Este parámetro oscila entre 0 y 1.

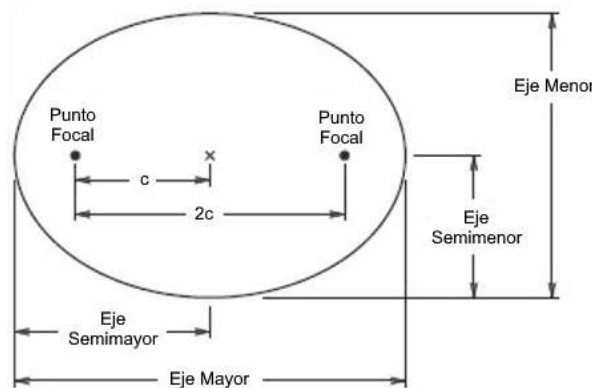


Figura 12. Geometría de una elipse. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

- **Segunda Ley de Kepler:** Un satélite se mueve más rápido cuando está más cerca de la Tierra y más lento cuando está más lejos. Esto se ilustra comparando dos áreas iguales (AOB y A'OB') en distintos tramos de la órbita: el tiempo que le toma al satélite cubrir ambos sectores es el mismo.

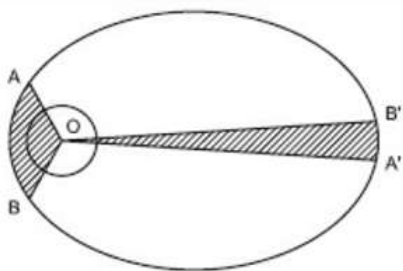


Figura 13. Representación de la segunda y tercer Ley de Kepler. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

- **Tercera Ley de Kepler:** Cuanto más lejos esté un satélite de la Tierra, más tiempo tardará en completar una órbita. Los satélites de órbita baja y la ISS tienen órbitas casi circulares con períodos de alrededor de 90 minutos. Por otro lado, satélites como el AO-40, con órbitas elípticas y altas, pueden tardar más de 19 horas. Si una órbita es suficientemente alta y circular, el satélite puede ser geosincrónico, con un período igual al de rotación de la Tierra. Si además la órbita está sobre el ecuador, el satélite parecerá permanecer en la misma posición en el cielo. Este tipo especial de órbita se llama geoestacionaria.

3.4.2 Definiciones Orbitales

- Inclinação: es el ángulo entre el plano de la órbita y el plano del ecuador terrestre.
 - Una inclinación de 0° significa que el satélite siempre está sobre el ecuador.
 - Una inclinación de 90° indica una órbita polar.
 - La inclinación se mide en el nodo ascendente, cuando el satélite cruza el ecuador de sur a norte.

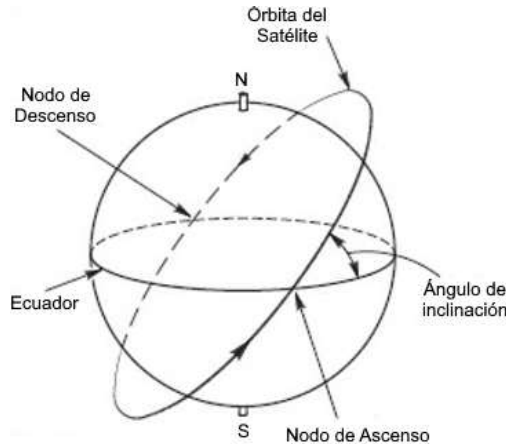


Figura 14. Órbita de un satélite. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

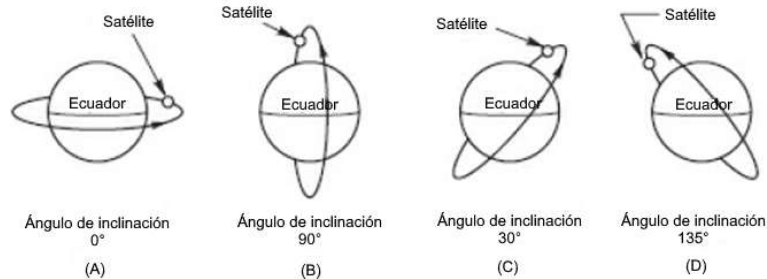


Figura 15. inclinación de la órbita de un satélite. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

- Nodo: punto donde la órbita cruza el ecuador.
 - Nodo ascendente: de sur a norte.
 - Nodo descendente: de norte a sur.
 - Es común describir los pasos del satélite como ascendentes (cuando viaja de sur a norte sobre tu ubicación) o descendentes (de norte a sur).
- EQX (cruce ecuatorial): normalmente se expresa en hora UTC del cruce y en grados de longitud oeste.
- Apogeo: punto más alejado de la Tierra en la órbita del satélite.
- Perigeo: punto más cercano.
 - La mitad de la distancia entre ambos equivale al semieje mayor.

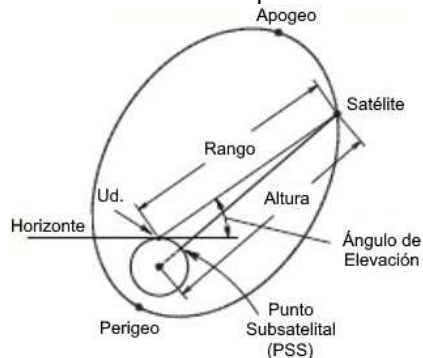


Figura 16. Diferencia entre el perigeo y apogeo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

3.4.3 Rotación de Faraday y modulación por giro

La orientación de la onda radioeléctrica que atraviesa la ionosfera experimenta transformaciones dinámicas. Una transmisión que se origina desde el satélite con polarización horizontal no conservará idéntica configuración al arribar a la estación receptora. La señal experimentará aparentes modificaciones en su polarización, fenómeno denominado rotación de Faraday, provocado por la interacción con la ionosfera.

El método más eficiente para contrarrestar este efecto consiste en emplear antenas de polarización circular tanto en transmisión como en la recepción.

Los artefactos espaciales frecuentemente logran su estabilización mediante un movimiento giratorio similar a un giroscopio alrededor de un eje específico. Esta estrategia contribuye a mantener su orientación durante la trayectoria orbital. Cuando el eje de rotación no apunta directamente hacia la estación terrestre, pueden manifestarse variaciones en la amplitud o alteraciones de polarización derivadas del movimiento rotacional del satélite, proceso conocido como modulación por giro.

La utilización de antenas lineales (polarización horizontal o vertical) puede provocar que estas pérdidas por modulación resulten más perceptibles e incluso problemáticas. Las antenas de polarización circular minimizan simultáneamente la rotación de Faraday y la modulación por giro.

3.4.4 Operación de satélites

Entre los diversos componentes de un sistema satelital, como baterías, paneles solares y controladores, los más relevantes para el radioaficionado que pretende utilizar el ingenio espacial (proyectos espaciales y satelitales realizados por radioaficionados) son los elementos radioeléctricos. Los satélites pueden incorporar tres modalidades diferentes de equipamiento radioeléctrico: repetidores, transpondedores y sistemas de almacenamiento y reenvío.

- **Repetidores**

Un repetidor instalado en un satélite opera de manera análoga a un repetidor terrestre. Capta señales de voz en modulación de frecuencia en un canal específico y retransmite el contenido recibido en un canal alternativo. Los repetidores satelitales típicamente funcionan con frecuencias de entrada y salida en bandas diferenciadas (denominados repetidores cruzados) para prescindir de las voluminosas cavidades resonantes requeridas para operar en una única banda. Acceder a un repetidor satelital resulta equivalente a utilizar uno terrestre. Algunos satélites incluso permiten emplear transceptores portátiles de baja potencia y antenas direccionales reducidas para establecer comunicaciones. (Se recomienda consultar el sitio web de AMSAT para obtener información actualizada sobre su estado operativo).

- **Transpondedores**

Convencionalmente, el término transpondedor designa cualquier traductor lineal integrado en un satélite. A diferencia de un repetidor, el transpondedor dispone de un ancho de banda receptivo que abarca suficiente espectro para múltiples canales. Un transpondedor de radioaficionados no segmenta canales como los repetidores de voz. Las señales captadas en un segmento completo de banda se amplifican, se reconfiguran a un nuevo rango de frecuencia mediante un mezclador y se retransmiten (Figura 17).

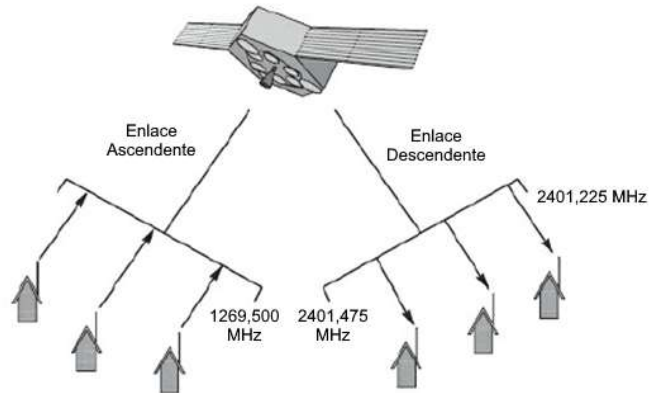


Figura 17. Representación del transpondedor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La distinción fundamental de arquitectura entre un repetidor y un transpondedor radica en el mecanismo de detección de señales. Mientras que un repetidor transforma la señal recibida en audio para su retransmisión, un transpondedor convierte las señales dentro del espectro a una frecuencia intermedia (FI) para amplificarlas y retransmitirlas.

Desde una perspectiva operacional, la diferencia resulta significativamente más pronunciada. Un repetidor de voz en FM constituye un dispositivo con un único modo de entrada y salida. En contraste, un transpondedor posee capacidad para receptor múltiples señales simultáneamente y convertirlas a un nuevo intervalo de frecuencia. Adicionalmente, puede conceptualizarse como un repetidor multimodo, capaz de retransmitir cualquier modo que reciba.

Un mismo transpondedor tiene la capacidad de gestionar señales en SSB y CW de manera concurrente.

Un transpondedor lineal inversor implementa una inversión de las señales de subida antes de su retransmisión en bajada. Este proceso se ejecuta utilizando los productos de diferencia del mezclador en lugar de los de suma. Dicho de otro modo, si la transmisión al satélite se realiza en el segmento inferior del ancho de banda de subida, la señal aparecerá invertida en el segmento superior del ancho de banda de bajada. Consecuentemente, una señal de subida en banda lateral superior (USB, por sus siglas en inglés) generará una señal de bajada en banda lateral inferior (LSB, por sus siglas en inglés). Aunque este fenómeno pueda parecer complejo, presenta una ventaja: compensa los efectos del desplazamiento Doppler en las señales transmitidas y recibidas. Un incremento en la frecuencia de subida provoca una disminución proporcional en la frecuencia de bajada.

La utilización de un transpondedor en lugar de un repetidor con canales permite una mayor concurrencia de estaciones utilizando el satélite simultáneamente. De hecho, el número de estaciones diferentes que pueden emplear un transpondedor únicamente está limitado por la interferencia mutua y la distribución de la potencia de salida del satélite. En satélites de órbita terrestre baja LEO, la potencia de salida ronda un par de watts. Para satélites de órbita superior y múltiples bandas, la salida de los transpondedores varía desde aproximadamente 50 watts en las bandas de 2.4 y 10 GHz, hasta alrededor de 1 watt en la banda de 24 GHz. Dado que todos los usuarios comparten la potencia de salida, los modos de portadora continua como FM y RTTY generalmente se evitan en satélites de radioaficionados, debiendo todos los usuarios limitar su ERP para permitir el máximo aprovechamiento del transpondedor.

- **Dispositivos de transmisión y recepción por radio paquetes (PACSATs, por sus siglas en inglés)**

Los PACSATs representan una innovadora fusión entre tecnología satelital y comunicación por paquetes. Estos diminutos artefactos orbitales operan como sistemas de repositorio y distribución de mensajes. Un centro de control terrestre puede transmitir una comunicación a través de un

PACSAT mediante su carga al satélite, permitiendo que otra estación receptora descargue dicha información cuando el ingenio espacial resulte visible.

El mecanismo de almacenamiento y retransmisión más empleado corresponde al sistema implementado en la Estación Espacial Internacional. Otros "CubeSats" de corta duración suelen proporcionar capacidades digitales experimentales temporales. (Consulte el estado de satélites en www.amsat.org para información adicional).

3.4.5 Frecuencias de operación de satélites

Los sistemas satelitales capaces de realizar comunicaciones bidireccionales generalmente emplean una banda de radioaficionados para la señal ascendente (uplink) y otra para la descendente (downlink). Los satélites de radioaficionados utilizan diversas bandas de transmisión, abarcando desde HF hasta microondas. Al describir los transpondedores satelitales, inicialmente se especifica la banda de entrada, seguida de la banda de salida. Ejemplificando, un transpondedor de 2 metros / 70 cm presentaría una banda de entrada centrada aproximadamente en 145 MHz y una banda de salida próxima a 435 MHz.

Los transpondedores habitualmente se identifican por su modo, mas no por el método de transmisión como SSB, CW o RTTY. En este contexto, "modo" posee un significado sustancialmente diferente. El modo operativo de un satélite identifica las bandas de frecuencia de transmisión y recepción que está utilizando.

Los modos operativos satelitales se representan mediante caracteres alfabéticos que corresponden a los intervalos de frecuencia de las bandas ascendente y descendente. Ilustrativamente, el carácter V designa una transmisión o recepción en banda de 2 metros, mientras que U representa una señal en banda de 70 cm. Consecuentemente, un satélite que opera con señal ascendente en 70 cm y descendente en 2 metros se clasifica en "Modo U/V". (Recuérdese que la banda de subida siempre se consigna como primer carácter).

La siguiente tabla detalla los diversos modos operativos satelitales según sus bandas de frecuencia y sus designaciones alfabéticas.

Tabla 7. Modos de operación de satélites. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Banda de Frecuencia	Designación por Letra
HF (15 y 10 metros)	H
VHF (2 metros)	V
UHF (70 cm)	U
UHF (23 cm)	L
UHF (13 cm)	S
UHF (5 cm)	C
UHF (3 cm)	X
UHF (1,5 cm)	K
Ejemplos de operación Rx / Tx	Rango de operación
Modo U/V	435 - 436 MHz / 144 - 146 MHz
Modo V/U	144 - 146 MHz / 435 - 438 MHz
Modo L/U	1,26 - 1,27 GHz / 435 - 438 MHz
Modo V/H	144 - 146 MHz / 21 - 30 MHz
Modo H/S	21 - 30 MHz / 2,40 - 2,45 GHz
Modo L/S	1,26 - 1,27 GHz / 2,40 - 2,45 GHz
Modo L/X	1,26 - 1,27 GHz / 10,45 GHz
Modo C/X	5,8 GHz / 10,45 GHz

Un satélite de radioaficionados puede operar en varios de estos modos, a veces simultáneamente. Algunos satélites de comunicaciones más versátiles pueden usar distintas combinaciones de bandas en diferentes momentos.

Capítulo 4 Electricidad, componentes y circuitos

4.1 Electricidad

4.1.1 Corriente y Tensión

La corriente eléctrica (simbolizada en ecuaciones mediante I o i) constituye el desplazamiento de electrones. Estos son partículas subatómicas con carga negativa. La unidad de medición de la corriente se establece en amperios, abreviándose como "A" o amps. La corriente se cuantifica siempre como el tránsito a través de un elemento conductor, como un cable o un componente electrónico. Para determinar su magnitud se emplea un amperímetro.

La tensión (representada en ecuaciones por V o v) corresponde a la fuerza electromotriz o potencial eléctrico que provoca el movimiento de electrones. Estos se desplazan en la dirección donde existe una diferencia positiva de tensión. La polaridad hace referencia a la convención que determina qué valores de tensión son positivos o negativos. Su unidad de medición es el voltio, abreviado como V (ocasionalmente v o V se utilizan en ecuaciones como símbolo de tensión). La medición de la tensión se realiza mediante un voltímetro. Siempre se mide entre dos puntos o con respecto a una referencia de tensión. Cuando la superficie terrestre se emplea como referencia, se denomina tensión de tierra, potencial de tierra o simplemente tierra.

4.1.2 Corriente Directa y Alterna

La corriente eléctrica adopta diferentes configuraciones según el movimiento de los electrones. La corriente que fluye constantemente en una única dirección se denomina corriente directa, abreviada como CD. Por otro lado, la corriente que invierte periódicamente su sentido de circulación se conoce como corriente alterna, abreviada como CA. La Figura 18 ilustra la diferencia entre CD y CA.

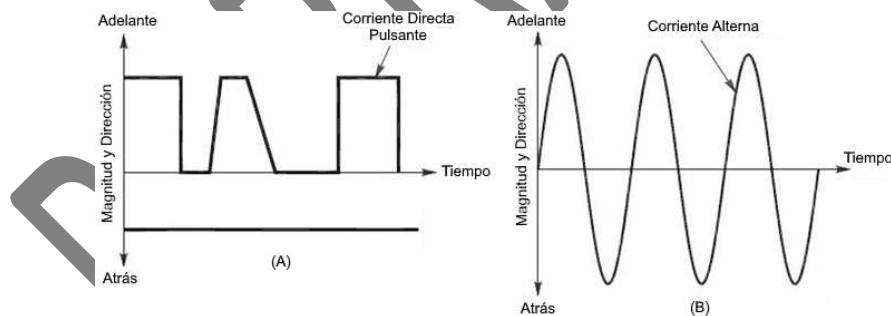


Figura 18. Diferencia entre CD y CA. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Así como en un circuito continuo, la tensión mantiene idéntica polaridad (una dirección constante de tensión positiva a negativa) de manera permanente, se denomina tensión CD. La tensión que periódicamente invierte su polaridad se denomina tensión CA. Los dispositivos de almacenamiento electroquímico como baterías y celdas fotovoltaicas representan una fuente primaria de tensión y corriente CD. El suministro energético de una vivienda es proporcionado por una empresa distribuidora eléctrica mediante tensión y corriente CA. La frecuencia de la energía eléctrica suministrada oscila entre 50 o 60 Hz, mientras que las señales radioeléctricas utilizadas por radioaficionados presentan frecuencias en rangos de MHz o GHz.

4.1.3 Circuitos

Un circuito es cualquier ruta por el cual la corriente puede fluir. Los circuitos eléctricos están hechos de componentes y de las conexiones entre ellos. La Figura 19 muestra la diferencia entre circuitos en serie y paralelos:

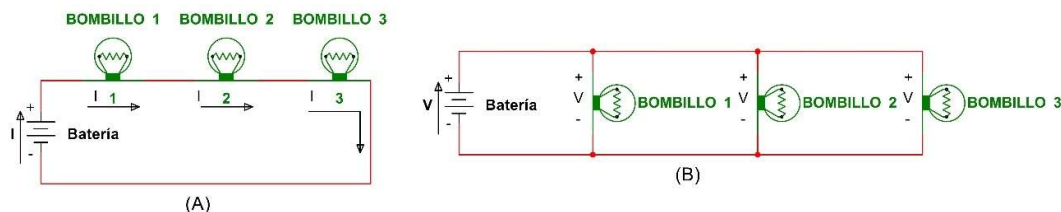


Figura 19. Circuito serie (A) y paralelo (B). (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Si dos o más elementos, como luminarias, se interconectan en un trayecto eléctrico de manera que la corriente idéntica deba atravesar cada uno de ellos, se denomina circuito en serie. Cuando dos o más componentes se disponen de tal forma que la tensión resulta uniforme en todos ellos, se clasifica como circuito en paralelo. Un cortocircuito representa una conexión directa, generalmente accidental, entre dos puntos dentro de un sistema eléctrico. Un circuito interrumpido ocurre cuando se fragmenta la trayectoria de la corriente en el sistema.

En la conexión de dos elementos dentro de un circuito en serie, según la representación gráfica de la figura anterior, se observa que la corriente permanece constante, o sea que el flujo eléctrico es idéntico en cada componente. Si los elementos se disponen en configuración paralela, la corriente se distribuye entre ellos. La magnitud del flujo eléctrico que transita por cada componente depende de sus propiedades intrínsecas o valor característico.

Cuando los componentes se integran en paralelo con una fuente de tensión como una batería como en la Figura 19 (B), la tensión en cada elemento resulta equivalente a la de la fuente original. En una configuración serie con una fuente de tensión como en la Figura 19 (A), el potencial se fracciona entre los componentes, condicionado por su naturaleza y valor específico.

Como se ilustra en la representación gráfica, los voltímetros se conectan en paralelo o a través de un componente o sistema para cuantificar la tensión. Los amperímetros se disponen en serie con un elemento o circuito para medir la corriente.

4.1.4 Resistencia y la Ley de Ohm

Todos los materiales presentan una oposición al desplazamiento de electrones. Esta propiedad se denomina resistencia y se simboliza mediante R . La resistencia se cuantifica en ohmios, representados por la letra griega omega (Ω). Su medición se realiza por medio de un ohmímetro.

Los materiales en los cuales los electrones pueden circular con facilidad ante una tensión aplicada se consideran conductores. Elementos metálicos como el cobre resultan excelentes conductores. En contraste, los materiales que obstaculizan o impiden la circulación electrónica son aisladores, entre los que se encuentran el vidrio, las cerámicas, la madera seca, el papel, la mayoría de los plásticos y otros materiales no metálicos.

La Ley de Ohm establece que la corriente que atraviesa un material mantiene una relación directamente proporcional con la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del material. Cuanto más elevada sea la resistencia de un material, menor será la corriente que lo atravesará en respuesta a una tensión determinada.

Como expresión matemática, la Ley de Ohm se representa mediante $I = V / R$. Si se conoce el valor de I , V o R , es posible determinar la magnitud faltante mediante cálculos específicos.

$$I = \frac{V}{R} \quad V = I * R \quad R = \frac{V}{I}$$

4.1.5 Potencia

Potencia, simbolizada mediante P , representa la velocidad de consumo de energía eléctrica. Un elemento que consume o dispersa potencia, como puede ser un horno o un motor, es

comúnmente denominado carga. La potencia se cuantifica en watts, abreviado como W. En un circuito CD, la potencia se determina mediante el producto resultante de la tensión y la corriente (en circuitos CA, se requieren consideraciones adicionales para su cálculo).

Siguiendo el principio de la Ley de Ohm, cuando se conocen dos de las magnitudes P, V o I, es posible establecer el valor faltante según se ilustra a continuación:

$$P = V * I \quad V = \frac{P}{I} \quad I = \frac{P}{V}$$

$V = \frac{P}{I}$ Sustituyendo los equivalentes de la Ley de Ohm por tensión ($V = I * R$) y corriente ($I = V / R$) permite que la potencia sea calculada utilizando la resistencia:

$$P = I^2 * R \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Para encontrar cuántos watts de potencia eléctrica son usados si 400 V son suministrados a una resistencia de 800 Ω :

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{400 * 400}{800} = \frac{160000}{800} = 200 \text{ W}$$

Para encontrar cuantos watts de potencia eléctrica son usados por un bombillo de 12 V que consume 0,2 A:

$$P = V * R = 12 * 0,2 = 2,4 \text{ W}$$

Para encontrar cuantos watts están siendo disipados cuando una corriente de 7 mA fluye a través de una resistencia de 1,25 k Ω :

$$P = I^2 * R = 0,007 * 0,007 * 1250 = 0,06125 \text{ W} = 61,25 \text{ mW}$$

4.1.6 Frecuencia

Una secuencia completa de CA que transcurre se interrumpe, cambia su dirección y se detiene nuevamente se denomina ciclo. La cantidad de ciclos por unidad temporal es la frecuencia (f) de la corriente, cuantificada en hertz (Hz).

4.1.7 Longitud de onda

Tal como se indicó, la velocidad de la luz en el espacio y el aire se sitúa en aproximadamente trescientos millones ($3 * 10^8$) metros por segundo, manifestándose ligeramente reducida en conductores metálicos y cables. La longitud de onda (λ) de una onda radiofónica representa la distancia recorrida durante un ciclo completo.

La propagación de una onda electromagnética en el espectro radioeléctrico puede caracterizarse mediante dos parámetros fundamentales: su longitud de onda o su frecuencia, considerando que la velocidad de propagación lumínica permanece constante.

4.1.8 Decibeles

Es la forma estándar para referirse a las relaciones de potencia o voltaje. La fórmula para calcular los decibeles es:

$$dB = 10 * \log_{10}(Potencia) = 20 * \log_{10}(Tension)$$

Si se está comparando una medición de potencia o voltaje (P_M ó V_M) con una referencia de potencia (P_{REF} o V_{REF}) la fórmula es:

$$dB = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_M}{P_{REF}}\right) = 20 * \log_{10}\left(\frac{V_M}{V_{REF}}\right)$$

Los valores positivos en decibelios (dB) representan una proporción superior a la unidad, mientras que los valores negativos señalan una proporción inferior a 1. Las relaciones mayores que 1 reciben la denominación de ganancia, y aquellas menores que 1 se identifican como pérdida o atenuación. Es importante precisar que la pérdida y la atenuación generalmente se expresan mediante valores positivos en dB (por ejemplo, una pérdida de 10 dB o un atenuador

de 6 dB), entendiéndose implícitamente que la proporción es menor a 1 y el valor calculado del cambio en dB resultará negativo.

A modo de ejemplo, si un amplificador transforma una señal de 5 W en otra de 25 W, la ganancia se determina como:

$$dB = 10 * \log_{10} \left(\frac{25}{5} \right) = 10 * \log_{10}(5) = 10 * 0,7 = 7 \text{ dB}$$

Por otro lado, si al ajustar el control de volumen de un receptor se reduce la tensión de la señal de salida de audio de 2 v a 0,1 v, se experimenta un cambio de:

$$dB = 20 * \log_{10} \left(\frac{0,1}{2} \right) = 20 * \log_{10}(0,05) = 20 * -1,3 = -26 \text{ dB}$$

4.2 Componentes y Unidades

Cada componente en un circuito eléctrico realiza una o más funciones tales como: almacenar o usar energía, rotar la corriente o amplificar una señal entre otras.

4.2.1 Componentes básicos

Los tres componentes electrónicos más fundamentales son: resistencias, capacitores e inductores (bobinas). Estos elementos poseen unidades de medición propias y generan distintos efectos sobre la tensión y la corriente.

Resistencias presentan un valor de resistencia especificado en ohms (Ω), kilohms (k Ω) o megohms (M Ω). El propósito de una resistencia consiste en obstaculizar el desplazamiento de la corriente eléctrica en un circuito de CA o CD, de manera similar a cómo una válvula restringe el flujo en una tubería hidráulica. La corriente eléctrica que atraviesa una resistencia experimenta una pérdida parcial de su energía en forma de calor, por consiguiente, las resistencias también disipan energía, actuando como un freno eléctrico.

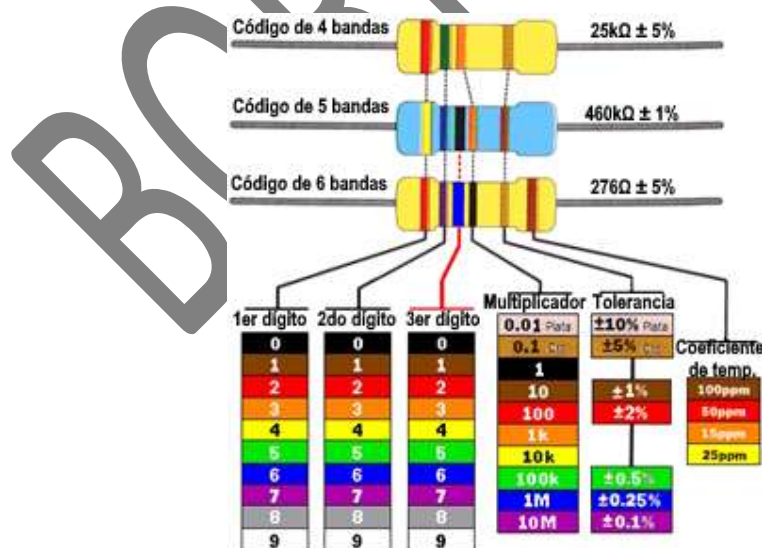


Figura 20. Código de colores de las resistencias. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

Los capacitores retienen energía eléctrica dentro de un campo electromagnético generado por la tensión existente entre dos superficies conductoras o terminales eléctricas, separadas por un material aislante denominado dieléctrico. El proceso de almacenamiento energético de esta naturaleza recibe el nombre de capacitancia, cuya unidad de medición corresponde a faradio (F).

En los circuitos radiofónicos, los capacitores presentan valores cuantificados en picofaradio (Pf), nanofaradio (Nf) y microfaradio (μF). Típicamente, en la mayoría de estos dispositivos electrónicos, los electrones y el material dieléctrico permanecen completamente confinados dentro de un revestimiento protector.

Los dispositivos inductores almacenan energía potencial en un campo electromagnético generado por la circulación de corriente eléctrica a través de un conductor metálico. Este fenómeno se denomina inductancia y se cuantifica en unidades de henrio (H). Los componentes inductivos presentan valores medibles en escalas de nanohenrio (nH), microhenrio (μH) y milihenrio (mH).

Los inductores se construyen mediante un conductor enrollado en forma de bobina, frecuentemente dispuesto alrededor de un núcleo fabricado con material ferromagnético que permite concentrar y potenciar la energía magnética generada.

Estos tres tipos de elementos fundamentales se encuentran disponibles como modelos adaptables o modificables. Una resistencia ajustable también recibe la denominación de potenciómetro o pot debido a que es comúnmente empleado para regular la tensión o el potencial, tal como sucede con el control de volumen.

4.2.2 Transformadores

Los transformadores transfieren corriente alterna (CA) entre dos o más inductores que comparten un núcleo común. Los inductores reciben la denominación de bobinas. El bobinado al cual se suministra la energía se denomina bobinado primario, mientras que el bobinado desde el cual se proporciona la energía se conoce como bobinado secundario.

Cuando se aplica tensión al bobinado primario, la inductancia mutua genera la aparición de tensión en el bobinado secundario. Los transformadores operan de manera igualmente eficaz en ambas direcciones, por lo que la asignación de bobinado primario y secundario se fundamenta en consideraciones de construcción y seguridad.

Los transformadores pueden convertir la potencia de una combinación de tensión y corriente alterna (CA) a otra mediante bobinados con diferente número de vueltas. Esta transformación ocurre debido a que todos los bobinados comparten idéntico campo magnético al estar bobinados en el mismo núcleo. Si la energía en todos los bobinados es equivalente, pero presentan diferente número de vueltas, la corriente en cada bobinado debe variar para garantizar que la potencia total que ingresa y sale del transformador sea constante, independientemente de la carga aplicada a los bobinados secundarios. Una modificación significativa entre la tensión primaria y secundaria generalmente requiere una alteración en el calibre del cable entre los bobinados. Por ejemplo, en un transformador elevador, el bobinado primario transporta mayor corriente y está bobinado con un cable de diámetro superior al secundario.

La relación entre el número de vueltas del bobinado primario (N_P) y el número de vueltas del bobinado secundario (N_S) determina cómo el transformador modifica la corriente y la tensión. La mayoría de los circuitos electrónicos se concentran principalmente en la tensión, por lo que, las ecuaciones de transformador más comunes son aquellas que relacionan la tensión de entrada (o primaria) del transformador (E_P) con la tensión de salida (o secundaria) (E_S), tal como se muestra a continuación:

$$\frac{E_S}{E_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad \text{o} \quad E_S = E_P \cdot \frac{N_S}{N_P}$$

4.2.3 Componentes en circuitos serie y paralelo

Repasando 2 reglas fundamentales de circuitos en la Figura 21:

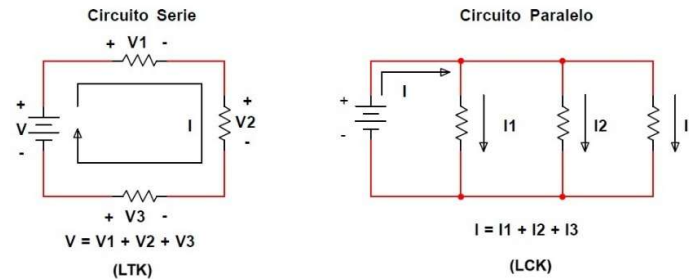


Figura 21. Circuitos series y paralelos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

- Los voltajes se suman en un circuito en serie
- Las corrientes se suman en un circuito paralelo

Empleando una comparación entre la electricidad, la presión y el flujo hídrico, si un dispositivo de bombeo proporciona presión a un sistema hidráulico cerrado, las disminuciones de presión en el sistema deben acumularse para equiparar la presión suministrada por el mecanismo de bombeo. No puede existir presión "reservada" ni "excedente". Sea que la tensión se aplique mediante una batería, una fuente de alimentación o un tomacorriente, en un circuito en serie, las tensiones de los diversos componentes deben adicionarse para ser equivalentes a la tensión aplicada al circuito. Esta es la Ley de Tensiones de Kirchoff (LTK).

Los circuitos en paralelo también presentan una analogía como el agua. Cuando se conectan múltiples conductos, el total de los flujos hídricos que ingresan a la unión debe ser idéntico a la suma de los flujos que emergen de ella. En otros términos, la totalidad de los flujos que entran y salen de la unión debe ser igual a cero. El líquido que ingresa debe corresponder exactamente al líquido que sale. La corriente eléctrica opera de manera similar, la corriente total que penetra en la unión de un circuito debe equipararse a la suma de las corrientes que se desprenden de ella. Esta es la Ley de Corriente de Kirchoff (LCK).

Los componentes conectados en serie o en paralelo pueden reemplazarse por un único componente equivalente. Las normas para determinar el valor del componente equivalente se resumen en la Tabla 8 y Tabla 9, y se representan gráficamente en la Figura 22. Únicamente es necesario recordar dos fórmulas: una adición simple (sumar los valores) y el "recíproco de recíprocos", según se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Cálculos equivalentes de valores en serie y paralelo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Componente	Cálculo en Serie
Resistor	$R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$
Inductor	$L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$
Capacitor	$1/(1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots + 1/C_n)$
Componente	Cálculo en Paralelo
Resistor	$1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n)$
Inductor	$1/(1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots + 1/L_n)$
Capacitor	$C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$

Tabla 9. Efecto en el resultado final en componentes serie y paralelo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Componente	Agregar en Serie	Agregar en Paralelo
Resistor	Aumenta	Disminuye
Inductor	Aumenta	Disminuye
Capacitor	Disminuye	Aumenta

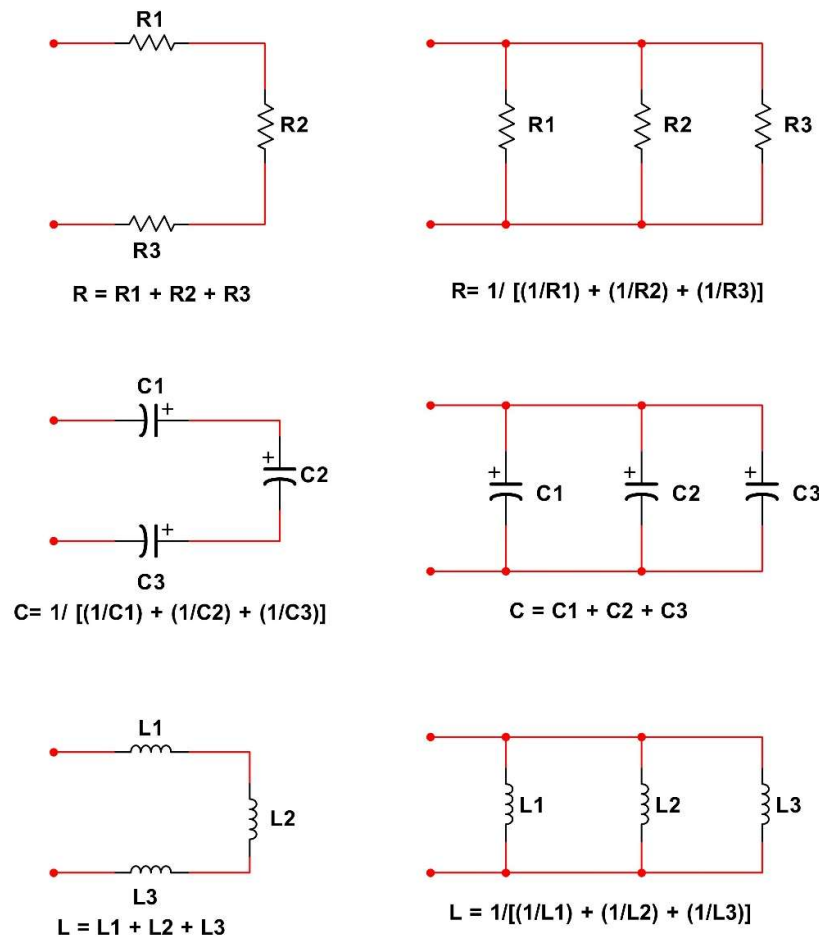


Figura 22. Combinación de circuitos series y paralelos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

4.2.4 Reactancia e Impedancia

En una resistencia, las tensiones y corrientes en CA están completamente sincronizadas o en fase. Cuando la tensión se incrementa, la corriente experimenta un aumento idéntico, y de manera recíproca. En los capacitores e inductores, la interrelación entre tensión y corriente CA experimenta una modificación tal que surge un desplazamiento temporal entre las variaciones de ambos elementos durante los procesos de almacenamiento y liberación energética. Esta circunstancia implica que la tensión y la corriente presentan una diferencia de fase.

En un capacitor, las modificaciones de corriente acontecen ligeramente antes, o se anticipan, a las alteraciones de tensión, debido a que la función de amortiguamiento del capacitor actúa contrarrestando las variaciones de tensión. En un inductor, las variaciones sobre la CA se postergan sutilmente con respecto a las modificaciones en la tensión, ya que el inductor se opone a las variaciones de corriente.

El resultado de la oposición al flujo de corriente CA se denomina reactancia y se simboliza como X. La reactancia se cuantifica en ohmios (Ω), de manera análoga a la resistencia. La reactancia correspondiente a un capacitor recibe el nombre de reactancia capacitiva, mientras que la de un inductor se conoce como reactancia inductiva. El valor de la reactancia de los componentes depende directamente de la magnitud de capacitancia e inductancia, así como de la frecuencia de la corriente CA.

La combinación de resistencia y reactancia se denomina impedancia, representada por Z, también medida en ohmios (Ω). La mayoría de los circuitos de radio contienen resistencia y

reactancia, por lo que la impedancia se utiliza frecuentemente como término genérico para indicar la oposición del circuito al tránsito de corriente CA.

4.2.5 Resonancia

En un circuito, cuando la reactancia capacitiva e inductiva alcanzan un punto específico de frecuencia, ambas magnitudes reactivas se equiparan y mutuamente se neutralizan, fenómeno denominado resonancia. El punto de frecuencia donde acontece este equilibrio se identifica como frecuencia de resonancia.

Los arreglos electrónicos que integran capacitores y bobinas reciben la denominación de circuitos resonantes o circuitos sintonizados. Mediante la implementación de capacitores o inductores con características de variabilidad, se logra modificar dinámicamente la frecuencia de resonancia, proceso conocido técnicamente como sintonización del circuito. Un circuito sintonizado opera funcionalmente como un dispositivo de filtrado, permitiendo la transmisión o interceptación de señales según su frecuencia característica. Los circuitos sintonizados resultan fundamentales en sistemas radiofónicos porque posibilitan la generación, transmisión o bloqueo selectivo de señales basándose en su espectro frecuencial.

4.2.6 Diodos y transistores

Ciertos materiales presentan una conductividad eléctrica inferior a los metales tradicionales, sin embargo, tampoco funcionan como aislantes puros. Estos materiales reciben la denominación de semiconductores. Algunos semiconductores, como el silicio, poseen una propiedad particularmente interesante: mediante la adición controlada de impurezas, proceso conocido como dopaje, pueden modificar su capacidad de conducción eléctrica. Dichas impurezas generan materiales clasificados como Tipo-N o Tipo-P, dependiendo de las características químicas específicas de los elementos añadidos.

Cuando un material Tipo-N y un material Tipo-P entran en contacto directo, se produce una unión PN que exhibe una conductividad direccional asimétrica. Esta característica y otras propiedades análogas son aprovechadas para la fabricación de diversos componentes electrónicos, generalmente denominados semiconductores.

Un dispositivo semiconductor que únicamente permite la circulación de corriente en una dirección se denomina diodo. Los diodos de aplicación intensiva son aquellos capaces de soportar elevadas magnitudes de tensión y corriente, conocidos como rectificadores. Cuando se aplica una tensión de corriente alterna a un diodo, el resultado es un pulso de corriente directa debido a que la corriente queda bloqueada cuando la tensión intenta desplazar los electrones en la dirección no permitida. Un diodo posee dos terminales electrónicas: un ánodo y un cátodo, generalmente, el cátodo se identifica mediante una línea marcada en el componente.

Un tipo especial de diodo, el diodo emisor de luz o LED, produce luminosidad cuando la corriente lo atraviesa. La composición material del LED determina la tonalidad de la luz emitida. Los LEDs se emplean principalmente como elementos de señalización visual. Se prefieren frente a lámparas incandescentes o bombillas por su reducido tamaño y menor consumo energético.

Los transistores son componentes fabricados con patrones de capas N o P, pudiendo presentar tres capas de material semiconductor. Los electrodos del transistor constituyen contactos realizados en una sección específica del patrón. Estos dispositivos utilizan tensiones y corrientes reducidas para gestionar valores de tensión y corriente más elevados. Mediante un circuito externo apropiado y una fuente de alimentación, los transistores pueden amplificar o conmutar tensiones y corrientes. La utilización de señales pequeñas para controlar o potenciar señales de mayor magnitud se denomina ganancia.

Existen dos tipologías habituales de transistores: transistores de unión bipolar (BJT, por sus siglas en inglés) y transistores de efecto de campo (FET, por sus siglas en inglés). Los transistores de potencia de RF se implementan como componente principal generador de ganancia en amplificadores de potencia de radiofrecuencia.

4.2.7 Componentes de protección

Componentes de protección tales como fusibles y disyuntores son usados para prevenir daños en los equipos o riesgos de seguridad como incendios o descargas eléctricas.

Los fusibles se categorizan según la intensidad máxima de corriente que pueden transportar sin experimentar su fusión. Interrumpen las sobrecargas eléctricas mediante la fundición de un segmento metálico corto. Cuando el elemento metálico se funde, se produce la interrupción del flujo eléctrico y se desconecta la alimentación de los circuitos protegidos por dicho fusible.

Al sustituir un fusible o disyuntor, es imperativo emplear uno con idéntica corriente nominal para prevenir riesgos de seguridad. Implementar uno con superior corriente nominal, incluso de manera temporal, podría ocasionar que el desperfecto dañe permanentemente el equipamiento o genere un siniestro. No se recomienda utilizar un dispositivo con mayor corriente nominal, ni siquiera provisionalmente.

Los "fusibles de acción lenta" pueden tolerar sobrecargas transitorias, pero se fundirán si la sobrecarga persiste. Los fusibles carecen de posibilidad de reutilización.

Los disyuntores funcionan de manera similar a los fusibles, activándose cuando se produce una sobrecarga de corriente. Al dispararse, se abre o interrumpe el circuito. A diferencia de los fusibles, los disyuntores permiten su reactivación una vez eliminada la sobrecarga eléctrica, cerrando el circuito y permitiendo nuevamente el flujo de corriente.

Empleado en cableado de alimentación de CA, el interruptor de circuito por falla a tierra (GFCI, por sus siglas en inglés), se activa si se detecta un desequilibrio en las corrientes transportadas por los conductores de fase y neutro. Los desequilibrios de corriente revelan la existencia de un riesgo potencial de descarga eléctrica.

Los protectores contra sobretensiones neutralizan las oscilaciones temporales de tensión por encima de los niveles estándar mediante la transformación del exceso de energía transitoria en calor. Estos dispositivos de protección eléctrica se integran a los circuitos de alimentación de corriente alterna (CA) en una resistencia, frecuentemente en regletas de enchufes, así como en las líneas telefónicas. Los pararrayos desempeñan una función equivalente en el sistema de alimentación de una antena. Estos elementos están concebidos para resistir las magnitudes de tensión y corriente significativamente superiores generadas por una descarga eléctrica atmosférica.

4.2.8 Conmutadores de los circuitos

Los interruptores y relés controlan la corriente a través de un circuito conectando y desconectando las rutas por las cuales la corriente puede fluir. Ambos pueden interrumpir la corriente (lo que se denomina apertura del circuito) o permitir su flujo (lo que se denomina cierre del circuito).

Los interruptores y relés son caracterizados mediante la especificación del número de polos y tiros. Cada polo gestiona el control de un flujo de corriente eléctrica. A modo de ilustración, un interruptor de polo-simple (PS, por sus siglas en inglés) administra un único circuito de corriente, mientras que un interruptor de polo-doble (PD, por sus siglas en inglés) regula dos corrientes independientes.

Cada tiro representa una ruta diferente para la circulación de corriente. Un interruptor de doble-tiro (DT, por sus siglas en inglés) posee la capacidad de dirigir la corriente a través de dos trayectos alternativos, en tanto que un interruptor de tiro-simple (TS, por sus siglas en inglés) únicamente puede establecer o interrumpir una sola vía de transmisión.

La combinación de polos y tiros determina la configuración específica de un interruptor. Como ejemplo representativo, el interruptor más elemental que permite abrir y cerrar un circuito eléctrico corresponde a un PSTS (polo-simple, simple-tiro). Adicionalmente, configuraciones como PSDT, DPTS y DPDT constituyen variantes frecuentes en el diseño de interruptores.

4.2.9 Esquemáticos y símbolos de componentes

Si un circuito contiene más de dos o tres componentes, describirlo con claridad resulta muy difícil. Para describir circuitos complejos, los ingenieros han desarrollado el diagrama esquemático, o simplemente esquemáticos. Los esquemáticos son una descripción visual de un circuito y sus componentes mediante dibujos estandarizados llamados símbolos de circuito. La Figura 23 muestra los símbolos esquemáticos de una cantidad de componentes comunes.

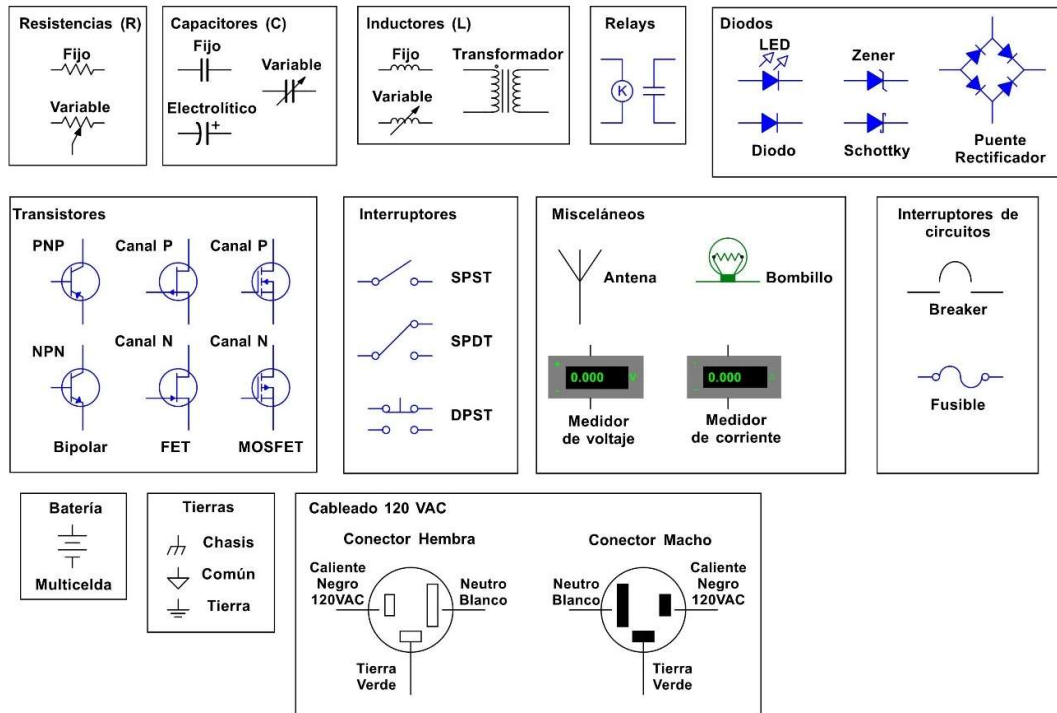


Figura 23. Símbolos esquemáticos utilizados en diagramas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

La Figura 24 (A) muestra el esquema de un circuito transistorizado simple. A cada componente se le asigna un designador único dentro del circuito o una etiqueta de texto. Algunos ejemplos son BT1, R1, Q1, o se puede añadir una etiqueta, como "Entrada activada" para la función de la lámpara. Las resistencias se designan con una R, los capacitores con una C, los inductores con una L, los diodos con una D, los transistores con una Q, etc.

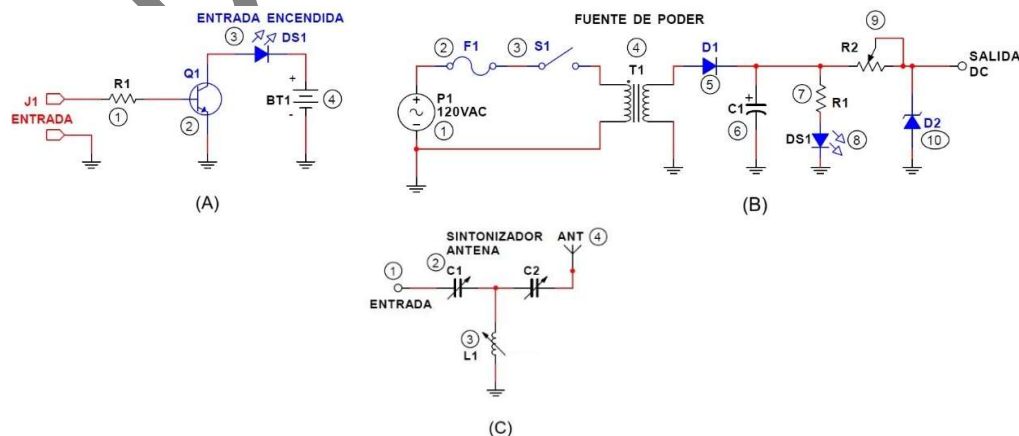


Figura 24. Esquema de un circuito transistorizado simple. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Un esquemático no representa la configuración física concreta de un circuito (para eso se emplea un diagrama pictórico), únicamente exhibe cómo se establecen las conexiones eléctricas entre componentes. Los trazos lineales de un elemento a otro, como entre R1 y Q1, representan tales interconexiones eléctricas. Cada línea no corresponde necesariamente a un cable físico; simplemente señala que existe una conexión eléctrica entre los extremos de dicha línea.

Las conexiones compartidas se representan mediante puntos negros sólidos en los puntos de intersección de dos líneas, como sucede en el circuito de la fuente de alimentación (Figura 24 B). Si dos líneas se interceptan sin un punto, no existe conexión. No se utilizan puntos en la conexión a un componente. En la Figura 24 B, los dos puntos entre D1, C1, R1 y R2 indican que estos elementos están interconectados. En la Figura 24 C, un esquema de un sintonizador de antena, el punto sobre L1 indica que C1, C2 y L1 están unidos entre sí.

En la Figura 24 A, el conector del lado izquierdo, denominado "Entrada", también porta el identificador J1, donde J denota un conector o receptáculo. En la Figura 24 B, el símbolo del enchufe de CA, P1, está etiquetado como "120 V CA" para identificarlo como fuente de alimentación. El esquemático muestra información crítica de seguridad, la tensión de línea de CA está conectada al fusible F1, al interruptor S1 y al transformador T1.

Para optimizar la legibilidad del esquemático, las entradas del circuito se posicionan hacia el lado izquierdo y las salidas hacia el derecho. Las tensiones de alimentación positivas se ubican en la zona superior, mientras que las tensiones de alimentación negativas o de tierra se sitúan en la parte inferior. Los componentes que colaboran y ejecutan una función idéntica tienden a dibujarse próximos entre sí. Se incorporan etiquetas para señalar la función del circuito. Esto puede observarse en la Figura 24 B, donde la energía de la línea de CA fluye a través de los componentes de entrada (izquierda), del transformador y de los elementos del circuito rectificador y regulador (derecha). La tensión de salida de CD está disponible desde el punto de conexión (derecha) del esquemático indicado como "SALIDA CD".

Tenga presente que un esquemático puede presentar escasa similitud con la disposición física real del circuito. Constituye simplemente un método práctico para describir la construcción eléctrica del circuito.

4.3 Campos Eléctricos y Magnético

La electricidad y el magnetismo son fenómenos imperceptibles para los sentidos humanos; únicamente pueden ser identificados a través de sus manifestaciones observables. Es posible constatar su presencia cuando una resistencia experimenta calentamiento, un motor genera movimiento rotatorio o un electroimán captura elementos féreos o de acero. Esta energía se manifiesta como un campo: una zona espacial donde se concentra y a través de la cual se propagan fuerzas electromagnéticas. La unidad fundamental del sistema métrico decimal para cuantificar la energía eléctrica y magnética corresponde al julio (pronunciado como "joule"), representado mediante la abreviatura J.

Dado que el cuerpo posee masa, interactúa con el campo gravitacional de manera que el planeta ejerce una fuerza de atracción. (El propio organismo genera un campo gravitatorio, aunque significativamente menos intenso que el terrestre). Puede conceptualizarse una báscula como un "medidor gravitacional" que, en lugar de registrar tensiones, indica unidades de peso. La magnitud del peso es directamente proporcional a la intensidad de la atracción gravitacional. El peso constituye una manifestación de fuerza. (Los instrumentos métricos proporcionan lecturas en kilogramos, una unidad de masa, asumiendo una fuerza gravitacional estándar y transformando el peso en una masa equivalente).

Este campo genera la obligación de realizar trabajo, como sucede al ascender escaleras. El trabajo posee una definición científica precisa en el contexto de los campos: corresponde al producto de la fuerza por la distancia recorrida en la dirección de la fuerza del campo. A modo de ejemplo, considérese el siguiente escenario: un individuo toma una masa, una piedra con un peso de 450 g y la eleva hasta un estante ubicado 3 metros por encima de su posición original. ¿Cuál sería la cantidad de trabajo realizado? Se ha desplazado un peso de 450 g una distancia

de 3 metros contra la atracción del campo, lo que implica la ejecución de 10 J de trabajo. (No se contabiliza el desplazamiento lateral, únicamente el vertical).

¿Cuál es el resultado de dicho trabajo? Se ha almacenado energía gravitacional en la piedra, equivalente a la cantidad de trabajo ejecutado. Esta energía almacenada recibe la denominación de energía potencial, ya sea gravitacional, eléctrica o magnética. Podría generarse idéntica cantidad de energía gravitacional elevando una piedra de 450 g 30 cm o transportando una piedra de 0,1 kg 30 metros. Al liberar la piedra (o si esta cae del estante), la misma cantidad de energía potencial se transformará en energía cinética mientras la piedra se desplaza hacia la superficie terrestre dentro del campo gravitacional.

En el ámbito electrónico, el interés se centra en dos tipologías de campos: los eléctricos y los magnéticos. Los campos eléctricos pueden identificarse mediante diferencias de tensión entre dos puntos. El análogo del campo eléctrico respecto a la masa gravitacional lo constituye la carga eléctrica.

Toda entidad portadora de carga eléctrica genera su propio espacio electromagnético, de manera análoga a cómo cada elemento con masa produce un campo gravitacional propio. La intensidad de la carga determina la magnitud del campo eléctrico generado, estableciendo una relación proporcional donde a mayor acumulación de carga, más pronunciada será su influencia espacial. De forma similar a cómo un objeto con masa experimenta una atracción dentro de un campo gravitatorio, una carga eléctrica también percibe fuerzas de interacción cuando se encuentra inmersa en un campo eléctrico.

El almacenamiento de energía eléctrica se logra mediante la segregación de cargas eléctricas, generando una diferencia de potencial o tensión entre ellas. La Figura 25 ilustra el campo eléctrico en un capacitor, originado por el desequilibrio entre las concentraciones de cargas positivas y negativas. Cuando dicho campo mantiene una configuración estable e invariable en el tiempo, se denomina campo electrostático. Convencionalmente, la orientación del campo eléctrico se establece como una trayectoria que discurre desde cargas positivas hacia cargas negativas.

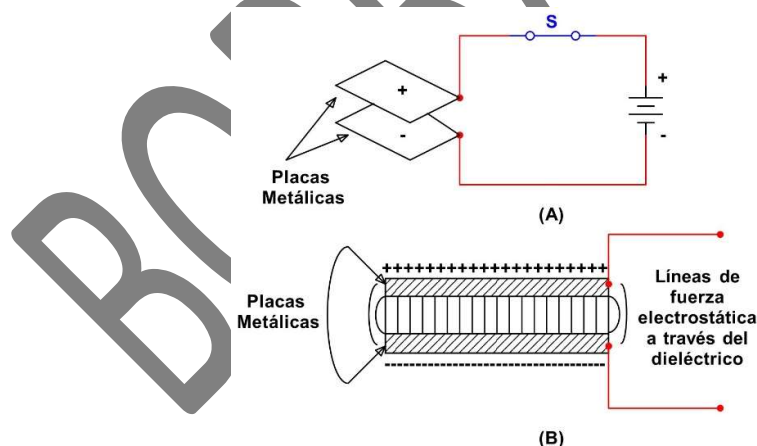


Figura 25. Campo eléctrico en un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La energía magnética se manifiesta sobre las cargas eléctricas en desplazamiento o la corriente eléctrica. El almacenamiento de la energía magnética ocurre a través del desplazamiento de la carga eléctrica (corriente), generando un campo magnético. La Figura 26 ilustra el campo magnético que rodea la corriente circulante en un conductor. Los campos magnéticos que permanecen constantes en el tiempo, como el correspondiente a un imán permanente inmóvil, reciben la denominación de campos magnetostáticos. La orientación del campo magnético será detallada en la sección subsiguiente.

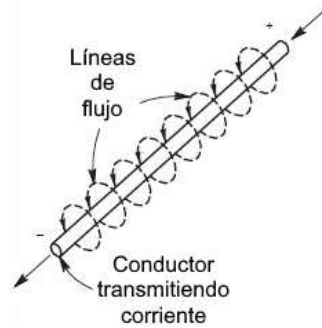


Figura 26. Campo magnético producto del paso de corriente en un conductor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La energía potencial eléctrica o magnética se desencadena al permitir la movilización de cargas dentro del campo correspondiente. A modo de ilustración, la energía eléctrica se libera cuando la corriente transita desde el capacitor previamente cargado en la Figura 25. La energía magnética almacenada por la corriente que circula en un inductor se descarga cuando experimenta variaciones, como sucede al desactivar un relé o un motor.

Cuando los campos eléctricos o magnéticos experimentan modificaciones, generan una onda electromagnética que se propaga a través del espacio. Las ondas de radio constituyen ondas electromagnéticas o EM (por sus siglas en inglés).

4.4 Principios de Circuitos

En los circuitos electrónicos, la energía eléctrica y magnética se almacena y libera constantemente en diversos componentes. Este intercambio se observa como la relación entre la tensión y la corriente en los componentes que almacenan energía eléctrica y magnética.

4.4.1 Almacenamiento de Energía Eléctrica

La energía eléctrica puede ser almacenada en un capacitor mediante la aplicación de una tensión continua en sus terminales, tal como se representa en la Figura 27 presenta un esquema elemental para la carga y descarga de un capacitor. Bajo la premisa de que no existe almacenamiento energético previo en el capacitor, se producirá una afluencia instantánea de corriente eléctrica mientras la carga ingresa por una terminal y emerge por la otra cuando S1 cambia a la posición A. El único factor restrictivo de la corriente lo constituyen la resistencia de la fuente de tensión, los conductores que interconectan el capacitor y los electrodos conductores internos del capacitor (denominados ocasionalmente "placas").

El capacitor genera una tensión (que refleja la intensidad del campo eléctrico) conforme un conjunto de electrodos acumula un excedente de electrones, mientras el conjunto complementario experimenta una pérdida equivalente. Finalmente, la tensión en las terminales del capacitor iguala la tensión de la fuente, momento en el cual la corriente interrumpe su flujo.

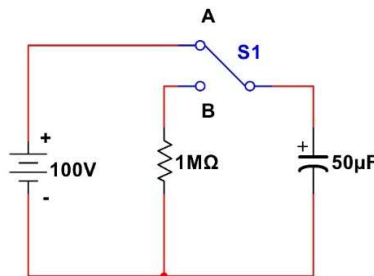


Figura 27. Circuito simple para cargar un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Si se interrumpe el suministro de tensión, el capacitor conservará su carga eléctrica en el mismo nivel. La acumulación de cargas permanecerá en los terminales del capacitor mientras no exista una trayectoria que permita el desplazamiento de electrones entre sus extremos. La tensión a través del capacitor refleja la cantidad de energía eléctrica almacenada en el campo eléctrico interno del dispositivo. Dado que las cargas (electrones) han cesado su movimiento, la energía queda retenida en el campo electrostático situado entre los electrodos. Al conectar una resistencia a los terminales del capacitor, desplazando S1 a la posición B, la energía almacenada se liberará progresivamente mientras la corriente circula por la resistencia, transformándose en calor.

Es importante señalar que la explicación en esta sección se centra en componentes teóricos, considerando resistencias que no presentan capacitancia parásita ni inductancia asociada a los cables o su propia composición. Los capacitores ideales carecen de pérdidas, resistencia en cables o electrodos. Los inductores teóricos están contruidos con alambre sin resistencia y sin capacitancia parásita entre espiras. En la realidad, no existen componentes completamente ideales, por lo que el comportamiento descrito experimenta ligeras modificaciones en circuitos reales. No obstante, los componentes pueden aproximarse significativamente a las condiciones ideales. Por ejemplo, un capacitor con una fuga extremadamente reducida puede conservar la carga durante periodos prolongados, incluso días o semanas.

4.4.2 Almacenamiento de Energía Magnética

Cuando los electrones circulan, típicamente a través de un conductor, se genera un campo magnético.

Este campo magnético se extiende en el espacio circundante al conductor y almacena energía magnética en su interior. La presencia del campo puede detectarse aproximando una brújula a un cable con corriente directa y observando la desviación de la aguja. De hecho, este método permitió descubrir originalmente la relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo.

La Figura 28 representa el campo magnético alrededor de un cable conectado a una batería. Si el cable se enrolla formando una bobina de manera que los campos de las espiras contiguas se superpongan, es posible producir un campo magnético significativamente más intenso. La orientación del campo magnético describe un círculo perpendicular al flujo de corriente, cuya dirección puede determinarse mediante la regla de la mano izquierda.

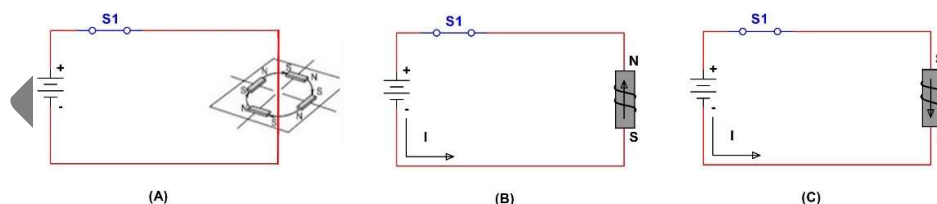


Figura 28. Campo magnético alrededor de un cable conectado a una batería. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Se precisa emplear la regla de la mano izquierda debido a que se hace referencia a la corriente electrónica (el desplazamiento de electrones) y no a la corriente convencional más habitual (el flujo de carga positiva), que circula en dirección opuesta. Cuando se trata de corriente electrónica, es necesario utilizar la regla de la mano izquierda; si se refiere a corriente convencional, se debe aplicar la regla de la mano derecha.

La magnitud del campo magnético guarda una relación proporcional con la cantidad de corriente. La energía eléctrica proveniente de la fuente de tensión se transfiere al campo magnético durante su formación. Consecuentemente, se almacena energía mediante la generación de un campo magnético, lo que implica realizar trabajo contra una tensión (también denominada fuerza electromagnética o FME, por sus siglas en inglés) que se genera en el circuito cada vez que el campo magnético (o corriente) experimenta una variación. La tensión generada recibe el nombre de FME inversa, puesto que actúa para contrarrestar cualquier modificación en la intensidad de corriente.

4.4.3 Dirección del Campo Magnético

Considerando los polos norte y sur de un imán, en el caso de un imán permanente, establecer su dirección resulta relativamente sencillo. Basta con observar el comportamiento del imán al aproximarlo a otro imán permanente. Los polos opuestos (norte-sur y sur-norte) experimentan una atracción mutua.

En lo que respecta a los campos magnéticos generados por el flujo de corriente, la determinación resulta más compleja. La Figura 28 ilustra cómo se orienta un campo magnético en función de la trayectoria de los electrones que circulan por el circuito. (La figura representa la corriente electrónica: el auténtico movimiento de electrones de negativo a positivo. La mayoría de los dispositivos electrónicos emplean una corriente convencional que fluye de positivo a negativo, en sentido contrario a la corriente electrónica). Para identificar la dirección del campo, se recurre a la regla de la mano izquierda. Únicamente es necesario conocer la configuración del enrollamiento del inductor y la dirección del flujo de corriente.

4.4.4 Constante de Tiempo

Cuando se establece una fuente de tensión continua en conexión directa con un capacitor mediante una resistencia, el valor de esta última determina la duración del proceso de carga, puesto que la resistencia restringe el flujo de corriente en el circuito. La Figura 29 ilustra un circuito RC (acrónimo que designa resistencia-capacitor) diseñado para cargar y descargar de manera alternativa un capacitor (C) a través de una resistencia (R). Al situar el interruptor en la posición A, la corriente que atraviesa la resistencia procede a cargar el capacitor hasta alcanzar la tensión de la batería. En el momento en que el interruptor se desplaza a la posición B, el capacitor libera su energía almacenada al circuito en forma de corriente que circula a través de la resistencia. El intervalo temporal que transcurre hasta que el capacitor se carga a un determinado porcentaje de la tensión aplicada o se descarga hasta un porcentaje específico de su tensión máxima se denomina constante de tiempo del circuito.

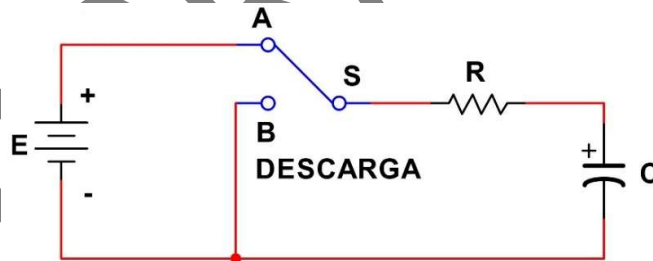


Figura 29. Circuito RC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El procedimiento genérico idéntico se implementa en un circuito RL (RL significa resistencia-inductor) donde un inductor se encuentra conectado en serie con una resistencia, tal como se representa en la Figura 30. En contraste con el incremento instantáneo de la tensión al momento de su aplicación, es la intensidad que atraviesa el inductor la que experimenta un aumento progresivo. El parámetro temporal para esta tipología de circuito corresponde al intervalo necesario para que la corriente del inductor se eleve o disminuya hasta alcanzar un porcentaje determinado de su valor máximo o mínimo.

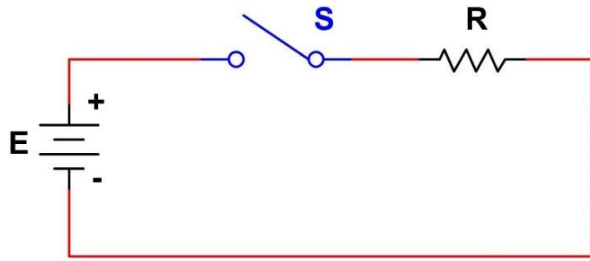


Figura 30. Circuito RL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.4.5 Cálculos de la constante de tiempo en circuitos RC

La constante temporal para un circuito elemental RC, según se representa en la Figura 29, se determina mediante la siguiente expresión matemática:

$$\tau = RC$$

Donde:

- τ = representa la letra griega tau, empleada para simbolizar la constante temporal.
- R corresponde a la resistencia total del circuito, medida en ohmios.
- C representa la capacitancia, cuantificada en faradios.

Es fundamental considerar que cuando R se expresa en megaohmios y C en microfaradios, el resultado de τ se obtiene en segundos. Es recomendable tener presente que, megaohmios multiplicados por microfaradios equivalen a segundos, lo cual permite optimizar significativamente los cálculos temporales.

El capacitor experimenta procesos de carga y descarga siguiendo una ecuación denominada curva exponencial. La Figura 31 presenta gráficamente las curvas de carga y descarga, donde el eje temporal se representa en función de τ y el eje vertical se expresa porcentualmente respecto a la tensión aplicada. Estas representaciones gráficas resultan válidas para cualquier circuito RC.

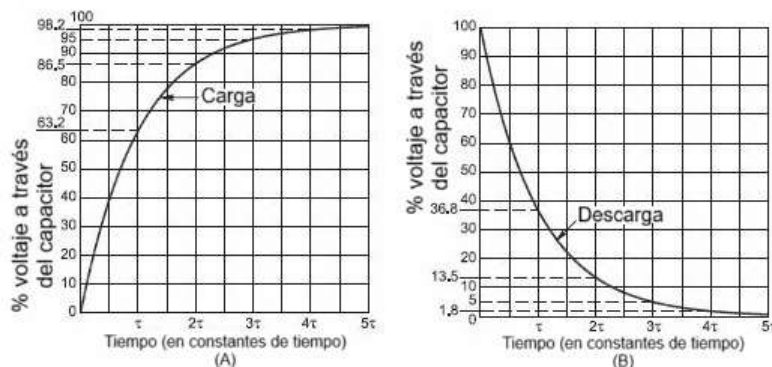


Figura 31. Curva de carga y descarga del capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Si se conoce la constante temporal y la tensión aplicada, es posible determinar la tensión en el capacitor en cualquier momento específico. Para un capacitor durante su proceso de carga:

$$V(t) = V (1 - e^{-t/\tau})$$

donde:

- $V(t)$ representa la tensión a través del capacitor en un momento t.
- V indica la tensión aplicada (proveniente de la batería en la Figura 27)
- t corresponde al tiempo en segundos desde que el capacitor inicia su carga o descarga.
- e constituye la base para logaritmos naturales.

- τ simboliza la constante temporal del circuito, expresada en segundos.

Cuando el capacitor se descarga desde V voltios, se requiere una ecuación ligeramente modificada:

$$V(t) = V (e^{-t/\tau})$$

Tales ecuaciones pueden resolverse con relativa sencillez utilizando una calculadora económica que admita logaritmos naturales (identificada con una tecla marcada como LN o LN X). En tal escenario, resultaría factible calcular el valor de $e^{-t/\tau}$ mediante el logaritmo natural inverso de $-t/\tau$, representado como:

$$\ln^{-1}(-t/\tau).$$

Tal como se ilustra en los gráficos de la Figura 31, es habitual considerar el tiempo de carga o descarga como múltiplos de la constante temporal del circuito. Al seleccionar intervalos desde cero (tiempo inicial), una constante temporal (1τ), dos constantes temporales (2τ), etcétera, el término exponencial de las ecuaciones se simplifica a e^0 , e^{-1} , e^{-2} , e^{-3} y consecutivamente. Es posible entonces resolver las ecuaciones para esos valores temporales específicos. Se sugiere elegir un valor de tensión de batería de $V = 100$ V, de modo que los resultados se expresen en porcentaje respecto a cualquier tensión aplicada.

Tabla 10. Tensión en el capacitor a lo largo del tiempo en el proceso de carga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Tiempo (t)	Ecuación	Resultado intermedio	Tensión (V)	Porcentaje (%)
$V(0)$	$100 \text{ V } (1 - e^0)$	$100 \text{ V } (1 - 1)$	0 V	0%
$V(1\tau)$	$100 \text{ V } (1 - e^{-1})$	$100 \text{ V } (1 - 0,368)$	63,2 V	63,2%
$V(2\tau)$	$100 \text{ V } (1 - e^{-2})$	$100 \text{ V } (1 - 0,135)$	86,5 V	86,5%
$V(3\tau)$	$100 \text{ V } (1 - e^{-3})$	$100 \text{ V } (1 - 0,050)$	95,0 V	95%
$V(4\tau)$	$100 \text{ V } (1 - e^{-4})$	$100 \text{ V } (1 - 0,018)$	98,2 V	98,2%
$V(5\tau)$	$100 \text{ V } (1 - e^{-5})$	$100 \text{ V } (1 - 0,007)$	99,3 V	99,3%

Tras un tiempo igual a cinco constantes de tiempo, el capacitor se carga al 99,3 % de la tensión aplicada. Esto se considera como carga completa a efectos prácticos. La ecuación utilizada para calcular la tensión del capacitor durante la descarga es ligeramente diferente a la utilizada para la carga.

Tabla 11. Tensión en el capacitor a lo largo del tiempo en el proceso de descarga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Tiempo (t)	$e^{-t/\tau}$	Tensión (V)	Porcentaje (%)
0	1	100 V	100%
1τ	0,368	36,8 V	36,8%
2τ	0,135	13,5 V	13,5%
3τ	0,050	5 V	5%
4τ	0,018	1,8 V	1,8%
5τ	0,007	0,7 V	0,7%

Se observa que, al transcurrir un lapso temporal equivalente a cinco intervalos constantes, el capacitor ha reducido su carga a menos del 1% de su valor primigenio. Esta situación se considera prácticamente una descarga completa.

Mediante los cálculos correspondientes a la carga de un capacitor, es posible definir la constante temporal de un circuito RC como el periodo necesario para alcanzar el 63,2% de la tensión de alimentación.

Partiendo de los cálculos de descarga de un capacitor, también se puede conceptualizar la constante temporal como el tiempo requerido para disminuir la tensión hasta el 36,8% de su valor inicial. Alternativamente, estos resultados pueden interpretarse como valores complementarios entre sí.

Si se resta cualquiera de los conjuntos porcentuales a 100, se obtendrá el conjunto complementario. Adicionalmente, se pueden identificar relaciones específicas entre los valores de descarga. Al considerar 36,8% (0,368) como valor para una constante temporal, el porcentaje de descarga presenta las siguientes progresiones: $0,368 \times 0,368 = 0,368^2 = 0,135$ tras dos constantes temporales, $0,368^3 = 0,05$ después de tres constantes, $0,368^4 = 0,018$ en cuatro

constantes y $0,368^5 = 0,007$ en cinco constantes temporales. Es posible convertir estos valores a porcentajes o simplemente multiplicar la fracción decimal por la tensión aplicada. Al restar estos valores decimales de 1, se obtienen los valores correspondientes a la ecuación de carga. Recordando el porcentaje del 63,2%, se pueden generar todos los demás porcentajes sin necesidad de utilizar logaritmos o expresiones exponenciales.

En múltiples escenarios, será necesario determinar el tiempo que un capacitor requiere para cargarse o descargarse hasta una tensión específica. El método más eficiente consiste en calcular inicialmente el porcentaje de la tensión máxima durante la carga o descarga. Posteriormente, se compara este valor con los porcentajes establecidos para la carga o descarga del capacitor. Frecuentemente, será viable aproximar el tiempo mediante un número entero de constantes temporales.

Considérese un capacitor de $0,01 \mu\text{F}$ y una resistencia de $2 \text{ M}\Omega$ conectados en paralelo a una batería. El capacitor se carga hasta 20 V y posteriormente se desconecta la batería. ¿Cuánto tiempo transcurrirá hasta que el capacitor se descargue a través de la resistencia y alcance una tensión de $7,36 \text{ V}$?

Inicialmente, calcúlese el porcentaje de reducción de la tensión. Este valor debe reconocerse como la tensión de descarga después de una constante temporal. A continuación, determínese la constante temporal del circuito.

$$\tau = RC = (2 \times 10^6 \Omega) \times (0,01 \times 10^{-6} \text{ F}) = 0,02 \text{ segundos}$$

$$\frac{7,36 \text{ V}}{20 \text{ V}} = 0,368 = 36,8 \%$$

Se requerirán $0,02$ segundos, equivalentes a 20 milisegundos, para descargar el capacitor hasta una tensión de $7,36 \text{ V}$. El circuito representado en la Figura 29 corresponde a una configuración en serie. Es habitual encontrar circuitos con múltiples resistencias y capacitores interconectados de manera serie o paralela. Cuando los componentes se encuentran dispuestos en serie, inicialmente es necesario consolidar todas las resistencias en un valor resistivo equivalente y todos los capacitores en una capacidad equivalente. Posteriormente, se procede a calcular la constante de tiempo según el método previamente descrito. En el caso de componentes conectados en paralelo, surge una complejidad adicional durante la fase de carga, aunque para un circuito en descarga aún es posible determinar la constante de tiempo. Nuevamente, se deben agregar todas las resistencias y capacitores a valores equivalentes y posteriormente calcular la constante de tiempo correspondiente.

4.4.6 Ejemplos de circuitos RC

Analicemos un caso de determinación de la constante temporal para un circuito similar al representado en la Figura 29, empleando valores de $220 \mu\text{F}$ y $470 \text{ k}\Omega$ para C y R . Para obtener la constante de tiempo, τ , se multiplican los valores de R y C expresados en ohmios y faradios.

$$\tau = RC = (470 \times 10^3 \Omega) \times (220 \times 10^{-6} \text{ F}) = 103,4 \text{ segundos}$$

De este modo, es posible calcular la constante temporal de cualquier circuito RC. En el supuesto de contar con dos capacitores de $100 \mu\text{F}$ y dos resistencias de $470 \text{ k}\Omega$, todos conectados en serie, inicialmente se combinan los valores de las resistencias en una única resistencia y los valores de los capacitores en una sola capacitancia.

$$R_T (\text{series}) = R_1 + R_2 = 470 \text{ k}\Omega + 470 \text{ k}\Omega = 940 \text{ k}\Omega = 940 \times 10^3 \Omega$$

$$C_T (\text{series}) = \frac{1}{(1/C_1 + 1/C_2)} = \frac{1}{2/100} = 50 \mu\text{F}$$

Consecuentemente, la constante temporal resulta:

$$\tau = RC = (940 \times 10^3 \Omega) \times (50 \times 10^{-6} \text{ F}) = 47 \text{ segundos}$$

Consideremos ahora dos capacitores de 220 μF y dos resistencias de 1 $\text{M}\Omega$ dispuestos en paralelo. Nuevamente, se combinan primero los valores en una única resistencia y una sola capacitancia.

$$R_T(\text{paralelo}) = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \text{ M}\Omega * 1 \text{ M}\Omega}{1 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega} = 5 \times 10^5 \Omega$$

$$C_T(\text{paralelo}) = C_1 + C_2 = 220 \mu\text{F} + 220 \mu\text{F} = 440 \mu\text{F} = 440 \times 10^{-6} \text{ F}$$

Por consiguiente, la constante temporal será:

$$\tau = RC = (5 \times 10^5 \Omega) \times (440 \times 10^{-6} \text{ F}) = 220 \text{ segundos}$$

Supongamos un capacitor de 450 μF y una resistencia de 1 $\text{M}\Omega$ conectados en paralelo a una fuente de alimentación. El capacitor se carga a 800 V y posteriormente se desconecta la alimentación. ¿Cuánto tiempo transcurrirá hasta que el capacitor se descargue a 294 V? Primero, calcúlese el porcentaje de disminución de tensión:

$$\frac{294 \text{ V}}{800 \text{ V}} = 0,368 = 36,8 \%$$

La cifra representa el valor de la tensión de descarga tras una constante temporal. Ahora calcúlese la constante temporal del circuito:

$$\tau = RC = (1 \times 10^6 \Omega) \times (450 \times 10^{-6} \text{ F}) = 450 \text{ segundos}$$

O bien, podría haberse aplicado que megohmios por microfaradios equivalen a segundos y haber efectuado el cálculo de esa manera.

4.4.7 Cálculos de la constante de tiempo del circuito RL

Cuando se establece una conexión en serie entre una resistencia y una inductancia, se genera una situación análoga a la de un circuito RC. La Figura 30 ilustra un esquema diseñado para acumular energía magnética en un inductor. En el momento de cerrar el interruptor, la corriente intentará circular de manera inmediata. La transición súbita desde la ausencia de corriente hasta un valor limitado exclusivamente por la fuente de tensión y la resistencia representa una modificación sustancial en la corriente, provocando que la inductancia genere una fuerza contraelectromotriz (FEM).

La FEM mantiene una proporcionalidad directa con la velocidad de transformación de la corriente, y su polaridad se contrapone a la tensión aplicada, lo que implica una oposición a la variación de la corriente. Como consecuencia, la corriente inicial resulta extremadamente reducida, pero experimenta un incremento acelerado, aproximándose gradualmente al valor de corriente final determinado por la Ley de Ohm ($I = V / R$) conforme la FEM disminuye hasta alcanzar cero.

La Figura 32 demuestra la progresión de la corriente a través del inductor representado en la Figura 30. En cualquier momento específico, la FEM será equivalente a la diferencia entre la caída de tensión en la resistencia y la tensión de la batería. Se puede constatar que cuando el interruptor se cierra inicialmente y no existe corriente, la fuerza contraelectromotriz es idéntica a la tensión total de la batería. Posteriormente, la corriente se elevará hasta un valor constante, momento en el cual no habrá caída de tensión en el inductor. La tensión total de la batería se manifestará entonces en la resistencia, mientras que la fuerza contraelectromotriz se reduce a cero. En términos prácticos, la corriente alcanza prácticamente su valor final después de 5 constantes de tiempo. La curva resultante presenta una morfología similar a la obtenida durante la carga de un capacitor.

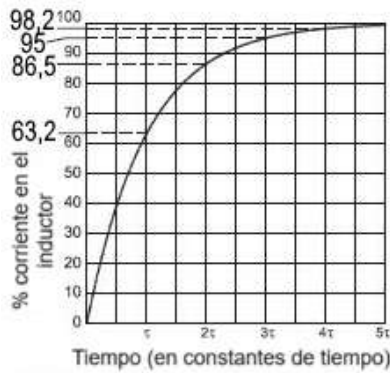


Figura 32. Grafica de corriente en un inductor con el tiempo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La constante temporal depende de los elementos constitutivos del circuito, tal como sucede en el circuito RC. En el caso de un circuito RL, la constante temporal se determina mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

La ecuación correspondiente a la corriente del inductor representa otra curva exponencial:

$$I(t) = \frac{V}{R} (1 - e^{-t/\tau})$$

Donde:

- $I(t)$ representa la intensidad de corriente en amperios en un momento específico.
- V simboliza la tensión aplicada.
- R indica la resistencia del circuito medida en ohmios.
- t corresponde al tiempo transcurrido en segundos tras el accionamiento del interruptor.
- τ define la constante temporal del circuito expresada en segundos.

Si se seleccionan valores temporales equivalentes a múltiplos de la constante temporal del circuito, se observará que la corriente alcanzará su valor máximo de manera análoga a la tensión durante la carga de un capacitor. En este caso, se propone un valor de 100 A para la corriente máxima, permitiendo expresar los resultados como un porcentaje de la corriente máxima para cualquier circuito RL.

Tabla 12. Corriente en el inductor a lo largo del tiempo en el proceso de carga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

@Tiempo (t)	$e^{-t/\tau}$	Ecuación	Corriente (A)	Porcentaje (%)
0	1	$100 \text{ A } (1 - 1)$	0 A	0%
1 τ	0.368	$100 \text{ A } (1 - 0.368)$	63.2 A	63.2%
2 τ	0.135	$100 \text{ A } (1 - 0.135)$	86.5 A	86.5%
3 τ	0.050	$100 \text{ A } (1 - 0.050)$	95.0 A	95%
4 τ	0.018	$100 \text{ A } (1 - 0.018)$	98.2 A	98.2%
5 τ	0.007	$100 \text{ A } (1 - 0.007)$	99.3 A	99.3%

Observe que la corriente a través del inductor aumentará hasta el 63,2 % del valor máximo durante una constante de tiempo. Después de cinco constantes de tiempo, la corriente se encuentra dentro del 1 % del valor máximo.

4.4.8 Ángulo de fase

Habiendo comprendido que la tensión y la corriente no se elevan ni descienden de manera simultánea en capacitores y bobinas, ahora procede examinar el escenario cuando se aplica tensión de CA en lugar de CD. El almacenamiento y la liberación de energía eléctrica y magnética es lo que genera la resistencia al flujo de corriente alterna, propiedad característica de capacitores e inductores denominada reactancia.

Para entender cómo se comportan la tensión y la corriente de CA en inductores y capacitores, se analizarán las magnitudes de las señales de CA lo largo de todo su ciclo. La correlación entre las formas de onda de corriente y tensión en un momento determinado se expresa mediante la fase de las ondas. Fase significa fundamentalmente el lapso o intervalo temporal entre dos acontecimientos. Se establece que el evento que acontece primero adelanta al segundo, mientras que el que transcurre después retrasa al primero. Dado que todos los ciclos de CA con idéntica frecuencia poseen el mismo período (o duración), es posible utilizar el período del ciclo como unidad temporal básica. Esto permite que la medición de fase sea independiente de la frecuencia de la forma de onda, relacionándose exclusivamente con la posición relativa dentro del ciclo de la forma de onda. Cuando se consideran dos o más frecuencias diferentes, las mediciones de fase generalmente se realizan con referencia a la frecuencia más baja. Resulta conveniente asociar un ciclo completo de la onda con un círculo y dividir el ciclo en 360 grados.

La Figura 33 ilustra un ciclo completo de una onda sinusoidal de tensión o corriente, con la onda dividida en cuatro cuartos de 90° cada uno. Cada grado corresponde a $1/360$ del período del ciclo. Por consiguiente, la medición de fase habitualmente se especifica como un ángulo. Al conocer el período de la forma de onda, es posible convertir grados a tiempo.

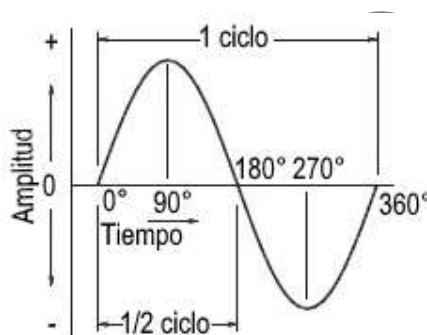


Figura 33. Ciclo completo de una onda senoidal. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020)

El ángulo de fase entre dos señales ondulatorias determina el desplazamiento temporal entre puntos equivalentes en cada señal (crestas máximas, intersecciones en cero, etc.). Se selecciona una de las señales como referencia. Un ángulo de fase que adelanta se considera positivo, mientras que uno que retrasa se considera negativo.

4.4.9 Relación de tensión-corriente CA en capacitores

La Figura 34 ilustra la tensión a través de un capacitor durante su proceso de carga y la corriente que fluye hacia dicho componente con una tensión de CD aplicada. Cuando se introduce una tensión en un capacitor ideal, se genera una irrupción instantánea de corriente mientras el dispositivo inicia su proceso de carga. Esta corriente experimenta una disminución progresiva conforme el capacitor se va saturando hasta alcanzar el valor máximo de la tensión aplicada. En el momento en que la tensión aplicada alcanza su punto culminante, el capacitor completa totalmente su carga, provocando que la corriente que ingresa se reduzca a cero. En este preciso instante, se ha acumulado la máxima energía en el campo eléctrico del capacitor.

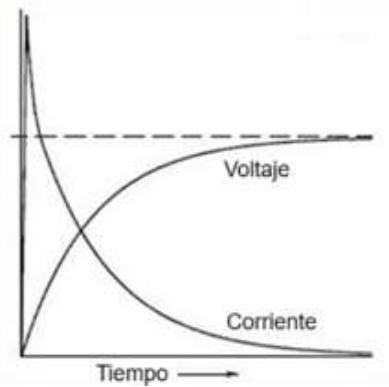


Figura 34. Tensión a través de un capacitor durante su carga en CD. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El escenario presenta características distintas cuando se introduce una tensión de CA, debido a que esta no permanece constante. La Figura 35 representa gráficamente las magnitudes proporcionales de corriente y tensión al aplicarse una señal de onda sinusoidal de CA. La escala no refleja valores cuantitativos específicos de corriente o tensión.

El gráfico ilustra las dos configuraciones de onda durante segmentos de un cuarto de ciclo correspondientes a la forma de onda de tensión.

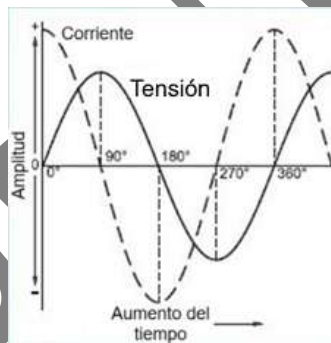


Figura 35. Amplitudes relativas de corriente y tensión en CA para un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

0° a 90°: La tensión es nula, por consiguiente, no se acumula energía en el capacitor. La tensión aplicada comienza a incrementarse y se genera una corriente de carga significativa, semejante a la proporcionada con una tensión de CD. La corriente disminuye progresivamente a medida que se almacena más energía en el capacitor.

90° a 180°: La tensión aplicada ha alcanzado su punto máximo, por lo tanto, no circula carga adicional hacia el capacitor y el flujo de corriente se interrumpe; la energía almacenada es máxima. Conforme la tensión inicia su descenso, es equivalente a descargar el capacitor; la corriente se invierte y la energía retorna al circuito.

180° a 270°: Al llegar a cero, la tensión desciende a su ritmo más acelerado, por lo que la corriente de descarga en sentido inverso alcanza su valor máximo. En este momento, la tensión aplicada se incrementa nuevamente, pero con polaridad opuesta. La energía se almacena de nuevo en el capacitor, pero con la tensión invertida. La corriente de carga también se desplaza en sentido contrario, disminuyendo gradualmente a medida que se acumula más energía en el capacitor.

270° a 360°: Nuevamente, la tensión aplicada alcanza un pico, pero con polaridad inversa. La corriente de carga se detiene al alcanzar el pico de tensión y comienza a reducirse, repitiéndose la situación entre 180° y 270°, pero con la polaridad opuesta.

Al completar los 360° , la tensión y la corriente presentan la misma relación que a 0° y el ciclo se reinicia.

Téngase en consideración que la energía experimenta un proceso de almacenamiento y descarga en el capacitor dos veces por cada ciclo: una mediante una tensión positiva a través del componente y otra con tensión negativa. La morfología de la corriente ilustra el desplazamiento de electrones hacia el interior y exterior del capacitor en respuesta a la tensión aplicada. El acopio energético alcanza su punto máximo cuando la tensión es superior, tal como se representa en la Figura 36. Este fenómeno acontece a 90° y 270° cuando la corriente se sitúa en cero. Obsérvese igualmente que la corriente experimenta su punto culminante 90° por delante de la morfología de la tensión. Se establece que la corriente que transita por un capacitor se anticipa 90° respecto a la tensión aplicada. Alternativamente, podría interpretarse que la tensión aplicada a un capacitor se retarda 90° con relación a la corriente que lo atraviesa. Para facilitar la comprensión de esta relación, considérese el acrónimo ICE. Esta denominación permitirá recordar que la corriente (I) precede (se adelanta) a la tensión (E) en un capacitor (C). Conforme a la convención establecida, la tensión constituye la forma de onda de referencia para el ángulo de fase, por consiguiente, en un capacitor el ángulo de fase se establece en -90° (negativo).

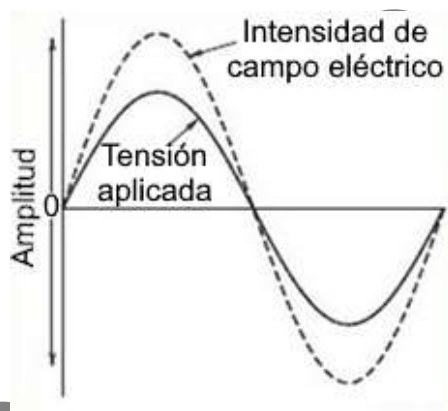


Figura 36. Relación entre el campo eléctrico y la tensión en un capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.4.10 Relación de la tensión-corriente CA en los inductores

La interacción entre la tensión y la corriente alterna en un inductor presenta una complementariedad respecto al comportamiento de un capacitor. La representación gráfica ilustrada en la Figura 37 evidencia que, contrariamente a estar sincronizada con la tensión aplicada, la energía almacenada mantiene una sincronización con la corriente del inductor. Este fenómeno genera una inversión en la relación de fase entre la tensión y la corriente, en comparación con la dinámica observada en el capacitor.

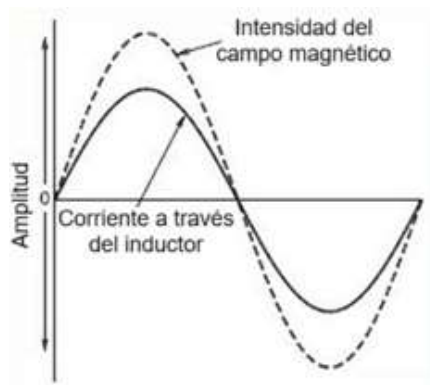


Figura 37. Relación entre el campo magnético y la corriente en un inductor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En la sección dedicada a la energía magnética, se abordó el concepto de fuerza contraelectromotriz (FEM). Esta fuerza electromotriz alcanza su valor máximo cuando la variación del campo magnético se produce con mayor celeridad. Adicionalmente, se genera con una polaridad que se opone a la modificación de la corriente o la intensidad del campo magnético. Consecuentemente, en el momento en que la corriente atraviesa el punto cero en su trayectoria hacia un pico positivo, la FEM logra su valor negativo máximo. Cuando la corriente alcanza el punto máximo positivo, la FEM se establece en cero, y el proceso continúa de manera similar.

Como en ocasiones anteriores, se analizará detalladamente la situación durante cada cuarto de ciclo de la forma de onda de la tensión aplicada, tal como se ilustra en la Figura 38. Junto con la tensión aplicada y la corriente del inductor, se ha incorporado la forma de onda de la FEM. Este procedimiento facilitará la explicación de la relación existente entre la tensión aplicada y la corriente del inductor.

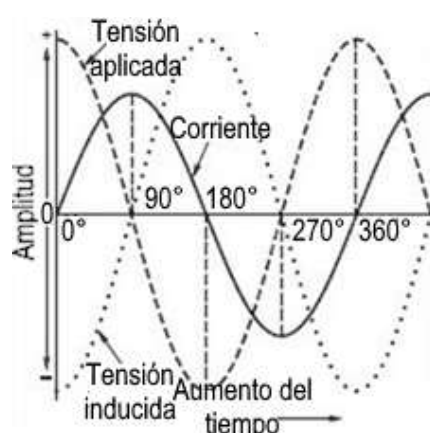


Figura 38. Amplitudes relativas de corriente y tensión en CA para un inductor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

0° a 90°: Partiendo del máximo de la tensión aplicada, la tensión inducida opuesta, que se opone a las variaciones en el flujo de corriente, alcanza también su valor máximo, lo que implica que la corriente debe incrementarse de manera gradual. Conforme la tensión aplicada disminuye, la variación de la corriente se reduce proporcionalmente y, consecuentemente, la tensión inducida experimenta una reducción. Cuando la tensión aplicada llega a cero, no circula corriente adicional y la tensión inducida se establece en cero. En este punto, la energía almacenada alcanza su máximo nivel.

90° a 180°: La tensión aplicada comienza a incrementarse en dirección inversa, provocando una disminución de la corriente y la energía almacenada. La tensión inducida aumenta, resistiéndose al cambio de corriente. Al alcanzar la tensión aplicada su máximo con polaridad inversa, la corriente se detiene completamente y la energía almacenada se reduce a cero.

180° a 270°: En sentido inverso al intervalo comprendido entre 0° y 90°, la corriente aumenta en dirección opuesta. La tensión aplicada disminuye y, por consiguiente, la tasa de variación de la corriente también se reduce, lo que genera una disminución de la tensión inducida. Al llegar la tensión aplicada a cero, la corriente y la energía almacenada alcanzan su valor máximo.

270° a 360°: Entre 90° y 180°, la tensión aplicada se incrementa en la polaridad opuesta a la corriente, provocando una reducción de esta. La variación en la corriente genera un aumento de la tensión inducida, oponiéndose al cambio de corriente. Al alcanzar la tensión aplicada su máximo, la corriente y la energía almacenada retornan a cero.

La relación de fase entre la tensión y la corriente CA aplicadas a través de un inductor es inversa a la de su relación en un capacitor. La corriente que circula por un inductor se retrasa 90° con respecto a la tensión aplicada. Alternativamente, se podría afirmar que la tensión aplicada a un inductor se adelanta 90° respecto a la corriente que lo atraviesa. Una frase útil para recordar estas relaciones es "ELI the ICE man". La L y la C representan el inductor y el capacitor, y la E y

la I representan la tensión y la corriente. Se puede observar inmediatamente que E (tensión) precede (se adelanta) a I (corriente) en un inductor y que I precede (se adelanta) a E en un capacitor. Utilizando la misma convención que para un capacitor, el ángulo de fase en un inductor es de 90° (positivo).

4.4.11 Combinando reactancia con resistencia

Hasta el momento, se han analizado las relaciones de fase entre tensión y corriente exclusivamente en inductores y capacitores. Los circuitos prácticos incorporan resistencia, sea como elemento independiente o como parte integrante del inductor o capacitor. Esta característica modifica el ángulo de fase entre las ondas de tensión y corriente. La tensión a través de un resistor mantiene una correspondencia de fase con la corriente que lo atraviesa, por consiguiente, si un circuito contiene simultáneamente resistencia y reactancia, ya sea de naturaleza inductiva o capacitiva, el ángulo de fase resultante de la corriente a través de todos los componentes será inferior a 90° . El ángulo de fase preciso dependerá de las proporciones relativas de resistencia y reactancia presentes en el circuito.

Profundizando momentáneamente en la reactancia, esta se conceptualiza como la oposición al desplazamiento de CA a través de una inductancia o capacitancia. Un resistor se opone a cualquier tipo de flujo de corriente, tanto CA como CD. Se ha observado previamente que los inductores generan una fuerza contraelectromotriz (FEM) que se resiste a las modificaciones en el flujo de corriente, lo cual equivale a contrarrestar las alteraciones en la energía almacenada. Los capacitores igualmente resisten las transformaciones energéticas al oponerse a las variaciones de tensión que provocarían el flujo de corriente. Esta resistencia al desplazamiento de corriente alterna se denomina reactancia. Para combinar reactancias en configuraciones serie y paralelo, se emplean idénticas ecuaciones que para combinar resistencias.

La reactancia inductiva (X_L) experimenta un incremento proporcional al aumento de la frecuencia, dado que, al elevarse la frecuencia, también se intensifica la tasa de variación de la tensión aplicada y la corriente del inductor. Una mayor tasa de variación potencia la fuerza contraelectromotriz y, consecuentemente, la oposición al flujo de corriente. De manera análoga, una inductancia superior también amplifica la reactancia inductiva. La ecuación para X_L se estructura como:

$$X_L = 2\pi fL$$

donde:

- X_L representa la reactancia en ohms
- f indica la frecuencia en Hertz
- L determina la inductancia en Henrys.

La reactancia capacitiva experimenta un incremento cuando la frecuencia disminuye, puesto que un período de ciclo más prolongado implica un mayor desplazamiento de corriente, resultando en una variación energética más significativa durante cada ciclo. Una transformación energética más pronunciada requiere que la fuente de tensión supere oscilaciones más amplias en la tensión del capacitor, lo cual produce un efecto equivalente de oposición al flujo de corriente. Una capacitancia reducida también incrementa la reactancia capacitiva. La ecuación para X_C se configura como:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

donde:

- X_C representa la reactancia en ohms
- f indica la frecuencia en Hertz
- C determina la capacitancia en Faradios

4.4.12 Impedancia Compleja

Cuando un circuito incorpora tanto resistencia como reactancia, el efecto combinado de ambas se denomina impedancia, representada por el símbolo Z . La impedancia constituye un término más abarcador que resistencia o reactancia, y se presenta como un número complejo para considerar la diferencia de fase entre la tensión y la corriente.

ESCRITURA Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA IMPEDANCIA Y EL ÁNGULO DE FASE

Los valores de impedancia se consignan en formato rectangular como $Z = R + jX$, donde el valor de la reactancia, X , puede ser positivo (inductivo, $+jX$) o negativo (capacitivo, $-jX$). A modo de ilustración, la impedancia $50 - j 25 \Omega$ comprende 50Ω de resistencia y 25Ω de reactancia capacitiva.

Tomando como referencia la Figura 70, es posible trazar la impedancia compleja y su ángulo de fase asociado mediante coordenadas rectangulares, utilizando el eje horizontal para el valor de R y el eje vertical para el valor de X .

El símbolo j indica que el valor de reactancia (como $j2$ o $-j3/2$) representa una distancia vertical a lo largo del eje Y .

Al graficar impedancias mediante coordenadas complejas, cualquier punto ubicado en el eje horizontal entre 0° y 180° corresponde a una resistencia pura carente de componente reactivo.

Cualquier punto situado en el eje vertical entre 90° y -90° (o 270°) representa una reactancia pura sin componente resistivo.

La impedancia también puede expresarse en coordenadas polares (véase la Figura 71) como $|Z| \angle \theta$, donde $|Z|$ representa la magnitud de la impedancia y θ su ángulo de fase.

Las impedancias en coordenadas polares se representan con el lado derecho del eje horizontal indicando 0° , la mitad superior del eje vertical señalando 90° , y así sucesivamente.

Es importante recordar que las coordenadas polares y los mapas presentan diferentes convenciones para los ángulos. La representación en coordenadas polares de una impedancia o admitancia también recibe el nombre de notación fasorial, y los valores se denominan fasores. Un diagrama fasorial muestra los valores de impedancia o admitancia representados mediante coordenadas polares.

Téngase presente que las reactancias varían con la frecuencia, por lo que un diagrama fasorial asume una frecuencia constante para todos los valores.

Los fasores constituyen un tipo de vector, es decir, cualquier magnitud que posea magnitud y dirección. En el caso de los fasores, la dirección corresponde a la coordenada angular. Se puede emplear el sistema de coordenadas rectangulares o polares para especificar la impedancia. Opte por coordenadas rectangulares para visualizar las componentes resistiva y reactiva. Elija coordenadas polares para visualizar la magnitud y el ángulo de fase de la impedancia.

Los componentes reactivos y resistivos de un circuito pueden disponerse en configuración serie o paralelo, tal como se ilustra en la Figura 39. En estas configuraciones, la reactancia se simboliza mediante la letra X , lo cual permite identificar si es de naturaleza inductiva o capacitiva. En el esquema serie presentado en A, la corriente mantiene un valor constante a través de ambos elementos, aunque con distintas magnitudes de tensión en la resistencia y la reactancia. En el diagrama paralelo mostrado en B, se establece idéntica tensión para los dos componentes, si bien pueden circular intensidades de corriente diferentes en cada una de las ramas.

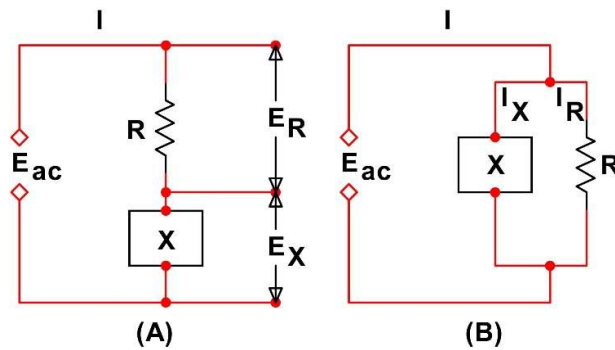


Figura 39. Circuito serie y paralelo con resistencias y reactancias. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Se puede constatar que la relación de fase entre la corriente y la tensión para la totalidad del circuito puede estar comprendida en un rango de cero a $\pm 90^\circ$. El ángulo de fase depende de las proporciones relativas de resistencia y reactancia presentes en el circuito.

El valor simple de $R + jX$ implica que todas las resistencias y reactancias se han integrado en un valor equivalente. En caso de existir más de una resistencia en el circuito, estas deben consolidarse para obtener un valor de resistencia equivalente.

De igual manera, si existen múltiples elementos reactivos, estos deben combinarse en una reactancia equivalente. Cuando hay diversos inductores y capacitores, se agrupan todos los elementos similares y se calcula la reactancia capacitiva e inductiva resultante.

Las reactancias capacitivas e inductivas se oponen al flujo de corriente alterna de maneras diferentes y presentan ángulos de fase contrapuestos, lo que provoca su mutua anulación. Esto se evidencia en la convención de considerar la reactancia capacitiva como un valor negativo y la reactancia inductiva como un valor positivo, de modo que al sumarlos se obtiene una reactancia total reducida. Si las dos reactancias opuestas poseen valores idénticos, la cancelación resultante significa la ausencia de reactancia en el circuito.

Combinar resistencia y reactancia resulta algo más complejo. Cuando la resistencia y la reactancia están en serie, ambos valores pueden integrarse de forma relativamente sencilla. La corriente mantiene su magnitud en todas las secciones del circuito ($I = I_R = I_X$) mientras que la tensión varía en cada componente.

Recordando que Z representa un número complejo, es posible formular una ecuación para la impedancia de la siguiente manera:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_R + jV_X}{I} = \frac{V_R}{I} + j \frac{V_X}{I}$$

En esencia, esta formulación representa la Ley de Ohm adaptada al concepto de impedancia, en lugar de la resistencia tradicional. La ecuación en cuestión revela que es posible analizar de manera independiente la tensión y la corriente asociadas con elementos tanto resistivos como reactivos.

¿Cabrá la posibilidad de afirmar que $Z = R + X$? ¡De ninguna manera! Puesto que el ángulo de fase de la corriente presenta diferencias fundamentales entre la resistencia (con un ángulo de fase de 0°) y la reactancia (con un ángulo de fase de $\pm 90^\circ$, según lo simboliza la j). Para determinar la impedancia efectiva resultante de la combinación de R y X , resulta imperativo considerar el ángulo de fase correspondiente.

Esta evaluación puede realizarse mediante un método gráfico. El procedimiento consiste en trazar los ejes de un sistema de coordenadas rectangulares, tal como se ilustra en la Figura 40. En este sistema, los valores de resistencia se representarán sobre el eje X, mientras que los valores de reactancia se ubicarán en el eje Y.

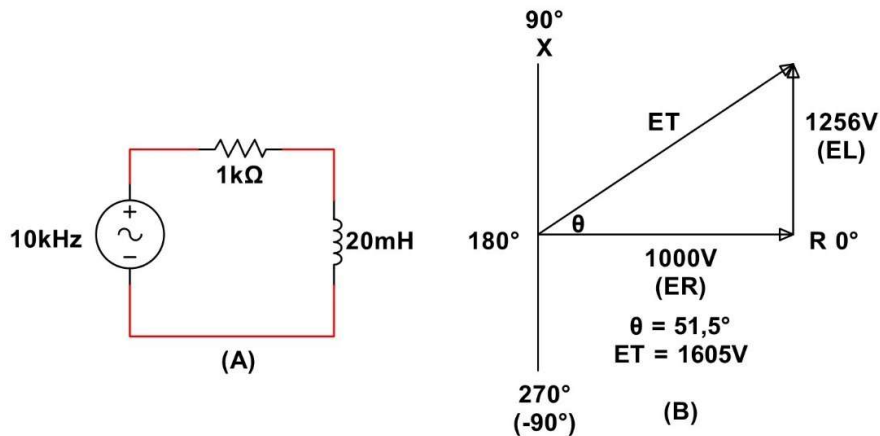


Figura 40. Circuito RL valores de resistencia eje X y reactancia eje Y. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Comience estableciendo que circula una corriente de 1 A en el circuito de la Figura 40 (A), de tal manera que la tensión y la impedancia posean idénticos valores numéricos en ohmios y voltios. (Si $I = 1$ A, entonces numéricamente $Z = V/I$). La corriente permanece constante en ambos componentes, por lo que, se utilizará la tensión a través de la resistencia como referencia y se representará la tensión a través de la reactancia en la dirección de la reactancia positiva en el diagrama. Resulta provechoso recordar que la razón por la cual se etiqueta la reactancia inductiva como + y la reactancia capacitiva como - se fundamenta en esta relación corriente-tensión adelantada y retrasada. En el circuito de la Figura 40, $R = 1000 \Omega$, consecuentemente, la tensión a través de ella será de 1000 V. Se dibujará esta tensión como una línea desde el origen a lo largo del eje 0° (rotulado como "R 0° ") hasta el punto (1000,0). $L = 20$ mH y $f = 10$ kHz, por lo tanto:

$$X_L = 6.28 \times (20 \times 10^{-3} \text{ H}) \times (10 \times 10^3 \text{ Hz}) = 1256 \Omega$$

Se representará la tensión en $X_L = V_L = 1 \text{ A} \times 1256 \Omega = 1256 \text{ V}$ como una línea que se dirige hacia arriba en dirección de 90° . La línea deberá ser paralela al eje de reactancia (identificado como " 90° X") desde el extremo de la línea precedente hasta el punto (1000,1256). Dado que la reactancia es inductiva, el ángulo de fase entre la tensión y la corriente es de 90° y la línea de tensión se extiende verticalmente desde el eje X. Si la reactancia hubiera sido capacitiva, el ángulo de fase habría sido de -90° y la línea de tensión se extendería hacia abajo desde el eje X. Se completará la figura trazando una línea desde el origen hasta el punto (1000,1256). Esto representa la combinación de tensiones en 1000Ω de resistencia y 1256Ω de reactancia inductiva. La impedancia compleja es $1000 + j1256 \Omega$. El triángulo rectángulo recién creado representa la solución del problema. La longitud de la hipotenusa desde el origen hasta (1000,1256) representa la magnitud de la tensión, $|V_T|$, en la combinación de R y L para una corriente de 1 A a 10 kHz. El ángulo θ es el ángulo de fase entre la tensión y la corriente.

La longitud de la hipotenusa y el ángulo se pueden calcular mediante trigonometría.

$$|V_T| = \sqrt{1000^2 + 1256^2} = 1605 \text{ V}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1256}{1000}\right) = 51.5^\circ$$

Si la frecuencia o la inductancia experimentaran un incremento, el reactivo inductivo (X_L) se elevaría, provocando un aumento simultáneo tanto de la tensión total (V_T) como del ángulo de fase (θ). En el escenario contrario, donde la frecuencia o la inductancia disminuyeran, X_L también reduciría su valor, y consecuentemente V_T y θ seguirían el mismo comportamiento decreciente. Para completar la determinación de la impedancia, es fundamental recordar que Z equivale a la relación entre V_T e I. Se conoce que I corresponde a 1 A y, al ser el valor de referencia, puede representarse como $10 \Omega \text{ A}$. Se ha establecido previamente que V_T alcanza 1605 V con un ángulo de fase de 51.5° , por lo cual V_T puede consignarse como 1605 V. Por consiguiente, si la

reactancia en el circuito hubiera sido capacitiva (negativa), la impedancia final habría sido $1605 \angle -51,5^\circ \Omega$.

$$Z = \frac{V_T}{I} = \frac{1605 \angle 51,5^\circ}{1 \angle 0^\circ} = 1605 \angle 51,5^\circ \Omega$$

4.4.13 Admitancia y Susceptancia

El inverso de la impedancia corresponde a la admitancia (Y), siendo su componente imaginaria la susceptancia (B). Las magnitudes de admitancia y susceptancia se cuantifican en siemens (S). De manera análoga a la impedancia, la admitancia puede representarse mediante coordenadas rectangulares o polares: $Y = G + jB$ o $|Y| \angle \theta$. Considerando que la impedancia y la admitancia son recíprocas, su transformación resulta sencilla en formato polar: $|Y| = 1/|Z|$.

Al determinar el recíproco del ángulo de fase en notación polar, la orientación del signo se invierte de positivo a negativo o viceversa. Consecuentemente, el ángulo de fase de la admitancia corresponde al negativo del ángulo de fase de la impedancia. En otros términos, $Y = 1/|Z| \angle -\theta$. Convertir una reactancia pura, $X \angle \theta$, en susceptancia presenta un procedimiento muy similar: $B = 1/|X| \angle -\theta$.

4.4.14 Cálculo de Impedancias y Ángulos de Fase

Desarrollemos un análisis de impedancias, admitancias, susceptancias y la determinación de ángulos de fase en circuitos elementales mediante las siguientes directrices fundamentales:

- Regla 1: Las impedancias, resistencias y reactancias en serie se acumulan.
- Regla 2: La admitancia representa el inverso de la impedancia ($Y = 1/Z$) y recíprocamente. Cuando únicamente existe reactancia en la impedancia (reactancia pura), la susceptancia constituye el inverso negativo de la reactancia ($B = -1/X$). A modo de ilustración, $Z = 1 / |Y| \angle \theta = 1/|Y| \angle -\theta$ y $B = 1/|X| \angle -\theta$.
- Regla 3: Las admitancias, conductancias y susceptancias en paralelo se agregan.
- Regla 4: La reactancia inductiva y capacitiva en serie se neutralizan.
- Regla 5: $1/j = -j$.

Es importante considerar que, al combinar elementos en paralelo, generalmente resulta más práctico convertirlos a conductancias o susceptancias, las cuales pueden sumarse directamente. Posteriormente, el elemento combinado puede transformarse de nuevo a una resistencia o reactancia, si así se requiere.

4.4.15 Potencia Reactiva y Factor De Potencia

La potencia no solo expresa la magnitud del trabajo realizado (o la cantidad de energía almacenada), sino que también indica la rapidez de su ejecución. En el sistema métrico decimal, la potencia se expresa en watts (W): 1 watt significa que la energía se almacena o el trabajo se ejecuta a una velocidad de 1 julio por segundo.

Previamente se comprendió que, al incrementarse la corriente a través de un inductor, la energía se acumula en su campo magnético. El campo eléctrico de un capacitor almacena energía cuando su tensión aumenta. Dicha energía retorna al circuito cuando la corriente a través del inductor disminuye o cuando la tensión del capacitor decrece.

También se conoció que las tensiones y corrientes en estos componentes presentan un desfase de 90° entre sí. Durante una mitad del ciclo, una porción de energía se almacena en el inductor o capacitor, y la misma cantidad regresa en el ciclo subsiguiente. Un capacitor o inductor perfecto no disipa ni consume energía, pero la corriente circula en el circuito cuando se le aplica una tensión. Si no se consume energía en un capacitor o inductor perfecto, no se realiza trabajo ni se consume potencia.

4.4.16 Definición de la potencia reactiva

La potencia eléctrica equivale a los valores RMS de corriente multiplicados por la tensión se representa de la siguiente manera:

$$P = I \cdot V$$

Indudablemente existe tensión y corriente en el inductor y el capacitor.

¿Por qué no se consume energía? Puesto que solo se cumple cuando la corriente y la tensión están en fase, como en una resistencia cuyo ángulo de fase es cero. Cuanto más amplio sea el ángulo de fase, menor será el trabajo ejecutado por la fuente de alimentación que suministra la tensión y la corriente. Cuando el ángulo de fase alcanza $\pm 90^\circ$, no se realiza ningún trabajo y, por consiguiente, la tasa (o potencia) resulta igual a cero.

En la reactancia inductiva o capacitiva de un circuito, la energía puede almacenarse y devolverse del campo magnético del inductor o del campo eléctrico del capacitor, pero no se consumirá como energía. Únicamente la parte resistiva del circuito consume y disipa energía en forma de calor.

Un amperímetro y un voltímetro conectados a un circuito de CA para medir la tensión y la corriente a través de un inductor o capacitor mostrarán valores distintos de cero, pero multiplicarlos no proporciona una indicación precisa de la potencia disipada en el componente. Los medidores no consideran la diferencia de fase entre la tensión y la corriente.

Si se multiplican los valores RMS de tensión y corriente de estos medidores, se obtiene una cantidad denominada potencia aparente. Esto indica que multiplicar los valores RMS de tensión y corriente no siempre ofrece la imagen exacta. La potencia aparente se expresa en voltamperios (VA) en lugar de watts. La potencia aparente en un inductor o capacitor se denomina potencia reactiva o potencia no productiva, sin watts. La potencia reactiva se expresa en voltamperios reactivos (VAR). La potencia aparente en una resistencia se denomina potencia real porque la tensión y la corriente están en fase, de modo que la potencia se disipa en forma de calor o genera trabajo.

4.4.17 Definición y cálculo de potencia

Es posible determinar la potencia reactiva de un circuito mediante el empleo del ángulo de fase para establecer el coeficiente de potencia. El factor de potencia (FP) establece una relación entre la potencia aparente de un circuito y su potencia efectiva. La potencia real en un circuito con resistencia puede establecerse:

Para un circuito en serie:

$$P = I^2 \times R$$

donde I representa la corriente RMS.

Para un circuito paralelo:

$$P = V^2 / R$$

donde V corresponde a la tensión RMS.

Ambas expresiones matemáticas se obtienen con facilidad aplicando la Ley de Ohm para identificar la tensión o corriente ($V = I \times R$ e $I = V / R$) y sustituyendo dicho término por su equivalente según la mencionada ley.

Un método para calcular el factor de potencia consiste en dividir directamente la potencia real entre la potencia aparente.

$$FP = \frac{P_{REAL}}{P_{APARENTE}}$$

Si $PF = 1$, la tensión y la corriente mantienen una relación síncrona, y la totalidad de la potencia aparente se traduce en potencia activa. En contraste, si $PF = 0$, la tensión y la corriente presentan un desfase angular de 90° y la potencia aparente se transforma completamente en potencia reactiva.

La Figura 41 ilustra un circuito conectado en serie que comprende una resistencia de 75Ω y un inductor caracterizado por una reactancia inductiva de 100Ω a la frecuencia de la señal. El dispositivo de medición de tensión (voltímetro) registra 250 V RMS , mientras que el amperímetro detecta una corriente de 2 A RMS . Este escenario se corresponde con una potencia aparente calculada mediante el producto de $250 \text{ V} \times 2 \text{ A}$, resultando en 500 VA .

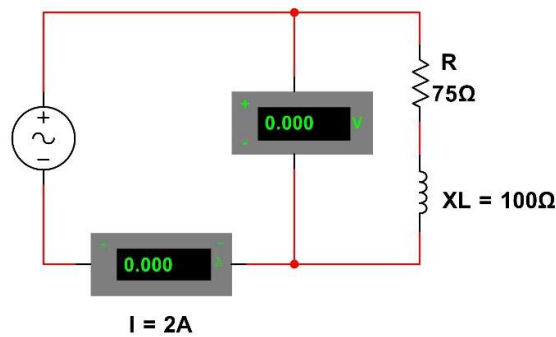


Figura 41. Circuito serie RL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

$$P_{REAL} = I^2 \times R = (2 \text{ A})^2 \times 75 \Omega = 4 \text{ A}^2 \times 75 \Omega = 300 \text{ W}$$

Ahora se calcula el factor de potencia:

$$FP = \frac{300 \text{ W}}{500 \text{ VA}} = 0,6$$

Otra forma de calcular la potencia real, si se conoce el factor de potencia, viene dada por:

$$P_{REAL} = P_{APARENTE} \times FP$$

En nuestro ejemplo:

$$P_{REAL} = 500 \text{ VA} \times 0,6 = 300 \text{ W}$$

El ángulo de fase también puede emplearse para determinar el coeficiente de potencia y la potencia efectiva. En la sección precedente, se aprendió a calcular el ángulo de fase de un circuito en serie o en paralelo. El factor de potencia se puede obtener a partir del ángulo de fase, mediante el cálculo del coseno del ángulo de fase:

$$\text{Factor de potencia} = \cos \theta$$

Donde θ representa el ángulo de fase entre la tensión y la corriente en el circuito. El factor de potencia (FP) mantiene un valor positivo, con independencia de si el ángulo de fase es positivo o negativo.

Como se puede constatar, en un circuito que únicamente contiene resistencia, donde la tensión y la corriente se encuentran en fase, el factor de potencia es 1 y la potencia efectiva resulta equivalente a la potencia aparente. Para un circuito que únicamente comprende capacitancia o inductancia en cualquier combinación, el factor de potencia se aproxima a 0, lo que implica la ausencia de potencia efectiva. En la mayoría de los circuitos prácticos, que incorporan resistencia, inductancia y capacitancia, y donde el ángulo de fase presenta un valor superior o inferior a 0° , el factor de potencia será ligeramente menor que la unidad. En un circuito de esta naturaleza, la potencia efectiva siempre será proporcionalmente inferior a la potencia aparente. Este constituye un aspecto fundamental que merece ser considerado con especial atención.

4.4.18 Circuitos Resonantes

Con todas las interrogantes abordadas previamente, se han explorado valores de inductores y capacitores que generan distintas reactancias inductivas y capacitivas. ¿Cabría preguntarse qué acontece cuando ambas reactancias resultan equivalentes?

En un circuito serie con un inductor y un capacitor, la tensión experimenta un desplazamiento angular de 90° adelantándose respecto a la corriente en el inductor; mientras que, en el capacitor la tensión se retarda 90° con relación a la corriente. Al tratarse de un circuito serie, la corriente que transita por todos los componentes permanece constante. Este fenómeno implica que las tensiones en el inductor y el capacitor se encuentran desfasadas 180° .

Dichas tensiones se neutralizan, dejando únicamente la tensión en la resistencia del circuito, la cual permanece en fase con la corriente.

En un circuito paralelo con inductancia y capacitancia, la tensión resulta idéntica en ambos elementos, pero las corrientes se encuentran desfasadas 180° . La corriente en el inductor se retarda 90° respecto a la tensión aplicada, mientras la corriente en el capacitor se adelanta 90° . La anulación de la corriente deja una resistencia en paralelo como único componente por donde puede circular la corriente, y la corriente remanente permanece en fase con la tensión.

Con independencia de la configuración serie o paralelo, se denomina circuito resonante cuando el valor de la reactancia inductiva equipara el valor de la reactancia capacitiva. Es fundamental recordar que la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia, mientras la reactancia capacitiva disminuye. La frecuencia en que ambas se igualan representa la frecuencia de resonancia del circuito.

4.4.19 Cálculos de la frecuencia de resonancia

La Figura 42 ilustra la intersección de dos líneas que representan la reactancia frente a la frecuencia: la línea curva, que decrece hacia la derecha, exhibe la reactancia capacitiva $X_C = \frac{1}{2\pi \times f \times C}$, y la línea recta ascendente muestra la reactancia inductiva $X_L = 2\pi \times f \times L$. En el punto de convergencia de las líneas, $X_C = X_L$ y el circuito alcanza su estado resonante. Las dos líneas se interceptan en un punto singular: la frecuencia de resonancia del circuito que emplea esos componentes.

Cualquier combinación de capacitor e inductor experimentará resonancia en una frecuencia específica.

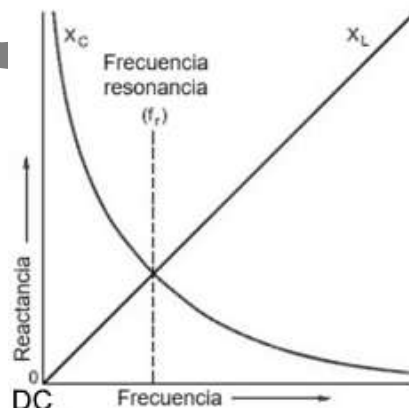


Figura 42. Respuesta de la capacitancia e inductancia reactiva en función de la frecuencia.
(Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Las escalas de ambos ejes en la representación gráfica son de carácter lineal, lo que origina la presencia de trazados curvos y rectilíneos. No obstante, en la mayoría de los manuales y documentos técnicos de ingeniería, las reactancias se visualizan mediante un diagrama con

escalas axiales logarítmicas, donde los diferentes tipos de reactancia se representan como líneas completamente rectas. Esta metodología de representación facilita la identificación precisa de la frecuencia de resonancia para un extenso intervalo de valores de capacitancia, inductancia y frecuencias.

Dado que el fenómeno de resonancia acontece cuando las reactancias presentan valores idénticos, es posible desarrollar una ecuación matemática que permita calcular la frecuencia de resonancia correspondiente a cualquier par de elementos capacitor-inductor:

$$X_L = 2\pi f L$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Establezca $X_L = X_C$ en resonancia, por lo tanto:

$$2\pi LC = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$(2\pi f)^2 = \frac{1}{LC}$$

Esto nos lleva a la fórmula para la frecuencia de resonancia:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Intentemos calcular una frecuencia de resonancia. ¿A qué frecuencia debería sintonizarse el generador de señales de la Figura 43 para la resonancia si la resistencia es de $22\ \Omega$, la bobina de $50\ \mu\text{H}$ y el capacitor tiene un valor de $40\ \text{pF}$? Probablemente, el mayor obstáculo en estos cálculos sea recordar convertir el valor del inductor a henrios y el del capacitor a faradios.

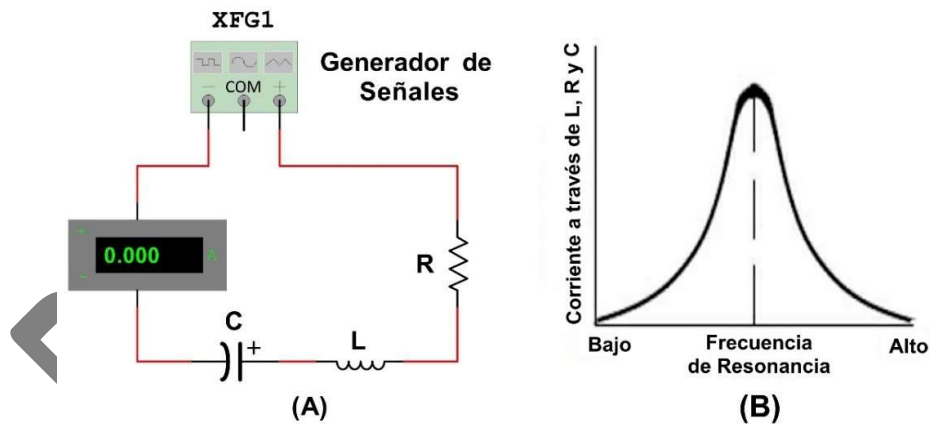


Figura 43. Circuito RLC para cálculo de resonancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(50 \times 10^{-6})(40 \times 10^{-12})}} = 3,56\ \text{MHz}$$

¿Qué ocurriría con f_r si el valor óhmico de la resistencia se modificara a $47\ \Omega$? Nada, el valor resistivo del circuito no genera ninguna alteración en la frecuencia de resonancia. Esta situación se fundamenta en que la resistencia no posee capacidad de almacenamiento de energía eléctrica ni magnética. El cálculo de la frecuencia de resonancia para un circuito en configuración paralela resulta idéntico al procedimiento empleado en un circuito en serie. Es irrelevante si los componentes inductivos (L) y capacitivos (C) se encuentran dispuestos en serie o en paralelo.

4.4.20 Energía almacenada en circuitos resonantes

La Figura 43 ilustra un dispositivo generador de señales vinculado a un circuito RLC en configuración serie. El aparato productor de señales genera una corriente de frecuencia variable a través del sistema, provocando una tensión en cada elemento componente. Como se estableció previamente, las tensiones del inductor y capacitor permanecen sistemáticamente desfasadas 180° .

Cuando el generador de señales emite una señal a la frecuencia de resonancia del circuito, las tensiones del inductor y capacitor resultan equivalentes y mantienen un desfase específico. Esto implica que se acumula idéntica cantidad energética en cada componente, produciéndose transferencias alternativas entre ellos.

Si los componentes presentan mínimas pérdidas resistivas, la energía suministrada continuamente por el generador de señales provocará que las tensiones a través del inductor y capacitor incrementen hasta niveles múltiples del voltaje aplicado inicialmente. Análogamente, las corrientes que circulan entre inductor y capacitor para intercambiar la energía almacenada alcanzan su punto máximo durante la resonancia. Estas corrientes reciben la denominación de corrientes circulantes debido a su movimiento oscilatorio mientras la energía transita entre las dos reactancias. (El almacenamiento energético explica también por qué los circuitos sintonizados ocasionalmente se denominan circuitos tanque).

Como representación analógica, considérese impulsar un columpio en un área infantil. Aunque cada empuje individual resulta pequeño, con mínima fricción, los impulsos pueden incrementar significativamente la amplitud del recorrido respecto a un único empujón.

4.4.21 Impedancia de los circuitos resonantes vs. frecuencia

Con las tensiones del inductor y capacitor anulándose mutuamente, la única impedancia experimentada por el generador de señales corresponde a la resistencia, R . Para componentes teóricamente perfectos y carentes de resistencia, no existiría restricción alguna a la corriente circulante. Un circuito resonante serie ideal se comportaría entonces como un cortocircuito para el generador de señales. Siempre existirá cierta resistencia en el circuito, pero si esta resulta mínima, la corriente será sustancial según los principios de la Ley de Ohm. La variación de corriente respecto a la frecuencia se representa en la Figura 43 (B), alcanzando su máximo en la frecuencia de resonancia, f_r . En un circuito resonante paralelo existen múltiples rutas de corriente, manteniéndose idéntica tensión en los componentes.

La Figura 44 presenta un circuito LC en configuración paralela conectado a un generador de señales. La tensión aplicada induce corrientes en cada una de las tres ramas del circuito. Durante la resonancia, la corriente del inductor permanecerá desfasada 180° con relación a la corriente del capacitor, resultando su suma equivalente a cero.

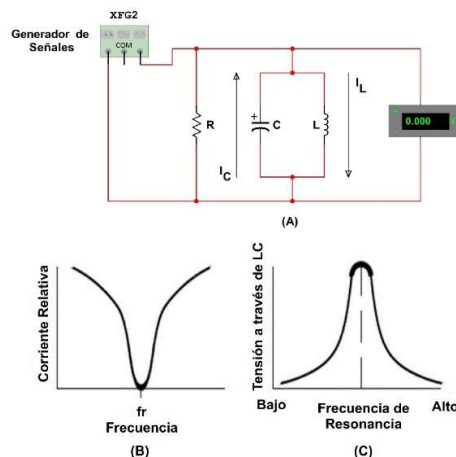


Figura 44. Circuito LC paralelo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Como consecuencia, el circuito resonante en paralelo exhibe una elevada impedancia y puede asemejarse a un circuito abierto para el generador de señales, puesto que la corriente proveniente de este resulta considerablemente reducida. Durante la resonancia, la magnitud de la impedancia de un circuito con una resistencia, un inductor y un capacitor conectados en paralelo será prácticamente equivalente a la resistencia del propio circuito.

La Figura 44 (B) ilustra un gráfico de la corriente relativa del generador. La corriente en la entrada de un circuito RLC en paralelo alcanza su valor mínimo en resonancia. No obstante, constituye un error presumir que, debido a la reducida corriente del generador, la corriente que circula a través del capacitor y el inductor también será pequeña. De manera similar a un circuito resonante en serie, la energía intercambiada entre el inductor y el capacitor puede alcanzar magnitudes considerables. En el punto de resonancia, las corrientes circulantes serán máximas, únicamente limitadas por las pérdidas resistivas en los componentes. Aunque la corriente total del generador es reducida en resonancia, la tensión medida a través del tanque logra su valor máximo en este punto. La Figura 44 (C) presenta un gráfico de la tensión a través del inductor y el capacitor.

Resulta igualmente relevante examinar la relación de fase entre la tensión de un circuito resonante y la corriente que lo atraviesa. Dado que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son idénticas, pero de signo opuesto, sus efectos se neutralizan mutuamente. La corriente y la tensión resultantes en un circuito resonante permanecen en fase. Este principio es aplicable tanto a circuitos resonantes en serie como a circuitos resonantes en paralelo.

4.4.22 Factor de Calidad (Q) de componentes y circuitos

Se ha profundizado en el análisis de resistencias, capacitores e inductores ideales y su comportamiento en circuitos de corriente alterna. Se ha evidenciado que la resistencia en un circuito genera una desviación respecto a los componentes ideales al disipar una porción de la energía almacenada. Surge entonces el cuestionamiento: ¿Cómo determinar qué tan próximo está un componente al ideal? ¿Cuál será su impacto en un circuito diseñado? Para responder, se puede calcular un valor para inductores y capacitores que evalúe sus ventajas relativas: el factor de calidad denominado Q. Igualmente, es posible asignar un valor Q a un circuito completo como medida de su proximidad al rendimiento ideal, al menos en términos de sus propiedades durante la resonancia.

Una conceptualización de Q radica en la proporción entre la reactancia y la resistencia. Esencialmente, representa la relación entre la energía almacenada y la energía disipada. Cuanto más reducidas sean las pérdidas resistivas del componente, más elevado será su valor Q.

$$Q = \frac{X}{R}$$

La Figura 45 ilustra que un capacitor puede concebirse como un capacitor ideal conectado en serie con una resistencia, y un inductor puede interpretarse como un inductor ideal en serie con una resistencia. Esta resistencia parásita resulta inherente e inseparable del inductor o capacitor, pero opera de manera similar a si estuviera conectada en serie con un componente ideal sin pérdidas. La Q de un inductor real, L, equivale a la reactancia inductiva dividida por la resistencia, mientras que la Q de un capacitor real, C, corresponde a la reactancia capacitiva dividida por la resistencia.

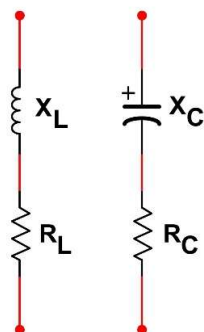


Figura 45. Capacitores e inductores considerados como ideales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Si se pretende determinar el factor de calidad (Q) de un circuito que incorpora tanto resistencia parásita como resistencias convencionales, resulta necesario agregar ambas para obtener el valor de R empleado en la ecuación correspondiente. Considerando que la adición de una resistencia únicamente puede incrementar la resistencia total, el factor Q del circuito experimentará una reducción inevitable al incorporar resistencia en serie con un inductor o capacitor. No existe alternativa para mejorar la Q de un inductor o capacitor más allá de diseñar un componente con una resistencia parásita minimizada.

En un circuito RLC resonante, la influencia de la resistencia varía según la configuración del circuito sea serie o paralelo. En una disposición serie, el incremento de R implica mayores pérdidas y disminución de la Q. Por el contrario, en un circuito paralelo, el aumento de R representa menores pérdidas y provoca un incremento de la Q. Precisamente por esta razón, las ecuaciones para la Q en circuitos resonantes serie y paralelo mantienen una relación recíproca.

$$Q_{SERIE} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad y \quad Q_{PARALELO} = R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Mediante manipulaciones algebraicas y considerando que $X_L = X_C$ en resonancia, es posible calcular la Q simplemente conociendo la reactancia del inductor o del capacitor a la frecuencia de resonancia.

$$Q_{SERIE} = \frac{X}{R} \quad y \quad Q_{PARALELO} = \frac{R}{X}$$

Por ejemplo, en la Figura 46 (A), la Q del circuito es 10, calculada a partir de 1000 Ω de reactancia divididos por la resistencia de pérdida de 100 Ω . En el circuito en paralelo de la Figura 46 (B), la Q = 20, resultante de 100 k Ω de resistencia divididos por 5000 Ω de reactancia.

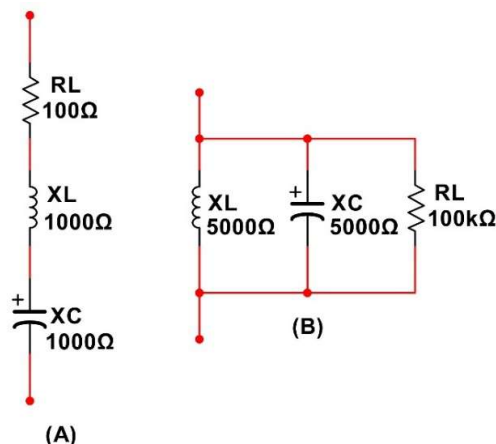


Figura 46. Circuito ejemplo RLC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La correlación entre el factor Q del circuito resonante y las tensiones internas y corrientes circulantes resulta ahora evidente. Cuanto más elevado sea el valor de Q , más significativas serán las tensiones y corrientes. En realidad, dentro de circuitos resonantes, como las redes de sintonización para amplificadores y la adaptación de impedancias, las tensiones y corrientes internas pueden alcanzar niveles suficientemente altos como para provocar un arco a través de los capacitores de sintonización o fundir las conexiones soldadas, incluso a niveles de potencia moderados.

Otra observación práctica: la resistencia interna de un capacitor tiende a ser sustancialmente menor que la de un inductor, por lo que frecuentemente se omite la resistencia del capacitor y se considera únicamente la asociada al inductor al calcular la Q de un circuito resonante. En otros términos, la Q del inductor suele constituir el factor determinante de la Q de un circuito resonante.

4.4.23 Q y ancho de banda de un circuito resonante

El ancho de banda hace referencia al intervalo de frecuencia en el cual la respuesta del circuito, tanto en tensión como en corriente, no disminuye más de 3 dB respecto a la respuesta pico. Los puntos de -3 dB se representan en la Figura 47, donde se señalan los anchos de banda. Dado que esta reducción de 3 dB en la señal representa los puntos donde la potencia del circuito equivale a la mitad de la potencia resonante, los puntos de -3 dB también reciben la denominación de puntos de media potencia. En estos puntos, la tensión y la corriente se han reducido a 0,707 veces sus valores pico.

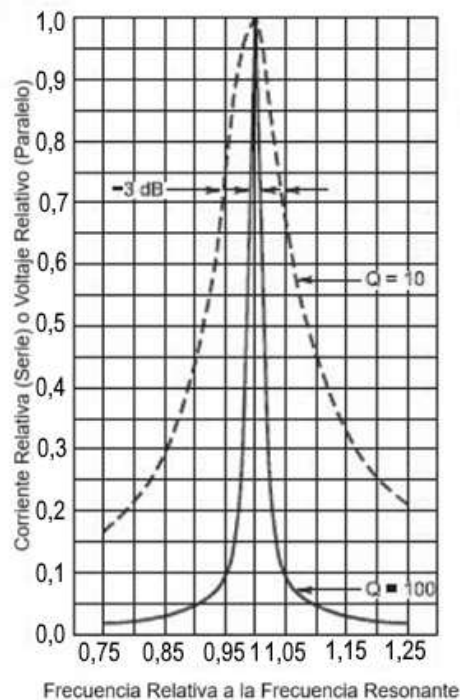


Figura 47. Ancho de Banda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Las frecuencias de corte, donde la potencia cae a la mitad de su valor máximo, corresponden a f_1 y f_2 ; siendo Δf el intervalo existente entre ambas frecuencias, el cual representa el ancho de banda de media potencia (o ancho de banda a -3 dB). Un sistema de circuitos con un margen de frecuencia reducido se caracteriza como "*agudo*", mientras que aquel con un margen de frecuencia más extenso se denomina "*ancho*". Es factible determinar el margen de frecuencia de un circuito resonante fundamentándose en el coeficiente Q del circuito y su frecuencia de resonancia.

$$\Delta f = \frac{f_r}{Q}$$

$$\Delta f = \frac{f_r}{Q} = \frac{7,1 \times 10^6}{150} = 47,3 \text{ kHz}$$

donde:

- Δf = el ancho de banda de media potencia
- f_r = la frecuencia de resonancia del circuito
- Q = el circuito Q

Cuanto más elevado sea el coeficiente Q del circuito, más reducido resultará el ancho de banda de un circuito resonante, tanto en configuración serie como paralela. La Figura 47 ilustra el ancho de banda relativo de un circuito con dos valores Q diferentes. Se procederá a calcular el ancho de banda a media potencia de un circuito en paralelo con una frecuencia de resonancia de 7,1 MHz y un valor Q de 150.

Para identificar las frecuencias de corte superior e inferior, se deberá restar la mitad del ancho de banda total a la frecuencia central para determinar la frecuencia de corte inferior y sumar la mitad del ancho de banda para obtener la frecuencia de corte superior. La respuesta de este circuito proporcionará al menos la mitad de la potencia pico de la señal para señales comprendidas en el intervalo de 7,07635 a 7,12365 MHz.

Se realizarán los cálculos para la siguiente combinación de frecuencia de resonancia y Q:

$$f_r = 3,7 \text{ MHz y } Q = 118: \Delta f = 31,4 \text{ kHz}$$

Los circuitos de adaptación de impedancia que incorporan inductancias y capacitancias también emplean energía circulante para transformar una relación de tensión a corriente (que constituye la definición de impedancia) en la salida a otra en la entrada. El coeficiente Q de los componentes y del circuito igualmente influye en su rendimiento. A medida que se incrementa la Q de un circuito de adaptación de impedancia, aumentan las tensiones y corrientes internas, y el ancho de banda de adaptación de impedancia disminuye, de manera análoga a un circuito resonante.

4.4.24 Efecto Piel y Q

Conforme se incrementa la frecuencia, los campos eléctricos y magnéticos de las señales penetran cada vez menos profundamente en un conductor metálico. En corriente directa (CD), la totalidad de la sección transversal del cable se emplea para transportar corrientes eléctricas. Al elevarse la frecuencia, el área efectiva se reduce progresivamente, dado que la corriente se concentra cada vez más cerca de la superficie del conductor. Este fenómeno disminuye el volumen disponible para la circulación de electrones e incrementa su resistencia efectiva.

En el intervalo de HF, la totalidad de la corriente circula por las milésimas de pulgada externas de un conductor. En VHF y UHF, la profundidad se sitúa en el rango de diezmilésimas de pulgada. (Precisamente por esta razón, numerosos inductores de VHF y UHF se encuentran plateados: para proporcionar una ruta de baja resistencia para la corriente). De hecho, en VHF y UHF, los conductores podrían estar fabricados de plástico metalizado sin consecuencias adversas significativas. El efecto piel constituye la causa principal del incremento de la resistencia parásita de los inductores (originada principalmente por la resistencia del cable empleado en su bobinado) al aumentar la frecuencia.

Debido al incremento de la reactancia, la Q del inductor experimentará un aumento con el ascenso de la frecuencia hasta cierto punto, pero posteriormente la resistencia parásita provocada por el efecto pelicular se eleva y la Q disminuye, tal como se ilustra en la Figura 48.

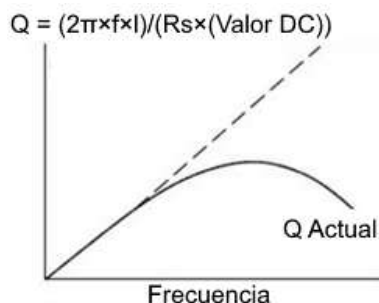


Figura 48. Q de una inductancia y la frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.4.25 Autoresonancia

Debido a la existencia de capacitancia parasitaria entre las espiras (capacidades de magnitud reducida que se generan entre el bobinado de un inductor), tal como se ilustra en la Figura 49, el inductor puede transformarse en un circuito con autorresonante a una frecuencia suficientemente elevada. De manera análoga a un circuito resonante conformado por componentes discretos, la impedancia del inductor alcanzará su punto máximo en la frecuencia de autorresonancia, y por encima de este umbral, el inductor experimentará un comportamiento capacitivo. El grado de resonancia está condicionado por la configuración constructiva del inductor, existiendo diversas metodologías para su regulación. (Los capacitores igualmente pueden manifestar fenómenos de autorresonancia).

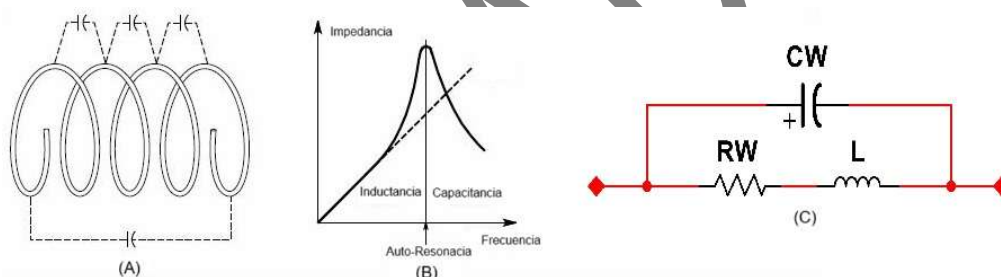


Figura 49. Circuito auto resonante. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La autorresonancia adquiere una relevancia fundamental en VHF y UHF, debido a que la frecuencia autorresonante de diversos componentes habituales resulta equivalente o inferior a la frecuencia de utilización del elemento. En tal situación, es posible implementar técnicas especializadas para construir componentes que funcionen en estas frecuencias, minimizando los efectos secundarios no deseados. En caso contrario, se debe descartar completamente la concepción de elementos concentrados, optando por metodologías propias de microondas, como las líneas de banda y las guías de onda.

4.4.26 Efectos del empaquetado de componentes en RF

Un fenómeno conexo lo constituye la inductancia parasitaria de los conductores empleados para establecer contacto con componentes discretos. Incluso un cable rectilíneo presenta cierta inductancia, que, aunque no es elevada, puede resultar significativa. A modo de ejemplo, el cable AWG N°24, comúnmente utilizado en conexiones de componentes discretos, posee una inductancia aproximada de 9,45 nH/cm. En circuitos que operan en VHF y frecuencias superiores, incluyendo circuitos digitales de alta velocidad, esta reactancia inductiva puede tornarse relevante e incrementarse con la frecuencia, provocando que el circuito se comporte de manera impredecible (y generalmente indeseable). Una práctica óptima de diseño y construcción en estas frecuencias consiste en minimizar los efectos de la inductancia de los cables mediante la utilización de componentes de montaje superficial o la reducción de la longitud de los cables para que sean lo más breves posible.

A medida que la longitud de onda se acorta, la longitud eléctrica de los cables de los componentes (y de cualquier cable de conexión) genera desfases en la señal que transita a través de ellos. Dichos desfases pueden resultar extremadamente complejos de controlar y provocan oscilaciones y una respuesta de frecuencia irregular en frecuencias de microondas.

Los circuitos integrados representaron un avance significativo al reducir la extensión de los cables y aumentar la frecuencia de operación. El popular circuito integrado encapsulado dual en línea (DIP, por sus siglas en inglés) se transformó rápidamente en un estándar para circuitos analógicos y digitales, permitiendo la operación en el rango inferior de UHF. Comprende dos hileras de pines con una separación de 2,5 mm (0,1 pulgadas), con filas de 8 a 15 mm (0,3 a 0,6 pulgadas) a lo largo de los lados opuestos de un cuerpo rectangular de plástico o cerámica. Dado que los pines se insertan en orificios de la placa de circuito impreso y se extienden a través de ella para ser soldados en uno o ambos lados, el encapsulado DIP constituye un ejemplo de componente de orificio pasante. Elementos como resistencias y capacitores con cables conductores también son componentes de orificio pasante. Sin embargo, a medida que incrementaba la complejidad de los dispositivos y la frecuencia de operación, incluso los cables conductores de los encapsulados DIP compactos se tornaron excesivamente prolongados. La solución se encontró en los componentes de montaje superficial que carecen de cables conductores, presentando únicamente terminales en el lateral del encapsulado. Los componentes de montaje superficial (SMT, por sus siglas en inglés) se depositan directamente sobre las pistas expuestas de una placa de circuito, recubiertas con pasta de soldadura. El conjunto completo se calienta hasta que la pasta de soldadura se funde y establece la conexión permanente, fijando el componente a la placa. Los componentes SMT pueden alcanzar dimensiones tan reducidas como 1 milímetro de lado, lo que permite construir el circuito con pistas de circuito más breves. Dado que los componentes SMT presentan menor inductancia y capacitancia parasitarias, resultan compatibles con el rango de VHF, UHF y microondas.

4.4.27 Núcleos Magnéticos

Los inductores retienen energía magnética, generando reactancia. Estos dispositivos comúnmente se representan como un enrollamiento clásico de cable metálico que recorre una forma circular, esta disposición de enrollamiento se denomina solenoidal, de donde proviene el término habitual "bobina". El elemento central de un inductor es cualquier sustancia alrededor de la cual se envuelve el cable conductor, incluso el aire. (Un inductor cuyo elemento central está compuesto exclusivamente de aire se conoce como bobinado aéreo).

Las bobinas solenoidales gozan de gran popularidad en publicaciones técnicas, pero el procedimiento de enrollar cable alrededor de una estructura hueca rellena únicamente de aire constituye un método relativamente poco eficiente para almacenar energía magnética. Una estructura fabricada con material magnético incrementa el almacenamiento energético porque concentra el campo magnético producido por la corriente en el devanado circundante. Un campo magnético más intenso potencia la inductancia del inductor.

La inductancia se determina por la cantidad de revoluciones del cable en el elemento central y por la permeabilidad del material constitutivo. La permeabilidad representa una medición de la intensidad del campo magnético en el núcleo en comparación con la intensidad del campo en un núcleo de aire. Los núcleos con superior permeabilidad presentan mayor inductancia para idéntico número de vueltas. En términos más precisos, si se construyen dos inductores con 10 vueltas alrededor de diferentes materiales de núcleo, el núcleo con mayor permeabilidad exhibirá superior inductancia.

Los fabricantes proporcionan una extensa gama de materiales, o combinaciones, para ofrecer núcleos con rendimiento óptimo en un intervalo de frecuencia específico. Los núcleos de hierro pulverizado combinan diminutas partículas férricas con sustancias aglutinantes magnéticamente inertes.

La fusión de materiales como compuestos de níquel-zinc y manganeso-zinc con hierro genera núcleos cerámicos de ferrita. Las denominaciones químicas de los compuestos féreos se fundamentan en la palabra latina para hierro, ferrum, de donde deriva el término ferrita. Los

inductores con núcleos de material magnético también se denominan inductores ferromagnéticos.

La selección de materiales para el núcleo de un inductor específico implica una negociación de características. Los núcleos de hierro pulverizado generalmente exhiben superior estabilidad térmica y mantienen sus propiedades a corrientes más elevadas. No obstante, los núcleos de ferrita suelen presentar valores de permeabilidad más altos, por lo que los inductores fabricados con núcleos de ferrita requieren menos espiras para producir un valor de inductancia determinado.

Algunos inductores se fabrican con capacidad de ajuste mediante enrollamiento sobre un molde que contiene un núcleo roscado móvil o un núcleo de lingote. El núcleo se regula con un destornillador o herramienta especializada para desplazarlo dentro y fuera de la bobina. Al insertar el núcleo en la bobina, se modifica su inductancia. Los núcleos de ferrita, los más habituales, poseen alta permeabilidad relativa e incrementan su inductancia conforme se inserta el núcleo. La baja permeabilidad relativa de los núcleos de latón provoca una reducción de la inductancia.

Los núcleos magnéticos también se emplean en transformadores que acoplan la energía de un devanado primario a un devanado secundario a través del núcleo. Al utilizar transformadores de cualquier tipología, resulta crucial evitar sobrepasar la capacidad del núcleo para almacenar energía magnética, un fenómeno denominado saturación. Cuando ocurre la saturación, la forma de onda de salida se distorsiona, generando armónicos y otros productos de distorsión. El núcleo de un transformador contendrá parte de la energía magnética proveniente de la corriente de magnetización en el devanado primario, incluso si no existe carga conectada al secundario.

4.4.28 Forma del Núcleo – Toroides y Perlas

La configuración estructural del núcleo de un inductor influye significativamente en la contención de su campo magnético. Dentro de un núcleo solenoidal, el campo magnético se extiende no únicamente al interior del componente, sino que también abarca el espacio circundante. Esta característica permite que el campo magnético interactúe o se acople con conductores próximos. Dicho acoplamiento generalmente provoca rutas de señalización no intencionadas e interacciones entre elementos, por consiguiente, resulta necesario implementar blindajes externos u otros procedimientos de aislamiento.

Para minimizar el acoplamiento no deseado, se emplea un núcleo toroidal con geometría anular. Al enrollar cable sobre este tipo de núcleo, se genera un inductor toroidal. Prácticamente la totalidad del campo magnético de un inductor toroidal permanece contenido dentro del propio núcleo toroidal. Los inductores toroidales representan una de las tipologías más utilizadas en circuitos de RF, puesto que pueden disponerse próximos entre sí en una placa de circuito con una interacción prácticamente inexistente.

Los núcleos toroidales constituyen herramientas sumamente eficaces para resolver múltiples desafíos relacionados con interferencias de radiofrecuencia (RFI, por sus siglas en inglés). A modo de ilustración, es posible seleccionar un núcleo de ferrita con mezcla tipo 43 y enrollar múltiples vueltas de un cable telefónico o de audio a través del núcleo para generar un dispositivo de supresión de modo común. Este dispositivo está concebido para inhibir cualquier propagación de energía de RF compartida en dichos cables. Las señales acústicas transitan por el dispositivo sin obstáculos, mientras que las señales de radiofrecuencia permanecen bloqueadas.

Una perla de ferrita representa un núcleo de dimensiones microscópicas con una abertura específicamente diseñada para deslizarse sobre cables de componentes. Frecuentemente se implementan como supresores de oscilaciones de VHF y UHF en los terminales de entrada y salida de amplificadores de alta y ultra alta frecuencia. La utilización de perlas de ferrita como supresores parásitos revela otra propiedad fascinante de estos materiales: su pérdida experimenta variaciones según la frecuencia. Cada composición presenta un conjunto distintivo de características de pérdida en función de la frecuencia. Aunque típicamente se busca seleccionar un material de núcleo de inductor con pérdidas mínimas en una frecuencia específica

o un rango determinado, en ocasiones se requiere un material de núcleo con elevadas pérdidas para absorber o disipar energía.

Determinar la inductancia de un inductor toroidal resulta un proceso relativamente sencillo. Inicialmente, es fundamental conocer el valor del índice de inductancia del núcleo que se utilizará. Este valor, denominado A_L , se encuentra documentado en las especificaciones técnicas del fabricante. En el caso de toroides de hierro en polvo, los valores de A_L se expresan en microhenrios por 100 espiras al cuadrado.

Para calcular la inductancia de un inductor toroidal de hierro en polvo cuando se conocen el número de vueltas y el material del núcleo, se emplea la ecuación:

$$L = \frac{A_L * N^2}{10000}$$

donde:

- L = inductancia en μH
- A_L = índice de inductancia, en μH por cada 100 vueltas al cuadrado
- N = número de vueltas

A menudo se desea saber cuántas vueltas se deben enrollar en el núcleo para producir un inductor con un valor específico.

$$N = 100 \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Al arrollar el conductor metálico en un toroide, es fundamental considerar que, si el alambre simplemente atraviesa el núcleo central, se genera un inductor de una única vuelta, tal como se representa en la Figura 50. Cada ocasión en que el conductor metálico transita por el centro del núcleo, se contabiliza como una vuelta adicional. Un error frecuente consiste en computar una rotación completa alrededor del anillo nuclear como una vuelta única. No obstante, esta práctica puede originar un inductor con dos vueltas.

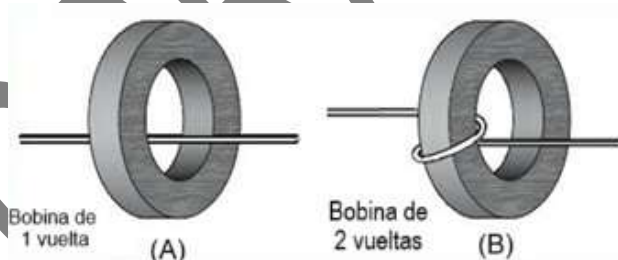


Figura 50. Conteo de N en un toroide. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Las estimaciones para núcleos de ferrita resultan prácticamente idénticas, aunque los valores de A_L se expresan en milihenrios por 1000 vueltas al cuadrado, en lugar de microhenrios por 100 vueltas al cuadrado, debido a la superior permeabilidad de la ferrita.

$$L = \frac{A_L * N^2}{1000000}$$

donde:

- L = inductancia en mH
- A_L = índice de inductancia, en mH por cada 1000 vueltas al cuadrado.
- N = número de vueltas.

4.5 Circuitos de Radio

En esta sección se introducirán algunos de los circuitos que realizan funciones especiales como frecuencia, fase, modulación, ancho de banda, banda lateral, etc. Los diagramas de bloques que

describen radios simples muestran como circuitos sucesivos, llamados etapas son arreglados para construir transmisores y receptores básicos de radio.

4.5.1 Osciladores y amplificadores

Un generador de ondas produce una señal constante en una determinada frecuencia. Los generadores de oscilación se emplean tanto en sistemas receptores como en emisores para establecer la frecuencia de funcionamiento. En un dispositivo transmisor, la señal generada por el oscilador se somete a modulación y se incrementa su amplitud antes de ser dirigida hacia una antena.

La señal emitida por el generador de ondas carece de potencia suficiente para asegurar una comunicación efectiva a grandes distancias. Un circuito amplificador, denominado regulador, permite que el oscilador opere de manera continua a baja potencia, preservando la estabilidad de su frecuencia. La señal de salida del regulador se transfiere a un amplificador de potencia con capacidad energética adecuada para garantizar una comunicación confiable entre diferentes estaciones. Para habilitar e inhabilitar la señal de salida en código Morse, las etapas del regulador y del amplificador de potencia se activan y desactivan mediante un dispositivo telegráfico. La Figura 51 representa gráficamente cómo se integran estas etapas para configurar un transmisor de código Morse elemental.

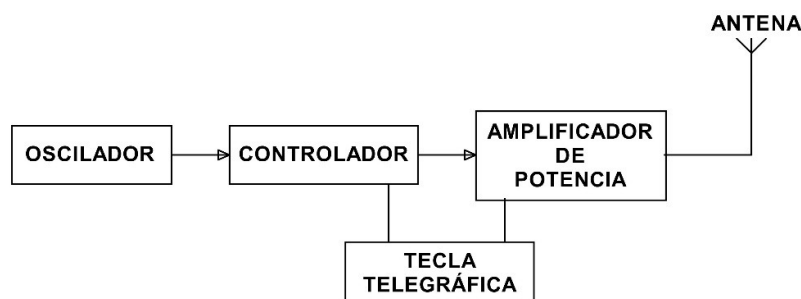


Figura 51. Transmisor de código morse. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

4.5.2 Moduladores

El procedimiento de integrar señales de información o comunicación vocal con una señal de radiofrecuencia se denomina modulación. En consecuencia, un dispositivo electrónico que ejecuta la función de modulación recibe el nombre de modulador. El propósito del modulador consiste en incorporar la señal de información o comunicación vocal a una señal portadora de radiofrecuencia. El resultado obtenido es una señal de radiofrecuencia susceptible de ser transmitida mediante ondas radioeléctricas. Un circuito demodulador se encarga de extraer la información contenida en una señal que ha sido modulada. La modulación será analizada con mayor profundidad más adelante.

4.5.3 Rectificadores y fuentes de poder

Prácticamente la totalidad de los equipos de radioaficionado precisan suministro energético. Los dispositivos electrónicos demandan CD para su funcionamiento, por consiguiente, se necesita un sistema de alimentación (integrado o externo) para convertir la corriente alterna doméstica. La mayoría de los equipos de radioaficionado emplean CD a +13,8 V, una tensión compatible con los sistemas de alimentación vehiculares para su operación móvil.

Una fuente de alimentación comprende tres componentes fundamentales: un transformador de entrada, un rectificador y un circuito de salida con filtro-regulador. El transformador de entrada transforma la corriente doméstica de 120 V CA a una tensión próxima a la requerida de 13,8 V. Adicionalmente, proporciona aislamiento de la salida de la fuente de alimentación respecto a la línea de CA. Esta constituye una relevante medida de seguridad, dado que la salida negativa de

la fuente de alimentación generalmente se conecta a la tierra de la estación y a las envolventes metálicas de los equipos, que habitualmente están en contacto directo con el operador.

4.5.3.1 Circuitos Rectificadores

Tras reducir la tensión de CA a un valor inferior mediante el transformador de entrada, un circuito rectificador convierte la forma de onda bipolar de CA en pulsos de CD, como se ilustra en la Figura 52. No se debe confundir un rectificador de un solo diodo con un circuito rectificador: ambos comparten denominación, pero uno representa un componente y el otro un circuito. Existen dos circuitos rectificadores básicos: el de media onda y el de onda completa.

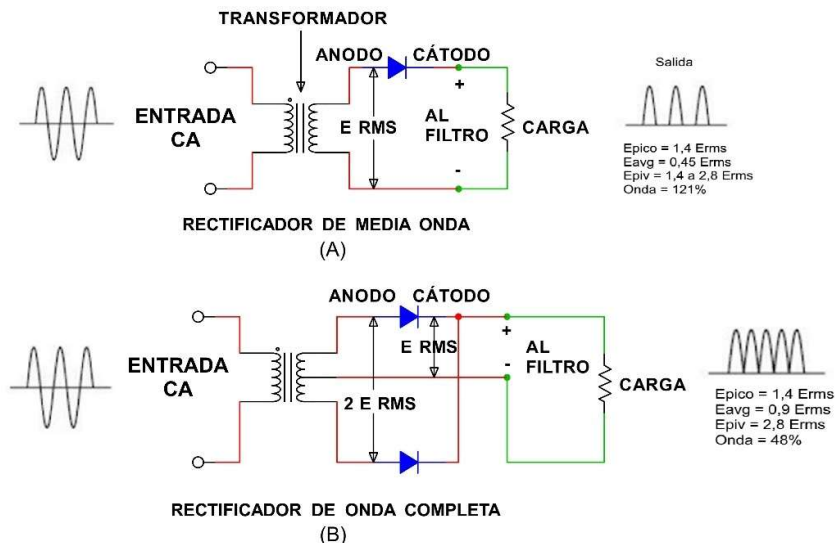


Figura 52. Dos circuitos rectificadores básicos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

El rectificador de media onda que se muestra en la Figura 52 (A) utiliza un solo diodo que permite el flujo de corriente durante la mitad de la forma de onda de CA de entrada (180°) desde el transformador. Esto crea una serie de pulsos de corriente en la carga a la misma frecuencia que la tensión de entrada. La duración entre pulsos es igual cuando no fluye corriente.

El rectificador de onda completa que se muestra en la Figura 52 (B) consiste en dos rectificadores de media onda que operan en semiciclos alternos. Este rectificador requiere que el devanado de salida del transformador tenga una toma central para proporcionar una ruta de retorno para la corriente que fluye en la carga. La ventaja del rectificador de onda completa es que la salida se produce durante los 360° del ciclo de CA. La salida de los rectificadores de onda completa es una serie de pulsos al doble de la frecuencia de la tensión de entrada.

En la Figura 53 se muestra un segundo tipo de rectificador de onda completa, llamado puente de onda completa. Este circuito añade dos diodos (cuatro en total), pero elimina la necesidad de un devanado con toma central.

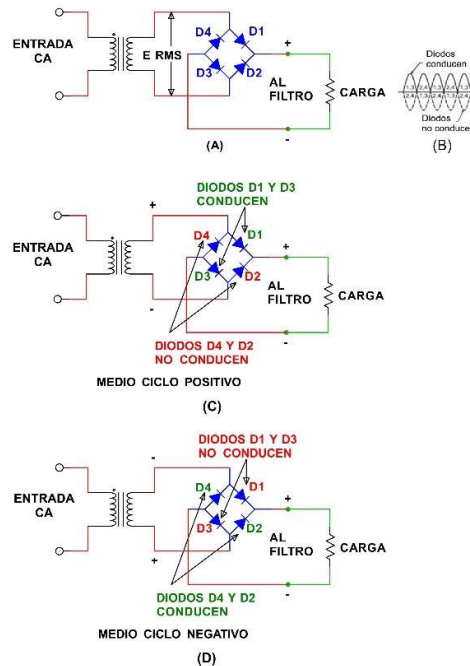


Figura 53. Rectificador de onda completa. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

4.5.3.2 Circuitos de filtrado de fuentes de poder

Las señales de corriente directa (CD) generadas por un rectificador presentan características inadecuadas para su aplicación directa en sistemas electrónicos. Dichas señales requieren un proceso de suavizado para lograr una tensión de salida con relativa estabilidad. Este procedimiento de estabilización se ejecuta mediante una estructura de filtrado compuesta por elementos capacitivos o una combinación de capacitores e inductores.

La oscilación en la tensión de salida provocada por las pulsaciones de corriente se denomina rizado, cuantificándose como el porcentaje de variación pico a pico en relación con la tensión media de salida. El método más frecuente para minimizar este rizado consiste en implementar un capacitor de filtrado de considerable dimensión en la etapa de salida del rectificador. Como se ilustra en la Figura 54, esta técnica recibe la denominación de filtro de entrada de capacitor. Es factible encontrar fuentes de alimentación de alta tensión (HV, por sus siglas en inglés) antiguas destinadas a amplificadores de potencia de RF que incorporan un inductor de choque junto a un segundo capacitor de filtrado. Las fuentes de alimentación elementales generalmente prescinden del inductor, dado que el capacitor por sí mismo proporciona un filtrado suficiente en la mayoría de las situaciones.

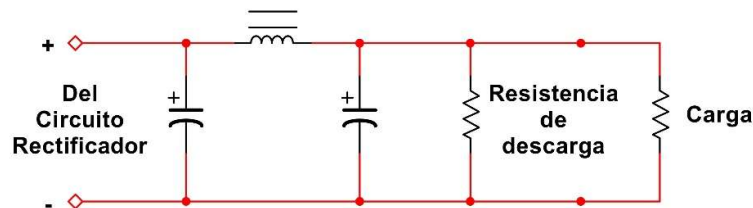


Figura 54. Filtro de entrada de capacitor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

4.5.3.3 Seguridad de las fuentes de poder

La protección resulta fundamental en el diseño de sistemas de alimentación eléctrica, considerando la conexión directa a la red de corriente alterna y la considerable cantidad de energía que estos sistemas gestionan y almacenan. Los elementos de protección en el circuito primario se implementan para prevenir riesgos asociados con sobrecargas eléctricas o interrupciones del circuito, siendo imperativo que todos los dispositivos de alimentación cuenten con un mecanismo de conexión/desconexión que permita interrumpir el suministro de corriente alterna cuando no se requiera su funcionamiento.

Otro riesgo inherente en los sistemas de alimentación lo constituye la energía acumulada en los capacitores de filtrado. Cuando el dispositivo se desconecta sin carga conectada, la energía almacenada en el capacitor queda sin una ruta de descarga, manteniéndose una tensión significativa en sus terminales. Para gestionar este potencial riesgo, se implementan resistencias de descarga diseñadas para disipar gradualmente la energía almacenada. Estas resistencias, conectadas a los capacitores de filtrado, como se muestra en la Figura 54, poseen una resistencia lo suficientemente elevada para no interferir con el funcionamiento normal del sistema. En el momento de desconectar la alimentación, y en ausencia de carga, dichas resistencias disipan progresivamente la energía almacenada transformándola en calor, logrando reducir la tensión del capacitor a niveles seguros en un breve intervalo temporal. El profesional que interactúe con estos sistemas debe garantizar un tiempo de espera prudencial que permita a las resistencias de purga completar su proceso de descarga tras la desconexión de la alimentación.

4.5.3.4 Fuentes de alimentación conmutadas o de modo conmutado

Los sistemas de alimentación que emplean filtros de entrada basados en capacitores o inductores, junto con reguladores de tensión lineales para proporcionar procesos de filtrado y regulación, reciben la denominación de fuentes lineales.

Alternativamente, existe otra tipología de circuitos de filtrado y regulación que fundamenta su funcionamiento en la utilización de impulsos de corriente de alta frecuencia para gestionar la tensión de salida, denominándose fuente conmutada o fuente conmutada.

En la representación esquemática de una fuente conmutada de la Figura 55, la entrada de corriente alterna experimenta inicialmente un proceso de rectificación y filtrado. Un transistor actuando como interruptor suministra impulsos de corriente a un inductor o transformador de reducidas dimensiones, operando a una frecuencia significativamente elevada (superior a 20 kHz, en contraste con los 60 Hz de una fuente lineal). Este mecanismo transfiere la energía hacia un capacitor de filtrado que se encarga de suavizar los impulsos para obtener una tensión de salida estable. La elevada frecuencia de los impulsos permite que el sistema responda con celeridad ante variaciones en la demanda de corriente, además de posibilitar la utilización de componentes inductivos y capacitivos de dimensiones reducidas para los procesos de suavizado y filtrado de la señal de salida.

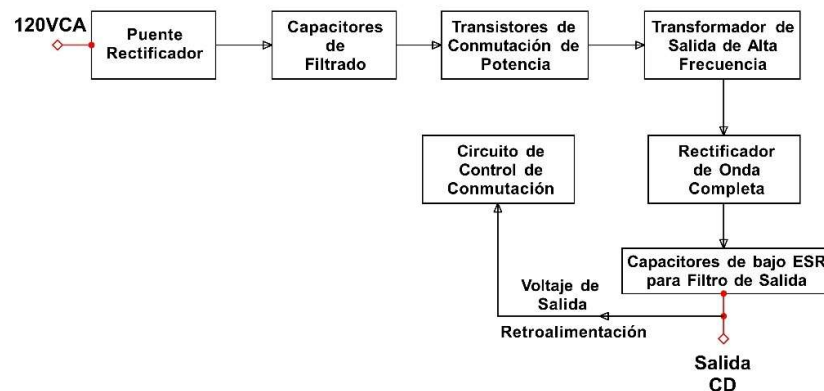


Figura 55. Diagrama de bloques de una fuente conmutada. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

La tensión media de la señal de salida del rectificador de media onda equivale a 0,45 veces la tensión de salida del devanado del transformador, o $0,45 V_{RMS}$. Adicionalmente, se presenta una caída de tensión directa del diodo en serie con la corriente de carga que disminuye la tensión pico de salida en 0,6 V para diodos de silicio estándar.

La tensión de salida del rectificador de onda completa alcanza $0,9 V_{RMS}$ (descontando la caída de tensión directa del diodo). Considerando que el devanado de salida posee toma central, cada segmento del devanado debe estar capacitado para generar la tensión de salida completa, V_{RMS} , por lo cual el devanado total debe producir el doble de la tensión de salida completa, $2 V_{RMS}$. La Figura 53 ilustra el funcionamiento del rectificador de puente de onda completa. Un conjunto de diodos conduce en semiciclos alternos. Los pares de diodos operan como interruptores sincronizados con la forma de onda de CA, conectando el devanado a la carga inicialmente con una polaridad y posteriormente con la opuesta. La tensión de salida resulta nuevamente $0,9 V_{RMS}$, pero reducida por dos caídas de tensión directa debido a que dos diodos permanecen en serie con la corriente constantemente.

Si se implementa el filtro de entrada de capacitores habitual (ver Figura 54) para construir una fuente de alimentación, existen diferencias fundamentales en la tensión inversa pico y las corrientes directas que experimentan los diodos en los tres circuitos rectificadores.

- En el circuito rectificador de onda completa con toma central, cuando uno de los diodos rectificadores interrumpe su conducción, está obligado a soportar no únicamente la tensión de pico negativa correspondiente a su segmento del devanado, sino también la tensión positiva proveniente del otro segmento. Consecuentemente, la tensión inversa de pico aplicada a los dispositivos semiconductores alcanza el doble de la tensión de pico de salida habitual de la fuente de alimentación.
- La tensión inversa máxima aplicada al diodo en un circuito rectificador de media onda equivale al doble de la tensión de salida máximo de la fuente de alimentación.
- En un circuito rectificador de puente de onda completa, cada elemento semiconductor únicamente debe tolerar el voltaje de salida pico de la fuente de alimentación.
- En el circuito rectificador de media onda, la totalidad de la corriente de carga transita a través de un único diodo, por lo tanto, requiere estar dimensionado para transportar el promedio de corriente de carga.
- En ambos rectificadores de onda completa, los diodos proporcionan solamente la mitad de la corriente de carga, lo que reduce proporcionalmente su requerimiento de corriente nominal. La Tabla 13 compila la tensión inversa máxima y la corriente directa promedio de los diodos en los tres circuitos rectificadores.

Tabla 13. Tensión y corriente de los diodos rectificadores. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Tipo de Rectificador	Número de Diodos	PIV	Corriente Promedio Directa
Media onda	1	$1,4 \text{ a } 2,8 E_{RMS} (2 E_{PK})$	I_{CARGA}
Onda completa	2	$2,8 E_{RMS} (2 E_{PK})$	$0,5 I_{CARGA}$
Puente de onda completa	4	$1,4 E_{RMS} (E_{PK})$	$0,5 I_{CARGA}$

A la salida del rectificador, el circuito de filtrado más habitual emplea un capacitor de elevada capacitancia para atenuar las oscilaciones de corriente. La capacidad dieléctrica debe ser suficientemente considerable para mantener la tensión de salida del sistema de alimentación próxima al valor medio de la señal rectificada, incluso bajo condiciones de corrientes de carga intensas. (En la práctica, es factible implementar múltiples capacitores en configuración paralela para incrementar el valor capacitivo hasta el nivel requerido). El rectificador suministra corriente al capacitor, provocando su carga y elevación de tensión siempre que la tensión de salida del rectificador supere la tensión del capacitor. Posteriormente, el capacitor libera la energía almacenada como corriente a través de la carga hasta que el rectificador pueda recargarlo nuevamente. El porcentaje de variación en la tensión de salida entre estados sin carga y carga completa se denomina regulación de la fuente. Para un capacitor de filtrado con dimensionamiento apropiado, el rectificador carga el capacitor mediante impulsos breves de alta corriente mientras la carga extrae corriente del capacitor de manera más gradual.

El capacitor de un filtro de salida de fuente de alimentación experimenta un proceso continuo de carga y descarga, con flujo de corriente hacia el interior y exterior del componente. Estas corrientes pueden alcanzar magnitudes considerables, por lo que resulta crucial prevenir pérdidas originadas por disipaciones en el capacitor. Existen diversas fuentes de pérdidas en el capacitor, como la resistencia de las superficies conductoras y del electrolito interno. Todas estas pérdidas se integran en una única resistencia parásita denominada resistencia en serie equivalente (ESR).

4.5.4 Mezcladores

Un mezclador está estrechamente vinculado con un modulador. Los mezcladores fusionan dos señales de RF y reposicionan una de ellas hacia una frecuencia alternativa. Los mezcladores se implementan tanto en sistemas transmisores como receptores para reconfigurar las frecuencias de las señales con múltiples propósitos. (Este circuito no debe confundirse con un mezclador de audio que integra señales sonoras para producción musical o espectáculos en vivo).

4.6 Potencia CA

4.6.1 RMS: definición y medición

A medida que la corriente alterna (CA) se extendió ampliamente, resultaba fundamental determinar qué nivel de tensión de CA proporcionaría una potencia media equivalente en comparación con una tensión de CD.

La ecuación de potencia resulta completamente diáfana para CD: $P = V^2 / R$. Sin embargo, surge un interrogante: ¿qué valor específico de V debería emplearse para la alimentación de CA? ¿Correspondería al valor pico, a un promedio, o a alguna otra magnitud? La solución se concreta en la tensión cuadrática media (RMS, por sus siglas en inglés) (frecuentemente abreviada como V_{RMS}). Al implementar la tensión RMS en las fórmulas previamente expuestas para calcular la potencia, el resultado para la señal de CA resulta idéntico al de una tensión de CD constante.

"Raíz cuadrática media" hace referencia a la metodología utilizada para computar la tensión RMS: consiste en extraer la raíz cuadrada del promedio (media) de los cuadrados de los valores de tensión presentes en la señal.

$$V_{RMS} = 0,707 * V_{PK} = 0,707 * \frac{V_{P-P}}{2}$$

El valor RMS de una onda sinusoidal es simplemente 0,707 veces la tensión pico de la onda sinusoidal, V_{PK} , como se muestra en la Figura 56.

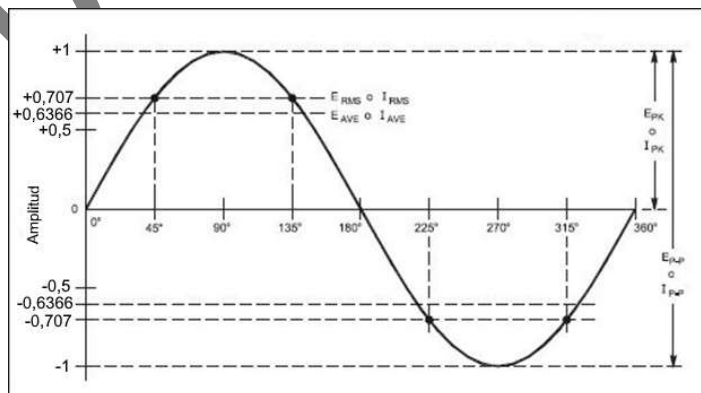


Figura 56. Relación entre RMS, promedio, pico de la tensión CA. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

No emplee estas metodologías para formas de onda que no sean ondas sinusoidales, como señales de voz, ondas cuadradas o tensiones de CD combinadas con tensiones de CA.

Es particularmente relevante comprender la correlación entre el valor eficaz (RMS) y la tensión pico para seleccionar componentes con la clasificación de tensión apropiada.

Los capacitores generalmente se conectan al circuito de alimentación de CA para efectuar el filtrado de RF. El capacitor debe poseer la capacidad nominal suficiente para soportar la tensión pico de CA. A modo de ilustración, un capacitor conectado a un circuito de alimentación de CA de 120 V experimentará una tensión pico de $120 \times 1,414 = 169,7$ V. Se recomienda utilizar un capacitor con una capacidad nominal de 200 V o superior.

4.6.2 Potencia de envoltente de pico (PEP): definición y medición

La PEP (o potencia de envoltente de pico) representa el valor medio de potencia correspondiente a un ciclo completo de radiofrecuencia en el punto máximo de la envoltente señal. (No corresponde a la potencia momentánea en el punto culminante de un ciclo de RF durante un máximo de la envoltente de señal). Se emplea la PEP porque constituye un método conveniente para evaluar o determinar la potencia máxima de señales con modulación de amplitud. Para determinar la potencia promedio en corriente alterna, resulta indispensable conocer la impedancia de carga y la tensión eficaz. Se procede a medir la tensión de radiofrecuencia en el punto máximo de la envoltente de la señal modulada; este valor representa la tensión de envoltente de pico (PEV, por sus siglas en inglés), según se ilustra en la Figura 57. El PEV equivale a la mitad de la tensión pico a pico de la forma de onda, V_{p-p} . La PEP se calcula mediante el siguiente procedimiento:

$$PEP = \frac{\left[\frac{0,707 * V_{p-p}}{2} \right]^2}{R} = \frac{(PEV * 0,707)^2}{R} = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

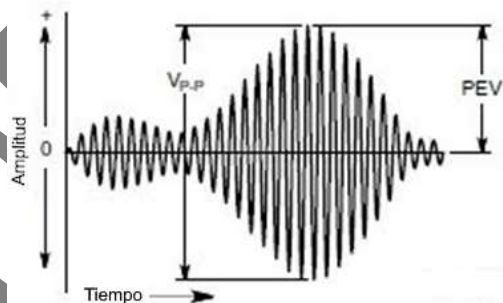


Figura 57. Potencia pico de envoltente. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

La PEP equivale a la potencia media cuando una señal con modulación de amplitud no experimenta modulación. Este fenómeno se produce al suprimir la modulación de una señal AM (conservando únicamente la portadora estable) o durante la manipulación de un transmisor de onda continua (CW, por sus siglas en inglés). De manera análoga, una señal de frecuencia modulada (FM) presenta una potencia constante, por consiguiente, la PEP siempre corresponderá a la potencia promedio en señales de FM. En el supuesto de que un vatímetro que registra lecturas promedio, conectado al transmisor, indique 1060 W al manipular la señal de CW, su salida de PEP será igualmente de 1060 W.

4.7 Reactancia, Impedancia y Resonancia

4.7.1 Reactancia

Los capacitores e inductores experimentan una oposición al tránsito de corriente alterna de manera distinta a la corriente directa. La impedancia al desplazamiento de corriente alterna

provocada por la capacitancia o la inductancia se denomina reactancia (representada por X) y se cuantifica en ohmios, de manera análoga a la resistencia. La reactancia emerge debido a que los capacitores e inductores acumulan energía. Examinaremos cómo ocurre este fenómeno, iniciando con el capacitor.

4.7.1.1 Reactancia Capacitiva

Si se suministra una tensión de CD a un capacitor totalmente descargado (es decir, sin energía acumulada y con una tensión de cero), inicialmente ingresa una corriente y el capacitor comienza a acumular energía en su campo eléctrico interno. Este proceso genera un incremento en la tensión a través del capacitor, generando una resistencia al flujo de corriente que lo alimenta. Consecuentemente, disminuye la cantidad de corriente que penetra en el capacitor. Como se ilustra en la Figura 58, cuanto mayor sea la energía almacenada y la tensión desarrollada a través del capacitor, menor será la corriente circulante. Eventualmente, el capacitor alcanza una carga equivalente a la tensión de la fuente de corriente, interrumpiéndose el flujo de corriente.

Durante la aplicación inicial de la tensión, el capacitor se comporta como un cortocircuito para las señales de CD. Una vez completamente cargado, se transforma en un circuito abierto para dichas señales; este mecanismo describe precisamente cómo un capacitor obstruye la corriente de CD.

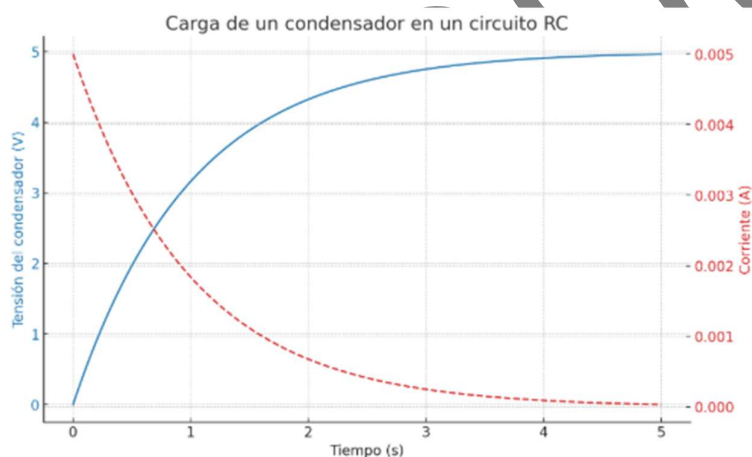


Figura 58. Comportamiento de un capacitor.

Para la corriente alterna (CA), el escenario presenta características distintivas. Cuando la tensión de CA exhibe una frecuencia lo suficientemente reducida, se comporta como una tensión de CD con variación progresiva, permitiendo que el capacitor mantenga una carga estable capaz de minimizar el flujo de corriente hasta valores insignificantes. No obstante, si la tensión de CA presenta una frecuencia más elevada, el capacitor no logra acumular suficiente carga como para disminuir sustancialmente la corriente. Consecuentemente, un capacitor impide el paso de corriente directa (CD), muestra resistencia ante corrientes alternas de baja frecuencia y facilita la transmisión de corrientes alternas de alta frecuencia.

La resistencia al desplazamiento de corriente alterna (CA) originada por la energía almacenada en un capacitor recibe el nombre de reactancia capacitiva, representada mediante el subíndice X_C . Su comportamiento en relación con la frecuencia se expresa mediante la siguiente ecuación matemática:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Donde f representa la frecuencia en hercios y C corresponde a la capacitancia en faradios. A medida que se incrementa la frecuencia de la señal aplicada, la reactancia capacitiva experimenta una disminución, y viceversa. Es fundamental considerar apropiadamente las unidades de frecuencia (como kHz y MHz) y capacitancia (como pF, nF y μ F).

BORRADOR

4.7.1.2 Reactancia Inductiva

Los inductores también presentan resistencia a la corriente alterna, pero de manera complementaria. Cuando se suministra una tensión continua a un inductor carente de energía almacenada, la corriente generada produce un campo magnético variable que se contrapone a la corriente entrante. En un principio, el flujo de corriente en el inductor es extremadamente reducido, pero se incrementa de manera progresiva, acumulando cada vez más energía hasta que desaparece la oposición a la corriente y el inductor se carga completamente de energía magnética. Este fenómeno se representa en la Figura 59. Al introducir inicialmente la tensión, el inductor genera un circuito abierto a la tensión continua. Una vez que el campo magnético alcanza su máxima intensidad, el inductor produce un cortocircuito a la tensión continua.

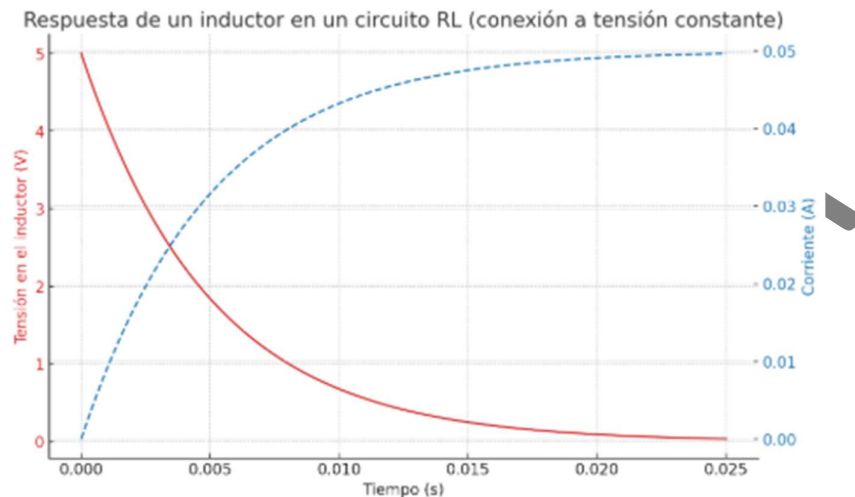


Figura 59. Comportamiento de un inductor.

Este comportamiento resulta completamente opuesto al de un capacitor que impide las corrientes continuas. Si se aplica un voltaje de CA de alta frecuencia a un inductor, el campo magnético resultante experimenta cambios constantes, por lo que la corriente siempre encuentra resistencia. Cuando la frecuencia del voltaje de CA es reducida, se puede establecer el campo magnético del inductor y la oposición a la corriente disminuye significativamente. Por consiguiente, un inductor bloquea las corrientes de CA de alta frecuencia y permite el paso de las de baja frecuencia, funcionando como un cortocircuito para las corrientes continuas.

La resistencia al flujo de corriente alterna (CA) proveniente de la energía almacenada en un inductor se denomina reactancia inductiva y se representa con el subíndice XL. Su comportamiento en relación con la frecuencia se describe mediante la siguiente ecuación:

$$X_L = 2\pi fL$$

Donde f representa la frecuencia en Hz y L la inductancia en henrios. A medida que se incrementa la frecuencia de la señal aplicada, aumenta proporcionalmente la reactancia inductiva y viceversa. De manera similar a la fórmula de la reactancia capacitiva, es fundamental considerar cuidadosamente las unidades de frecuencia e inductancia.

Aquí hay otra forma de ver el efecto de la energía almacenada en capacitores e inductores: los capacitores se oponen a los cambios de tensión, mientras que los inductores se oponen a los cambios de corriente. Ambos se oponen al flujo de corriente alterna, pero de forma complementaria.

4.7.1.3 Inductancia y Capacitancia Parásita

"Parasitario" significa "un atributo no deseado derivado de la configuración estructural del elemento". En radioelectrónica, la inductancia parásita de un componente resulta fundamental. Por ejemplo, las resistencias de potencia bobinadas se manufacturan enrollando un cable

resistivo sobre una base cerámica, conformando una pequeña bobina. Esta modalidad constructiva genera niveles considerables de inductancia parásita. Los conductores de un componente igualmente producen inductancia parásita.

En un inductor, cada par de espiras genera adicionalmente una diminuta cantidad de capacitancia parásita en serie con la inductancia. Cuando se emplea una resistencia de alambre bobinado en un circuito de radiofrecuencia, la reactancia inductiva resultante normalmente es suficiente para interrumpir la operatividad del circuito o impactar su sintonización. En circuitos que operan a radiofrecuencias se implementan resistencias no inductivas, como las de composición carbonosa, película carbonosa u óxido metálico.

Ciertos tipos de capacitores se fabrican con láminas delgadas separadas mediante una película plástica y enrolladas. Esta estructura origina una inductancia parásita significativa. Los capacitores electrolíticos utilizan este método constructivo y exhiben una elevada inductancia parásita. La reactancia inductiva restringe su utilización a frecuencias relativamente bajas en circuitos de audio y fuentes de alimentación. Los capacitores de tantalio presentan una inductancia parásita proporcionalmente reducida en comparación con los electrolíticos y pueden emplearse a frecuencias más elevadas.

Un capacitor cerámico se compone de placas delgadas de cerámica con una superficie revestida de una película metálica y múltiples capas apiladas. Gracias a esta configuración, los capacitores cerámicos muestran una inductancia parásita relativamente reducida y pueden utilizarse en frecuencias de microondas.

4.7.2 Impedancia y resonancia

La impedancia constituye un concepto amplio que representa la resistencia al desplazamiento de corriente eléctrica en un circuito de corriente alterna, originada por la resistencia, la reactancia o su combinación simultánea. El símbolo representativo de la impedancia es la letra Z , cuya unidad de medida corresponde a ohmios. De manera similar a la resistencia, la impedancia establece la proporción entre la tensión y la corriente.

La resonancia constituye un fenómeno donde se produce una concordancia exacta entre la frecuencia intrínseca de respuesta de un circuito o antena y la frecuencia de la señal externa aplicada. El estado de resonancia en un sistema electrónico acontece cuando las reactancias capacitivas e inductivas presentes mantienen una equivalencia absoluta.

En el circuito dispuesto en configuración serie, representado en la Figura 60, durante el estado de resonancia, las reactancias correspondientes a los elementos inductivos y capacitivos se neutralizan mutuamente, generando un cortocircuito efectivo. Esta anulación deja únicamente la resistencia, R , como el elemento determinante de la impedancia del circuito. De manera análoga, en un circuito paralelo resonante que integra elementos inductivos, capacitivos y resistivos, las reactancias experimentan una cancelación recíproca. En esta configuración, los componentes inductivos y capacitivos conforman un circuito abierto, permaneciendo nuevamente la resistencia R como el único factor de impedancia.

El principio de resonancia encuentra aplicaciones fundamentales en diseños de filtros y circuitos de sintonización, permitiendo la selección o exclusión de frecuencias específicas donde se produce el fenómeno resonante.

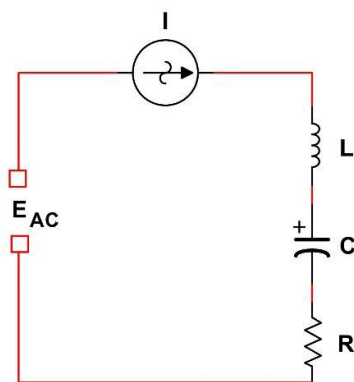


Figura 60. Circuito LCR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

La resonancia igualmente puede manifestarse cuando la reactancia anticipada de un elemento es equivalente a la reactancia de su reactancia parasitaria. Este fenómeno se denomina autorresonancia. El resultado consiste en un componente que aparenta ser un cortocircuito o un circuito interrumpido en la frecuencia autorresonante. Por encima de la frecuencia autorresonante, la reactancia del elemento modifica su naturaleza, transformando un inductor en capacitivo y un capacitor en inductivo. Esta situación puede generar complicaciones significativas en un circuito de radiofrecuencia.

4.7.3 Transformación de impedancia

Un transformador puede modificar la combinación de tensión y corriente al transferir energía. La impedancia representa la proporción existente entre la tensión y la corriente en un circuito de CA, por consiguiente, el transformador igualmente altera o modifica la impedancia entre los circuitos primario y secundario. De este modo, el transformador opera de manera análoga a la transmisión de un automóvil, transfiriendo potencia mecánica mientras transforma una combinación de par y velocidad rotacional en el eje de transmisión del motor hacia otra en las ruedas.

Eléctricamente, el transformador ajusta la impedancia conectada al devanado secundario, Z_S , a una impedancia diferente cuando se mide a través del devanado primario, Z_P . La relación de espiras regula la transformación de forma similar a la proporción de dientes de un engranaje en una transmisión mecánica.

$$Z_P = Z_S * \left[\frac{N_P}{N_S} \right]^2$$

4.7.4 Adaptación de impedancia

La capacidad de un recurso energético para proporcionar energía a un consumidor está condicionada por su resistencia intrínseca. Ilustrativamente, la resistencia interna de un acumulador eléctrico determina la corriente máxima que puede suministrar. Análogamente, sucede con las fuentes de potencia de radiofrecuencia, como circuitos y dispositivos de transmisión. Un generador de RF puede transferir la potencia óptima cuando su impedancia inherente y la impedancia receptora son equivalentes o concordantes. Adicionalmente, tanto la impedancia del emisor como la del receptor deben ser estrictamente resistivas, es decir, carentes de componente reactiva.

Los equipos de transmisión de radioaficionados están configurados para que la impedancia interna de sus circuitos de salida sea de 50 Ω . Cuando la disparidad entre la impedancia del sistema de antena y la impedancia de salida del transmisor supera cierto umbral, el transmisor puede reducir su potencia de emisión para prevenir posibles deterioros. La solución técnica consiste en un circuito de adaptación de impedancia que transforma la impedancia no deseada al valor requerido.

La mayoría de los circuitos de adaptación de impedancia son estructuras LC compuestas por bobinas e inductores. La Figura 61 ilustra dos configuraciones LC habituales para la adaptación

de impedancia: la red pi y la red T. Sus denominaciones derivan de las letras π y T, que reproducen esquemáticamente la topología del circuito. Estos pueden estar conformados enteramente por componentes de valor constante para cargas como una antena monobanda. Alternativamente, se pueden implementar componentes ajustables, lo que permite que el circuito se adapte dinámicamente a diferentes frecuencias o cargas.

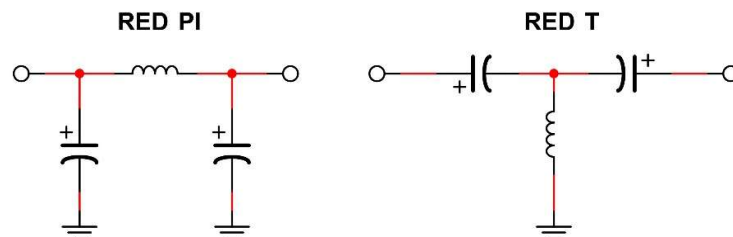


Figura 61. Circuitos LC para adaptación de impedancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Otro método popular para realizar la adaptación de impedancia se presentó en la sección sobre transformadores. Con frecuencia se emplean transformadores de impedancia de RF especiales para esta función, que igualan las impedancias de la fuente y la carga para maximizar la transferencia de potencia. La adaptación de impedancia también puede realizarse mediante longitudes y conexiones especiales de la línea de transmisión.

4.8 Componentes Activos

Para amplificar, conmutar, modelar o procesar una señal, es necesario utilizar componentes activos. Estos suelen requerir una fuente de alimentación y pueden incluir componentes pasivos, como resistencias o capacitores, como elementos de un dispositivo más complejo.

4.8.1 Componentes semiconductores

Los componentes activos más frecuentes están fabricados con materiales semiconductores. Los semiconductores son sustancias que transmiten la electricidad de manera más eficiente que un aislante, aunque no tan óptimamente como un conductor metálico. El silicio (símbolo químico Si) y el germanio (Ge) representan ejemplos de semiconductores empleados en radioelectrónica. Las características eléctricas de estos materiales pueden modificarse mediante la incorporación de pequeñas cantidades de elementos adicionales, como el indio (In) o el fósforo (P). Tales sustancias añadidas se denominan dopantes, y su integración al material base recibe el nombre de dopaje. Cuando la presencia de la impureza genera un excedente de electrones para conducir la electricidad, se obtiene un material de tipo N. En caso contrario, la impureza crea un material de tipo P caracterizado por presentar vacíos o una carencia de electrones que facilitan la conducción eléctrica. Todos los semiconductores se generan a partir de combinaciones de materiales tipo N y tipo P. El punto donde ambos tipos de material establecen contacto se conoce como unión PN.

Un diodo de unión semiconductor emplea una unión PN para interrumpir el flujo de corriente en una dirección específica, según se ilustra en la Figura 62. Cada capa posee conductores. La corriente circula cuando se aplica una tensión positiva del material tipo P al tipo N (polarización directa), lo que impulsa el desplazamiento de electrones a través de la unión. La tensión aplicada en sentido inverso, desde el material tipo N al tipo P (polarización inversa), aleja los electrones de la unión, impidiendo la circulación de corriente. La tensión necesaria para forzar el paso de electrones a través de la unión se denomina tensión directa del diodo o tensión umbral de unión, abreviada como V_F . Para diodos de silicio, V_F alcanza aproximadamente 0,7 V, mientras que para los de germanio se sitúa en 0,3 V.

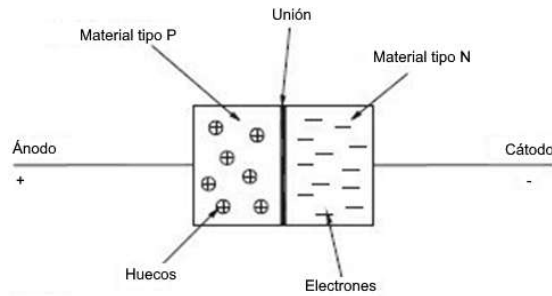


Figura 62. Diodo tipo PN. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Las zonas adyacentes de componentes semiconductores de polaridad P y N generan un desplazamiento de electrones en una dirección específica dentro del diodo. No obstante, al incorporar una capa adicional de material semiconductor, se origina un componente electrónico capaz de potenciar una señal: el transistor. La Figura 63 representa la configuración estructural fundamental de un transistor de unión bipolar o BJT. Los transistores bipolares están constituidos por materiales semiconductores de tipo P y N, y emplean la corriente eléctrica para regular su operatividad. A diferencia del diodo, el transistor precisa de suministro energético para su funcionamiento.

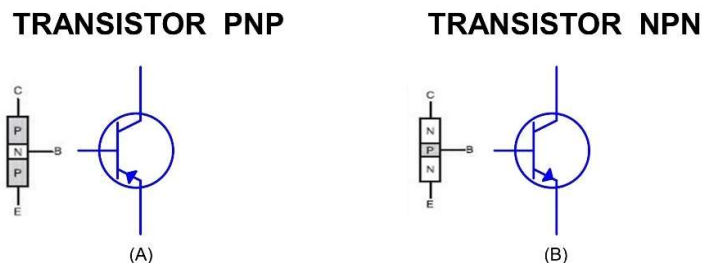


Figura 63. Representación del transistor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Los transistores de unión bipolar presentan una configuración de tres terminales: el colector (C), el emisor (E) y la base (B). Los conductores correspondientes al colector y al emisor son los encargados de transportar la corriente que el dispositivo regula. El mecanismo de operación del transistor se gestiona mediante el flujo de corriente establecido entre la base y el emisor. La frágil capa de material constitutiva de la base genera un par de uniones PN consecutivas que aparentemente obstaculizan la circulación de corriente a través del componente, independientemente de la dirección en que se aplique la tensión, puesto que una de las uniones permanece sistemáticamente polarizada de manera inversa. No obstante, cuando se produce un flujo de corriente entre la base y el emisor, la base resulta tan estrecha que dicha corriente provoca la disrupción de ambas uniones, facilitando el tránsito de corriente entre el colector y el emisor.

La magnitud de corriente base-emisor requerida para activar el flujo colector-emisor resulta considerablemente reducida. El proceso de control de una corriente elevada mediante una corriente de menor intensidad se denomina amplificación, y la proporción entre la corriente colector-emisor y la corriente base-emisor se identifica como ganancia de corriente. La ganancia de corriente para señales de CD se representa mediante el símbolo β (beta). La ganancia de corriente para señales de CA se expresa a través del símbolo h_{fe} .

Otro tipo de transistor, tal como se analizó, ilustrado en la Figura 64, corresponde al transistor de efecto de campo (FET). El FET presenta tres electrodos, de manera similar al transistor bipolar: drenador (D), fuente (S) y compuerta (G). En contraste con el control de corriente mediante corriente compuerta-fuente, este dispositivo regula la corriente drenador-fuente a través de la tensión existente entre compuerta y fuente. En lugar de una ganancia de corriente, el FET exhibe transconductancia (g_m), que representa la relación entre la corriente de drenador y la tensión de compuerta-fuente.

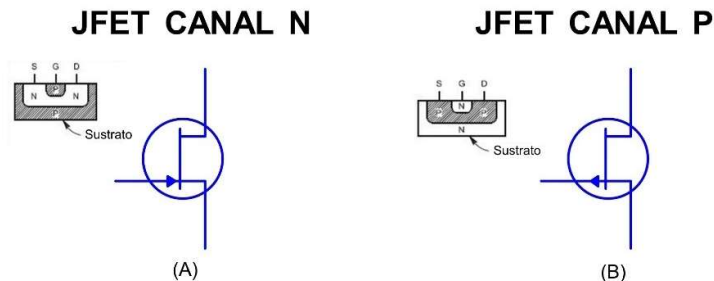


Figura 64. Transistor FET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Un FET de unión o JFET se estructura con el material de compuerta en contacto directo con el elemento que interconecta los electrodos de fuente y drenador. El FET semiconductor de óxido metálico o MOSFET, junto con un dispositivo conexo denominado FET de compuerta aislada o IGFET, incorporan una capa aislante de óxido entre la compuerta y el resto de las componentes del transistor. Tanto los JFET como los MOSFET demuestran una extraordinaria sensibilidad, permitiendo que cantidades mínimas de tensión regulen la corriente de fuente-drenador.

La elevada capacidad de amplificación de los transistores los posiciona como componentes óptimos para funcionar como conmutadores de tensión y corriente. Mediante la aplicación de una corriente base-emisor suficiente o una tensión puerta-fuente adecuada, el transistor puede alcanzar un estado de saturación, donde incrementos adicionales en la entrada no generan modificaciones en la salida. Análogamente, la señal de entrada puede reducir la corriente de salida hasta cero, configurando la condición de corte. Estos dos estados representan de manera excepcional las señales digitales de activación/desactivación en circuitos lógicos.

4.8.2 Tubos de vacío

El dispositivo electrónico de amplificación más antiguo, conocido como tubo de vacío, continúa siendo una contribución significativa en los sistemas de amplificación de elevada potencia. Adicionalmente a los amplificadores, numerosos entusiastas encuentran placentero utilizar equipamiento antiguo de válvulas.

Un tubo de vacío está compuesto por tres componentes fundamentales: una fuente generadora de electrones, un electrodo destinado a su captación y electrodos intermedios encargados de regular el desplazamiento electrónico desde la fuente hacia el colector. Cada electrodo del tubo recibe la denominación de elemento. La Figura 65 ilustra el diagrama esquemático de un tubo y sus elementos.

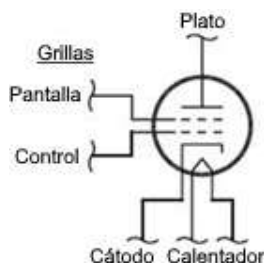


Figura 65. Símbolo esquemático del tubo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Un conducto electrónico con dos componentes recibe la denominación de diodo, con tres elementos se nombra triodo, con cuatro elementos tetrodo, y así sucesivamente. En la actualidad, los tubos más utilizados en el servicio de radioaficionados son los triodos y tetrodos.

- Filamento o calentador: su función primordial consiste en elevar la temperatura del cátodo, provocando la emisión de electrones.
- Cátodo: constituye el origen o punto de partida de los electrones.

- Rejilla de control: electrodo más próximo al cátodo, cuya misión radica en regular la trayectoria electrónica entre el cátodo y la placa.
- Rejilla de pantalla: elemento electrónico diseñado para disminuir la capacitancia entre la rejilla y la placa, reduciendo consecuentemente la capacidad de amplificación en frecuencias elevadas.
- Rejilla supresora: componente electrónico destinado a impedir la migración de electrones desde la placa hacia la rejilla de control o de pantalla.
- Plato: electrodo encargado de capturar los electrones, denominado corriente de placa.

Todos los tubos amplificadores presentan como mínimo tres electrodos: un cátodo (acompañado de un filamento para su calentamiento), una rejilla y una placa. Mediante el calentamiento a elevada temperatura por un calentador o filamento, el cátodo libera electrones al espacio vacío del tubo. La placa se sitúa a una tensión positiva respecto al cátodo (tensión de placa a cátodo) para atraer los electrones.

Los electrones transitan hacia la placa a través de las perforaciones de la rejilla de control. Cuando la rejilla de control se encuentra a una tensión negativa con relación al cátodo (tensión de rejilla a cátodo), los electrones experimentan repulsión, ralentizándose y disminuyendo la corriente de placa, o deteniéndose completamente, fenómeno conocido como corte.

En sentido inverso, una tensión positiva de rejilla a cátodo acelera los electrones hacia la placa, incrementando la corriente de placa. Por consiguiente, la variación de la tensión en la rejilla de control provoca modificaciones en la corriente de placa, lo que permite amplificar la señal de entrada.

Un diodo semiconductor presenta diversas especificaciones que restringen su aplicación. Las dos más relevantes son:

- Tensión inversa de pico (PIV, por sus siglas en inglés): valor máximo de tensión inversa (tensión en dirección no conductora) que puede aplicarse antes de producirse la ruptura inversa, permitiendo el flujo de corriente en sentido contrario.
- Corriente directa media (IF, por sus siglas en inglés): debido a la tensión directa, la corriente que atraviesa el diodo disipa una potencia de $I_F \times V_F$ en forma de calor. Sobrepassar esta especificación provocará la destrucción de la estructura interna del dispositivo.

Otro parámetro que influye en el funcionamiento de un diodo a elevadas frecuencias es su capacitancia de unión (CJ). Durante la polarización inversa, las capas de material tipo P y N actúan como placas de un capacitor diminuto. Cuanto mayor sea la CJ, más tiempo requerirá el diodo para transitar desde la polarización inversa a la conducción directa.

Distintos métodos constructivos generan diodos con características específicas, útiles para determinados tipos de circuitos.

- Diodo PIN: Conduce señales de CA con reducida caída de tensión directa, empleado para conmutación y control de RF.
- Diodo Schottky: Su baja capacitancia de unión permite operar a frecuencias elevadas.
- Varactor: La unión con polarización inversa funciona como capacitor y puede utilizarse como capacitor variable de pequeñas dimensiones.
- Diodo Zener: Los niveles adicionales de dopaje permiten que estos diodos se empleen como reguladores de tensión durante la ruptura inversa.

Los diodos diseñados para circuitos con señales de baja potencia se denominan diodos de señal o de conmutación. Los diodos de alta resistencia para circuitos de alta potencia deben transportar corrientes intensas, soportar elevadas tensiones o disipar considerable potencia. Estos diodos se conocen como rectificadores y pueden presentar valores nominales PIV e I_F hasta 1000 V o 100 A.

Los transistores existen en múltiples tipos de encapsulados. Los diferentes estilos suelen identificarse con números de encapsulado que comienzan por "TO" (Transistor Outline). Los

transistores de baja potencia generalmente presentan encapsulados plásticos aislados. El encapsulado plástico resulta inadecuado para transistores que requieren disipar grandes cantidades de potencia. Sus encapsulados poseen superficies metálicas mediante las cuales se puede eliminar fácilmente el exceso de calor. La superficie metálica habitualmente está conectada internamente al colector o fuente del transistor, por lo que una conexión directa a un disipador térmico metálico o al chasis de un equipo provocaría un cortocircuito en dicho electrodo a tierra. Frecuentemente se requiere algún tipo de aislamiento entre la carcasa y el disipador térmico. Debe prestarse especial atención al instalar o sustituir transistores de alta potencia para evitar cortocircuitos.

Los tubos de vacío suelen operar a voltajes peligrosos, de hasta dos mil o tres mil voltios en amplificadores de potencia. Los equipos que utilizan alto voltaje cuentan con numerosas medidas de seguridad para prevenir descargas eléctricas. Los equipos de tubos de vacío de bajo voltaje dependen de que el operador o técnico aplique los procedimientos adecuados. Tome precauciones de seguridad adicionales al realizar el mantenimiento de tubos de vacío.

4.8.3 Circuitos integrados analógicos y digitales

Los procedimientos de fabricación de transistores sobre finas láminas de silicio posibilitan generar con similar sencillez múltiples diodos, transistores, resistencias, capacitores e incluso microscópicos inductores helicoidales, interconectándolos mediante cables metálicos revestidos. El producto final es un circuito integrado (CI), también denominado "chip". Los dos modelos más frecuentes de circuitos integrados son los analógicos (o lineales) y los digitales (o lógicos).

Los CI analógicos funcionan en un espectro continuo de tensiones y corrientes. La Figura 66 presenta el símbolo esquemático y los diagramas de conexión de dos de los CI analógicos más habituales: el amplificador operacional y el regulador de tensión lineal. El amplificador operacional, o "op amp", se emplea extensivamente en circuitos de CD y audio como una fuente económica de amplificación. Los reguladores de tensión lineales se implementan para conservar la salida de una fuente de alimentación en una tensión constante a través de un amplio intervalo de corrientes.

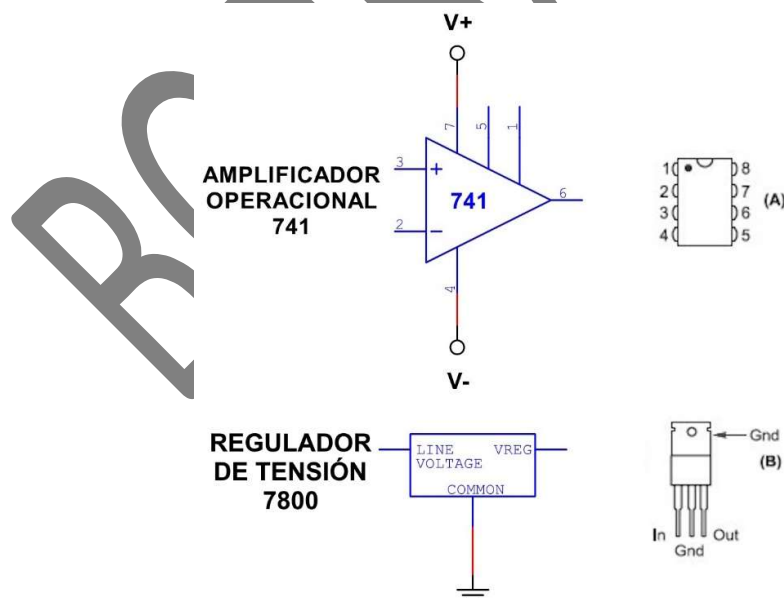


Figura 66. Símbolo esquemático de un CI. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Los circuitos integrados digitales funcionan con magnitudes discretas de tensión y corriente que simbolizan los valores binarios 0 y 1. Existen diversas tipologías de circuitos digitales, denominadas familias lógicas, que emplean un método específico de concepción para generar distintas funcionalidades lógicas. Cada agrupación puede implementar diferentes tensiones de

alimentación o rangos de tensión y corriente para representar valores digitales. Es posible construir estructuras digitales complejas utilizando componentes integrados pertenecientes a la misma familia, garantizando que los niveles de tensión y corriente sean mutuamente compatibles.

Las características de algunas familias lógicas habituales se presentan en la Tabla 14. Aunque ciertos equipos pueden incorporar dispositivos de lógica transistor-transistor (TTL), la familia lógica predominante en la actualidad es la de *semiconductores complementarios de óxido metálico* (CMOS, por sus siglas en inglés), debido a su elevada velocidad de procesamiento y mínimo consumo energético.

Tabla 14. Características de algunas familias lógicas comunes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Nombre de la Familia	Frecuencia Máxima de Operación	Consumo de Energía	Fuente de Alimentación
TTL	100 MHz	Alta	5 V
CMOS	1 GHz	Baja	3 - 5 V
CMOS (CD4000)	1 MHz	Muy Baja	3 - 15 V

FUNDAMENTOS DE LA LÓGICA DIGITAL

Los elementos fundamentales de los sistemas de circuitos digitales son las compuertas lógicas, las cuales ejecutan operaciones de inversión (transformando un 1 en un 0 y viceversa) y las funciones lógicas OR y AND. Considerando la arquitectura de los circuitos digitales, las compuertas más frecuentemente utilizadas en la práctica son la inversora, NAND y NOR. Estas tres funciones y sus representaciones esquemáticas gráficas se ilustran en la Figura 67. Las estructuras lógicas más complejas, comprendiendo microprocesadores y procesadores de señales digitales, se construyen mediante combinaciones de estas tres funciones elementales. Los sistemas de circuitos digitales que emplean compuertas para integrar entradas binarias y producir una salida binaria o una combinación de estas se denominan lógica combinacional.

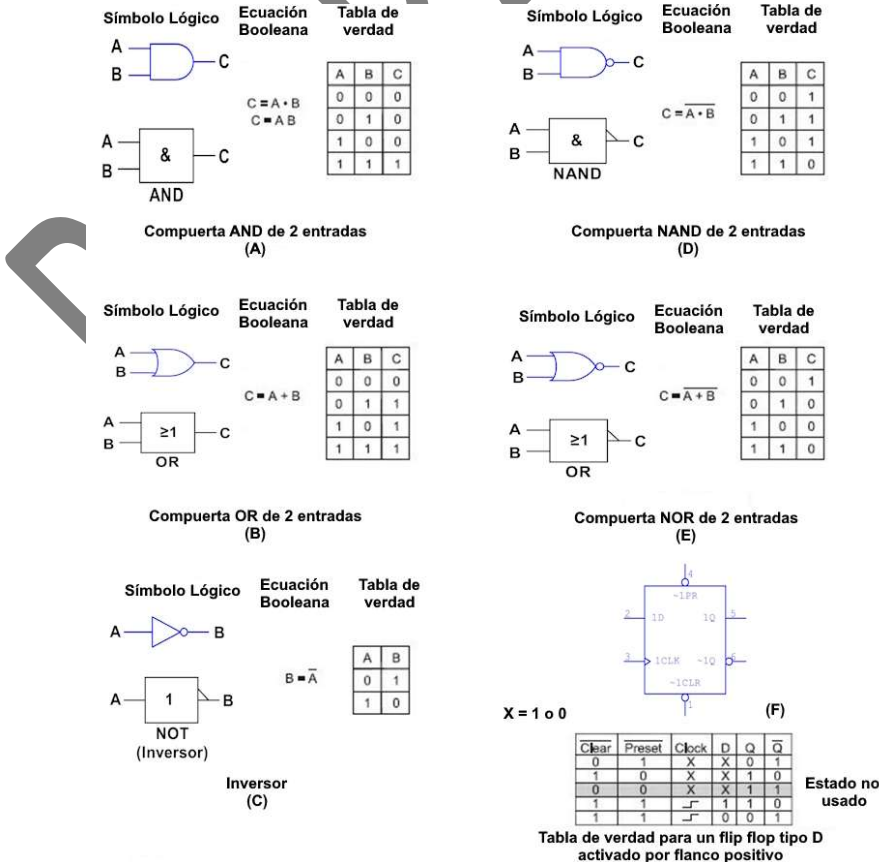


Figura 67. Símbolo esquemático de las funciones lógicas básicas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Otra modalidad de circuitos digitales integra señales binarias de manera temporal y secuencial. Estos circuitos reciben la denominación de lógica secuencial. El elemento fundamental de la lógica secuencial es el dispositivo biestable (flip-flop), caracterizado por presentar dos estados de estabilidad. El biestable reacciona ante una señal de sincronización que provoca modificaciones en sus salidas según las señales de entrada. Sus dos salidas, Q y $\bar{Q}$ (la barra superior indica inversión de señal), permanecen siempre en estados contrapuestos. Existen diversas tipologías de biestables, siendo el más habitual el tipo D, representado en la Figura 67. Cuando se suministra una señal digital, como un impulso o una onda cuadrangular, a la entrada de sincronización, el flanco ascendente (transición de nivel bajo a alto o de 0 a 1) genera que la salida Q sea 1 si la entrada D es 1, y viceversa. Las salidas Q y $\bar{Q}$ conservan dicho estado hasta que se produce el siguiente flanco ascendente en la entrada de sincronización.

Al interconectar biestables de manera que las salidas de uno alimenten la entrada del siguiente, se generan dos categorías significativas de circuitos: contadores y registros de desplazamiento. En un contador, las salidas de la secuencia de biestables conforman un valor binario o estado que representa la cantidad de señales de sincronización emitidas. Cada biestable almacena un bit del conteo total. El valor máximo que un contador puede representar es 2^N , donde N corresponde al número de biestables que lo componen. A modo de ejemplo, un contador de 3 bits (integrado por tres biestables) puede cuantificar $2^3 = 8$ estados diferentes, un contador de 4 bits puede cuantificar 16 estados, y así sucesivamente.

La interconexión del conjunto de biestables de una forma ligeramente diferente origina un registro de desplazamiento. Este registro preserva una secuencia de unos y ceros desde su entrada como salidas del biestable. Cada señal de sincronización provoca que el valor en la entrada del registro de desplazamiento se transfiera o desplace al siguiente biestable de la cadena. Algunos circuitos con registro de desplazamiento pueden configurarse para desplazarse en dirección ascendente o descendente (hacia adelante o hacia atrás) a lo largo del conjunto. Los registros de desplazamiento constituyen una modalidad elemental de memoria digital.

4.8.4 Circuitos integrados de RF

Los dispositivos semiconductores de radiofrecuencia (CI, por sus siglas en inglés) están concebidos de manera específica para ejecutar tareas habitualmente solicitadas en el espectro de radiofrecuencias, tales como amplificadores de señal reducida y elevada ganancia, mezcladores, moduladores y demoduladores, e incluso elementos de filtrado. Los circuitos integrados de radiofrecuencia disminuyen de manera significativa la cantidad de componentes discretos requeridos para la construcción de sistemas de radiocomunicación.

Un Circuito Integrado Monolítico de Microondas (MMIC, por sus siglas en inglés) representa una variante especializada de CI de radiofrecuencia que opera a través de rangos de frecuencia de microondas. Mediante el aprovechamiento de la integración para consolidar múltiples dispositivos de radiofrecuencia en una única envolvente, algunos MMIC ejecutan diversas funcionalidades. El MMIC constituye el elemento que posibilita a los profesionales en ingeniería de comunicaciones desarrollar teléfonos celulares económicos, receptores GPS y otros ejemplos sofisticados de tecnología inalámbrica.

Este tema se desarrollará con más detalle más adelante.

4.8.5 Microprocesadores y componentes relacionados

Los circuitos integrados de microprocesadores y microcontroladores poseen la capacidad de procesar millones de cálculos instruccionales por segundo, e incorporan frecuentemente funcionalidades como puertos de entrada-salida paralelos y serie, contadores y cronómetros directamente implementados en el chip.

4.8.5.1 Memoria

El programa requiere almacenarse en algún tipo de dispositivo de memoria para que un microprocesador pueda interpretar las instrucciones. Existen diversas categorías de memoria. La memoria volátil experimenta una pérdida de información almacenada al interrumpir su suministro energético. La memoria no volátil conserva los datos de manera permanente, incluso ante la desconexión de su fuente de alimentación. La memoria de acceso aleatorio (RAM, por sus siglas en inglés) permite operaciones de lectura y escritura en cualquier secuencia. La memoria de solo lectura (ROM, por sus siglas en inglés) preserva los datos de forma permanente sin posibilidad de modificación. Existen múltiples variantes habituales de cada tipología, como se ilustra en la Tabla 15. Los dispositivos o sistemas de memoria se conectan al microprocesador mediante una interfaz de alta velocidad denominada bus de memoria, capaz de transferir datos a velocidades elevadas.

Tabla 15. Tipos de memoria. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Memoria	Volátil/No volátil
SRAM (RAM estática)	Volátil
DRAM (RAM dinámica)	Volátil, los datos deben refrescarse continuamente
PROM (ROM programable)	No volátil
EPROM (ROM borrrable)	No volátil, se puede borrar con luz UV
EEPROM (ROM borrrable eléctricamente)	No volátil, se puede borrar eléctricamente; Flash EEPROM se borra por secciones
Almacenamiento masivo	No volátil, datos almacenados en disco duro, CD-ROM o cinta

4.8.5.2 Interfases de datos

Los microprocesadores y los sistemas informáticos establecen comunicación a través de canales de transferencia de información: dispositivos electrónicos, procedimientos y conexiones especializadas destinadas al intercambio de datos digitales. Se distinguen dos categorías fundamentales de interfaz: transmisión secuencial y transmisión simultánea. Las interfaces secuenciales efectúan la transferencia de un único bit informático por cada ciclo operativo. Diversas interfaces secuenciales de uso frecuente se presentan en la Tabla 16. Las interfaces de transmisión simultánea posibilitan la transferencia de múltiples bits de información en cada ciclo de operación.

Tabla 16. Interfaces seriales comunes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Interfaz	Velocidad típica
RS-232	115 Kbits/seg
USB 1.1	1,5 Mbits/seg
USB 2.0	480 Mbits/seg
USB 3.0	5 Gbits/seg
Firewire	800 Mbits/seg

4.8.5.3 Interfases Visuales

Los equipos de radioaficionado emplean dos categorías de dispositivos para representar información de manera visual: el indicador y la pantalla. Un indicador constituye un mecanismo que exhibe información de estado binario visualmente mediante la presencia, ausencia o tonalidad luminosa. Los indicadores tradicionales comprenden la lámpara incandescente y el diodo emisor de luz (LED). Una pantalla representa un dispositivo capaz de desplegar información textual o gráfica de forma visual. Un ejemplo lo constituye la pantalla que presenta datos de frecuencia y operación en el panel frontal de la mayoría de los transceptores. Las lámparas incandescentes han sido sustancialmente reemplazadas por LED en prácticamente todos los equipos de radioaficionado. Los LED presentan mayor durabilidad, activación y desactivación más expedita, menor consumo energético y generación térmica reducida comparados con las bombillas convencionales. Algunos indicadores incorporan LED con diversas cromáticas, generando múltiples tonalidades o incluso luz blanca. Un LED representa un diodo manufacturado con materiales semiconductores especializados que emiten radiación luminosa cuando la unión PN recibe polarización directa.

El tipo de pantalla más frecuente corresponde a la pantalla de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés), cuya construcción implica intercalar material de cristal líquido entre paneles vítreos transparentes. Un patrón de electrodos se imprime sobre una película transparente delgada en el panel frontal, mientras un electrodo único cubre el panel posterior. Al aplicar tensión a los electrodos del panel frontal, los cristales líquidos se retuercen configurándose para obstruir la transmisión luminosa. Las LCD requieren iluminación ambiental o de fondo (una fuente lumínica posterior a la capa de cristal líquido), dado que este medio no genera luz autónomamente.

4.9 Equipo Básico de Prueba

Conforme el radioaficionado adquiera destreza con equipos radiofónicos y sus complementos, se encontrará en la necesidad de efectuar verificaciones y evaluaciones elementales. Podría emprender la construcción de dispositivos e incluso restaurar un equipo de comunicación con desperfectos. Para tal propósito, requerirá un equipo básico de diagnóstico, y esta sección presenta algunos de los elementos habituales presentes en el banco de trabajo radiofónico.

4.9.1 Medidores analógicos y digitales

El voltímetro-ohmímetro (VOM, por sus siglas en inglés, también denominado voltímetro, voltímetro-ohmímetro-miliamperímetro y multímetro) constituye el instrumento de prueba más elemental y sorprendentemente versátil. Un medidor convencional, reciente, permite medir tensión, corriente y resistencia, funcionar como verificador de continuidad e incluso examinar diodos y transistores. Adicionalmente, estos dispositivos pueden incorporar conteo de frecuencia, medición de capacitancia e inductancia, y una interfaz de datos para su computadora personal con el objeto de registrar las lecturas.

Existen dos modalidades de VOM: analógicos y digitales. El medidor analógico presenta un indicador móvil con escalas calibradas en la pantalla. Aunque este tipo de instrumento no puede realizar funciones más complejas, resulta completamente apropiado para pruebas fundamentales de funcionamiento, sintonización y diagnóstico de problemas. De hecho, los radioaficionados y afines experimentados prefieren los medidores analógicos para identificar una lectura máxima o mínima, como al ajustar un circuito sintonizado, ya que resulta más sencillo observar el desplazamiento del indicador que una pantalla numérica.

El multímetro digital (DMM, por sus siglas en inglés) emplea un microprocesador para ejecutar todas las funciones elementales e incorpora la capacidad de contabilizar y realizar cálculos matemáticos. El dispositivo digital ofrece una precisión notablemente superior (aptitud para resolver variaciones diminutas) en comparación con un multímetro analógico. Numerosos radioaficionados poseen un multímetro digital y uno analógico para propósitos diversos.

En ambas tipologías de medidor, el instrumento debe impactar mínimamente el circuito sometido a medición. Al medir tensión, el medidor debe presentar una impedancia de entrada elevada para minimizar la carga en el circuito. En un circuito sensible, la pequeña corriente requerida por el voltímetro puede influir en su rendimiento. Otras características provechosas comprenden entradas de corriente con fusibles para prevenir daños por sobrecargas transitorias, retención de picos para capturar un valor máximo y rango automático para seleccionar autónomamente el rango de visualización apropiado.

4.9.2 Osciloscopio

Para trabajar con señales de audio, datos y RF de evolución acelerada, ningún instrumento resulta más versátil ni útil que el osciloscopio. El osciloscopio proporciona una representación de la tensión en función del tiempo, como se ilustra en la Figura 68. La visualización puede actualizarse miles o incluso millones de veces por segundo, lo que brinda al operador una perspectiva en tiempo real de las características de la señal. Esto permite evaluar formas de onda complejas y de rápida transformación que no son mensurables con medidores.

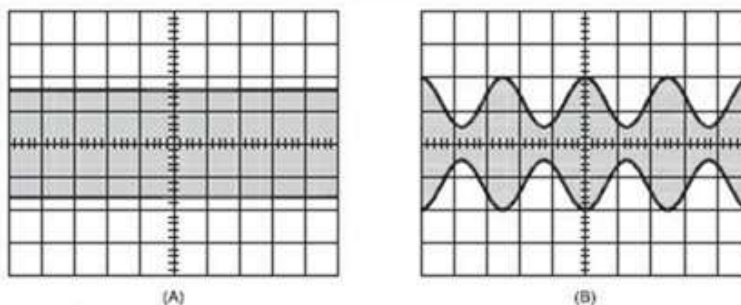


Figura 68. Visualización en pantalla de un osciloscopio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Las señales externas de los circuitos sometidos a evaluación se interconectan al dispositivo de visualización mediante amplificadores de canal horizontal y vertical. La amplificación de estos dispositivos resulta ajustable para modificar la sensibilidad vertical de la pantalla del instrumento. Un generador de base temporal interno regula la duración representada por las divisiones horizontales de la superficie de visualización.

En un osciloscopio digital, las señales se transforman en datos digitalizados y son procesadas por un microprocesador que gestiona su representación. Ciertos osciloscopios digitales implementan una conexión USB para proyectar las señales en un equipo computacional.

En la estación de radioaficionado, un osciloscopio de monitoreo resulta sumamente provechoso para supervisar las señales transmitidas, estableciendo conexión desde la salida de RF atenuada del transmisor hacia el canal vertical del instrumento. La capacidad de monitorear la morfología de onda de salida del transmisor en tiempo real proporciona una asistencia significativa para calibrar las formas de onda de manipulación, la ganancia del micrófono y el procesamiento vocal. La Figura 68 ilustra una portadora sin modulación y una portadora de AM modulada por una onda sinusoidal. La Figura 69 despliega una morfología de onda de manipulación típica sincronizada con los intervalos de conmutación que activan y desactivan el transmisor. El operador puede percibir nítidamente los efectos de cualquier ajuste o condición susceptible de generar distorsión o interferencias en la señal transmitida.

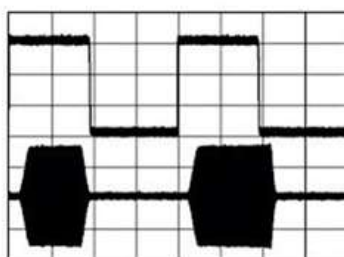


Figura 69. Ejemplo de una forma de onda del encendido y apagado de un transistor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

4.9.3 Mediciones de impedancia y resonancia

Frecuentemente resulta indispensable evaluar la impedancia durante la construcción o prueba de una antena novedosa, o al efectuar labores de mantenimiento en una infraestructura de comunicación existente. Un instrumento extraordinariamente versátil que ha simplificado significativamente los procedimientos de verificación de antenas es el analizador de antenas. Este dispositivo integra un generador de señales de onda continua (CW, por sus siglas en inglés), un contador de frecuencia, un puente de ROE y un medidor de impedancia.

Diversos analizadores pueden presentar valores correspondientes a la componente resistiva y reactiva de la impedancia de la antena, así como la frecuencia exacta en la cual se ejecuta la medición. Al establecer una conexión directa del analizador con la línea de alimentación de la

antena, es posible corroborar la ROE sin requerir la transmisión de una señal de alta potencia. Adicionalmente, estos instrumentos están capacitados para determinar el factor de velocidad de la línea de alimentación, la longitud eléctrica, la impedancia característica y otros parámetros técnicos relevantes.

Los analizadores a batería también son lo suficientemente pequeños como para formar parte de un kit de herramientas, lo que permite probar las antenas en el punto de ajuste sin tener que volver a la caseta para realizar mediciones. Precaución: dado que los analizadores utilizan señales pequeñas para realizar mediciones, su precisión puede verse afectada por señales fuertes de transmisores cercanos.

MEDIDORES Y VATÍMETROS DE ROE

Para determinar la ROE en un circuito de alimentación, se emplea un dispositivo de medición específico. El instrumento se instala en conexión secuencial con el trayecto de transmisión, típicamente en el punto de salida del equipo de radiocomunicación. Esta disposición permite una evaluación precisa de la relación de onda estacionaria que el sistema de antena presenta al transmisor. Numerosos equipos de radiocomunicación incorporan de manera integrada un medidor de ROE en su configuración interna.

En sustitución de detectores de ROE, numerosos entusiastas optan por un vatímetro y, de preferencia, un vatímetro con capacidad direccional. Los instrumentos de medición de potencia en líneas de alimentación permiten su instalación para registrar el flujo energético en cualquier sentido. Los vatímetros con orientación direccional posibilitan la evaluación de la potencia que se dirige hacia la antena y la potencia que se refleja desde ella mediante el giro de un elemento sensor o la conmutación de un interruptor. Posteriormente, el operador puede transformar las lecturas de potencia directa y reflejada en ROE utilizando tablas o fórmulas específicas.

SINTONIZADORES DE ANTENA

Cuando la ROE en el extremo de la línea de alimentación resulta excesivamente elevada para garantizar un funcionamiento óptimo del equipo de radio, se implementan dispositivos denominados adaptadores de impedancia o sintonizadores de antena. Estos componentes se conectan a la salida del transmisor. Un sintonizador de antena se ajusta meticulosamente hasta lograr que la ROE medida en la salida del transmisor se aproxime significativamente a una relación 1:1, lo que indica una adaptación precisa de la impedancia del sistema de antena con la impedancia de salida del transmisor.

A pesar de su denominación, el dispositivo de recepción no está realmente ajustado: la resistencia en el punto de salida del conducto de alimentación se transforma en un valor diferente. Este proceso permite que el emisor proporcione una descarga de energía total sin perjuicios derivados de la elevada relación de ondas estacionarias (ROE). Para facilitar la operación, la mayoría de los dispositivos de sintonización integran las funcionalidades de adaptación de impedancia, medidor direccional y conmutador de antena. Adicionalmente, existen sintonizadores con capacidad automática que identifican cuando la ROE es elevada y ejecutan los ajustes pertinentes bajo la supervisión de un microprocesador para lograr la coincidencia de impedancias.

4.9.4 Medidores de intensidad de campo y potencia de RF

Un conjunto adicional de evaluaciones resulta fundamental para determinar la eficacia y el patrón de radiación de la antena. Aunque un receptor podría ejecutar estas evaluaciones, su traslado al terreno suele resultar complicado. El medidor de campo emerge como la alternativa más idónea para esta labor, permitiendo lecturas precisas y calibradas de la intensidad del campo eléctrico. Si bien los niveles de intensidad de la señal pueden deducirse mediante mediciones de potencia y ROE, un medidor de campo permite cuantificar.

Al posicionar el dispositivo de medición de campo en una ubicación específica y orientar la antena, es posible evaluar el patrón de radiación de esta. De manera recíproca, el instrumento de medición puede trasladarse a diversos emplazamientos para determinar el diagrama de radiación de una antena estática, como una antena de haz metálico o un arreglo de antenas.

Otra herramienta para cuantificar la potencia es el vatímetro direccional. Este instrumento permite cuantificar tanto la potencia directa (PF, por sus siglas en inglés) como la potencia reflejada (PR) en el trayecto de transmisión. Algunos equipos de medición están capacitados para realizar ambas mediciones de manera simultánea, ya sea mediante medidores independientes o mediante la activación de un conmutador o un sensor de potencia. Los instrumentos de medición de potencia se emplean para optimizar los circuitos de salida del transmisor y del amplificador, así como para ajustar los niveles de excitación.

La relación de onda estacionaria (ROE) se puede calcular a partir de mediciones de potencia directa y reflejada realizadas con un vatímetro direccional. La ROE se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$SWR = \frac{1 + \sqrt{P_R/P_F}}{1 - \sqrt{P_R/P_F}}$$

4.10 Matemática de Radio

4.10.1 Coordenadas rectangulares y polares

En el ámbito científico, resulta imposible percibir visualmente los electrones circulando a través de un circuito, ni tampoco detectar directamente la tensión o las impedancias. Por consiguiente, los investigadores recurren a representaciones matemáticas y representaciones gráficas para explicar los fenómenos físicos. Los gráficos constituyen representaciones visuales que traducen lo que las ecuaciones expresan mediante símbolos; ambos medios comunicacionales transmiten información idéntica. El método de posicionamiento de las magnitudes matemáticas en la representación gráfica recibe la denominación de sistema de coordenadas. El término "coordenadas" equivale a una escala numérica que segmenta un gráfico en unidades uniformes. La localización precisa de cada punto dentro del gráfico se determina mediante un conjunto específico de coordenadas.

Los dos sistemas de coordenadas más frecuentemente empleados en radio son el sistema de coordenadas rectangulares (ocasionalmente referido como coordenadas cartesianas) y el sistema de coordenadas polares, los cuales se ilustran en la Figura 70 y Figura 71 respectivamente.

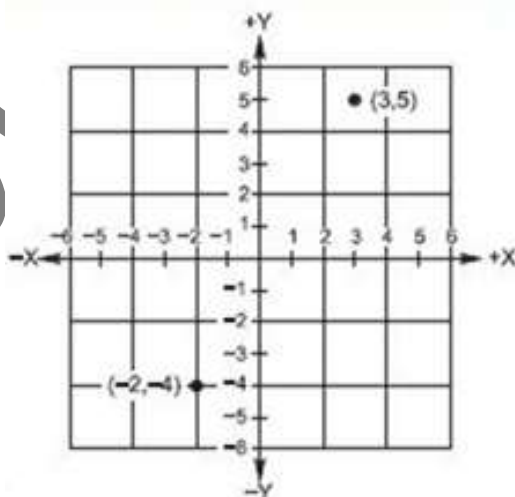


Figura 70. Coordenadas rectangulares. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En un sistema de representación cartesiano, la línea horizontal que atraviesa el centro del gráfico corresponde al eje X. La línea vertical que cruza por el punto medio del diagrama representa el eje Y. Cada punto dentro de este sistema de coordenadas rectangulares posee dos valores

numéricos que determinan su posicionamiento espacial, identificados como X e Y, habitualmente expresados mediante la notación (X, Y). Cada par de valores coordinados describe una ubicación específica en el plano gráfico. El punto de intersección de ambos ejes, donde los valores numéricos son cero en ambas direcciones, se denomina origen y se representa como (0, 0).

Las coordenadas con valores positivos en X e Y se localizan hacia la derecha y por encima del origen, respectivamente. En la Figura 70, el punto con coordenadas (3, 5) se ubica 3 unidades a la derecha del origen sobre el eje X y 5 unidades por encima del origen en el eje Y. Otro punto situado en (-2, -4) se encuentra 2 unidades a la izquierda del origen sobre el eje X y 4 unidades bajo el origen en el eje Y. Es fundamental no confundir la "X" referente a la posición en el eje X con la "X" que representa la reactancia.

En el sistema de coordenadas polares, los puntos del gráfico se describen mediante un par de valores numéricos denominados coordenadas polares. En este contexto, se emplea una longitud o radio medido desde el origen, y un ángulo que oscila entre 0° y 360° , calculado en sentido contrario a las agujas del reloj desde la línea de 0° , según se ilustra en la Figura 71. El símbolo r se utiliza para representar el radio y θ para el ángulo. Una representación numérica en coordenadas polares se expresa como $r\theta$. Consecuentemente, los dos puntos descritos previamente podrían representarse como $(5,83, 59,0^\circ)$ y $(4,5, 243,4^\circ)$, y se representan gráficamente como coordenadas polares en la Figura 71. A diferencia de los mapas convencionales, la convención matemática establece que la dirección de 0° apunta hacia la derecha, incrementándose el ángulo en sentido antihorario.

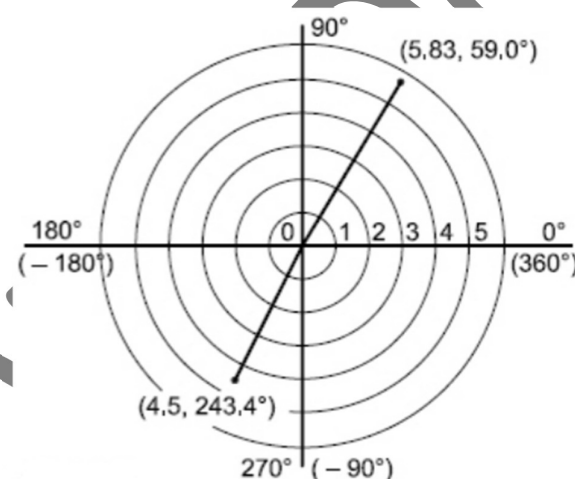


Figura 71. Coordenadas polares. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un ángulo negativo esencialmente denota "rotar en dirección opuesta". Considerando ángulos positivos medidos en sentido antihorario desde el eje de 0° , las coordenadas polares del punto ubicado en el sector inferior izquierdo de la Figura 71 corresponderían a $(4,5; -116,6^\circ)$. Cuando se detecta un valor angular negativo, implica que la medición se realiza en sentido horario partiendo de 0° .

A modo de ilustración, -270° resulta equivalente a 90° ; -90° es equiparable a 270° ; 0° y -360° presentan una equivalencia idéntica; así como $+180^\circ$ y -180° son mutuamente intercambiables. Adicionalmente, un ángulo puede expresarse en radianes ($1 \text{ radian} = 360 / 2\pi = 57,3 \text{ grados}$), no obstante, en este documento y en la evaluación correspondiente, todos los ángulos se representarán en grados.

En el ámbito electrónico, resulta habitual emplear simultáneamente el sistema de coordenadas rectangulares y polares al abordar problemas relacionados con impedancia.

4.10.2 Coordenadas complejas

Durante su trayectoria radiofónica, el profesional ha trabajado exclusivamente con magnitudes numéricas reales como π (pi), $5\ \Omega$, $2,5\ \text{mH}$ o $53,2\ \text{MHz}$. No obstante, al abordar ecuaciones que representan ángulos y fases, se encontrará con valores numéricos que incorporan la raíz cuadrada de menos uno $\sqrt{-1}$. Los valores fundamentados en $\sqrt{-1}$ reciben la denominación de números imaginarios, diferenciándolos de los números reales. Por conveniencia $\sqrt{-1}$ se representa como j en el ámbito electrónico.

A modo de ilustración, $2j$, $0,1j$, $7j/4$ y $457,6j$ constituyen ejemplos de números imaginarios. (Los matemáticos emplean i con idéntico propósito, aunque i se utiliza para representar la corriente en electrónica). j posee además otra propiedad significativa: $1/j = -j$. Los números imaginarios se emplean para caracterizar la fase, la rotación o las formas de onda dinámicas.

Los números reales e imaginarios pueden combinarse mediante operaciones de adición o sustracción. La integración de números reales e imaginarios genera un híbrido denominado número complejo, como $1 + j$ o $6 - j7$. (La convención en números complejos establece que j debe preceder en la parte imaginaria del valor). Estos valores resultan sumamente útiles en radio, ya que describen impedancias, relaciones entre tensión y corriente, y diversos fenómenos asociados.

COORDENADAS POLARES Y RECTANGULARES

Los números complejos que representan magnitudes eléctricas pueden manifestarse en formato rectangular ($a + jb$) o en representación polar ($r \angle \theta$). La adición de números complejos resulta más expedita en configuración rectangular:

$$(a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d)$$

La multiplicación y división de números complejos se simplifica en formato polar:

$$a \angle \theta_1 \times b \angle \theta_2 = (a \times b) \angle (\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{a \angle \theta_1}{b \angle \theta_2} = \left(\frac{a}{b}\right) \angle (\theta_1 - \theta_2)$$

La transformación entre formatos resulta provechosa en determinados cálculos matemáticos. A modo de ejemplo, para determinar el valor de dos impedancias complejas en configuración paralela, se emplea la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Para calcular el numerador ($Z_1 Z_2$), se requiere expresar las impedancias en representación polar. Para computar el denominador ($Z_1 + Z_2$), se precisa consignar las impedancias en formato rectangular. Consecuentemente, es fundamental dominar las técnicas de conversión entre ambas modalidades.

Para transformar desde formato rectangular ($a + jb$) a formato polar ($r \angle \theta$):

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

Para convertir desde formato polar a rectangular: $a = r \cos \theta$ $b = r \sin \theta$

Numerosas calculadoras científicas integran funcionalidades de conversión de coordenadas polares a rectangulares, siendo recomendable familiarizarse con su utilización. Es fundamental verificar que el dispositivo esté configurado en las unidades angulares preferidas: radianes o

grados. Todos los cálculos contemplados en este documento y en evaluaciones utilizan grados para la medición angular.

Si el número complejo se desglosa en sus componentes real e imaginaria, estos dos valores pueden emplearse como coordenadas en un gráfico que utiliza sistemas de coordenadas complejas.

Se trata de una modalidad específica de representación de coordenadas rectangulares, también denominada plano complejo. Convencionalmente, las coordenadas del eje X representan la parte real del número complejo, mientras que las del eje Y representan la componente imaginaria. Por ejemplo, el número complejo $6 - j7$ ocuparía idéntica ubicación que el punto (6 ; -7) en un gráfico de coordenadas rectangulares. La Figura 72 exhibe los mismos puntos que la Figura 70, pero ahora representando los números complejos $3 + j5$ y $-2 - j4$, respectivamente.

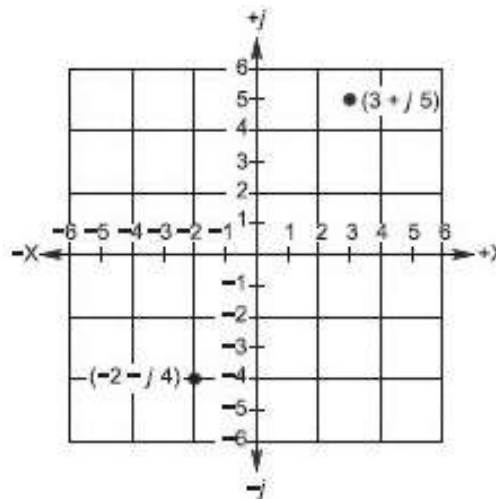


Figura 72. Representación del plano de números complejos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.11 Dispositivos Semiconductores

4.11.1 Materiales

El elemento químico silicio (Si) y el germanio (Ge) representan los materiales predominantemente empleados en la fabricación de componentes semiconductores. (Es importante destacar que el silicio difiere completamente de los compuestos lubricantes domésticos y selladores elastoméricos denominados silicona).

Estructuralmente, el silicio contiene 14 protones y 14 electrones, mientras que el germanio presenta 32 unidades de cada partícula subatómica. Ambos elementos poseen cuatro electrones en su capa externa susceptibles de ser compartidos, característica que permite su interacción con átomos próximos. Cuando estas partículas se organizan siguiendo una disposición sistemática mediante el intercambio electrónico, generan estructuras cristalinas. La Figura 73 ilustra los cristales formados por silicio y germanio. (Es importante mencionar que diferentes tipologías atómicas pueden configurarse en variados patrones).

Los cristales constituidos por átomos de silicio o germanio no exhiben propiedades óptimas ni como conductores eléctricos ni como aislantes, motivo por el cual se clasifican como semiconductores. Bajo condiciones específicas, pueden comportarse alternativamente como conductores o aislantes. Tales materiales semiconductores integran características tanto metálicas como no metálicas.

Los semiconductores se presentan como cristales sólidos caracterizados por su robustez estructural. Demuestran considerable resistencia y no resultan fácilmente deteriorables ante

vibraciones o manipulación brusca. Los componentes electrónicos fabricados mediante estos materiales semiconductores reciben la denominación de dispositivos de estado sólido.

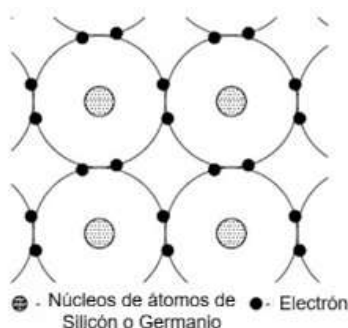


Figura 73. Átomos de silicio y germanio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Para modificar las propiedades eléctricas del material semiconductor, los fabricantes incorporan átomos adicionales a estos cristales mediante un procedimiento meticulosamente regulado denominado dopaje. Los átomos introducidos de esta manera generan un material que ya no conserva la pureza original del silicio ni del germanio. A estos átomos incorporados se les denomina impurezas. Dichas impurezas se seleccionan habitualmente por su potencial para modificar el mecanismo de distribución electrónica dentro de la estructura cristalina.

Como ilustración, el fabricante podría integrar algunos átomos de arsénico (As) o antimonio (Sb) al silicio o germanio durante el proceso de cristalización.

Los átomos de arsénico y antimonio poseen cinco electrones susceptibles de ser compartidos: un electrón adicional transferible en comparación con el cristal de silicio prístino. La Figura 74 ilustra cómo un átomo con cinco electrones en su capa externa se integra en la estructura cristalina. En tal escenario, existe un electrón adicional o libre en el cristal, y al material semiconductor fabricado bajo estas condiciones se le denomina material de tipo N. (Esta denominación deriva de la presencia de electrones libres adicionales en la estructura cristalina).

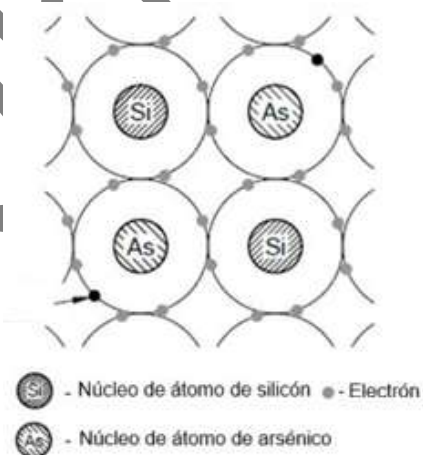


Figura 74. Átomo con 5 electrones encajan en la estructura cristalina añadiendo arsénico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los átomos de impureza presentan neutralidad eléctrica, de manera equivalente a los átomos de silicio o germanio. Los electrones suplementarios se interpretan como libres debido a que no comparten un enlace tan intenso con los átomos circundantes, lo que les permite una movilidad más amplia dentro de la estructura cristalina. Los átomos de impureza que generan (ceden) electrones libres a la estructura cristalina reciben la denominación de impurezas donantes.

Consideremos ahora el escenario donde el fabricante incorpora átomos de galio o indio en lugar de arsénico o antimonio. Los átomos de galio (Ga) e indio (In) únicamente poseen tres electrones susceptibles de compartirse con átomos próximos. Cuando estos átomos de galio o indio se integran en el cristal, surge un espacio adicional donde potencialmente podría ubicarse un electrón.

La Figura 75 ilustra un ejemplo de estructura cristalina con espacios donde podría estar presente un electrón. A este espacio para un electrón se le denomina hueco. El material semiconductor producido mediante este proceso se clasifica como material de tipo P. Los átomos de impureza que generan espacios adicionales para electrones en la estructura cristalina reciben la denominación de impurezas aceptoras.

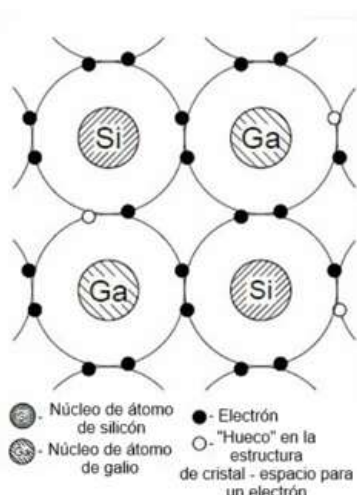


Figura 75. Átomo con 5 electrones encajan en la estructura cristalina añadiendo galio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.11.2 Diodos de unión

El diodo de unión, denominado también diodo de unión PN, consiste en una estructura semiconductor conformada por dos capas de material fusionadas. Una de las capas corresponde a un material semiconductor tipo P (caracterizado por portadores de carga positiva). La otra capa representa un material semiconductor tipo N (caracterizado por portadores de carga negativa). La denominación "unión PN" deriva precisamente del mecanismo de conexión entre las capas P y N que dan origen al dispositivo semiconductor. Figura 76 representa gráficamente el principio fundamental de un diodo de unión.

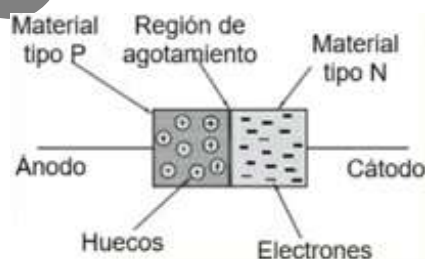


Figura 76. Concepto básico de un diodo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Cuando no se suministra tensión a un diodo, la intersección entre los semiconductores de tipo P y tipo N funciona como un obstáculo que bloquea la circulación de portadores entre las capas. Este fenómeno ocurre porque los portadores predominantes (electrones y huecos) se fusionan en el punto de contacto entre ambos materiales, sin dejar ningún portador que permita la transmisión de corriente a menos que se aplique tensión desde una fuente externa. Esta restricción al desplazamiento de corriente se identifica como región de agotamiento.

El sector tipo P del diodo se denomina ánodo. El sector tipo N se denomina cátodo. Cuando se suministra tensión a un diodo de unión, como se ilustra en A en la Figura 77, los portadores de carga transitan a través de la barrera y el diodo conduce. Con el ánodo en potencial positivo respecto al cátodo, los electrones son atraídos a través de la unión desde el material tipo N, atravesando el material tipo P y el circuito hasta el terminal positivo de la batería. Los huecos son atraídos en dirección contraria por la tensión negativa de la batería. Los electrones se aportan al cátodo y se extraen del ánodo mediante los cables conectados a la batería. Cuando el diodo se conecta de esta manera, se considera que está polarizado directamente. La corriente convencional (que fluye de positivo a negativo) en un diodo circula del ánodo al cátodo. Los electrones se desplazan en sentido inverso.

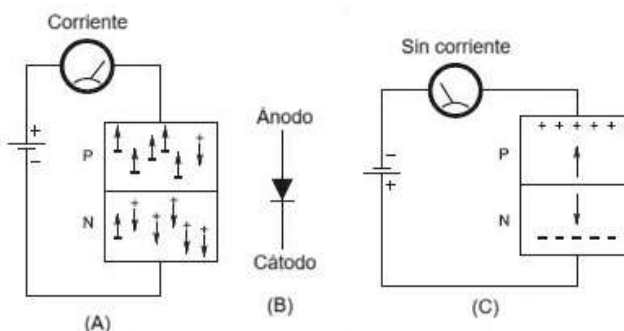


Figura 77. Funcionamiento del diodo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La Figura 77 (B) presenta el símbolo esquemático de un diodo, representado tal como se implementaría en un circuito, en contraste con la representación de bloques semiconductores utilizada en la sección A. La flecha del símbolo indicativo apunta en dirección de la corriente convencional, no de la corriente electrónica, que corresponde al desplazamiento de los electrones.

Si se modifica la polaridad de la batería, como se ilustra en la Figura 77 (C), los electrones excedentes del material tipo N son atraídos desde la unión hacia el terminal positivo de la batería. Análogamente, los huecos del material tipo P son atraídos desde la unión hacia el terminal negativo de la batería. Cuando acontece este fenómeno, los electrones no transitan a través de la unión hacia el material tipo P y el diodo interrumpe su conducción. Cuando el ánodo se conecta a una fuente de tensión negativa y el cátodo a una fuente de tensión positiva, se considera que el dispositivo está polarizado inversamente.

La tensión requerida para que los portadores se desplacen a través de la unión PN genera una tensión directa en el diodo durante su conducción. En diodos de silicio, la tensión directa oscila entre aproximadamente 0,6 y 0,7 V; mientras que, en diodos de germanio, fluctúa entre 0,2 y 0,3 V.

Los diodos de unión funcionan como rectificadores para permitir el tránsito de corriente en una única dirección. Cuando se aplica una señal de CA a un diodo, este se polariza directamente y conduce durante la mitad del ciclo, permitiendo que la corriente fluya hacia la carga. Durante el semiciclo restante, el diodo se polariza inversamente e interrumpe el flujo de corriente. La corriente CA se transforma en pulsos de CD, que siempre circulan en idéntica dirección.

La corriente directa promedio máxima representa la corriente promedio más elevada que puede circular a través del diodo en dirección directa para una temperatura de unión máxima admisible especificada. Si se permite un sobrecalentamiento excesivo, el diodo podría dañarse o destruirse.

Los diodos, diseñados para gestionar con seguridad corrientes directas superiores a unos cuantos amperios, se encapsulan de manera que puedan montarse en un disipador térmico. Este componente auxilia al encapsulado del diodo a disipar el calor con mayor celeridad, manteniendo la temperatura de la unión del diodo en un nivel seguro. El gabinete o pestaña metálica de un

diodo de potencia generalmente está conectado eléctricamente a una de sus capas, por lo que suele estar aislado de tierra.

La Figura 78 exhibe algunos de los tipos de carcasas de diodos más habituales, así como el símbolo esquemático general de un diodo. La línea o punto en la carcasa de un diodo indica el cable del cátodo. Consulte la carcasa o la hoja de datos del fabricante para verificar las conexiones correctas.

Símbolo
Ánodo —▶— **Cátodo**

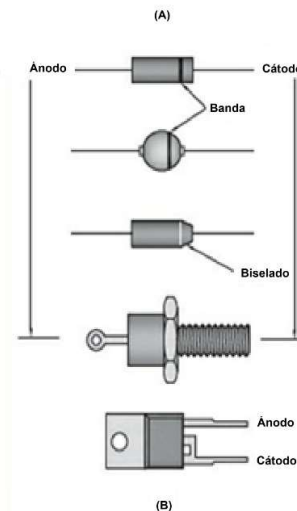


Figura 78. Tipos de carcasa para diodos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.11.3 Diodos de barrera Schottky

Si el componente semiconductor tipo P de una conexión PN se sustituye mediante una capa metálica, tal como se ilustra en la Figura 79 (A), se origina una barrera Schottky con características rectificadoras análogas, aunque con una tensión directa inferior comparada con una unión semiconductor completa. (Schottky fue el científico que conceptualizó esta configuración). Ilustrativamente, la tensión directa del diodo de barrera Schottky oscila entre 0,2 y 0,5 V, en contraste con los 0,6 a 0,7 V propios de los diodos de unión PN de silicio. Esta reducida tensión directa genera una menor disipación energética en relación con los diodos de unión PN para idéntica magnitud de corriente, motivo por el cual los rectificadores de diodos Schottky se implementan extensivamente en circuitos de alimentación. La Figura 79 (B) presenta el símbolo esquemático de un diodo Schottky.

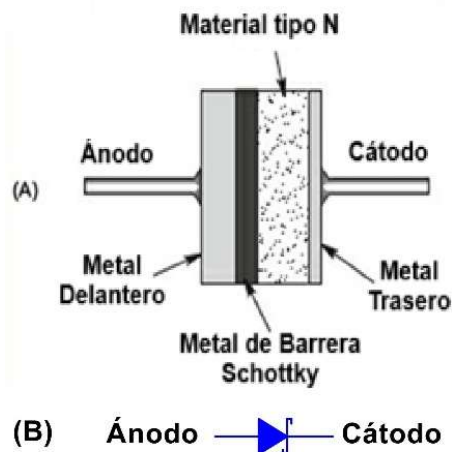


Figura 79. Diodo Schottky. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

DIODOS DE CONTACTO-PUNTUAL

En un diodo de unión, los estratos P y N están separados exclusivamente por la juntura, configurando un capacitor: dos placas eléctricamente cargadas distanciadas por un dieléctrico de reducido espesor. Aunque la capacitancia intrínseca de un diodo de unión PN podría ser tan solo de algunos picofaradios, esta característica capacitiva puede generar complicaciones en circuitos de radiofrecuencia, particularmente en VHF y frecuencias superiores.

Los diodos de unión pueden emplearse desde CD hasta la región de microondas, sin embargo, el diodo de contacto puntual presenta una capacitancia interna reducida, específicamente concebido para aplicaciones de radiofrecuencia.

La Figura 80 representa la estructura interna de un diodo de contacto puntual. Este dispositivo posee una superficie en la unión significativamente menor comparada con un diodo de unión PN. Durante su fabricación, el componente principal está elaborado con material de tipo N y un delgado filamento de aluminio, frecuentemente denominado filamento, se posiciona en contacto con la superficie semiconductor, generando una barrera Schottky. El resultado es un diodo con una capacitancia interna sustancialmente inferior a los diodos de unión PN, típicamente 1 pF o menos. Esto implica que los diodos Schottky de contacto puntual resultan más apropiados para aplicaciones de VHF y UHF que los diodos de unión PN. Generalmente, estos diodos Schottky de contacto puntual se implementan como mezcladores de UHF y como detectores de RF en VHF y frecuencias inferiores.

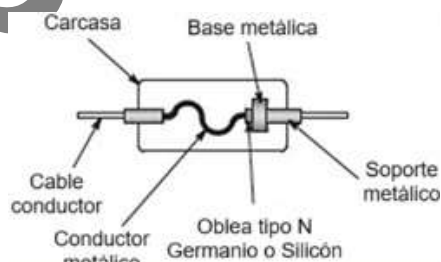


Figura 80. Diodo de contacto puntual. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

DIODOS DE PORTADOR CALIENTE

Existe una variante adicional de diodo de barrera Schottky caracterizada por una reducida capacitancia interna y sobresalientes prestaciones en altas frecuencias: el diodo de portador caliente. (El término «caliente» hace referencia a las velocidades electrónicas superiores del dispositivo en comparación con un diodo de unión PN). Esta tipología de componente presenta una estructura constructiva prácticamente idéntica al diodo de contacto puntual, con una divergencia estructural significativa que se ilustra en la Figura 81.

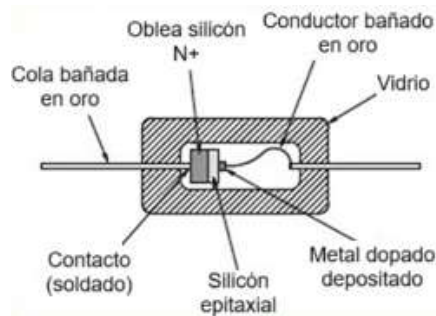


Figura 81. Diodos de contacto caliente. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El filamento correspondiente al dispositivo semiconductor de portador térmico se encuentra enlazado estructuralmente con un punto conductor metálicamente depositado sobre su elemento constitutivo. El dispositivo semiconductor de portador térmico demuestra una superioridad tanto mecánica como eléctrica respecto al diodo de contacto puntual tradicional. Entre las principales características distintivas de este componente electrónico se encuentran su optimizada capacidad de gestión energética, una reducida resistencia de contacto y una superior resistencia a las perturbaciones generadas por impulsos de ruido transitorio. Los dispositivos semiconductores de portador térmico son frecuentemente implementados en sistemas de mezcla y detección para rangos de VHF y UHF. En tales aplicaciones específicas, estos componentes electrónicos superan significativamente a los diodos de contacto puntual convencionales, presentando una mayor eficiencia en los procesos de conversión y generando niveles de ruido sustancialmente inferiores.

4.11.4 Diodos Zener

Los diodos Zener (denominados así en honor a su creador) constituyen una categoría particular de diodos de unión PN empleados como referencias de tensión y estabilizadores de potencial. Como se explicó previamente, la corriente de fuga experimenta un incremento al aplicar una tensión inversa a un diodo. Inicialmente, esta corriente de fuga resulta extremadamente reducida y experimenta variaciones mínimas al aumentar la tensión inversa.

No obstante, existe un punto en el cual la corriente de fuga se eleva abruptamente. Más allá de este punto, la corriente se incrementa de manera exponencial para un pequeño aumento de tensión; este fenómeno se denomina punto de avalancha. La tensión Zener representa la tensión necesaria para provocar dicha avalancha. Los diodos de unión convencionales se destruirían si operaran en esta región, mientras que los diodos Zener se fabrican específicamente para soportar con seguridad la corriente de avalancha.

Dado que la corriente en la región de avalancha puede fluctuar en un amplio intervalo mientras la tensión permanece prácticamente constante, este tipo de dispositivo puede utilizarse como regulador de tensión. La tensión en la cual se produce la avalancha puede controlarse con precisión durante el proceso de fabricación. Los diodos Zener se calibran en función del voltaje de avalancha. Los reguladores de voltaje de diodos Zener, ilustrados en la Figura 82, proporcionan un voltaje de salida de CD prácticamente constante, incluso con variaciones significativas en la resistencia de carga o la tensión de entrada. Como referencias de voltaje, presentan un potencial estable que permanece invariable en un amplio rango de temperaturas.

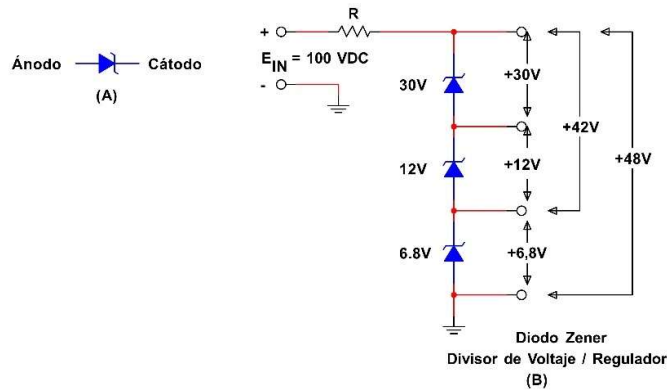


Figura 82. Diodo Zener. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En la actualidad, los diodos Zener se encuentran disponibles con tensiones nominales que abarcan desde 1,8 hasta 200 V. Su potencia nominal comprende un rango entre 250 mW y 50 W. Se presentan bajo idénticos formatos de envoltente que los diodos de unión. Generalmente, los diodos Zener con una disipación térmica de 10 W o superior se manufacturan en carcasas con montaje mediante perno o pestaña.

4.11.5 Diodos Varactor

Como se indicó previamente, los diodos de unión exhiben una capacitancia interna significativa. Es factible modificar la capacitancia interna de un diodo alterando la cantidad de polarización inversa aplicada, transformando así la separación de los portadores en la región de agotamiento. Los diodos de capacitancia variable y los diodos varactores (diodos de reactancia variable) han sido concebidos para aprovechar esta característica, generando capacitores controlados por tensión. Un diodo de capacidad variable (Varicap) constituye la denominación comercial de estos dispositivos.

Los varactores proporcionan diversos intervalos de capacitancia, desde unos cuantos picofaradios hasta más de 100 pF. Cada variante posee una capacitancia mínima y máxima específica. Cuanto más elevada sea la capacitancia máxima, mayor resultará la capacitancia mínima. Un varactor convencional puede ofrecer modificaciones de capacitancia en una proporción de 10:1 con tensiones de polarización que oscilan entre 0 y 100 V.

Los símbolos esquemáticos habituales de un diodo varactor se representan en la Figura 83. Estos componentes se implementan en multiplicadores de frecuencia con niveles de potencia hasta 25 W, en circuitos de sintonización remota y en circuitos moduladores de frecuencia.

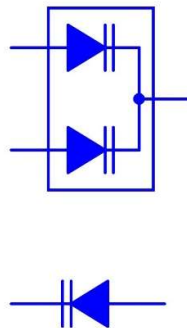


Figura 83. Diodo varactor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.11.6 Diodos PIN

Un diodo PIN (positivo/intrínseco/negativo) se constituye mediante la implementación de estratos de naturaleza P y N en caras opuestas de un estrato de silicio prácticamente virgen, denominado región I, puesto que la conducción la efectúan los electrones propios de un cristal de silicio convencional. La Figura 84 ilustra la configuración trilaminar del diodo PIN. Este estrato no se encuentra dopado con transportadores de carga de tipología P o N, a diferencia de los demás. Los transportadores de carga presentes en dicha capa son consecuencia de las propiedades intrínsecas del material semiconductor puro. En el caso específico del silicio, existen escasos transportadores de carga libres. Las propiedades del diodo PIN están fundamentalmente condicionadas por el espesor y la superficie de la región I. Los estratos externos reciben la denominación P+ y N+ para significar un dopaje sustancialmente más intenso que el estándar. Los diodos PIN se representan mediante el mismo símbolo esquemático que un diodo de unión PN.

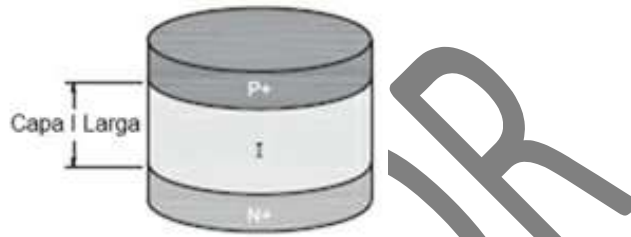


Figura 84. Diodo PIN. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los diodos PIN responden a la RF de tres maneras diferentes, dependiendo de su polarización:

- Con polarización inversa, los transportadores de carga se desplazan extremadamente lentos. Su reducida velocidad de respuesta provoca que el diodo PIN se comporte como una resistencia para las corrientes de RF, obstruyéndolas, de manera que el diodo PIN permanece aislado y funciona como un circuito abierto a la RF.
- Con polarización neutra, prácticamente no existen portadores de carga libres para conducir, por lo cual la unión PIN opera como un capacitor de dimensiones muy reducidas, frecuentemente lo suficientemente pequeño para que el diodo pueda considerarse un circuito abierto.
- Con polarización directa, el diodo PIN actúa como una resistencia que disminuye proporcionalmente al incremento de la corriente de polarización. Consecuentemente, la resistencia que un diodo PIN presenta a la RF puede controlarse modificando la polarización directa aplicada.

Estas características permiten que el diodo PIN funcione como interruptor o atenuador. Los diodos PIN resultan más veloces, más compactos, más resistentes y confiables que los relés u otros dispositivos de conmutación electromecánicos.

La Figura 85 muestra un circuito en el que se utilizan diodos PIN para construir un interruptor de RF. Este diagrama ilustra un interruptor de transmisión/recepción para su uso entre un transceptor de 2 metros y un transversor de UHF o microondas. Sin polarización, o con polarización inversa aplicada al diodo, el diodo PIN presenta una elevada resistencia a la RF, por lo que no circula ninguna señal del generador a la carga. Al aplicar polarización directa, la resistencia del diodo disminuye, permitiendo la transmisión de la señal de RF. La pérdida de inserción (resistencia a la corriente de RF) se determina principalmente por la cantidad de polarización directa aplicada; a mayor corriente de polarización directa, menor resistencia a la RF.

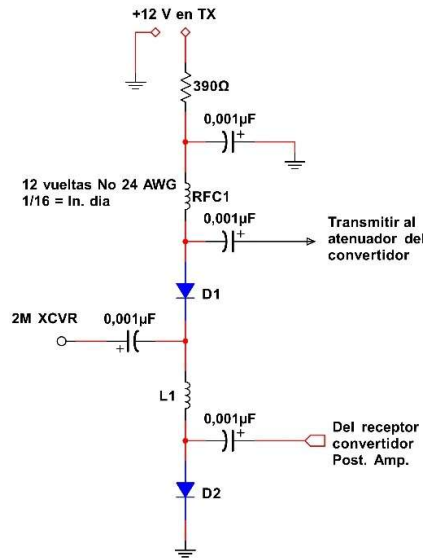


Figura 85. Circuito con diodos PIN. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.11.7 Diodos emisores de luz

Los diodos emisores de luz (LED) están concebidos para producir luminosidad cuando se polarizan directamente, permitiendo que la corriente transite a través de sus uniones PN. En el momento en que un electrón libre se fusiona con una vacante, genera luz con una longitud de onda o tonalidad específica. Los LED representan fuentes luminosas de extraordinaria eficiencia.

El matiz del LED depende del material o la combinación de elementos empleados para la unión. Los LED están disponibles en múltiples cromatismos. Mediante el control de la diferencia energética entre electrones y vacantes, también es posible regular el color del LED. La luminosidad emitida guarda proporción directa con la cantidad de corriente circulante. Los LED rojos, verdes y amarillos generalmente se fabrican con arseniuro de galio, fosfuro de galio o una combinación de ambos materiales. Los LED azules utilizan elementos como carburo de silicio o seleniuro de zinc. Un LED blanco, en realidad, consiste en un LED azul con un revestimiento de fósforo amarillento en su interior que resplandece al ser iluminado por la luz azul del LED. La interacción entre la luz azul emitida por el LED y la luz amarilla del fósforo produce una percepción blanquecina para el ojo humano.

Los LED se presentan en envolturas plásticas o metálicas con un extremo transparente. Resultan útiles como reemplazos de lámparas incandescentes de panel e indicadores. En esta aplicación, ofrecen una prolongada vida útil, reducido consumo energético y un tamaño compacto. Una de sus aplicaciones electrónicas más relevantes es la de las pantallas numéricas, donde se disponen matrices de diminutos LED para proporcionar segmentos luminosos que conforman números. El símbolo esquemático y un diseño de carcasa típico para el LED se muestran en la Figura 86.

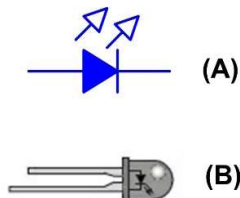


Figura 86. Diodos LED. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un diodo emisor de luz (LED) rojo convencional presenta una tensión directa aproximada de 1,6 V. Los LED de tonalidades amarilla y verde exhiben valores de tensión directa más elevados (2

V para el amarillo y 4 V para el verde). La corriente de polarización directa de un LED estándar se sitúa generalmente entre 10 y 20 mA para conseguir su máxima luminosidad. Los LED de alta potencia destinados a iluminación emplean corrientes significativamente superiores. De manera similar a otros diodos, la corriente que atraviesa un LED puede modularse mediante resistencias conectadas en serie. La modificación de la corriente que circula por un LED influirá en su intensidad luminosa; no obstante, la tensión a través del dispositivo permanecerá prácticamente constante.

4.11.8 Transistores bipolares

El transistor de unión bipolar (BJT, por sus siglas en inglés) constituye un dispositivo semiconductor de tres terminales con uniones PN, capaz de emplear una corriente pequeña para controlar otra de mayor magnitud; en otras palabras, amplificar la corriente. Su estructura comprende dos capas de material tipo N o P, insertando una delgada capa del tipo opuesto entre ambas, según se ilustra en la Figura 87. Cuando las capas externas son de material tipo P y la capa intermedia de material tipo N, el dispositivo recibe la denominación de transistor PNP debido a la disposición de sus capas. Si las capas externas son de material tipo N, se denomina transistor NPN. Esencialmente, un transistor representa dos diodos de unión PN consecutivos. La Figura 88 muestra los símbolos esquemáticos correspondientes a los transistores bipolares PNP y NPN. Las tres capas del transistor se identifican como emisor, base y colector. La Figura 87 presenta un diagrama de la construcción de un transistor PNP típico.

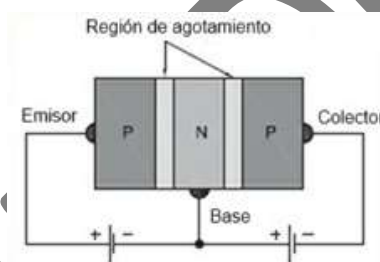


Figura 87. Diagrama de un transistor PNP. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

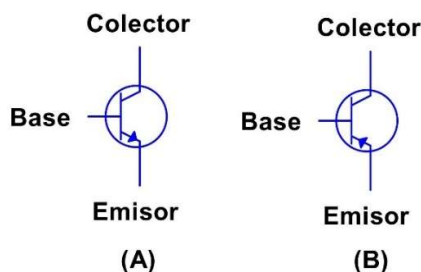


Figura 88. Símbolo de un transistor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En un transistor bipolar real, la región base (en este caso, sustrato tipo N) presenta un espesor considerablemente menor comparado con las capas periféricas. De manera similar al diodo de unión PN previamente descrito, se genera una zona de agotamiento en cada interfaz entre materiales tipo P y tipo N. Dichas regiones de agotamiento funcionan como una barrera para la circulación de corriente hasta que se establece una polarización directa en la unión entre las capas base y emisor.

La tensión de polarización directa en la sección emisor-base del conjunto estratificado provoca la migración de electrones desde la base hacia el emisor. Conforme los electrones libres del material tipo N se desplazan hacia el material tipo P, los huecos del material tipo P se mueven en dirección opuesta hacia la base. Algunos huecos se fusionan con electrones libres en la base,

pero debido a la reducida dimensión de la capa base, la mayoría se trasladan directamente hacia el material tipo P del colector.

Como se ilustra, el colector se encuentra conectado a una tensión negativa con relación a la base. Típicamente, la polarización inversa obstaculizaría la circulación de corriente a través de la unión base-colector. No obstante, el colector ahora contiene un excedente de huecos originado porque los del emisor traspasaron la base. Dado que la fuente de tensión vinculada al colector genera un potencial negativo, los huecos del emisor serán atraídos hacia la conexión de la fuente de alimentación, generando un flujo de corriente desde el emisor al colector.

Un BJT se considera polarizado cuando existe una caída de tensión directa en la unión emisor-base y la unión colector-base permanece polarizada inversamente. Para los transistores de silicio, la tensión de activación de emisor a base oscila entre 0,6 a 0,7 V de base a emisor para transistores NPN y de emisor a base para transistores PNP.

Los transistores de unión bipolar encuentran aplicación en una diversidad de campos, incluyendo amplificadores (desde niveles muy bajos hasta potencias muy elevadas), interruptores, osciladores y fuentes de alimentación. Se implementan en todos los rangos de frecuencia, desde CD hasta UHF y microondas. Los transistores se presentan en una amplia variedad de envolturas.

CARACTERÍSTICAS DEL TRANSISTOR

Derivado de su estructura constructiva, el transistor presenta una particularidad donde la corriente que circula por el colector resulta significativamente superior a la que transita por la base. Cuando la unión base-emisor experimenta una polarización directa, la corriente del colector incrementa de manera proporcional a la corriente de polarización suministrada. El vínculo entre la corriente del colector y la corriente de base se denomina ganancia de corriente o beta. Beta se representa mediante el símbolo griego β . Su cálculo se efectúa mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = I_c / I_b$$

donde:

- I_c Corriente colector
- I_b = Corriente base

A modo ilustrativo, si una corriente de base de 1 mA genera una corriente de colector de 100 mA, el valor beta resultante será 100. Los valores beta para transistores de unión oscilan habitualmente desde aproximadamente 10 hasta varios cientos.

Las hojas de especificaciones técnicas de los fabricantes establecen un intervalo de valores para β . Los transistores individuales pertenecientes a una tipología específica pueden presentar betas sustancialmente variables. Otra característica fundamental de los transistores es alfa, expresada mediante la letra griega α . Alfa representa la relación entre la corriente de colector y la corriente de emisor, determinada por la ecuación:

$$\alpha = I_c / I_e$$

donde:

- I_c = Corriente colector
- I_e = Corriente emisor

Cuanto más reducida sea la corriente de base, más próxima resultará la corriente del colector a la del emisor, aproximándose alfa al valor unitario. En un transistor de unión, alfa típicamente se sitúa entre 0,92 y 0,98.

El transistor se considera saturado cuando incrementos adicionales en la corriente base-emisor no provocan aumentos en la corriente del colector, considerándose completamente activo en dicho estado. En el extremo opuesto, cuando el transistor experimenta una polarización inversa, no existe corriente entre emisor y colector, situándose en estado de corte. Durante su utilización

como amplificador, el transistor opera entre estos dos límites. Al operar en corte o saturación, el dispositivo puede funcionar como interruptor. Los transistores presentan características de frecuencia relevantes. La frecuencia de corte alfa representa la frecuencia en la cual la ganancia de corriente disminuye hasta 0,707 veces su valor a 1 kHz, considerándose el límite superior práctico de frecuencia para un transistor configurado como amplificador de base común.

La frecuencia de corte beta, similar a la frecuencia de corte alfa, se aplica a transistores configurados como amplificadores de emisor común. Representa la frecuencia en la cual la ganancia de corriente disminuye hasta 0,707 veces su valor a 1 kHz.

4.11.9 Transistores de efecto de campo

Tal como se mencionó de manera general, los transistores de efecto de campo (FET) obtienen su denominación debido a que el flujo de corriente que los atraviesa se regula mediante la influencia de un campo eléctrico o tensión, en contraste con otros dispositivos de corriente, como sucede en el transistor de unión bipolar. En la actualidad, se emplean dos modalidades de transistores de efecto de campo: el FET de unión (JFET) y el FET semiconductor de óxido metálico (MOSFET). La propiedad fundamental compartida por ambas variantes de FET radica en presentar una impedancia de entrada extremadamente elevada, que típicamente alcanza 1 megaohmio o incluso valores superiores. Esta característica de impedancia resulta significativamente más pronunciada comparada con la de un transistor bipolar. Los FET se producen utilizando idénticos tipos de encapsulados que los transistores bipolares.

4.11.9.1 Transistores de efecto de campo de unión (JFET)

La configuración estructural fundamental del JFET se representa en la Figura 89. El JFET puede interpretarse como un segmento de material semiconductor que funciona como una resistencia de magnitud variable. El terminal por el cual se desplazan los transportadores de carga recibe la denominación de fuente. El terminal opuesto se identifica como drenador. Los terminales encargados de regular la resistencia entre la fuente y el drenador se conocen como compuertas. La sección material que interconecta la fuente y el drenador se denomina canal. Se distinguen dos variantes de JFET: canal N y canal P, determinadas por la naturaleza del material constitutivo del canal. Los símbolos esquemáticos correspondientes a ambas tipologías de JFET se presentan en la Figura 90.

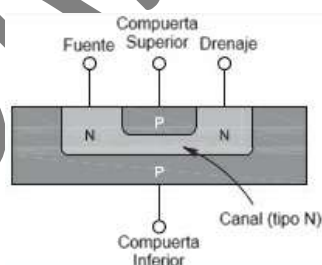


Figura 89. Transistor JFET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

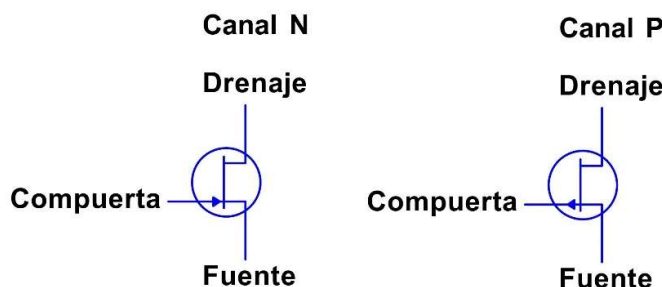


Figura 90. Símbolo del JFET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Dos zonas de compuerta, fabricadas con materiales semiconductores de naturaleza opuesta para el canal, se generan en lados contrapuestos del canal del JFET y se interconectan. Cuando se suministra una tensión de polarización inversa desde las uniones compuerta-canal superior e inferior hacia la fuente, se establece un campo eléctrico a través del canal. Este campo eléctrico regula el flujo convencional de electrones por el canal. Al modificar la tensión de compuerta, el campo eléctrico experimenta variaciones, lo que consecuentemente altera la corriente fuente-drenador. El terminal de compuerta permanece sistemáticamente polarizado inversamente, provocando un flujo prácticamente nulo de corriente y generando que el JFET posea una impedancia de entrada extremadamente elevada, en contraste con el transistor bipolar, cuya impedancia de entrada resulta considerablemente inferior.

Dado que la corriente del canal está regulada por la tensión en la compuerta, la ganancia de un FET se cuantifica mediante transconductancia (g_m), que representa la relación entre la corriente de salida y la tensión de entrada. La transconductancia se dimensiona en siemens (S), el recíproco de ohmios.

4.11.9.2 Transistores de efecto de campo semiconductor de óxido metálico (MOSFET)

La configuración de un transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico (MOSFET), ocasionalmente denominado transistor de efecto de campo de puerta aislada (IGFET), y su representación esquemática se presentan en la Figura 91. En el MOSFET, la puerta permanece aislada del canal de fuente/drenaje mediante una delgada capa dieléctrica. Puesto que circula una cantidad mínima de corriente a través de este dieléctrico, la impedancia de entrada resulta aún más elevada que en el JFET, típicamente de 10 megaohmios o superior. Las representaciones esquemáticas de los MOSFET de doble puerta de canal N y canal P se ilustran en la Figura 92. Ciertos tipos de MOSFET incorporan dos puertas a las cuales se pueden aplicar diferentes tensiones para aplicaciones especializadas, como mezcladores.

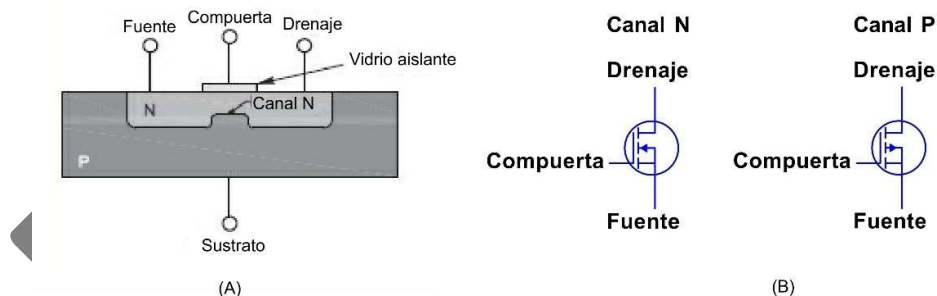


Figura 91. Transistor MOSFET. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

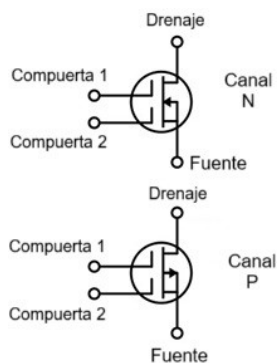


Figura 92. MOSFET de doble puerta. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Prácticamente la totalidad de los MOSFET fabricados en la actualidad integran diodos Zener destinados a la protección de la compuerta. Sin esta característica, el aislamiento de la puerta podría perforarse con suma facilidad ante pequeñas descargas electrostáticas. Los diodos protectores se interconectan entre la puerta (o puertas) y el cable de alimentación del FET. Normalmente, estos diodos no se representan en el símbolo esquemático.

4.11.9.3 FET de modo de mejora y de vaciado (agotamiento)

Existen dos categorías de transistores de efecto de campo: los correspondientes al modo de mejora y los pertenecientes al modo de vaciado. Un dispositivo en modo de vaciado se corresponde con la Figura 89, donde se presenta un canal sin tensión de compuerta aplicada. La compuerta de un dispositivo en modo de vaciado opera con polarización inversa. Cuando se establece polarización inversa entre la compuerta y la fuente, el canal se despoja de portadores de carga y la corriente experimenta una disminución.

Los dispositivos en modo de mejora están concebidos de manera que no existe canal alguno sin tensión aplicada a la compuerta. El canal conduce corriente únicamente cuando se aplica una tensión de compuerta a fuente que le permite establecer conducción. Cuando la compuerta de un dispositivo en modo de mejora está polarizada directamente, la corriente comienza a circular a través del canal fuente/drenador. Cuanto más intensa sea la polarización directa en la compuerta, mayor será la corriente que transita por el canal. Los JFET no pueden emplearse como dispositivos en modo de mejora porque, si la compuerta está polarizada directamente, conducirá como un diodo polarizado directamente. Las puertas de los MOSFET están aisladas de la región del canal, por lo que pueden utilizarse como dispositivos de modo de mejora.

Ambas polaridades pueden aplicarse a la puerta sin que esta se polarice directamente ni conduzca. Algunos MOSFET están diseñados para su utilización sin polarización en la puerta. El MOSFET opera en modo de mejora cuando la puerta está polarizada directamente y en modo de agotamiento cuando está polarizada inversamente.

4.11.10 Dispositivos integrados RF

Los circuitos integrados (CI) representan el componente predominante en la arquitectura electrónica contemporánea. Al desmontar un transceptor o un equipo computacional, resultaría prácticamente improbable identificar múltiples transistores discretos individuales. Los circuitos correspondientes a Frecuencias muy altas (VHF), Frecuencias ultra altas (UHF) y microondas han sido uno de los últimos segmentos electrónicos en experimentar la transición hacia la integración. Aunque los transistores contenidos en un CI pueden procesar señales de elevada frecuencia, la fabricación de un circuito integrado que opere correctamente en diversas configuraciones representa un desafío tecnológico significativo.

Los progresos en el diseño de circuitos han permitido finalmente su operación en frecuencias superiores, de manera análoga a las frecuencias inferiores. De hecho, los dispositivos móviles resultarían técnicamente inviables sin CI que incorporen funcionalidades de UHF y microondas.

El CI de RF más utilizado por los aficionados corresponde a un circuito integrado monolítico de microondas (MMIC). Su configuración difiere sustancialmente de los CI convencionales. Generalmente, los MMIC presentan dimensiones reducidas, frecuentemente denominados "encapsulados de píldora" debido a su morfología similar a una pequeña pastilla con cuatro conductores dispuestos perpendicularmente. El MMIC típico contempla un conductor de entrada, otro de salida y dos de conexión a tierra.

Múltiples MMIC carecen de un conductor de alimentación independiente: el suministro de CD a la electrónica interna y la salida de RF emplean idéntico conductor. El aprovisionamiento energético se realiza mediante una resistencia o bobina de RF hacia el conductor de salida. La tensión de CD de operación habitual en un amplificador MMIC alcanza los 12 V. Un capacitor de bloqueo de reducidas dimensiones impide la propagación de la tensión de CD hacia circuitos adyacentes, según se representa en el esquema de la Figura 93. Los MMIC implementan este

método por su simplicidad, y el conductor de tierra adicional contribuye a garantizar el funcionamiento óptimo del circuito amplificador en el espectro completo de frecuencias.

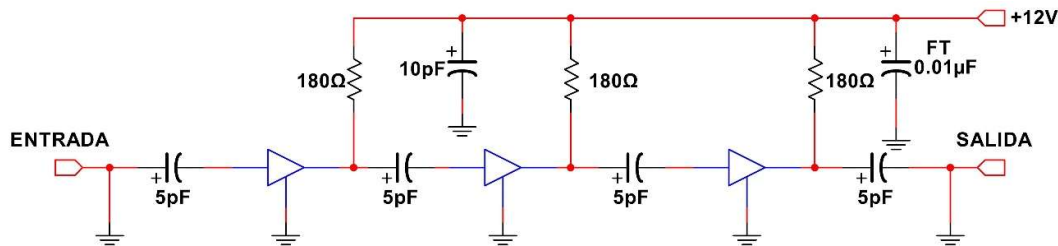


Figura 93. Diagrama esquemático de un amplificador UHF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los dispositivos MMIC exhiben parámetros operativos meticulosamente regulados, tales como amplificación, coeficiente de ruido y características de impedancia de entrada/salida, y demandan únicamente algunos componentes periféricos para su implementación óptima. Como “*elementos fundamentales*”, los MMIC pueden simplificar sustancialmente el diseño de amplificadores para circuitos en rangos de UHF y microondas, dado que las configuraciones de impedancia de entrada y salida de los circuitos integrados son próximas a 50 Ω.

Como ilustración de configuración, un MMIC MAR-6 podría emplearse para desarrollar un preamplificador receptor para un equipo de 1296 MHz utilizando escasas resistencias y capacitores externos. Este componente suministra 16 dB de amplificación para señales hasta 2 GHz, con un coeficiente de ruido aproximado de 3 dB. Numerosos amplificadores MMIC presentan coeficientes de ruido en un intervalo de aproximadamente 3,5 a 6 dB. Un preamplificador de UHF de elevado rendimiento y mínima interferencia puede ostentar un coeficiente de ruido de 2 dB o inferior.

En las frecuencias superiores de VHF e inferiores de UHF, la ganancia de dispositivos de silicio y germanio decrece aceleradamente debido a que los portadores de carga no transitan por estos materiales con suficiente celeridad. Se requieren materiales con superior movilidad de portadores. Los transistores de RF y los MMIC pueden operar exitosamente en el espectro de microondas utilizando arseniuro de galio (GaAs) y nitruro de galio (GaN).

Los circuitos construidos con MMIC generalmente implementan técnicas de construcción de microbanda. Se utiliza material de placa de circuito de doble cara, con una superficie constituyendo un plano de tierra. Las pistas de dimensiones precisas sobre el plano de tierra conforman una línea de transmisión de 50 Ω. Los MMIC y componentes adicionales se sueldan directamente a estas secciones de la línea de alimentación.

4.12 Optoelectrónica

Podría parecer que la óptica y la radio mantienen escasa vinculación, sin embargo, existen numerosos componentes que integran funcionalidades ópticas y electrónicas. Estos elementos se identifican como optoelectrónica y aprovechan las características ópticas de los semiconductores para ejecutar funciones prácticas. Las propiedades ópticas más empleadas comprenden la fotoconductividad, donde la luz interactúa con un semiconductor para alterar su conductividad, y el efecto fotovoltaico, mediante el cual la luz genera el desplazamiento de corriente.

4.12.1 Fotoconductividad

Para comprender la fotoconductividad, resulta fundamental iniciar con el efecto fotoeléctrico. En términos elementales, hace referencia a la liberación de electrones de los átomos de un material cuando la luz impacta sobre él. Aunque una explicación exhaustiva de la interacción lumínica con el material semiconductor excede el alcance de este documento, se describirán algunos principios fundamentales de la fotoelectricidad.

Analicemos la estructura atómica básica, tal como se representa en la Figura 94. El núcleo contiene protones (partículas con carga positiva) y neutrones (carentes de carga eléctrica). La cantidad de protones en el núcleo determina el elemento atómico. El carbono posee seis protones, el oxígeno ocho y el cobre veintinueve, por ejemplo. El núcleo atómico está circundado por un número equivalente de electrones con carga negativa respecto a los protones, de modo que un átomo mantiene una carga eléctrica neta neutra.

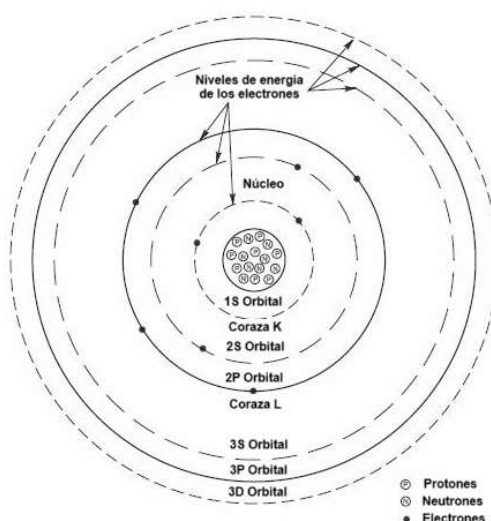


Figura 94. Estructura básica de un átomo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los electrones que orbitan alrededor del núcleo atómico se distribuyen en estratos energéticos precisos, tal como se ilustra en la Figura 94. Los niveles de energía ascendentes se representan mediante esferas progresivamente amplificadas que circundan el núcleo central (aunque esta representación visual no resulta completamente exacta, facilitará la comprensión de la estructura atómica). Para que un electrón transite hacia un estrato energético diferente, es imperativo que adquiera o pierda una determinada cantidad de energía. Un mecanismo mediante el cual un electrón puede obtener la energía requerida consiste en absorber radiación electromagnética bajo la modalidad de un fotón lumínico. En este proceso, el electrón incorpora la energía del fotón y se desplaza instantáneamente a un nuevo nivel energético. Un electrón que ha captado energía y transitado a un nivel superior se denomina en estado de excitación.

Cuando el fotón lumínico posee suficiente potencial energético, el electrón puede desprenderse completamente de la estructura atómica. En un conductor metálico, este electrón liberado puede circular como corriente eléctrica. Consecuentemente, la corriente puede propagarse a través de un circuito conectado al material expuesto a la radiación fotónica. Este fenómeno constituye la base fundamental del efecto fotoeléctrico.

EL EFECTO FOTOCONDUCTIVO

Considerando este modelo elemental del átomo, resulta sencillo comprender que el flujo eléctrico a través de un conductor o material específico depende de la capacidad de atracción o liberación de electrones por parte de los átomos. La velocidad de desplazamiento electrónico en un punto determinado del conductor establece la intensidad de corriente. Cada material presenta una determinada resistencia al tránsito electrónico, denominada resistividad.

Al incorporar la longitud y el área transversal de un objeto o segmento conductor, se determina la resistencia del elemento mediante la siguiente expresión:

$$R = \rho l/A$$

donde:

- P = representa la resistividad material.
- l = longitud del objeto.
- A = área transversal del elemento.
- R = resistencia.

La conductividad constituye el valor recíproco de la resistividad, mientras que la conductancia representa el inverso de la resistencia:

$$\sigma = 1/\rho$$

donde:

- σ = simboliza la conductividad.

$$G = 1/R$$

donde:

- G = conductancia.

Se comprende que, según el principio fotoeléctrico, los electrones pueden desprenderse de los átomos cuando la radiación luminosa impacta la superficie material. Este principio sugiere que los electrones liberados facilitan la circulación de corriente a través del medio. Incluso cuando los electrones no se separan completamente, aquellos ubicados en zonas energéticas superiores pueden transferirse con mayor fluidez entre átomos.

Lo anterior conduce a una conclusión fundamental: la generación de corriente se optimiza cuando algunos electrones atómicos se encuentran en estado de excitación. La conductividad material se incrementa mientras la resistividad disminuye. La conductancia total de un segmento conductor puede aumentar y su resistencia reducirse cuando la luz incide sobre su superficie, manifestando la esencia del fenómeno fotoconductor.

Los materiales que experimentan este efecto se denominan fotoconductores. El efecto fotoconductor resulta más significativo en materiales semiconductores cristalinos que en conductores metálicos convencionales. En un segmento de alambre de cobre, la conductancia habitualmente es elevada, por lo que cualquier incremento marginal provocado por la radiación luminosa resulta prácticamente imperceptible.

La conductividad de cristales semiconductores como germanio, silicio, sulfuro de cadmio, seleniuro de cadmio, arseniuro de galio, sulfuro de plomo y otros, presenta valores reducidos en ausencia de iluminación, experimentando aumentos sustanciales cuando la luz impacta sus superficies. Cada material exhibe su máximo cambio conductivo en rangos específicos de frecuencias luminosas. Por ejemplo, el sulfuro de plomo responde óptimamente a frecuencias en el espectro infrarrojo, mientras que el sulfuro de cadmio y seleniuro de cadmio se utilizan frecuentemente en detectores de luz visible, como los integrados en dispositivos fotográficos.

4.12.2 Componentes optoelectrónicos

La mayoría de los elementos semiconductores se encuentran encapsulados en envolturas de plástico o metal con el propósito de impedir la penetración lumínica hacia la unión semiconductor.

La radiación luminosa no incide sobre la conductividad ni, consecuentemente, sobre las propiedades operacionales de un transistor o diodo. No obstante, si el contenedor presenta una abertura transparente que permite el ingreso de luz hasta la unión, las características del componente dependerán directamente de la intensidad luminosa que lo impacte. Tales dispositivos especializados poseen aplicaciones significativas en radioafición.

Un fototransistor constituye un elemento específicamente concebido para permitir que la radiación luminosa alcance la unión del transistor. La luz, por consiguiente, funciona como mecanismo de control del componente. Incluso, algunos fototransistores carecen de terminal de base. Otros sí incorporan dicho terminal, lo cual posibilita gestionar la señal de salida en ausencia de iluminación. Adicionalmente, el terminal de base puede emplearse para polarizar el transistor y lograr su respuesta ante diferentes intensidades lumínicas. Generalmente, la amplificación del transistor mantiene una relación directamente proporcional con la cantidad de luz incidente. Un fototransistor puede implementarse como fotodetector, un dispositivo destinado a identificar la presencia de radiación luminosa.

4.12.2.1 Optoacopladores u optoaisladores

Un optoacoplador u optoaislador representa la integración de un LED y un fototransistor dentro de un único encapsulado de circuito integrado. Cuando se suministra corriente al LED, este emite radiación luminosa, cuya energía activa el fototransistor. Dado que utilizan luz en lugar de una conexión eléctrica directa, los optoaisladores proporcionan uno de los métodos más seguros para transferir señales entre circuitos con tensiones significativamente variables.

Los optoacopladores presentan una impedancia extremadamente elevada entre la fuente luminosa (entrada) y el fototransistor (salida). No existe flujo de corriente entre los terminales de entrada y salida.

Los LED de la mayoría de los optoacopladores son emisores infrarrojos, aunque algunos operan en el espectro visible electromagnético. Por esta razón, se emplean frecuentemente cuando se requiere conmutar circuitos de 120 V CA bajo el control de señales digitales de baja potencia.

La Figura 95 (A) ilustra el diagrama esquemático de un optoacoplador típico. En este ejemplo, el terminal de base del fototransistor se extrae del encapsulado. La correlación entre la corriente de salida y la corriente de entrada se denomina relación de transferencia de corriente (CTR). Como se muestra en (B), puede utilizarse un fototransistor Darlington para optimizar la CTR del dispositivo.

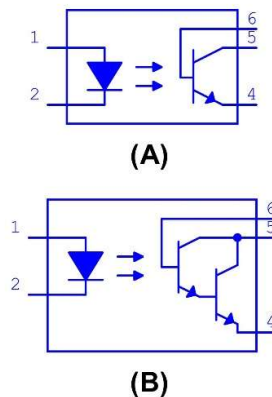


Figura 95. Diagrama esquemático de un optoacoplador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En un optoacoplador de circuito integrado, la radiación luminosa se transfiere desde el diodo emisor de luz al fototransistor detector a través de un conducto óptico de material polimérico o un diminuto espacio intermedio entre ambas secciones.

Al integrar un optoacoplador con transistores de alta potencia, las prestaciones de un relé electromecánico pueden reproducirse mediante componentes semiconductores. El relé de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés) resultante puede funcionar significativamente más veloz que un relé electromecánico y puede controlarse directamente mediante circuitos digitales.

Un diodo emisor de luz o emisor infrarrojo independiente y su correspondiente detector fototransistor pueden hallarse separados por una corta distancia para emplear un trayecto reflectante u otro espacio externo. En tal situación, al modificar la longitud del recorrido o interrumpir la radiación, se altera la señal de salida del transistor. Esto puede aprovecharse, por ejemplo, para identificar un objeto que transita entre el detector y la fuente luminosa.

4.12.2.2 El codificador de eje óptico

Un dispositivo optoelectrónico ampliamente implementado en equipamiento radioeléctrico es un codificador de eje óptico. Comprende un conjunto de emisores y detectores. Un disco plástico con un modelo de bandas radiales alternadas, transparentes y opacas, se desplaza rotacionalmente a través de un intersticio entre los emisores y detectores como se muestra en la

Figura 96. Mediante un conjunto de emisores y dos detectores, un microprocesador puede determinar la orientación y velocidad de rotación de la rueda. Los transceptores contemporáneos utilizan un sistema semejante para gestionar la frecuencia de un oscilador de frecuencia variable (VFO, por sus siglas en inglés) sintetizado. Para el operador, el mando de sintonización puede parecer que ajusta mecánicamente el VFO, aunque no existe ningún capacitor de sintonización ni otro mecanismo conectado al mando ni a la rueda de corte luminoso.

Los codificadores de eje económicos también se emplean frecuentemente para interruptores y selectores.

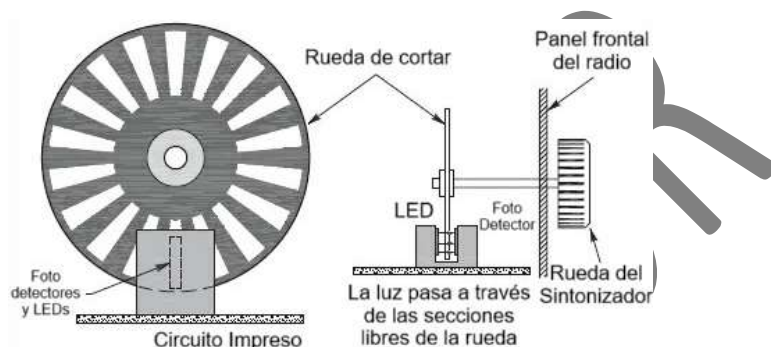


Figura 96. Codificador de eje óptico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.12.3 Celdas fotovoltaicas

El fenómeno fotoeléctrico puede emplearse igualmente para producir energía eléctrica, así como para transformar o regular propiedades eléctricas. En una unión PN, similar a un diodo, los transportadores de carga generan una zona de agotamiento, según se explicó previamente en este capítulo. Para que los transportadores de carga atraviesen la unión, resulta necesario aplicar tensión.

Cuando una unión PN se somete a radiación lumínica, los fotones serán captados por los electrones del material semiconductor. Si los fotones poseen la energía adecuada, los electrones libres del material tipo N pueden activarse lo suficiente para traspasar la región de agotamiento hacia el material tipo P. Esencialmente, esto resulta análogo al movimiento de un hueco en dirección opuesta. Mientras la unión permanezca iluminada, los electrones y huecos pueden circular a través de ella, generando una diferencia de tensión entre ambos extremos de la unión.

Si se establece un circuito entre los dos lados de la unión, la tensión provocada por la absorción de fotones mediante los electrones inducirá el flujo de una corriente. Esta corriente representa la transformación de la energía luminosa de los fotones en energía eléctrica transportada por los electrones en el circuito. Este es el efecto fotovoltaico. Una unión PN diseñada para captar fotones y generar energía eléctrica se denomina fotovoltaica o fotocelda. La sección transversal de una célula fotovoltaica se ilustra en la Figura 97.

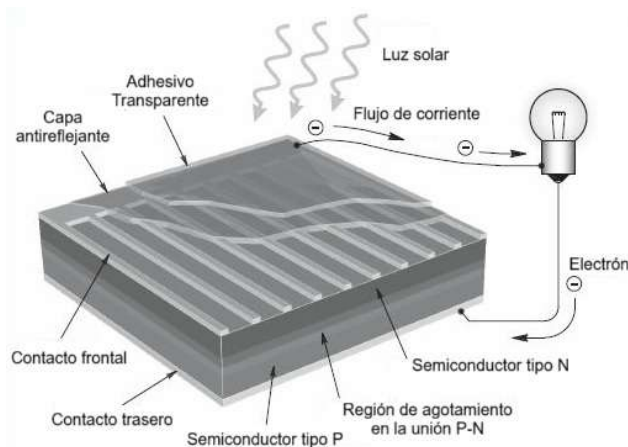


Figura 97. Sección transversal de una fotocelda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El potencial eléctrico que genera una célula fotovoltaica está condicionado por la composición del material constitutivo. A modo de ilustración, una célula de silicio completamente expuesta a la radiación, que representa el material semiconductor más frecuentemente empleado en dispositivos fotovoltaicos, produce una tensión de circuito abierto cercana a 0,5 V. La magnitud de corriente que puede generar dicho elemento está influenciada por el nivel de iluminación y la capacidad de transformación del material, es decir, la proporción de energía luminosa que se transforma en energía eléctrica mediante corriente. Prácticamente cualquier material semiconductor puede transformarse en una célula fotovoltaica, si bien la máxima eficiencia en dispositivos fabricados con un único material se registra actualmente en las células construidas con arseniuro de galio (GaAs).

La generación fotovoltaica constituye una alternativa comercialmente competitiva para la producción de electricidad a gran escala. La célula fotovoltaica o solar representada en la Figura 97 está elaborada con material semiconductor, aunque resulta factible utilizar otros materiales ópticamente reactivos, como combinaciones de metales y semiconductores, moléculas orgánicas y nanoestructuras.

4.13 Lógica Digital

La electrónica digital constituye un componente fundamental en el ámbito de la radioafición. En la actualidad, los sistemas radioaficionados incorporan desde circuitos digitales elementales hasta complejos sistemas basados en microcomputadoras. Prácticamente, incluso los dispositivos más básicos suelen integrar un microprocesador. Las aplicaciones en el dominio radioeléctrico abarcan comunicaciones digitales, transformación de códigos, procesamiento de señales, gestión de estaciones, generación de frecuencias, telemetría satelital, administración de mensajes y diversas operaciones de tratamiento informativo.

4.13.1 Fundamentos de lógica

4.13.1.1 Álgebra de Boole

El principio de la electrónica digital radica en que una señal únicamente puede presentar un número limitado de valores discretos o estados. En los sistemas digitales binarios, las señales pueden manifestarse en dos estados, representados mediante aritmética de base 2 por los numerales 0 y 1. Los estados binarios, conceptualizados como 0 y 1, pueden simbolizar una condición de desactivación y activación, o bien como espacio y marca en una transmisión de comunicaciones como CW o RTTY. La Figura 98 ejemplifica una señal binaria característica.

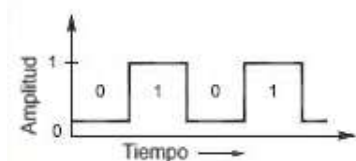


Figura 98. Señal binaria típica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los componentes digitales más elementales son los conmutadores y relés. No obstante, los sistemas electrónicos digitales se construyen empleando circuitos integrados digitales, que generan, identifican o transforman señales digitales. Ya sean interruptores o microprocesadores, todos los sistemas digitales implementan principios matemáticos comunes denominados lógica. Se iniciará con las normas para combinar diferentes señales digitales, conocidas como lógica combinacional. Estas reglas se originan en las matemáticas de los números binarios, denominadas álgebra de Boole, en reconocimiento a su creador, George Boole.

En los circuitos lógicos digitales binarios, cada configuración de entradas produce una o varias salidas específicas. Excepto durante las modificaciones de las señales de entrada y salida (denominadas transiciones de conmutación), el estado de la salida está completamente determinado por el/los estado(s) simultáneo(s) de la(s) señal(es) de entrada. Una función lógica combinacional presenta un único estado de salida correspondiente a cada combinación de estados de entrada. La salida de un circuito lógico combinacional se establece íntegramente por la información contenida en las entradas del circuito.

Los circuitos individuales que ejecutan las funciones matemáticas más básicas se denominan elementos. Los elementos de lógica combinacional pueden realizar operaciones aritméticas o lógicas. Independientemente de su propósito, estas operaciones generalmente se expresan en términos aritméticos. Los circuitos digitales suman, restan, multiplican y dividen, pero típicamente lo realizan en formato binario utilizando dos estados representados por los numerales 0 y 1.

Las funciones de los circuitos digitales binarios se representan mediante ecuaciones que utilizan el álgebra de Boole. Los símbolos y las leyes del álgebra de Boole difieren ligeramente de los del álgebra convencional. El símbolo de cada función lógica se muestra en las descripciones de los elementos lógicos individuales.

La función lógica de un elemento específico puede describirse enumerando todas las combinaciones posibles de valores de entrada y salida en una tabla de verdad. Este listado de todas las combinaciones de entrada y sus correspondientes salidas caracteriza o describe la función de cualquier dispositivo digital.

4.13.1.2 Elementos de una sola entrada

Existen dos componentes lógicos caracterizados por poseer una única entrada y una salida: el búfer no inversor y el circuito inversor o NOT (Figura 99). El búfer no inversor transmite exactamente el mismo estado (0 o 1) desde su entrada hacia su salida. En un circuito inversor o NOT, cuando ingresa un 1 se produce un 0 en la salida, y de manera inversa. NOT representa inversión, negación o complementación. Es relevante observar que la única distinción entre los símbolos del búfer no inversor y del inversor radica en el pequeño círculo o triángulo presente en el cable de salida. Este elemento se emplea para señalar inversión en cualquier símbolo perteneciente a circuitos lógicos digitales. La notación correspondiente al álgebra booleana para NOT consiste en una barra sobre la variable o expresión.

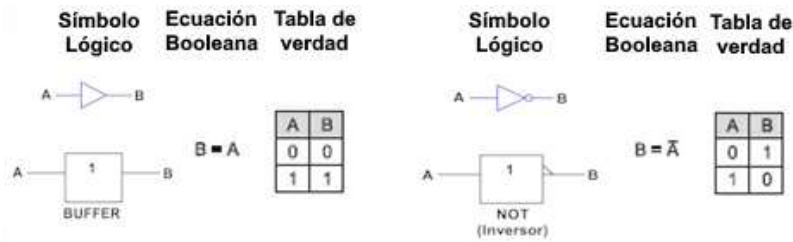


Figura 99. Representación de un búfer. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.1.3 La operación AND

Una compuerta lógica se conceptualiza como un dispositivo electrónico combinacional que posee dos o más terminales de entrada y cuyo estado de salida está determinado por el estado de sus entradas. Los elementos lógicos ejecutan operaciones lógicas elementales y pueden integrarse para conformar funciones de conmutación más complejas. Consecuentemente, al referirse a las operaciones lógicas empleadas en el álgebra booleana, es fundamental comprender que cada función se materializa mediante una compuerta con denominación idéntica. A modo de ilustración, una compuerta AND implementa específicamente la operación AND.

La operación AND produce como resultado el valor 1 únicamente cuando la totalidad de las entradas son 1. Dicho de otro modo, si las entradas se denominan A y B, la señal de salida será 1 exclusivamente si A y B son simultáneamente 1. En la notación booleana, el operador lógico AND típicamente se representa mediante un punto entre las variables ($\cdot$). La función AND también puede expresarse sin espaciado entre variables. Ambas representaciones se ilustran en la Figura 100, acompañadas del símbolo esquemático correspondiente a una compuerta AND.

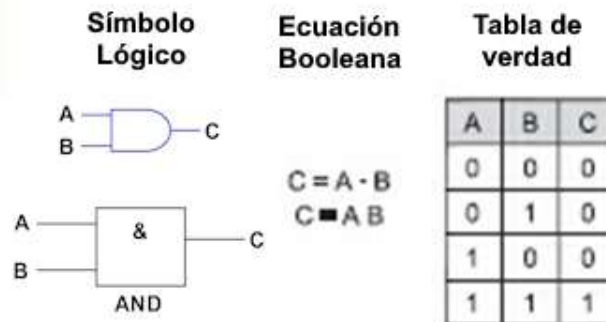


Figura 100. Compuerta AND. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.1.4 La operación OR

La función OR produce un resultado de 1 cuando al menos una o todas las señales de entrada son 1. En la representación booleana, el símbolo de suma (+) se emplea para representar la operación OR. El circuito lógico OR que se presenta en la Figura 101 es frecuentemente referido como OR INCLUSIVO. Analice detenidamente la tabla de verdad correspondiente a la función OR en la Figura 101. Es importante destacar que la compuerta lógica OR únicamente generará una salida de 0 cuando la totalidad de sus entradas sean 0.

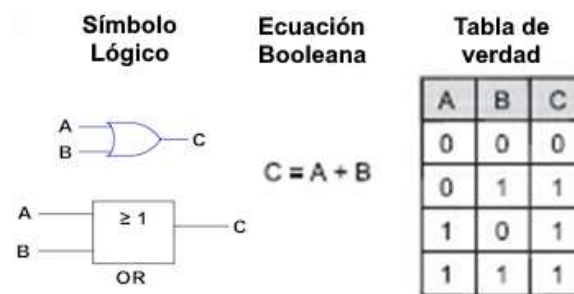


Figura 101. Compuerta OR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.1.5 La operación NAND

La operación NAND significa NO AND. Una compuerta NAND constituye una compuerta AND con su señal de salida invertida. Una compuerta NAND genera un 0 en su resultado únicamente cuando la totalidad de sus entradas son 1. En la notación booleana, NAND generalmente se representa mediante un punto entre las variables y una línea superior sobre la combinación, tal como se ilustra en la Figura 102.

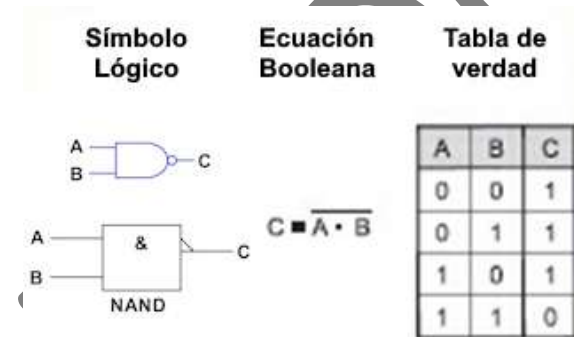


Figura 102. Compuerta NAND. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.1.6 La operación NOR

La operación NOR representa la función lógica NO OR. La representación gráfica de la tabla de verdad, ilustrada en la Figura 103, evidencia que una compuerta NOR genera una señal de salida con valor 1 únicamente cuando la totalidad de sus entradas son 0. En la notación booleana, las variables se encuentran conectadas mediante el símbolo de suma (+) y se aplica una línea horizontal sobre la expresión completa para señalar la función NOR.

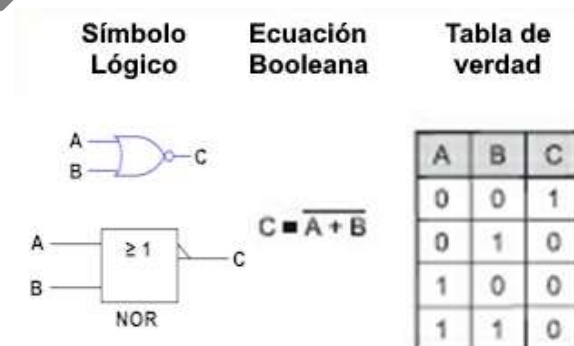


Figura 103. Compuerta NOR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.1.7 La operación NOR EXCLUSIVA

La operación OR EXCLUSIVA (XOR) produce un resultado unitario únicamente cuando una de sus entradas es 1. En el supuesto de que ambas entradas sean 1, la salida resultante será 0. La representación booleana expresa formalmente la función OR EXCLUSIVA. Al invertir la función XOR, se obtiene como consecuencia la operación NOR EXCLUSIVA (XNOR). La Figura 104 ilustra el símbolo esquemático correspondiente a una puerta NOR EXCLUSIVA junto con su respectiva tabla de verdad.

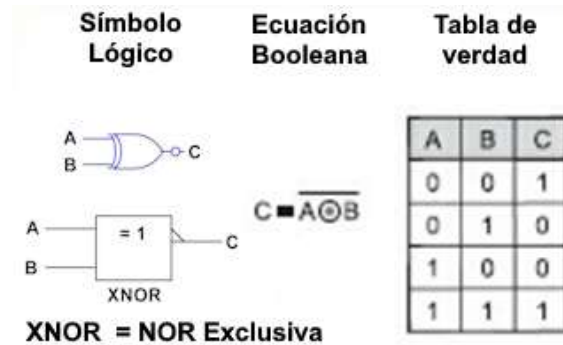


Figura 104. Compuerta XOR. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.1.8 Lógica verdadera positiva y negativa

Los esquemas lógicos pueden estructurarse para emplear dos modalidades de polaridad lógica. La lógica positiva o positiva-verdadera emplea el nivel de tensión más elevado (ALTO) para simbolizar el 1 binario y el nivel más reducido (BAJO) para representar el 0. Cuando se implementa la representación inversa (ALTO = 0 y BAJO = 1), se denomina lógica negativa o negativa-verdadera. En las explicaciones de los componentes que se desarrollarán seguidamente, se implementará lógica positiva.

Los signos representativos de la lógica positiva y negativa se contrastan en la Figura 105. Los círculos diminutos (indicadores de estado) ubicados en el sector de entrada de una compuerta señalan lógica negativa. La aplicación de lógica negativa ocasionalmente simplifica el álgebra booleana asociada a los circuitos lógicos.

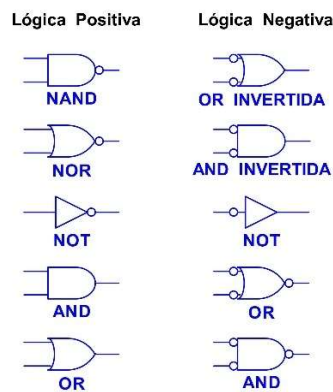


Figura 105. Comparación de la lógica positiva y negativa. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Analice un sistema de circuito que presenta dos terminales de entrada y una terminal de salida, estableciendo como condición que el resultado sea ALTO únicamente cuando ambas entradas sean BAJAS. Una exploración en las matrices de verdad revela que el componente de puerta NOR posee las características apropiadas para este requerimiento. No obstante, la manera de

plantear el problema (específicamente los términos “únicamente” y “ambas”) orienta hacia la función AND (o NAND). Una puerta NAND bajo una lógica negativa resulta funcionalmente equivalente a una puerta NOR con lógica positiva. El símbolo NAND expresa de manera más precisa la funcionalidad del circuito en el escenario previamente descrito. La Figura 106 ilustra la implementación de una función elemental mediante una puerta NOR o NAND, dependiendo de la convención lógica seleccionada. Es fundamental verificar que las matrices de verdad demuestran que los circuitos ejecutan funciones idénticas. Se recomienda corroborar esto mediante un análisis comparativo de las listas de condiciones de entrada y salida.

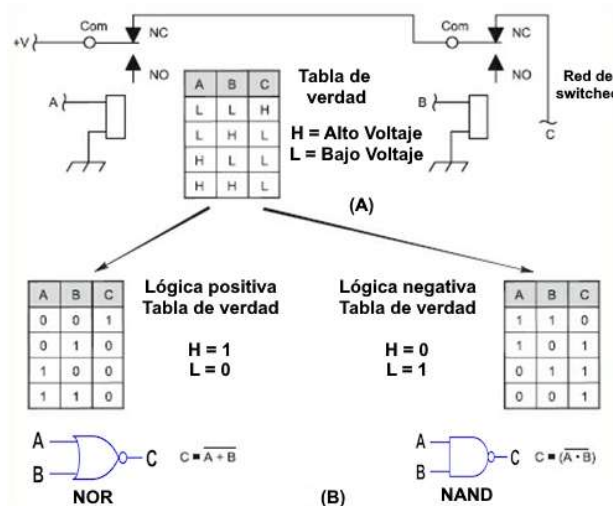


Figura 106. Función simple según la lógica elegida. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.1.9 Lógica triestado

En los circuitos digitales, resulta habitual interconectar diversos circuitos integrados de manera paralela sobre un bus de datos o direccionamiento para compartir información y datos. En dicha configuración, únicamente una salida del CI puede gestionar las señales del bus simultáneamente, mientras que todas las restantes salidas deben permanecer en estado de espera, modificando sus señales para comportarse como una alta impedancia sin intentar llevar la conexión del bus hacia un estado ALTO o BAJO. Los CI con esta capacidad se denominan lógica triestado, donde una salida puede presentarse como ALTA, BAJA o con alta impedancia.

4.13.2 Lógica secuencial y sincrónica

El estado de salida de un circuito lógico secuencial se encuentra determinado tanto por sus entradas presentes como por los estados de salida precedentes. La dependencia de los estados de salida previos implica que el circuito debe poseer algún tipo de memoria.

4.13.2.1 Flip-Flops

Un biestable o flip-flop (igualmente conocido como multivibrador biestable) constituye un elemento lógico secuencial binario con dos estados estables: el estado de activación (estado 1) y el estado de reinicio (estado 0). El término biestable significa que el circuito presenta dos estados estables y puede permanecer en cualquiera de ellos de manera indefinida. Por consiguiente, un biestable puede almacenar un bit de información. Un biestable utilizado para almacenar información en ocasiones se denomina “latch”. El símbolo esquemático de un biestable es un rectángulo con las letras FF, como se ilustra en la Figura 107 (estas letras pueden omitirse si la función resulta evidente).

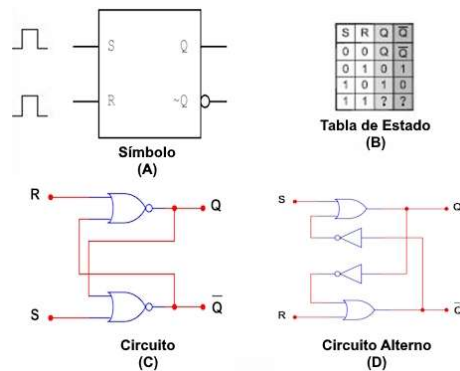


Figura 107. Flip Flop. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Habitualmente, los terminales de entrada y salida de un biestable se representan mediante una o dos letras identificativas. A modo de ejemplo, el biestable mostrado en la Figura 107 corresponde a la tipología R-S. La matriz de estados de la Figura 107 evidencia que cuando S y R se encuentran en nivel cero, los estados de las señales de salida Q y $\bar{Q}$ permanecen inalterados. Adicionalmente, la matriz de estados revela que no resulta factible garantizar el estado de las señales de salida (Q y $\bar{Q}$) en el supuesto de que ambas entradas alcancen simultáneamente un nivel alto. Típicamente, existen dos señales de salida complementarias, denominadas Q y $\bar{Q}$ (que se pronuncian como "Q NOT"). En el escenario donde Q equivale a 1, $\bar{Q}$ será necesariamente 0, y viceversa. Para una descripción pormenorizada del comportamiento de la señal de salida del biestable, se recomienda consultar la Tabla 17.

Tabla 17. Resumen del comportamiento de la señal de salida del biestable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Salida	Acción	Restricciones
Q (Set)	Salida normal	Solo hay dos estados de salida posibles: $Q = 1$ y $\bar{Q} = 0$
$\bar{Q}$ (Reset)	Salida invertida	Los estados de salida son opuestos a Q: $Q = 0$ y $\bar{Q} = 1$

Notas

- 1) $\bar{Q}$ es el complemento de Q.
- 2) La salida normal se marca normalmente como Q o sin marcar.
- 3) La salida invertida se marca normalmente como $\bar{Q}$. Si hay un estado 1 en Q, habrá un estado 0 en $\bar{Q}$.
- 4) Alternativamente, la salida invertida puede tener una indicación de polaridad (un pequeño triángulo en el exterior del rectángulo del flip-flop en la línea de salida invertida). Para líneas con indicadores de polaridad, tenga en cuenta que un estado 1 en lógica negativa es igual a un estado 0 en lógica positiva. Esta es la convención seguida por la Comisión Electrotécnica Internacional.

4.13.2.2 Flip-Flops sincrónicos y asincrónicos

Los vocablos síncrono y asíncrono se emplean para definir las características de un biestable o las entradas particulares de un circuito integrado. En los biestables síncronos (también denominados biestables sincronizados, regulados por reloj o compuerta), la señal de salida únicamente sigue a la entrada en los momentos específicamente determinados por la señal de reloj. Los biestables asíncronos ocasionalmente se identifican como biestables no sincronizados o controlados por datos, debido a que la salida puede modificarse cuando las entradas experimentan cambios.

Las entradas asíncronas son aquellas que potencialmente pueden incidir en el estado de la salida con independencia del reloj. Las entradas síncronas impactan el estado de la salida bajo la supervisión de la entrada de reloj.

4.13.2.3 Entradas dinámicas vs estáticas

Las entradas dinámicas (activadas por flanco) solamente afectan las salidas cuando la señal de reloj modifica su estado. Esta tipología de entrada se representa en los símbolos lógicos mediante un diminuto triángulo (denominado indicador dinámico) en el punto donde se conecta la línea de entrada. Salvo que exista un indicador de inversión o negación (un pequeño círculo o triángulo externo al símbolo), la transición de 0 a 1 será la transición identificada. Este fenómeno se conoce como activación por flanco positivo. El indicador de negación implica que la entrada se activa por flanco negativo y responde a transiciones de 1 a 0.

Las entradas estáticas (activadas por nivel) se reconocen por la carencia del indicador dinámico en el símbolo lógico. Los estados de entrada (1 o 0) de las entradas estáticas son los que provocan la acción del biestable.

El diagrama de tiempos exhibe la salida de un biestable modificando su estado con cada pulso de reloj positivo. Consecuentemente, si la salida es inicialmente 0, cambiará a 1 en el flanco inicial del primer pulso de reloj positivo y retornará a 0 en el flanco inicial del pulso de reloj positivo subsiguiente. Todas las variantes de biestables pueden configurarse o interconectarse para operar de esta manera. De este modo, el biestable proporciona un pulso de salida completo por cada dos pulsos de entrada, dividiendo la frecuencia de la señal de entrada entre dos. Dos de estos biestables podrían conectarse secuencialmente para dividir la señal de entrada entre cuatro, y así sucesivamente.

4.13.2.4 Multivibrador monoestable

Un multivibrador monoestable (o monoestable) presenta una configuración con un estado de equilibrio y otro de inestabilidad (o cuasiestabilidad). El circuito puede permanecer en condición inestable durante un lapso determinado por los elementos componentes del sistema RC vinculados al dispositivo monoestable.

Al ser activado, experimenta una transición hacia el estado inestable y, tras un intervalo predeterminado, retorna a su condición original estable hasta que se active nuevamente. Una vez transcurrido el período constante, el monoestable regresa a su estado de equilibrio hasta que se produzca una nueva activación. Consecuentemente, el monoestable genera un pulso único al ser activado.

En la Figura 108, se ilustra el conocido circuito integrado temporizador 555 configurado como un multivibrador monoestable. El proceso se origina mediante un pulso de activación negativo aplicado entre el terminal de activación y el punto de referencia de tierra.

El pulso de activación provoca que la salida (Q) se torne positiva hasta que el capacitor C se carga a dos tercios de VCC a través de la resistencia R. Al concluir el período de temporización, el capacitor se descarga rápidamente hacia tierra. La salida permanece en lógica 1 durante un lapso determinado por:

$$T = 1.1 RC$$

donde:

- R = es la resistencia en ohms.
- C = es la capacitancia en Faradios.
- T = es el tiempo en segundos.

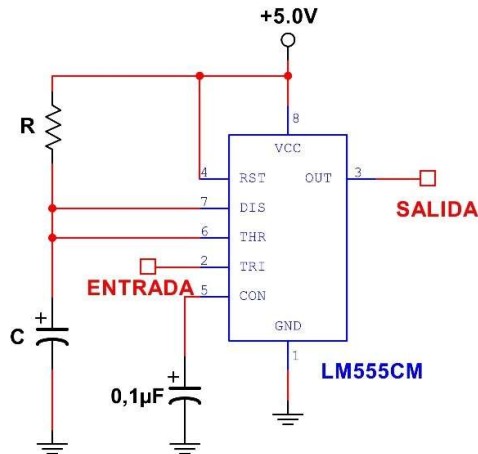


Figura 108. CC temporizador 555 configuración monoestable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.2.5 Multivibrador astable

Un multivibrador astable o multivibrador de funcionamiento libre es un circuito que conmuta continuamente entre dos estados inestables.

En la Figura 109 se muestra un circuito multivibrador astable que utiliza el circuito integrado temporizador 555. El capacitor C1 se carga repetidamente hasta dos tercios de VCC a través de R1 y R2, y se descarga hasta un tercio de VCC a través de R2. La relación (R1:R2) establece el ciclo de trabajo. La frecuencia se determina mediante:

$$f = \frac{1.46}{C_1 [R_1 + 2 * R_2]}$$

donde:

- R = es la resistencia en ohms.
- C = es la capacitancia en faradios.

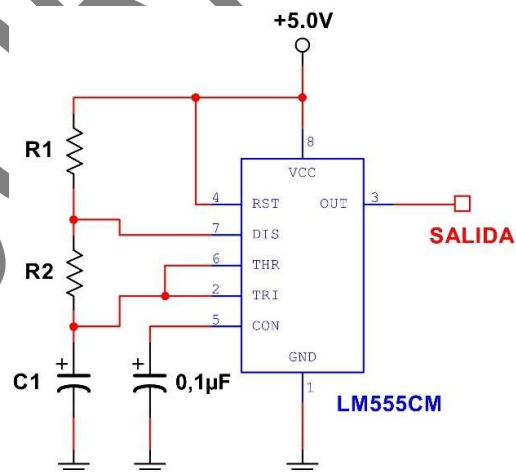


Figura 109. CC temporizador 555 configuración estable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.13.2.6 Divisores y contadores

Un dispositivo de conteo, divisor o contador de división constituye un sistema electrónico conformado por múltiples elementos de memoria que genera un pulso de salida tras recibir un número determinado (n) de impulsos de entrada. En un contador estructurado por elementos de

memoria interconectados secuencialmente, cuando la fase inicial modifica su estado, impacta directamente en la siguiente etapa, generando una reacción en cadena.

Cada impulso de entrada provoca la transición del circuito hacia el siguiente estado. Las señales generadas por todos los elementos de memoria pueden configurar una salida compuesta que representa numéricamente en formato binario el conteo total de impulsos.

Un contador de propagación, de transferencia secuencial o asíncrono transmite el registro de conteo entre sus diferentes etapas; cada fase se sincroniza mediante la etapa precedente, provocando que la modificación del estado del circuito se propague sistemáticamente. En un contador sincronizado, cada fase opera bajo el control de una señal de reloj común, permitiendo que las salidas de todas las etapas experimenten cambios simultáneos.

La mayoría de los dispositivos de conteo permiten restablecer el registro a cero. Algunos sistemas adicionales pueden preconfigurar un conteo específico. Ciertos contadores están diseñados para incrementar progresivamente, mientras otros pueden decrementar. Los circuitos integrados de conteo bidireccional pueden operar en ambos sentidos, dependiendo del estado de una entrada de control.

Internamente, un circuito integrado de contador decimal presenta 10 estados de salida. Algunos dispositivos disponen de un terminal de salida independiente para cada uno de estos 10 estados, mientras otros únicamente cuentan con una salida conectada al último bit del contador. La etapa final del elemento de memoria genera un pulso de salida por cada 10 impulsos de entrada.

4.13.3 Familias lógicas

Aunque puede existir un símbolo único para una compuerta NAND o un contador decimal, existen múltiples variantes de circuitos y componentes digitales capaces de ejecutar las funciones requeridas. Los fabricantes de dispositivos lógicos digitales se esfuerzan por mantener coherencia en su línea de productos, desarrollando una serie completa de circuitos integrados con características similares, optimizados para aplicaciones específicas como eficiencia energética o velocidad de conmutación. Todos los elementos lógicos están disponibles dentro de esa tecnología, garantizando la compatibilidad de señales entre circuitos integrados similares.

Estos conjuntos de circuitos integrados semejantes se denominan familias. En el interior de una familia lógica, todos los dispositivos presentarán restricciones de señal de entrada y salida análogas y modificarán su estado aproximadamente a la misma velocidad.

4.13.3.1 Características TTL

La tecnología de lógica transistor-transistor (TTL, por sus siglas en inglés) constituye una de las familias más antiguas de circuitería bipolar, denominada así por estar sus compuertas completamente conformadas por transistores bipolares. La mayoría de los circuitos integrados TTL se reconocen mediante series numéricas 7400/5400. A modo de ilustración, el 7490 representa un circuito integrado destinado al conteo decimal. Las generaciones más recientes de esta tecnología proporcionan un rendimiento sustancialmente superior, aunque la estructuración de las funciones lógicas y la codificación de componentes permanecen prácticamente invariables respecto a las originales TTL.

Todos los elementos lógicos previamente descritos en esta sección poseen implementaciones mediante circuitos integrados TTL. Entre los ejemplos se encuentran la compuerta NAND cuádruple 7400, la compuerta OR cuádruple 7432 y la compuerta AND cuádruple 7408. Adicionalmente, otros ejemplos de la serie 7400 incluyen el inversor hexagonal 7404 y el biestable doble 7476. El término “cuádruple”, “hexagonal” o cualquier otro similar, hace referencia a la cantidad de circuitos de compuerta contenidos en un solo circuito integrado. El 7404 alberga seis inversores independientes, cada uno con una entrada y una salida, dentro de un encapsulado de 14 pines. La Figura 110 presenta un diagrama esquemático del 7404. El 7476 incorpora dos biestables J-K en un único circuito integrado.

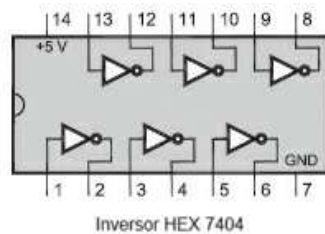


Figura 110. Diagrama del 7404. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los circuitos integrados TTL precisan una fuente de alimentación de +5 V. La tensión de suministro eléctrico puede oscilar entre 4,7 y 5,3 V, siendo 5 V la tensión más idónea. Igualmente, existen restricciones en la tensión de la señal de entrada.

Para asegurar un procesamiento lógico adecuado, una entrada ALTA (1) debe situarse entre 2 V y 5 V, mientras que una entrada BAJA (0) no debe superar 0,8 V. Con el propósito de prevenir daños irreversibles en un circuito integrado TTL, las entradas ALTAS no deberán exceder 5,5 V, y las BAJAS no podrán ser inferiores a -0,6 V. Las salidas TTL ALTAS se ubicarán entre 2,4 V y 5,0 V, dependiendo del componente electrónico y la corriente de carga. Las salidas BAJAS comprenderán el intervalo de 0 V a 0,4 V. Los intervalos de niveles de entrada y salida se representan en la Figura 111. Es fundamental considerar que los niveles de salida garantizados se encuentran dentro de los límites de entrada. Esta característica garantiza un funcionamiento confiable cuando se interconectan circuitos integrados TTL.

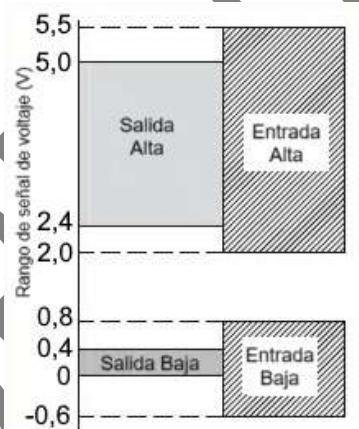


Figura 111. Rangos de entrada y salida para los TTL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Las entradas TTL que permanecen sin conexión o en estado indeterminado provocarán que el circuito interno adopte un estado ALTO o 1, aunque su comportamiento podría resultar inestable. Cuando una entrada requiere mantenerse en nivel ALTO, se recomienda conectarla a la fuente de alimentación positiva mediante una resistencia de elevación (típicamente entre 1 y 10 kΩ). Si es preciso mantener una entrada en BAJO, es posible vincularla directamente al retorno o al punto común de la fuente de alimentación, o bien implementar una resistencia de caída. En cualquier escenario, dichas resistencias aseguran que la entrada permanezca en un nivel lógico perfectamente identificable.

Las resistencias de caída también encuentran aplicación en salidas de colector abierto que dependen de una resistencia externa para energizar el transistor de salida.

Existen múltiples variantes de la familia TTL con características diferenciales, identificadas mediante letras posteriores al "74" en la denominación del componente. Verbigracia, un dispositivo lógico cuya numeración inicie con "74LS" pertenece a la familia TTL Schottky de reducido consumo, mientras que un número de pieza comenzando por "74HC" corresponde a la versión CMOS de alta velocidad de la lógica TTL. Dentro de una familia, prácticamente siempre

acontece que los componentes con idéntica función lógica presentan conexiones de pines equivalentes. A modo de ejemplo, todos los inversores de las familias 7404, 74LS04, 74H04, 74S04, 74HC04, etc., dispondrán de las mismas conexiones de pines, según se ilustra en la Figura 110.

4.13.3.2 Características CMOS

Los dispositivos CMOS están constituidos por transistores de efecto de campo (FET, por sus siglas en inglés) de canal N y canal P integrados en el mismo sustrato. Puesto que ambos FET pueden combinarse en un único sustrato, los circuitos pueden ubicarse en un espacio más reducido. Esta característica contribuye a disminuir el costo de estos circuitos integrados. La lógica CMOS se ha transformado en la modalidad de lógica digital más empleada globalmente, debido a su elevada velocidad de conmutación, el reducido tamaño de las puertas individuales y otros componentes, además de un consumo energético significativamente inferior al TTL. A modo de ilustración, cuando una puerta CMOS no experimenta conmutación, su consumo energético es prácticamente insignificante.

Una de las familias CMOS más difundidas son los componentes con números de pieza de la serie 4000. Verbigracia, un CI 4001 representa una puerta NOR cuádruple de dos entradas. El 4001 contiene cuatro puertas NOR independientes, cada una con dos entradas y una salida. Otros ejemplos incluyen la puerta NAND cuádruple 4011, la puerta AND cuádruple 4081 y el inversor hexadecimal 4069.

Como se enunció previamente, los números de pieza de la serie 74HC00 resultan compatibles en términos de pines con la familia TTL 7400, proporcionando una velocidad de conmutación equivalente con un consumo energético sustancialmente menor. Si se identifica un dispositivo cuyo número de pieza comienza por 74C o 74HC, debe considerarse que una C en el número de pieza probablemente indica un dispositivo CMOS.

Los circuitos integrados CMOS de la serie 4000 (números de modelo comprendidos entre 4000 y 4999) operan en un rango de alimentación considerablemente más amplio que los circuitos integrados TTL. La tensión de la fuente de alimentación puede oscilar entre 3 V y 18 V. Las tensiones de salida CMOS dependen directamente de la tensión de la fuente de alimentación. Una salida ALTA generalmente se ubica a 0,1 V de la conexión positiva de la fuente de alimentación, mientras que una salida BAJA se sitúa a 0,1 V de la conexión negativa de la fuente de alimentación (tierra en la mayoría de las aplicaciones). Por ejemplo, si se operan puertas CMOS con una batería de 9 V, una salida lógica 1 se encontrará entre 8,9 y 9 V, y una salida lógica 0 estará comprendida entre 0 y 0,1 V.

El umbral de conmutación para las entradas CMOS se aproxima a la mitad de la tensión de alimentación. La Figura 112 ilustra estas características de tensión de entrada y salida. El amplio rango de tensiones de entrada confiere a la familia CMOS una notable inmunidad al ruido, dado que los picos de ruido generalmente no provocan una transición en el estado de entrada. Incluso las familias CMOS compatibles con TTL presentan una inmunidad al ruido ligeramente superior gracias a sus rangos de señal ALTA y BAJA más extensos.

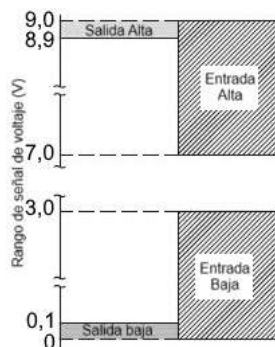


Figura 112. Rango de las señales de entrada y salida para la serie 4000 CMOS. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Todos los circuitos integrados CMOS demandan un tratamiento especializado debido a la delicada capa de aislamiento existente entre la compuerta y el sustrato de los transistores MOS. Incluso descargas electrostáticas mínimas pueden perforar dicho aislamiento, provocando la destrucción de la compuerta. Los dispositivos CMOS requieren ser almacenados con sus terminales apoyados sobre una espuma conductora especializada. Es fundamental instalarlos en un zócalo o, en su defecto, emplear un soldador con punta conectada a tierra para su soldadura en la tarjeta de circuito. Se recomienda utilizar una muñequera con conexión a tierra durante la manipulación de estos componentes para garantizar que el operador esté eléctricamente neutralizado. Cualquier descarga electrostática hacia o a través del circuito integrado previo a su instalación puede provocar su inutilización total.

4.13.3.3 Lógica BiCMOS

Considerando que tanto la tecnología bipolar como la CMOS presentan ventajas específicas de rendimiento, su integración en un único circuito integrado genera dispositivos capaces de operar con la velocidad y baja impedancia de salida característica de transistores bipolares, junto con la alta impedancia de entrada y reducido consumo energético propios de los CMOS. Esta aproximación tecnológica se denomina BiCMOS. Dicha configuración permite que los circuitos integrados combinen funcionalidades analógicas, como amplificadores y osciladores, con funciones digitales de control y conmutación.

4.13.3.4 Lógica Programable

En lugar de construir funciones lógicas complejas mediante circuitos integrados individuales, resulta significativamente más eficiente utilizar dispositivos lógicos programables (PLD, por sus siglas en inglés). Los PLD son circuitos integrados individuales que incorporan miles de puertas lógicas, lógica secuencial, interruptores, registros y funcionalidades complejas adicionales, incluyendo microprocesadores. Algunos PLD se componen fundamentalmente de puertas lógicas y se conocen como matrices de puertas programables (PGA, por sus siglas en inglés). El circuito deseado se diseña mediante software especializado, y un dispositivo programador transfiere el diseño al PLD, donde queda almacenado. Posteriormente, el PLD ejecuta las funciones programadas. Tanto en PLD como en PGA, es posible crear funcionalidades extremadamente complejas en un único circuito integrado que opera a velocidades muy elevadas. De hecho, numerosas radios definidas por software (SDR, por sus siglas en inglés) implementan todas sus funciones de filtrado, modulación y demodulación mediante PLD.

4.14 Amplificadores

Cuando los entusiastas discuten sobre amplificadores, generalmente se refieren al dispositivo que incrementa la producción de un transceptor hasta varios cientos de watts o más. No obstante, existen circuitos amplificadores mucho más numerosos y diminutos que elevan la potencia de señales pequeñas en receptores e instrumentos de diagnóstico. Sin embargo, todos comparten características fundamentales.

En un sistema donde múltiples circuitos amplificadores operan simultáneamente, cada circuito amplificador recibe la denominación de etapa, similar a la configuración de un cohete. Una etapa cuya señal de salida constituye la entrada de otro amplificador, particularmente en un transmisor, se identifica como controlador. El último amplificador en un equipo de transmisión se denomina amplificador final, o simplemente el final. El circuito al cual un amplificador transfiere su potencia de salida se conoce como carga. Una carga puede ser cualquier elemento, desde otro circuito hasta una carga simulada o una antena. Conectar una carga a la salida de un amplificador se denomina cargar.

GANANCIA DEL AMPLIFICADOR

La ganancia de un amplificador representa la relación entre la señal de salida y la señal de entrada. La ganancia de tensión de un amplificador es la proporción entre sus tensiones de salida

y entrada. La ganancia de corriente corresponde a la relación entre la corriente de salida y la de entrada, mientras que la ganancia de potencia es la proporción entre los niveles de potencia de salida y de entrada.

Frecuentemente, la ganancia de una etapa se expresa como una “ganancia de tensión de 16” o una “ganancia de potencia de 25”, ambas relaciones simples. Sin embargo, para relaciones extremadamente elevadas, como una ganancia de amplificador de FI de 90 dB (1 000 000 000), resulta más sencillo expresar y manipular mediante decibelios.

IMPEDANCIA DE ENTRADA Y DE SALIDA

La impedancia de entrada de un amplificador representa la impedancia equivalente que presenta a la etapa precedente. No existe un componente único que genere la impedancia de entrada. Es un efecto combinado de los componentes que estructuran el circuito y su diseño. La impedancia de entrada se cuantifica como la relación entre el voltaje de entrada y la corriente de entrada en los terminales de entrada del amplificador. La impedancia de entrada casi siempre fluctúa con la frecuencia y puede variar según las características operativas del circuito.

La impedancia de salida resulta más compleja de definir. Representa la impedancia equivalente de una fuente de señal que simboliza la salida del amplificador. Una impedancia de salida reducida implica que la fuente puede mantener una tensión constante en amplios rangos de corriente. Las fuentes con elevada impedancia de salida mantienen una corriente constante mientras la tensión puede variar.

Los amplificadores diseñados para proporcionar una potencia de salida significativa generalmente presentan impedancias de salida bajas, como 50 Ω .

4.14.1 Amplificadores de dispositivos discretos

El estudio de esta sección se delimitará exclusivamente a circuitos amplificadores que incorporan transistores bipolares. Las metodologías generales resultan igualmente aplicables a transistores de efecto de campo (FET) y tubos de vacío, y ciertos aspectos relacionados con los circuitos de válvulas serán abordados posteriormente.

4.14.1.1 Circuitos Básicos

Los dispositivos amplificadores implementados con transistores BJT se estructuran en tres categorías: emisor común, base común y colector común. El término “común” indica que el electrodo de referencia del transistor (base, emisor o colector) funciona como terminal de referencia para las conexiones de entrada y salida. Habitualmente, el terminal común coincide con la tierra del circuito, según se ilustra en los subsiguientes esquemas.

Un amplificador de transistor bipolar constituye esencialmente un amplificador de corriente. La corriente en el circuito base-emisor regula corrientes de mayor magnitud en el circuito colector-emisor. Para emplear el transistor como amplificador de tensión, la corriente de salida del amplificador circula a través de una carga resistiva, y la tensión resultante, o su variación, representa la señal de tensión de salida del amplificador.

Las uniones base-emisor de los transistores bipolares deben estar polarizadas directamente, mientras que las uniones base-colector deben estarlo inversamente para operar como amplificadores de corriente (se asumirá polarización directa al utilizar el término polarización, salvo indicación expresa). En circuitos con transistor NPN, el colector y la base deben presentar potencial positivo respecto al emisor. En contraste, al emplear un transistor PNP, la base y el colector han de mantener un potencial negativo en relación con el emisor. La polarización requerida se suministra mediante una fuente de alimentación que proporciona las tensiones colector-emisor y emisor-base. Estos voltajes de polarización provocan el flujo de dos corrientes: colector-emisor y base-emisor. La dirección del flujo de corriente dependerá del tipo de transistor utilizado.

Cualquier transistor, sea PNP o NPN, puede implementarse con una fuente de alimentación con conexión a tierra negativa o positiva. No obstante, debe garantizarse una polarización adecuada. La combinación de polarización y corriente colector-emisor se denomina punto de operación del circuito. El punto de operación sin señal de entrada recibe el nombre de punto de reposo o punto Q del circuito.

4.14.1.2 Circuitos de emisor común y colector común

Los amplificadores de emisor común representan la tipología de amplificador más utilizada, por lo que servirán como ejemplo del funcionamiento de un circuito amplificador, según se muestra en la Figura 113. El circuito de emisor común se identifica por el valor de la resistencia en el circuito del emisor (R3), que resulta significativamente menor (o incluso inexistente) comparado con la resistencia del circuito del colector (R4), o por la resistencia del emisor puenteada mediante un capacitor (C3).

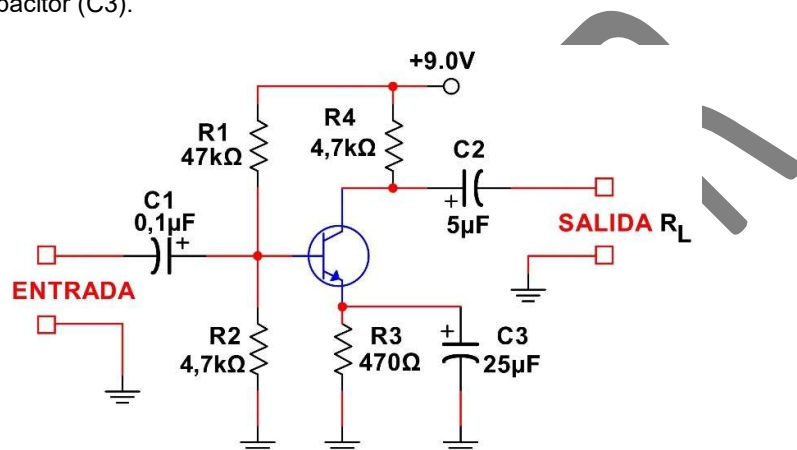


Figura 113. Amplificador de emisor común. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En los transistores bipolares, la corriente de emisor mantiene una relación de concordancia con la corriente de base. Conforme se incrementa la tensión de entrada, se produce un aumento correlativo de la corriente base-emisor, generando un incremento en la corriente colector-emisor. A medida que circula una mayor corriente de colector, se produce un aumento de la caída de tensión en R4, lo que provoca una reducción de la tensión en la salida del circuito. Consecuentemente, las señales de entrada y salida presentan un desfase, tal como se ilustra en la Figura 113.

R1 y R2 conforman un divisor de tensión destinado a generar una tensión de polarización. Esta tensión de CD establecida en la base del transistor propicia un punto de operación estable para el dispositivo. La determinación del punto de funcionamiento representa un equilibrio entre la ganancia del circuito amplificador y la disipación de potencia del transistor.

Con el incremento de la polarización, la corriente de colector experimenta un aumento, al igual que la temperatura de las uniones internas del transistor. Conforme se eleva la temperatura de la unión, se produce un incremento en la ganancia de un BJT, provocando un aumento adicional de la corriente colector-emisor. Incluso si la polarización base-emisor se mantiene constante mediante R1 y R2, con corrientes de emisor suficientemente elevadas o si el transistor alcanza temperaturas críticas, las condiciones de realimentación mutua entre temperatura y ganancia pueden desencadenar una fuga térmica, donde las uniones del transistor se sobrecalientan hasta su destrucción. Se requiere algún mecanismo de retroalimentación negativa o estabilización de polarización para prevenir este fenómeno.

Una solución viable consiste en incorporar una resistencia al circuito del emisor (R3) para generar una retroalimentación degenerativa del emisor o autopolarización. Su funcionamiento se desarrolla de la siguiente manera: al incrementarse la corriente del emisor, se produce simultáneamente un aumento de la tensión continua en R3. Este incremento de tensión reduce

la polarización directa base-emisor establecida por R1 y R2, lo que consecuentemente disminuye la corriente del emisor. El equilibrio resultante estabiliza el punto de operación del transistor y previene la fuga térmica.

Para una carga específica, la ganancia de tensión del circuito de emisor común está determinada por la relación entre R4 y R3. Los valores de R4 y R3 también establecen la corriente de colector para una tensión de polarización determinada.

Una variante del circuito de emisor común mantiene R4 y R3, pero conecta C2 a tierra, configurándose como un amplificador de colector común. La señal de salida se obtiene del emisor. La tensión del emisor mantiene una concordancia de fase con la tensión de entrada de base, o “sigue” la tensión de entrada de base, por lo que este circuito recibe la denominación de seguidor de emisor. Dado que R3 generalmente presenta un valor reducido, la impedancia de salida del seguidor de emisor resulta igualmente baja, convirtiéndolo en una opción óptima para alimentar cargas de baja impedancia, como cables coaxiales.

4.14.1.3 Similitudes con los circuitos de tubos de vacío

Cada electrodo del FET (sea el emisor o fuente; base o puerta; colector o drenador) posee un electrodo equivalente en un tubo de vacío. El cátodo del tubo resulta análogo al emisor y la fuente. La rejilla del tubo corresponde directamente a la base y la puerta, mientras que el ánodo o placa se equipara con el colector y el drenador. Consecuentemente, los tres circuitos amplificadores de transistores examinados en este contexto tienen su respectivo circuito amplificador de tubo de vacío. La Figura 114 ilustra las tres configuraciones de amplificadores de tubo. De manera similar a los amplificadores de transistores, los circuitos de tubo presentan características distintivas propias:

- **Cátodo común:** Señal de entrada aplicada a la red, impedancia de entrada y ganancia de potencia relativamente altas, que a menudo requiere neutralización en VHF; la salida está en fase con la señal de entrada.
- **Red conectada a tierra:** Señal de entrada aplicada al cátodo, sin ganancia de corriente; la baja impedancia de entrada se adapta bien a la línea de alimentación de 50 Ω ; la red conectada a tierra reduce la necesidad de neutralización.
- **Ánodo común (seguidor de cátodo):** Señal de entrada aplicada a la red, alta impedancia de entrada, sin ganancia de tensión; la salida está en fase con la señal de entrada.

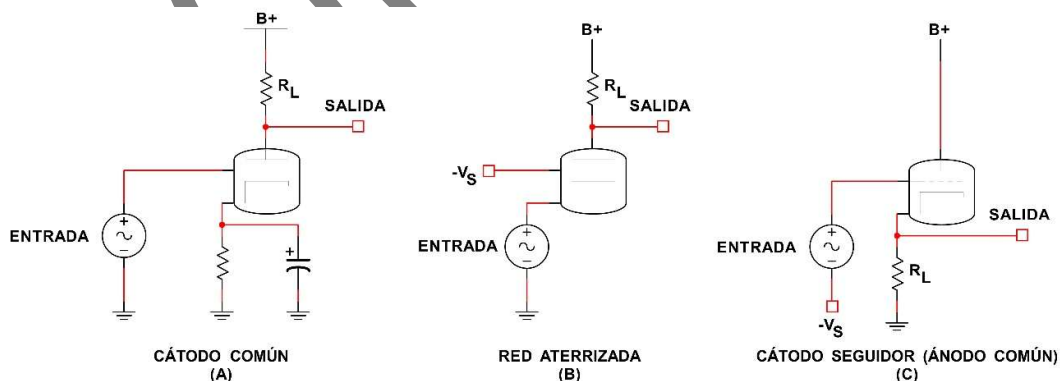


Figura 114. Tres configuraciones de amplificadores de tubo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.14.2 Amplificadores Operacionales (OP AMP)

El amplificador operacional (OP AMP, por sus siglas en inglés) constituye un dispositivo amplificador diferencial caracterizado por una elevada ganancia y acoplamiento directo, capaz de potenciar señales tanto de CD como de CA. El acoplamiento directo implica que los elementos y etapas internas del circuito se encuentran conectados de manera inmediata, sin la mediación

de capacitores de bloqueo, acoplamiento o derivación, lo que permite su funcionamiento uniforme con señales de CD y CA. La entrada de este amplificador diferencial se determina por la diferencia existente entre dos señales de ingreso.

Originalmente, estos dispositivos se implementaron en computadoras analógicas para ejecutar operaciones matemáticas complejas, tales como la multiplicación numérica y la extracción de raíces cuadradas; de esta particularidad deriva su denominación como amplificador operacional.

Los amplificadores operacionales presentan dos terminales de entrada, uno denominado inversor y otro no inversor, según se ilustra en la Figura 115. Las señales conectadas a las entradas inversora (identificadas con el signo -) y no inversora (identificadas con el signo +) generan señales de salida con desfases y en fase, respectivamente.

Dado su carácter de amplificador diferencial, este dispositivo amplifica la discrepancia entre las señales en sus dos entradas, independientemente del nivel de tensión absoluto en cualquiera de ellas: únicamente resulta relevante la diferencia entre ambas.

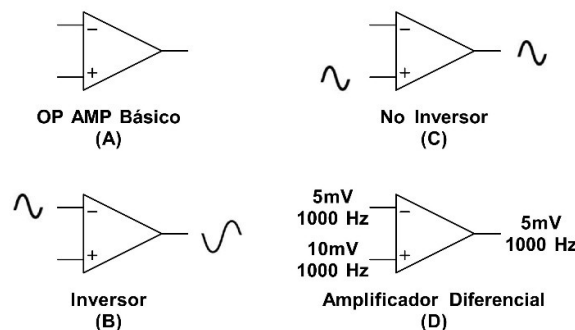


Figura 115. Amplificador operacional. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.14.2.1 Características OP AMP

Un amplificador operacional teóricamente perfecto (ideal) presentaría las siguientes propiedades: una resistencia de entrada infinitamente elevada, una resistencia de salida completamente nula, una amplificación de tensión ilimitada que permanece constante independientemente de la frecuencia y una señal de salida inexistente cuando la señal de entrada es cero. Consecuentemente, las propiedades de los circuitos de amplificadores operacionales están determinadas por componentes externos al propio dispositivo. Estos criterios pueden implementarse en un amplificador operacional práctico, según se detalla en los siguientes apartados.

La amplificación de tensión de un amplificador operacional práctico sin realimentación (ganancia de lazo abierto) típicamente alcanza los 120 dB (1 000 000). No obstante, los amplificadores operacionales rara vez se emplean como amplificadores en configuración de lazo abierto. Generalmente, una porción de la señal de salida se retroalimenta hacia la entrada inversora, donde actúa para reducir y estabilizar la ganancia del circuito. Cuanto más intensa sea la retroalimentación negativa aplicada, más estable resultará el circuito amplificador.

La ganancia de lazo abierto de un amplificador operacional práctico disminuye de manera lineal al incrementarse la frecuencia. El ancho de banda de ganancia de un amplificador operacional representa el intervalo de frecuencia en el cual la ganancia de tensión en lazo abierto es equivalente o superior a 1 (0 dB).

La ganancia del circuito con retroalimentación negativa se denomina ganancia en lazo cerrado. Cuanto más elevada sea la ganancia en lazo abierto, mayor será la retroalimentación negativa que pueda utilizarse, manteniendo simultáneamente una ganancia útil en lazo cerrado. Al conectar el amplificador operacional a un circuito de lazo cerrado, como se ilustra en la Figura 116, la ganancia del circuito permanece constante en un amplio espectro de frecuencias.

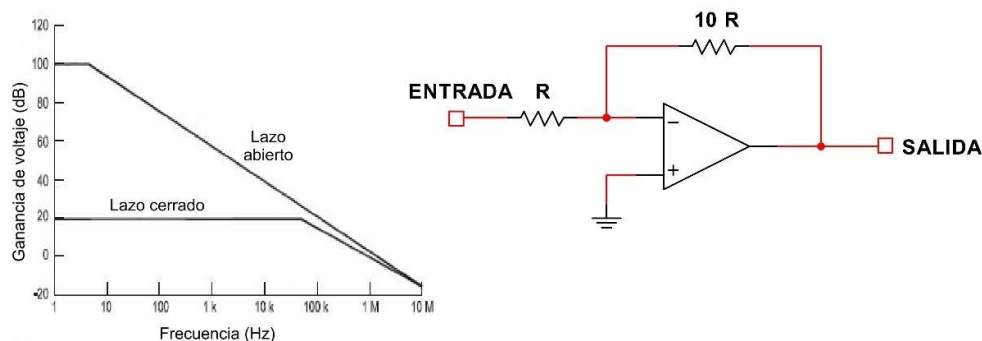


Figura 116. Ganancia constante circuito cerrado el AMP. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Si los terminales de entrada de un amplificador operacional se conectan directamente, la tensión de salida debería ser nula. No obstante, la mayoría de los amplificadores operacionales exhiben una diminuta tensión de salida. Esta desviación de tensión se origina por desequilibrios internos entre los transistores de entrada del amplificador operacional. La tensión de desviación de entrada del amplificador operacional determina la diferencia de potencial entre sus entradas que generará una tensión de salida cero, considerando que el amplificador se encuentra en un circuito de bucle abierto. Las tensiones de desviación oscilan desde milivoltios en dispositivos de consumo masivo hasta nanovoltios o microvoltios en amplificadores operacionales de alta precisión.

4.14.2.2 Circuitos amplificadores básicos

Los amplificadores operacionales constituyen amplificadores excepcionales con mínima distorsión. Posibilitan la creación de osciladores capaces de generar ondas sinusoidales, cuadradas e incluso de diente de sierra. Empleados con retroalimentación negativa, su elevada impedancia de entrada y características lineales los convierten en instrumentos ideales para amplificación de señales destinadas a mediciones precisas.

La elevada ganancia del amplificador operacional amplía la diferencia de potencial entre sus entradas. Al implementar retroalimentación negativa, el amplificador operacional intenta reducir a cero la diferencia de tensión de entrada. La alta impedancia de entrada del amplificador operacional permite ignorar la corriente que ingresa o egresa de sus terminales. La utilidad de estos dos conceptos de retroalimentación negativa (diferencia de tensión de entrada reducida a cero y corriente de entrada nula) se tornará evidente al derivar la ganancia del circuito simple de amplificador operacional inversor de la Figura 117 (el circuito es inversor porque las señales de entrada y salida presentan desfase).

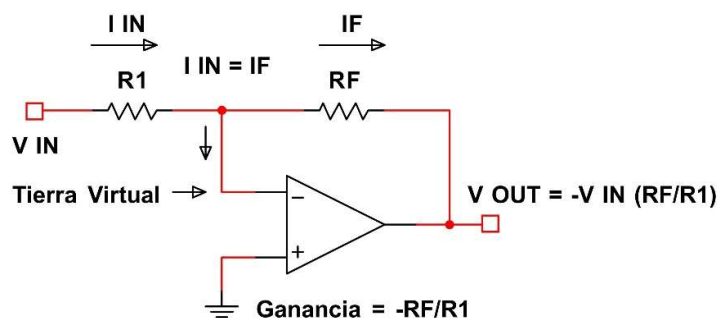


Figura 117. Amplificador operacional inversor. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La extraordinaria amplificación del amplificador operacional provoca que las tensiones en los terminales inversor y no inversor sean prácticamente idénticas. Puesto que la entrada no

inversora se encuentra conectada a tierra, la tensión en la entrada inversora será forzada a potencial de tierra, con independencia de los valores de las tensiones de entrada y salida del circuito (siempre que estos se encuentren dentro del rango de la fuente de alimentación). Mantener una entrada a potencial de tierra sin una conexión directa a tierra se denomina tierra virtual.

La ganancia de tensión del circuito del amplificador operacional inversor de la Figura 117 está determinada exclusivamente por R_1 (la resistencia de entrada) y R_F (la resistencia de retroalimentación). Para conservar la entrada inversora a potencial de tierra, cualquier corriente de entrada $I_{IN} = V_{IN} / R_1$ debe equilibrarse con una corriente de retroalimentación igual y opuesta $I_F = -V_{OUT} / R_F$, o bien:

$$\frac{V_{IN}}{R_1} = \frac{-V_{OUT}}{R_F}$$

Entonces:

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-R_F}{R_1}$$

La amplificación del circuito del amplificador operacional se determina habitualmente como una dimensión ($|A_V|$) y puede presentarse en modalidad inversora o no inversora. Esta dependencia exclusiva de los elementos externos simplifica el cálculo de la ganancia del circuito.

4.14.3 Comparadores

Un comparador de tensión constituye una tipología específica de circuito de amplificador operacional, representado en la Figura 118. Incorpora dos señales analógicas como entradas, cuya salida se establece en nivel alto o bajo, determinándose según si la tensión de la señal no inversora o inversora resulta superior, respectivamente. Consecuentemente, “contrasta” las tensiones de entrada.

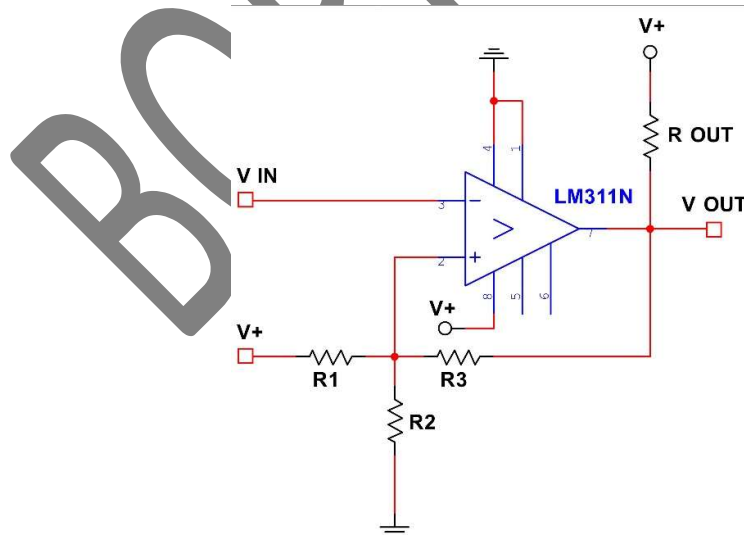


Figura 118. Comparador de tensión. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un amplificador operacional convencional puede funcionar como un dispositivo comparador al conectar las dos señales de entrada en los terminales no inversor e inversor, sin implementar resistencias de entrada o de realimentación. Cuando la tensión del terminal no inversor supera la tensión del terminal inversor, la tensión de salida se eleva hasta alcanzar el límite positivo.

En el escenario contrario, donde el terminal inversor presenta un potencial superior al no inversor, la tensión de salida se incrementa hasta el límite negativo.

Las resistencias externas generan una tensión de referencia (VSP, por sus siglas en inglés), denominada punto de ajuste o umbral, contra la cual se contrasta la señal de entrada. Consecuentemente, el comparador modifica su estado de salida dependiendo de si la tensión se sitúa por encima o por debajo del umbral establecido. Los circuitos comparadores incorporan histéresis para prevenir la “vibración”, es decir, la salida del comparador oscila rápidamente cuando el ruido provoca que la tensión de entrada supere repetidamente el umbral del punto de ajuste. La salida inestable podría generar confusión en los circuitos que interactúan con la salida del comparador.

La histéresis representa una modalidad de retroalimentación positiva que “desplaza” el punto de consigna algunos milivoltios en dirección opuesta al cruce de la señal de entrada por el umbral. La salida del comparador se retroalimenta al terminal positivo a través de la resistencia R3, lo que adiciona o sustrae una pequeña cantidad de corriente del divisor, provocando un desplazamiento del punto de consigna.

4.14.4 Clases de operación

La Figura 119 ilustra gráficamente la relación entre la señal de salida y entrada de un amplificador típico. Conforme se incrementa la señal de entrada, la salida aumenta debido a la ganancia del amplificador. Cuando la corriente de colector o drenador de un transistor amplificador se torna extremadamente reducida (corte) o excesivamente elevada (saturación), las variaciones en la señal de entrada generan cambios cada vez menos significativos en la corriente, lo que produce distorsión en la señal de salida.



Figura 119. Salida vs entrada amplificador típico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El punto de funcionamiento del amplificador se regula a través de la magnitud de la polarización. Al alterar este punto, el dispositivo amplificador puede ajustarse para funcionar próximo a la saturación, al corte o en una posición intermedia. La influencia del punto de operación sobre la linealidad del amplificador se identifica como clase de operación.

Las tres clases de operación fundamentales para circuitos amplificadores analógicos son Clase A, Clase B y Clase C. La clase de operación con características intermedias entre las clases A y B se denomina Clase AB. Cada clase presenta beneficios y limitaciones específicas. La Figura 120 ilustra la señal de salida de los amplificadores que operan en Clase A, B, AB y C.

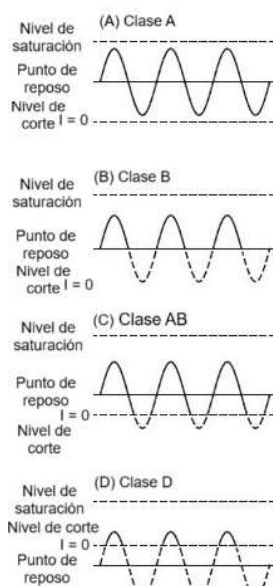


Figura 120. Operación de un amplificador en clase A, B, AB, C. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

▪ CLASE A

En la operación de Clase A, el ajuste de polarización se configura de tal manera que el punto de operación del amplificador se posiciona entre las zonas de saturación y corte. Esta disposición mantiene al amplificador permanentemente en la región lineal de su curva característica. Siempre que la señal de entrada no supere ciertos límites, la señal de salida constituye una reproducción lineal de la entrada con una distorsión prácticamente imperceptible. La eficiencia de un amplificador de Clase A resulta reducida (típicamente entre 25 % y 30 %) debido al consumo constante de corriente desde la fuente de alimentación, incluso cuando no existe señal de entrada.

▪ CLASE B

El funcionamiento en clase B establece la polarización en el umbral de corte. En este escenario, la señal de salida únicamente emerge durante la mitad del ciclo sinusoidal de entrada.

La ventaja radica en una eficiencia energética superior, ya que los amplificadores prácticos suelen alcanzar aproximadamente un 60 %.

Los amplificadores de clase B se implementan en frecuencias audibles mediante la conexión de dos tubos o transistores en un circuito "push-pull", según muestra la Figura 121. Este esquema resulta popular en amplificadores de potencia de RF. Mientras un transistor permanece en estado de corte, el otro conduce, permitiendo que ambas secciones de la forma de onda estén presentes en la salida. Este procedimiento reduce la distorsión en la señal de salida y los armónicos de orden par.

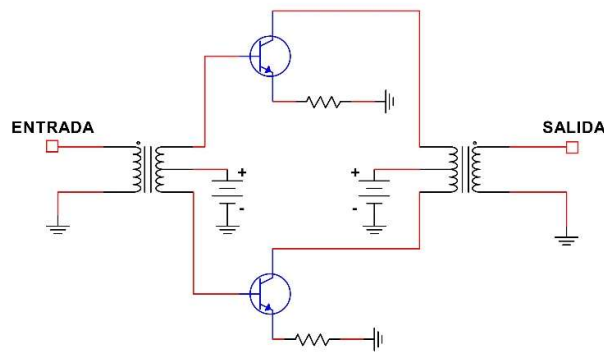


Figura 121. Amplificador clase B en circuito push-pull. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

▪ CLASE AB

En un amplificador de clase AB, el nivel de polarización y excitación se configuran de tal manera que el punto de trabajo permita al amplificador alcanzar la zona de corte durante los picos de la señal. Figura 120 (C) ilustra la señal de salida de un amplificador de clase AB. Su funcionamiento abarca entre 180 y 360 grados del ciclo de señal. Esta modalidad operativa se emplea frecuentemente para señales vocales cuando se tolera una ligera distorsión a cambio de una mayor eficiencia, que generalmente supera el 50%. Los armónicos y otros productos de distorsión se mitigan mediante la implementación de filtros en la etapa de salida del amplificador.

▪ CLASE C

En la amplificación de Clase C, la polarización se ajusta para que el punto de operación se ubique en la región de corte. El amplificador únicamente conduce corriente durante una fracción de un semiciclo de la señal de entrada, generando pulsos a la frecuencia de la señal, según se muestra en la Figura 120 (D). Consecuentemente, la eficiencia operativa puede resultar considerablemente elevada, alcanzando hasta un 80% con un diseño apropiado. La linealidad resulta muy reducida, por lo que los amplificadores de Clase C solo resultan viables para señales de CW y FM que no demanden amplificación lineal. La utilización de un amplificador de Clase C para señales SSB o digitales provocaría una distorsión excesiva y la señal de salida ocuparía un ancho de banda desproporcionado. Se requiere un filtro sintonizado en la salida de un amplificador de Clase C para minimizar los armónicos y otros productos de distorsión.

▪ CLASES DE CONMUTACIÓN O MODO CONMUTADO

La operación conmutada o en modo conmutado trasciende la Clase C, donde el transistor funciona completamente como un interruptor, permaneciendo totalmente saturado o casi completamente apagado. Esto genera una disipación de potencia extremadamente reducida por parte del transistor y eficiencias superiores al 90%, significativamente mayores que las de los amplificadores lineales. Existen múltiples clases de amplificadores conmutados, aunque todos emplean el mecanismo básico fundamental. Por ejemplo, los amplificadores de Clase D se utilizan para amplificar señales de audio, efectuando la conmutación a frecuencias múltiples veces superiores a la frecuencia máxima que se pretende amplificar. La acción de conmutación produce una forma de onda de salida compuesta por una serie de pulsos cuadrados altamente ricos en armónicos. Un filtro paso bajo en la etapa de salida del amplificador elimina los armónicos, preservando las señales en el rango de frecuencias deseado sin atenuación.

4.14.5 Distorsión e intermodulación

La linealidad del amplificador resulta crucial puesto que determina la precisión con la cual se reproducirá la señal de entrada en la salida. Cualquier desviación de la linealidad genera una salida deformada. El amplificador de clase A exhibe la mínima distorsión, mientras que un amplificador de clase C produce una salida altamente distorsionada. La transacción entre no linealidad y rendimiento constituye la no linealidad.

Una derivación de la no linealidad radica en que la morfología de la onda de salida contendrá armónicos de la señal de entrada. La distorsión provoca que una señal de entrada de onda sinusoidal pura se transforme en una composición compleja de ondas sinusoidales en la salida. Para suprimir los armónicos, los amplificadores de RF implementan una salida sintonizada o circuito tanque. El circuito tanque obtiene su denominación del almacenamiento energético en la inductancia y la capacitancia. Similar a un volante mecánico, el circuito tanque atenúa los impulsos que acontecen al desactivar el amplificador durante segmentos de cada ciclo, minimizando los armónicos. Esto resulta particularmente beneficioso si se amplifica una señal de onda sinusoidal pura, como para CW, y se pretende aprovechar la superior eficiencia que proporciona un amplificador de clase C. El circuito sintonizado reducirá los armónicos indeseados generados por un estadio amplificador no lineal.

Si la señal de entrada comprende ondas sinusoidales de múltiples frecuencias, como una señal vocal, la no linealidad del amplificador también generará productos de intermodulación. Los productos de intermodulación se originan mediante la suma y diferencia de todos los armónicos de las señales de entrada y, consecuentemente, se considerarían señales espurias en caso de transmisión.

La severidad de la distorsión por intermodulación depende del orden de los productos generados, par o impar. Los productos de orden par producen señales espurias próximas a los armónicos de la señal de entrada, mientras que los productos de orden impar generan señales espurias cercanas a las frecuencias de la señal de entrada. Cuanto más elevados sean los armónicos combinados, más tenue será el producto.

Esto implica que los productos de intermodulación de orden impar más bajos, específicamente los de tercer orden, poseen mayor probabilidad de provocar interferencias en señales adyacentes a la frecuencia de transmisión deseada.

4.15 Procesamiento de Señales

En esta sección, se abordarán los principios fundamentales inherentes a la tecnología radiofónica: osciladores, moduladores y demoduladores, detectores, mezcladores, bucles de enganche de fase y sintetizadores de frecuencia. Estos componentes se encargan de generar o manipular señales para optimizar la transferencia de información entre puntos mediante comunicación radioeléctrica. La denominación genérica para estas operaciones es procesamiento de señales. Tales funciones pueden implementarse tanto mediante circuitos electrónicos como mediante soluciones informáticas. No obstante, resulta más didáctico comprenderlas inicialmente a través de circuitos, dado que numerosos dispositivos se fundamentan en arquitecturas de circuitos, por lo que el análisis se centrará en esta perspectiva. La exploración se iniciará con la fuente primigenia de casi todas las señales: el oscilador.

4.15.1 Circuitos osciladores y sus características

Para crear un oscilador, necesitamos tres elementos: un amplificador con ganancia a la frecuencia deseada, un circuito que proporcione retroalimentación positiva desde la salida del amplificador a su entrada y un filtro que limite la retroalimentación a la frecuencia deseada. Estos elementos están conectados en un bucle de retroalimentación, como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 122.

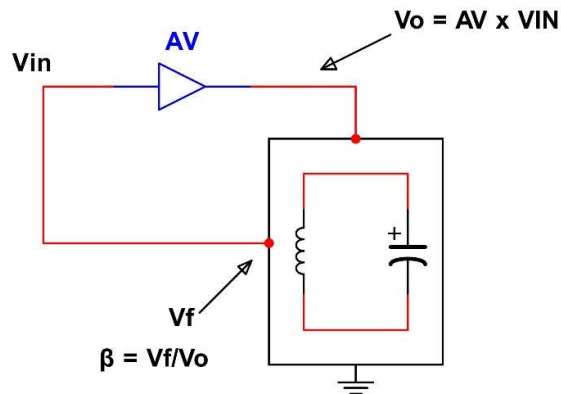


Figura 122. Circuito oscilador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El mecanismo de retroalimentación está configurado para que, en la frecuencia de interés, el producto de la ganancia amplificadora (A_V) y el coeficiente de retroalimentación (β), sea equivalente o superior a 1.

$A_V\beta$, denominada también ganancia de bucle representa la amplificación total que experimenta una señal durante su trayectoria a través del amplificador, el circuito de retroalimentación (el circuito LC en la Figura 122) y su retorno a la entrada (el coeficiente de retroalimentación, β , difiere de la ganancia de corriente, β , de los transistores).

Las señales en la frecuencia apropiada se potencian, una porción se reenvía a la entrada del amplificador, se intensifica nuevamente, y así sucesivamente, tornándose automantenida y generando una señal de salida estable. No obstante, si la diferencia de fase no resulta exactamente precisa, la porción de retorno de la señal de salida se desplaza progresivamente en cada recorrido sin producir una señal sostenida.

El resonador desempeña un doble propósito. Suministra el desfase requerido en la frecuencia deseada y funciona como filtro para las señales en el bucle amplificador, de manera que únicamente se potencian las señales pretendidas (para mayor comprensión, se omiten las conexiones de CD y polarización).

4.15.2 Inestabilidad y oscilación parásita

La combinación de retroalimentación positiva, ganancia y filtrado puede provocar la inestabilidad de cualquier amplificador, sea un circuito reducido o un amplificador de potencia de RF de grandes dimensiones. El amplificador puede oscilar de forma continua, intermitente o generar ruido. Incluso los amplificadores de baja potencia pueden experimentar inestabilidad, resultando en salidas ruidosas, señales espurias e interferencias con otros servicios si las oscilaciones se acoplan a una antena.

La retroalimentación negativa puede estabilizar un amplificador de RF, como se describe en las siguientes secciones sobre neutralización y supresión parásita. Precaución al acoplar la impedancia de la entrada y la salida del amplificador, la disposición correcta del circuito, la conexión de las cajas y el aislamiento adecuado entre la entrada y la salida también pueden prevenir la oscilación.

4.15.2.1 Neutralización

Como se observó en el circuito oscilador básico, la oscilación puede ocurrir cuando una porción de la señal de salida se realimenta en fase con la señal de entrada como retroalimentación positiva. A medida que se incrementa la tensión de salida, también aumenta la señal de retroalimentación.

La señal reamplificada puede entonces acumularse hasta alcanzar un punto autosostenible y el amplificador se transforma en un oscilador.

Para evitar oscilaciones no deseadas, resulta necesario cancelar la retroalimentación positiva. Esto se logra proporcionando una ruta alternativa de retorno a la entrada para una porción de la señal de salida. La señal desfasada cancela entonces la señal en fase y previene la oscilación.

Una técnica de neutralización para amplificadores de potencia de RF de tubo de vacío se ilustra en la Figura 123. En este circuito, el capacitor de neutralización, C1, se ajusta para que posea el mismo valor de reactancia que la capacitancia entre los electrodos placa-rejilla que proporciona la ruta de retroalimentación causante de la oscilación. Al conectar C1 al circuito de entrada sintonizado, el cambio de fase provoca que la señal de retroalimentación tenga la fase opuesta a la señal de retroalimentación de placa a rejilla no deseada, anulándola.

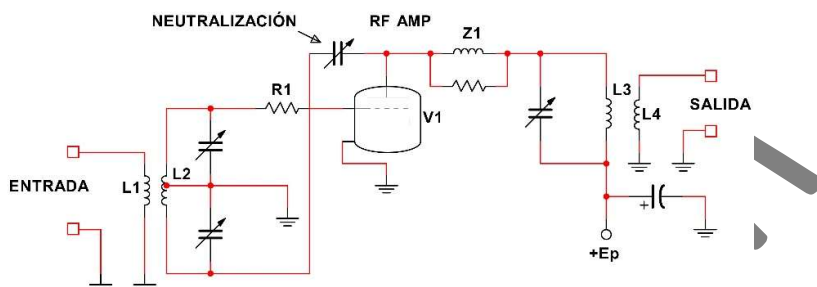


Figura 123. Técnica de neutralización para AMP de potencia de RF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.15.2.2 Oscilaciones Parásitas

Las oscilaciones parásitas pueden manifestarse en un amplificador dentro de frecuencias ajenas a las que se pretenden amplificar. Tales oscilaciones reciben la denominación de parásitas debido a que consumen potencia de los circuitos donde se generan. Su origen se encuentra en las resonancias presentes en los circuitos de entrada o salida, lo que facilita la retroalimentación positiva.

Típicamente, estas oscilaciones emergen por encima de la frecuencia de operación como consecuencia de la capacitancia parásita y la inductancia de los conductores, complementadas por la capacitancia interelectrodo. En determinadas situaciones, resulta viable eliminar las parásitas mediante la alteración de la longitud o disposición de los conductores, lo que modifica su capacitancia e inductancia, y consecuentemente, la frecuencia de resonancia.

Un procedimiento eficaz para suprimir las parásitas en amplificadores de tubo de vacío de alta frecuencia implica incorporar una combinación paralela de un inductor diminuto y una resistencia en serie con el conductor de la rejilla o placa. Este supresor parásito se identifica como Z1 en la Figura 123.

La reactancia del devanado presenta una magnitud suficientemente elevada en VHF/UHF para permitir que tales señales transiten a través de la resistencia, mientras que las señales de HF circulan con facilidad por la bobina. El valor de la resistencia se selecciona para sobrecargar la ruta de retroalimentación de VHF/UHF de manera que se inhiba la oscilación. Los parámetros del inductor y la resistencia generalmente se determinan mediante experimentación, dado que diferentes configuraciones requieren valores de supresores específicos.

4.15.3 Osciladores RF

Durante la década de 1920, los ingenieros de radio Hartley y Colpitts concibieron los dos circuitos representados en la Figura 124 (A) y (B), que alcanzaron gran popularidad en el diseño radiofónico. En ambos casos, la retroalimentación se establece al dirigir una porción del circuito del emisor a través de un divisor de tensión compuesto por dos reactancias. La conexión al

divisor de tensión se denomina toma, y se considera que el circuito o componente está provisto de tomas. Si el divisor reactivo consiste en un par de capacitores, se trata de un oscilador Colpitts. Si el divisor reactivo comprende un par de inductores o, con mayor frecuencia, un único inductor con tomas, el circuito corresponde a un oscilador Hartley. Estos mismos circuitos continúan utilizándose ampliamente en la actualidad, tras casi un siglo de existencia.

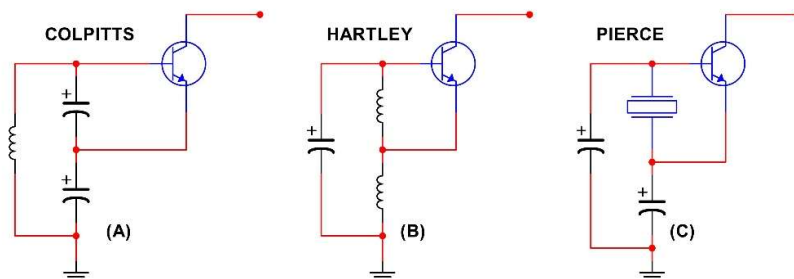


Figura 124. Circuitos de Hartley, Colpitts y Pierce. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los circuitos osciladores Hartley y Colpitts presentan una funcionalidad prácticamente equivalente, aunque sus particularidades distintivas resultan determinantes para la selección del diseñador. Concretamente, el modelo Hartley exhibe un espectro de sintonización más extenso y requiere menor cantidad de componentes. No obstante, el Colpitts logra evadir el inductor con derivación y contempla múltiples configuraciones con notable estabilidad; en contraste, un oscilador Hartley muestra menor estabilidad que su homólogo Colpitts. Ambas configuraciones corresponden a osciladores LC, lo que implica que su frecuencia operativa se encuentra regulada mediante inductores (L) y capacitores (C).

Al incorporar un cristal de cuarzo en la trayectoria de retroalimentación para gestionar la frecuencia de retroalimentación, se origina un oscilador de cristal Pierce, según se ilustra en la Figura 124 (C). El oscilador Pierce se posiciona como el más estable entre los tres circuitos osciladores principales: Colpitts, Hartley y Pierce.

Sin embargo, incluso los cristales no proporcionan suficiente estabilidad para su aplicación directa en frecuencias de microondas, escenario que demanda tecnologías más sofisticadas. La referencia de frecuencia más accesible resulta ser las señales provenientes de satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés). Cada satélite integra una referencia de frecuencia de precisión elevada, y numerosos receptores GPS suministran una salida de referencia de frecuencia sincronizada con la señal GPS. Un oscilador GPS disciplinado permanece sincronizado con la señal GPS. Otras fuentes de frecuencias de alta precisión incluyen osciladores de rubidio y resonadores dieléctricos de alta calidad (factor de calidad Q, en cuanto a eficiencia de resonancia) estabilizados térmicamente, típicos en equipamiento de laboratorio.

OSCILADORES DE FRECUENCIA VARIABLE

Aunque el oscilador de cristal de cuarzo ofrece una extraordinaria estabilidad de frecuencia, los radioaficionados requieren sintonizar sus radios en un intervalo de frecuencias específico. Esta necesidad demanda un oscilador de frecuencia variable (VFO, por sus siglas en inglés). Los VFO se construyen mediante la integración de un componente variable en el circuito resonante del oscilador. La limitación radica en que la frecuencia resultante no alcanza la estabilidad de un oscilador controlado por cristal. Tanto los osciladores Hartley como los Colpitts pueden implementarse como VFO. La metodología convencional para osciladores LC ajustables consiste en emplear un oscilador Colpitts, donde se ubica un capacitor de sintonización modificable en paralelo con el inductor.

4.15.4 Cristales para osciladores

El cuarzo constituye un material piezoeléctrico natural con la capacidad de convertir energía mecánica (como compresión o deformación) en potencial eléctrico (tensión) y recíprocamente. Esta característica se denomina efecto piezoeléctrico.

Los cristales de cuarzo pueden ser seccionados en láminas con frecuencias de oscilación resonantes que abarcan desde varios miles de hercios hasta decenas de megahercios, en función de sus dimensiones. El valor del resonador cristalino radica en su elevado factor Q, que fluctúa entre un mínimo aproximado de 20 000 y un máximo de 1 000 000. Este factor Q implica que la frecuencia de vibración resulta altamente estable y precisa. Esto transforma al cuarzo en un material extraordinario para aplicaciones en radiofrecuencias gracias a su sobresaliente estabilidad térmica y resistencia mecánica. Las propiedades mecánicas de un resonador cristalino de cuarzo, o simplemente cristal, presentan una notable similitud con las propiedades eléctricas de un circuito sintonizado. Consecuentemente, se puede establecer un circuito equivalente para el cristal. La vinculación eléctrica con el cristal se efectúa mediante placas de soporte o electrodos que lo mantienen unidos. Se genera un diminuto capacitor con dos placas, utilizando la placa cristalina como dieléctrico intermedio. El cristal en sí mismo equivale a un circuito resonante en serie y, juntamente con la capacitancia del soporte, configura el circuito equivalente representado en la Figura 125.

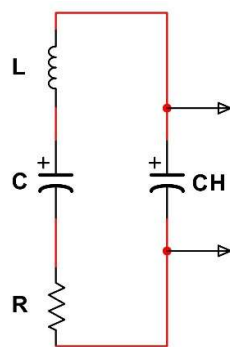


Figura 125. Circuito equivalente de un cristal. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La característica primordial de un cristal empleado en un circuito oscilador radica en su estabilidad de frecuencia. En un oscilador LC, el espaciamiento de las espiras de la bobina puede experimentar variaciones debido a vibraciones, y las placas de un capacitor variable pueden desplazarse. En contraste, la frecuencia de un cristal presenta una menor propensión a modificarse ante cambios térmicos o mecánicos. Mediante el control del ángulo de corte de la placa cristalina a través del plano de la estructura de cuarzo, los fabricantes pueden gestionar el coeficiente de temperatura del cristal y otros parámetros. Cuando se requiere una estabilidad de frecuencia superior, es posible ubicar el cristal en un horno que mantenga una temperatura constante.

Otra modalidad de influir en la frecuencia de operación de un oscilador cristalino consiste en incorporar capacitancia en paralelo con el cristal. Esta acción modifica la frecuencia de resonancia del circuito sintonizado conformado por el cristal y sus componentes asociados. De hecho, los cristales resultan considerablemente sensibles a los efectos de la capacitancia externa. El fabricante del cristal especificará la capacitancia que debe disponerse en paralelo para que resuene en la frecuencia deseada.

4.15.5 Microfonía y deriva térmica

La estabilidad de un oscilador depende no únicamente del circuito electrónico, sino también del entorno donde opera. Cualquier transformación física en el oscilador alterará la ruta de retroalimentación, incluyendo la frecuencia en la cual el desfase resulta apropiado para sostener la oscilación. Existen dos fuentes fundamentales de modificación: la vibración mecánica y las variaciones de temperatura.

La vibración mecánica puede impactar a un oscilador mediante diversos mecanismos. El más evidente consiste en mover o hacer vibrar los componentes, alterando la capacitancia parásita entre ellos o modificando ligeramente su valor eléctrico. En un oscilador cristalino que depende de las propiedades piezoeléctricas del cristal, la vibración mecánica también puede provocar efectos significativos.

El oscilador puede resultar sorprendentemente sensible a las vibraciones. Por ejemplo, si se sintoniza la señal de un oscilador y se golpea su carcasa, probablemente se perciba un sutil cambio de frecuencia. Esta respuesta a la vibración mecánica se denomina respuesta microfónica, ya que el oscilador actúa como una especie de micrófono, transformando las ondas sonoras (vibraciones) en una señal eléctrica (modificación de frecuencia). La microfonía puede resultar bastante perturbadora, y los diseñadores de radio se esfuerzan por aislar mecánicamente los osciladores de la vibración mediante acolchado, amortiguadores y una selección y disposición meticulosa de los componentes.

Otro desafío que enfrentan todos los osciladores es la deriva térmica. A menos que todos los componentes del oscilador, incluyendo las uniones semiconductoras internas, se mantengan a una temperatura uniforme, la frecuencia del oscilador variará con la temperatura conforme los valores de los componentes se modifican. Al igual que con la microfonía, los diseñadores de osciladores se empeñan en minimizar la sensibilidad del oscilador a las variaciones de temperatura. Una estrategia para lograrlo implica utilizar componentes como capacitores con coeficientes de temperatura NP0 (cero negativo-positivo). Otra alternativa consiste en calentar el circuito oscilador y aislarlo del entorno. También se pueden emplear hornos de cristal para mantener un cristal a temperatura constante.

4.15.6 Sintetizador de frecuencia

Las emisoras radiofónicas contemporáneas prescinden de circuitos osciladores con sintonización continua para gestionar la frecuencia de la señal. En su defecto, se implementa una metodología denominada síntesis de frecuencia para generar señales con frecuencias reguladas con exactitud que experimentan variaciones en incrementos mínimos de 100 Hz o inferiores. El procedimiento primordial de síntesis de frecuencia empleado en equipos radiofónicos de alta frecuencia son los sintetizadores digitales directos (DDS, por sus siglas en inglés). Los sintetizadores de bucle de enganche de fase (PLL, por sus siglas en inglés) fueron en su momento predominantes en los dispositivos radios comerciales, sin embargo, han sido sustancialmente reemplazados por los DDS, que demandan menor cantidad de circuitos analógicos y resultan más sencillos de integrar en circuitos integrados digitales.

4.15.7 Sintetizadores digitales directos (DDS)

La Figura 126 exhibe el diagrama de bloques de un sintetizador digital directo. Esta tipología de sintetizador se fundamenta en el principio de que es posible definir una onda sinusoidal mediante la especificación de una secuencia de valores de amplitud distribuidos en ángulos de fase equivalentes. La frecuencia de la onda sinusoidal se determina entonces por la frecuencia de muestreo con la cual el sintetizador recorre los valores sucesivos.

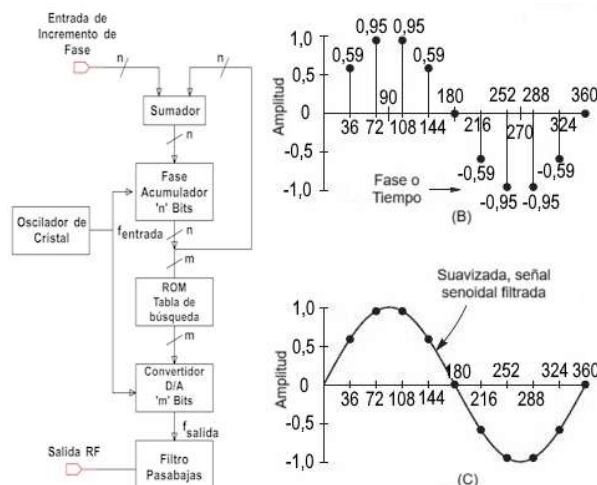


Figura 126. Diagrama de bloques de un sintetizador digital. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El generador de oscilación cristalina determina la tasa de muestreo para los valores de amplitud. La entrada de incremento angular al bloque sumador establece la cantidad de muestras por ciclo.

La señal cronométrica del oscilador instruye al acumulador angular que extraiga los datos del sumador y posteriormente incremente el valor del sumador según el incremento de fase. El valor del acumulador angular oscila entre 0 y 360, lo que corresponde a un ciclo completo de la forma de onda generada. El almacenamiento de memoria ROM contiene los valores de amplitud de la forma de onda en cada ángulo representado por el acumulador angular. Un conversor analógico-digital (DAC, por sus siglas en inglés) transforma los valores digitales del almacenamiento en una tensión de salida analógica, generando la forma de onda.

Los componentes principales de impurezas espectrales producidos por un sintetizador digital directo son señales parásitas a frecuencias discretas específicas determinadas por la señal cronométrica y otros componentes digitales del sintetizador DDS. Un diseño meticuloso puede posicionar estas señales parásitas fuera de las bandas de radioaficionado.

4.15.8 Bucles de enganche de fase (PLL)

En un bucle de enganche de fase, la frecuencia de un oscilador variable se compara continuamente con la fase de un oscilador de referencia estable de frecuencia constante. Si la frecuencia del oscilador variable resulta excesivamente elevada, su fase comenzará a adelantarse respecto a la referencia. Esta diferencia angular se utiliza para reducir la frecuencia del oscilador variable hasta que se sincronice nuevamente con la del oscilador de referencia. Una frecuencia demasiado baja provoca un desfase creciente, que se emplea para incrementar la frecuencia del oscilador. De este modo, el oscilador variable se sincroniza en fase con la referencia, manteniendo sus frecuencias exactamente equiparadas.

No obstante, para funcionar como oscilador sintonizable, la frecuencia del oscilador variable debe poder modificarse y, simultáneamente, permanecer bajo el control de la referencia.

La Figura 127 ilustra el funcionamiento de un PLL. El detector de fase emite una tensión correspondiente a la diferencia angular entre los osciladores. Esta tensión atraviesa un filtro de bucle paso bajo, se amplifica mediante un amplificador de bucle y se utiliza para regular la frecuencia de un oscilador controlado por tensión (VCO, por sus siglas en inglés). La combinación de detector de fase, filtro y VCO crea un bucle "servo" electrónico. Al emplear el oscilador de referencia como entrada de frecuencia al bucle servo, se configura un bucle de enganche de fase.

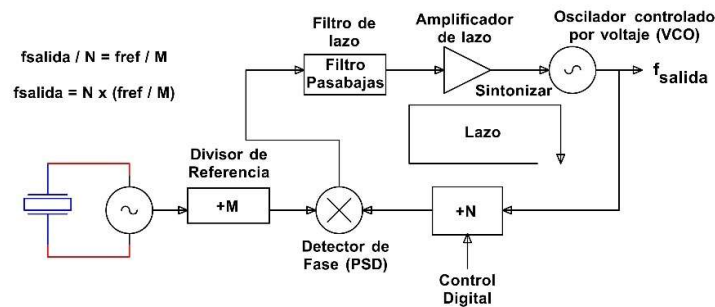


Figura 127. Funcionamiento de un PLL. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Si el bucle se encuentra “sincronizado”, es decir, cuando la frecuencia del VCO está bajo control, el intervalo de variación de frecuencia sobre el cual el bucle puede mantener el dominio del VCO se denomina rango de sincronización del bucle. Cuando el bucle no está sincronizado y las frecuencias divididas del VCO y la referencia se aproximan progresivamente, el bucle “capturará” el VCO en determinado momento. El intervalo comprendido entre las frecuencias máxima y mínima donde ocurre este fenómeno constituye el rango de captura del bucle. Las propiedades del filtro de bucle y del amplificador determinan la estabilidad y la velocidad de sintonización del PLL. El PLL realiza un ajuste continuo de la frecuencia de la señal de salida con relación al oscilador de referencia, generando variaciones en la fase de la señal. Tales variaciones producen un ruido de fase de banda ancha, que representa la principal impureza espectral generada por los PLL y una de las causas fundamentales por las que han sido reemplazados por osciladores DDS. Adicionalmente a la síntesis de frecuencia, un PLL puede emplearse para efectuar modulación y demodulación de FM. Si la señal moduladora se adiciona a la señal de control del VCO, la salida será una señal FM directa. En caso de introducir una señal FM dividida hacia el detector de fase en lugar de una salida del VCO, la salida del detector de fase será una reproducción de la señal moduladora.

4.15.9 Mezcladores

Los circuitos mezcladores se utilizan para modificar la frecuencia de una señal. En un receptor superheterodino, esto implica transformar la señal recibida a la frecuencia intermedia (FI) para permitir su amplificación y filtrado con mayor eficiencia. De este modo, el receptor puede optimizarse para obtener las mejores características de gestión de la señal, como linealidad y selectividad, sin necesidad de resintonizar múltiples elementos del circuito cada vez que se altera la frecuencia recibida. La Figura 128 muestra el símbolo de un mezclador.

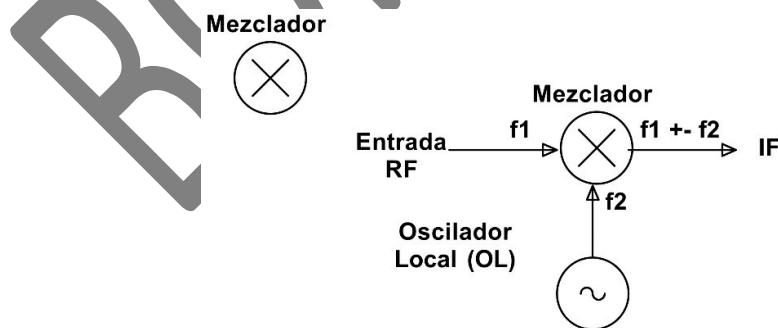


Figura 128. Símbolo de un mezclador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los dispositivos mezcladores desempeñan también una función de transformación de la frecuencia de una señal durante su trayectoria a través de un sistema transmisor. Los fundamentos operativos resultan significativamente análogos para mezcladores, detectores y moduladores, por lo cual la descripción de su mecanismo le proporcionará una comprensión más profunda de los tópicos subsiguientes.

Cuando el procedimiento de mezcla se ejecuta mediante dispositivos capaces de potenciar las señales, el arreglo circuital recibe la denominación de mezclador activo. En contraste, si el

mezclador emplea componentes pasivos incapaces de amplificar una señal para realizar la función de mezcla, se clasifica como mezclador pasivo. Esta configuración genera inevitablemente pérdidas de conversión originadas por las limitaciones de los componentes pasivos. La Figura 129 ilustra el diagrama de un mezclador pasivo de doble balance (DBM, por sus siglas en inglés) que implementa cuatro diodos dispuestos en configuración anular (con similitudes, aunque no idéntico, a un rectificador de onda completa) para multiplicar las señales de RF y del oscilador local (LO, por sus siglas en inglés).

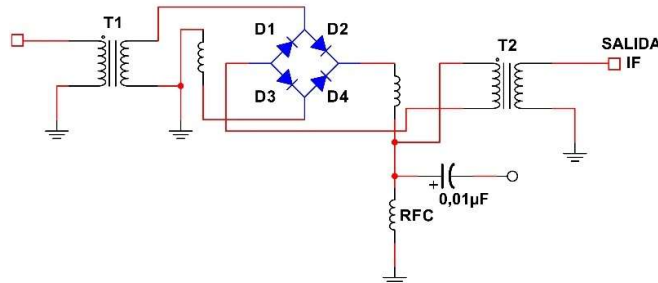


Figura 129. Mezclador pasivo de doble balance. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Cuando dos ondas sinusoidales interactúan en un circuito con comportamiento no lineal (donde la salida no reproduce proporcionalmente la entrada), como en un mezclador, la señal resultante presenta una morfología ondulatoria compleja. Esta nueva señal contiene componentes espectrales fundamentales derivados de las dos señales originales, junto con dos señales producto. Las señales producto consisten en ondas sinusoidales cuyas frecuencias representan la suma y diferencia de las frecuencias iniciales. Adicionalmente, se generan combinaciones de armónicos de orden superior, aunque generalmente resultan más atenuadas que las frecuencias primarias de suma y diferencia, por lo que se omiten en este análisis.

La señal de frecuencia variable (en un receptor, la señal de entrada objetivo) se denomina habitualmente señal de RF. La señal generada en la radio para su mezcla con la señal de RF recibe el nombre de oscilador local (LO), y la señal resultante se identifica como señal de FI. En un receptor superheterodino, la frecuencia del LO se ajusta para que uno de los productos de salida de FI del mezclador se ubique en la frecuencia para la cual están configurados los circuitos de FI.

Un filtro permite la selección de uno de los productos de la combinación de salida. Cuanto más refinado sea el filtro, menor será la presencia de productos no deseados o señales de entrada en la señal resultante. Mediante técnicas de mezclador balanceado, el circuito mezclador logra aislar los distintos puertos de señal, impidiendo que las señales de RF, LO e IF aparezcan en puertos alternos. Este procedimiento evita la propagación de las señales de entrada (RF y LO) hacia la salida, requiriendo que el filtro únicamente elimine los productos no deseados de la salida del mezclador.

Las etapas del mezclador en receptores de alto rendimiento demandan una evaluación meticulosa, dado su impacto significativo en el funcionamiento óptimo ante la presencia de señales intensas. La señal de RF debe amplificarse estrictamente lo necesario para compensar las pérdidas del mezclador. Una amplificación excesiva provocaría la saturación del circuito mezclador, generando desensibilización y combinaciones de frecuencias de orden superior que emergerían como señales espurias altamente indeseables o productos de distorsión de intermodulación (IMD, por sus siglas en inglés) próximos a la frecuencia de FI, interfiriendo con la señal deseada. Un mezclador debe garantizar la capacidad de procesar señales intensas, denominada rendimiento de señal fuerte, sin generar señales espurias.

4.15.10 Moduladores

La modulación constituye el proceso de incorporar información a una señal de radiofrecuencia no modulada, también conocida como portadora. La modulación de voz o datos se denomina señal de banda base o información de banda base. Banda base es el término que designa el

rango de frecuencia ocupado por una señal de mensaje previo a la modulación. La señal de banda base o de mensaje puede ser de audio para modos de voz o de datos para modos digitales. Los circuitos que ejecutan el proceso de modulación se denominan moduladores.

Cualquier aspecto de la señal portadora puede modificarse para añadir información, como la amplitud, la frecuencia o la fase.

4.15.11 Modulación de amplitud y banda lateral única

Una señal de AM representa fundamentalmente una señal compleja integrada por tres componentes de radiofrecuencia individuales. Adicionalmente a la onda portadora de RF, las dos señales restantes conforman los segmentos laterales: uno ubicado en una frecuencia resultante de la suma de las frecuencias de la portadora y la señal informativa (banda lateral superior o USB, por sus siglas en inglés), y el otro correspondiente a su diferencia (banda lateral inferior o LSB, por sus siglas en inglés). La Figura 130 ilustra el espectro de una señal AM generada mediante la modulación de una portadora de 10 MHz con una señal acústica sinusoidal de 1 kHz.

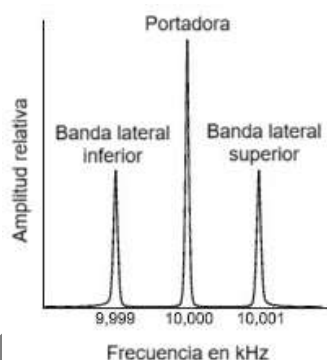


Figura 130. Espectro de una señal AM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

SSB: EL MÉTODO DEL FILTRO

En una señal de modulación de amplitud, las bandas laterales superior e inferior contienen fundamentalmente la misma información: la amplitud y las frecuencias de la señal moduladora. Únicamente es preciso transmitir una banda lateral para reconstruir la información original, por lo que la banda lateral no deseada puede eliminarse junto con la portadora que no transporta información.

El procedimiento inicial para generar SSB mediante el método de filtrado consiste en combinar la señal de banda base con una portadora de radiofrecuencia en un modulador balanceado. Un modulador balanceado es un tipo de mezclador cuyos productos de salida corresponden a la suma y la diferencia de las frecuencias del mensaje y la portadora (las bandas laterales), y la señal portadora se anula. La señal resultante consta exclusivamente de las señales de banda lateral superior (USB) e inferior (LSB) y se denomina doble banda lateral con portadora suprimida o DSB-SC (por sus siglas en inglés). Finalmente, se emplea un filtro paso banda estrecho para suprimir una de las bandas laterales junto con cualquier señal portadora residual. Esto deja únicamente la señal de banda lateral única, como se ilustra en la Figura 131.

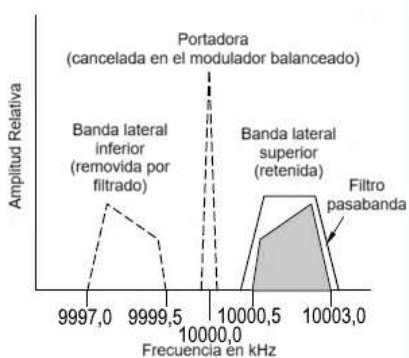


Figura 131. SSB método del filtro. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La Figura 132 muestra el diagrama de bloques de un transmisor SSB básico. Una vez generada la señal SSB, un mezclador puede cambiar su frecuencia a la banda de radioaficionado deseada. Posteriormente, el amplificador lineal la amplifica a niveles de potencia útiles.

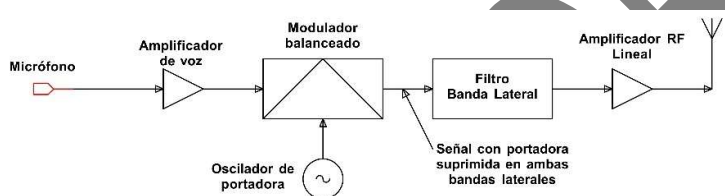


Figura 132. Diagrama de bloques de un transmisor SSB. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.15.12 Modulación de frecuencia

La totalidad de los procedimientos de generación de FM se clasifican en dos categorías fundamentales: FM directa y FM indirecta. Como cabría anticipar, cada modalidad presenta sus propias particularidades y limitaciones. Se procederá a examinar inicialmente el método de FM directa.

La única alternativa para generar una señal de FM auténtica sin modulación de fase consiste en emplear un modulador de reactancia que interactúa con un oscilador, tal como se representa en la Figura 133. Cuando la señal moduladora regula la reactancia variable, se obtiene como resultado una señal de FM directa.

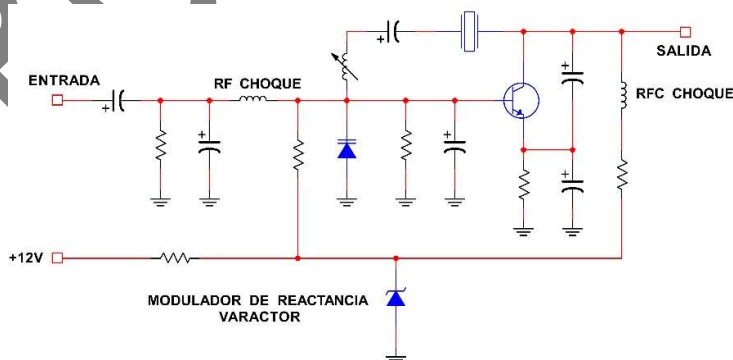


Figura 133. Modulador de reactancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La alteración de la fase también modifica la frecuencia de una señal; consecuentemente, desde una perspectiva operativa, la FM indirecta resulta equivalente a la PM. El mismo tipo de circuito modulador de reactancia puede emplearse como modulador de fase para transformar la reactancia en un circuito amplificador de RF sintonizado y, por consiguiente, modificar la fase de la corriente. Esto genera modulación de fase (PM).

La Figura 133 ilustra un ejemplo de modulador de reactancia que produce FM directa, según se describe a continuación. La señal de audio de entrada provoca una transformación en la capacitancia del diodo varactor, lo que consecuentemente altera la relación LC del circuito resonante del oscilador y su frecuencia. La sensibilidad del modulador (cuantificada en Hz/V) depende de la variación de capacitancia del diodo varactor por cada unidad de tensión de señal de entrada. Alternativamente, podría implementarse una inductancia variable, aunque representa una opción menos eficiente.

En los moduladores de reactancia prácticos, el oscilador modulado típicamente opera a una frecuencia relativamente reducida, garantizando una frecuencia portadora altamente estable. Los multiplicadores de frecuencia incrementan la señal hasta la frecuencia de salida final deseada, como se representa en la Figura 134. Es fundamental destacar que, al multiplicar la frecuencia, simultáneamente se multiplica la desviación de frecuencia. La desviación generada por el modulador requiere un ajuste meticuloso para conseguir la desviación apropiada en la frecuencia de salida final.

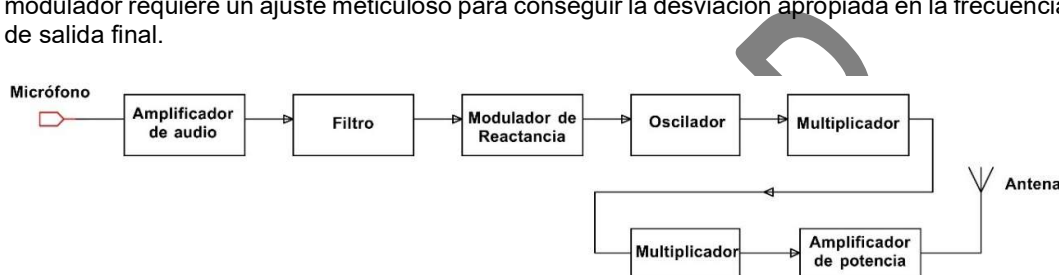


Figura 134. Diagrama de bloques de un transmisor FM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.15.13 Pre-énfasis y de-énfasis

En la modulación en fase (PM), la variación de frecuencia experimenta un incremento proporcional a la frecuencia de modulación auditiva (las ondas sonoras de mayor frecuencia generan una desviación frecuencial más pronunciada). Consecuentemente, resulta imperativo implementar un filtro pasa bajos en el modulador acústico para atenuar las frecuencias superiores a 3000 Hz previo al proceso de modulación. Esta acción previene la generación de bandas laterales indeseadas que se distancian de la frecuencia portadora, provocando potenciales interferencias en canales adyacentes.

En un sistema FM directo, la desviación frecuencial permanece constante durante la modulación acústica, por lo que no se requiere un filtro pasa bajos. No obstante, la menor potencia energética de los componentes vocales de alta frecuencia implica que la señal recuperada resulta vulnerable al ruido de alta frecuencia. Para mitigar el siseo y el ruido de alta frecuencia en el receptor, se incorpora un circuito acústico denominado red de pre-énfasis en un modulador FM directo. El pre-énfasis aplicado a un transmisor FM proporciona las características de desviación de PM.

El procedimiento inverso de aplicar un filtro pasa bajos, conocido como de-énfasis, se emplea en el receptor para restablecer el espectro acústico a sus proporciones relativas originales y reducir el ruido de alta frecuencia. Un transmisor que utiliza PM no precisa una red de pre-énfasis. Por consiguiente, un receptor FM con una red de de-énfasis resulta compatible tanto con señales PM como con señales FM que implementan pre-énfasis.

4.15.14 Detectores y demoduladores

Los detectores y demoduladores desempeñan una función análoga: recuperar la información de modulación de una señal de RF modulada. Un circuito detector extrae la información directamente de la señal. Un demodulador invierte el proceso de modulación para recuperar la información. Los detectores tienden a ser circuitos más simples que los demoduladores, aunque la señal recuperada generalmente no constituye una réplica tan precisa de la señal moduladora original como cuando se emplea un demodulador. Ambos juegan un papel fundamental en las comunicaciones radiofónicas.

4.15.14.1 Detectores

El detector más elemental, empleado en los primeros receptores radiofónicos, corresponde al detector de diodos. Su funcionamiento se basa en la rectificación y filtrado de la señal de radiofrecuencia recibida. La Figura 135 ilustra un receptor completo y sencillo. Este circuito únicamente opera con señales AM intensas, razón por la cual su utilización actual es limitada, restringiéndose principalmente a propósitos experimentales. No obstante, constituye un excelente punto de referencia para comprender el principio de detección. En los iniciales equipos de radio de cristal, una punta metálica ejercía presión sobre un cristal de plomo para generar un diodo (una variante primitiva del diodo de barrera Schottky) capaz de rectificar la señal. Unos auriculares de alta sensibilidad recuperaban la señal de audio.

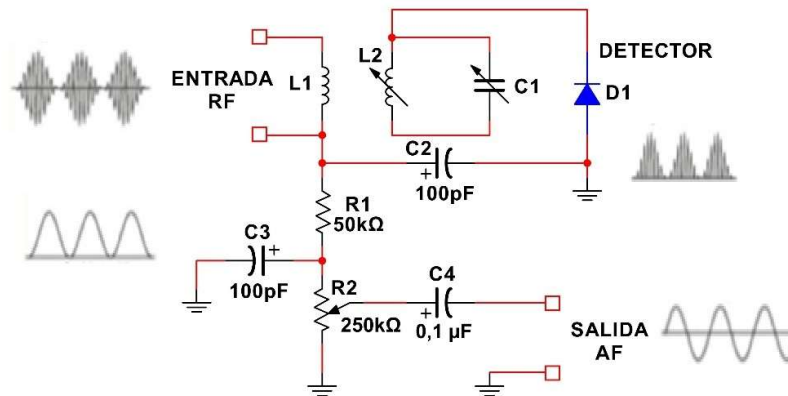


Figura 135. Receptor complejo y simple. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.15.14.2 Detectores de producto

Un detector de producto representa un tipo de mezclador que sucede a las etapas de FI en un receptor superheterodino. Combina la señal de salida de FI con la generada por un oscilador de frecuencia de batido (BFO, por sus siglas en inglés). La frecuencia del BFO se selecciona de manera que uno de los productos de suma y diferencia se ubique en frecuencias audibles. Los detectores de producto se implementan para la recepción en SSB, CW y RTTY. El BFO recibe su denominación por la diferencia de frecuencia audio o “batido” entre su salida y la salida de FI.

A modo de ejemplo, si la FI del receptor es de 455 kHz y el operador desea escuchar una señal CW con un tono de 700 Hz, el BFO podría ajustarse a 455,7 kHz, generando productos de suma y diferencia a 700 Hz y 910,7 kHz. Un filtro de audio eliminaría posteriormente el componente de mayor frecuencia. La frecuencia del BFO también podría configurarse en 454,3 kHz, obteniéndose idéntico resultado. Este procedimiento resulta igualmente aplicable a señales SSB y RTTY.

4.15.14.3 Detectando señales FM

El detector de FM más habitual es el circuito discriminador de frecuencia mostrado en la Figura 136. Utiliza un transformador sintonizado con la FI del receptor para la detección de señales FM. La señal primaria se introduce en el punto medio del devanado secundario mediante un capacitor. Para una señal de entrada sin modular, las tensiones resultantes en ambos lados del punto central del secundario se neutralizan mutuamente. Sin embargo, cuando la frecuencia de la señal experimenta variaciones, se produce un desfase en las dos tensiones de salida que oscila a la frecuencia audio de la señal moduladora. Ambas tensiones se rectifican mediante un par de diodos, y la diferencia resultante en la tensión de salida se transforma en la señal de audio.

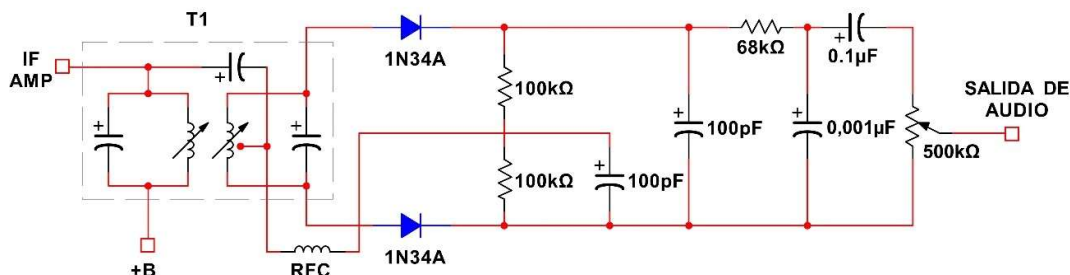


Figura 136. Circuito discriminador de frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.16 Procesamiento de Señales Digitales (DSP) y Radio Definida por Software (SDR)

El procesamiento digital de señales (DSP, por sus siglas en inglés) constituye un componente esencial de la electrónica contemporánea y ha transformado radicalmente la industria de manera similar a la revolución provocada por el transistor y el microprocesador. Las prestaciones del DSP han experimentado una evolución tan significativa que prácticamente todas las funciones que previamente se implementaban mediante circuitos analógicos en un transceptor ahora se ejecutan como operaciones matemáticas dentro de un procesador digital. Esta innovadora modalidad de radio recibe la denominación de radio definida por software (SDR, por sus siglas en inglés). La totalidad de las funciones principales de un sistema SDR están gobernadas por programación informática, susceptible de modificación para adaptarse a requerimientos específicos del usuario. SDR se ha consolidado como la tecnología predominante en los transceptores de radioaficionados, si bien siempre persistirán dispositivos y circuitos analógicos.

4.16.1 Procesamiento de señales digitales (DSP)

4.16.1.1 Muestreo Secuencial

El DSP consiste en la medición expedita de señales analógicas, registrando las observaciones como una secuencia numérica, procesándolos y posteriormente reconvirtiendo la nueva sucesión al dominio analógico. El tratamiento de los valores numéricos dependerá de la función específica que se esté implementando, entre las múltiples posibilidades existentes.

La metodología para generar una secuencia numérica que represente mediciones periódicas de una forma de onda analógica continua se denomina muestreo secuencial. Cada elemento de la secuencia representa una medición singular de la amplitud instantánea de la forma de onda en un momento de muestreo determinado. Al efectuar las mediciones de manera continua e intervalos regulares, se obtiene una secuencia numérica que representa la amplitud de la señal en momentos precisos. Este procedimiento se ilustra en la Figura 137, que exhibe la conversión de una señal analógica a formato digital.

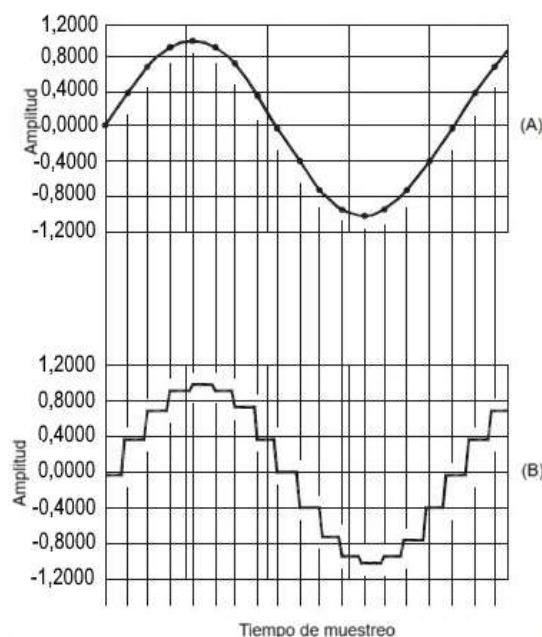


Figura 137. Representación como se convierte una señal analógica a formato digital. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Es importante destacar que la frecuencia de la onda sinusoidal muestreada resulta considerablemente inferior a la frecuencia de muestreo (f_s). En otros términos, se capturan múltiples muestras durante cada ciclo de la onda sinusoidal. La forma de onda muestreada no contiene información sobre la evolución de la señal analógica entre muestras, no obstante, mantiene una aproximación significativa a la onda sinusoidal original. Si se introdujera la onda sinusoidal analógica en un analizador espectral, se observaría un componente único de señal en la frecuencia de la onda sinusoidal. Evidentemente, el espectro de la forma de onda muestreada difiere, presentándose como una representación escalonada compuesta por intervalos discretos que saltan de un valor a otro.

El espectro de la señal muestreada puede anticiparse e interpretarse según se ilustra en la Figura 138. El espectro correspondiente a la onda sinusoidal analógica se representa en (A), situado por encima del espectro de la función de muestreo mostrado en (B). La señal muestreada resulta del producto directo de ambas señales, tal como se aprecia en (C).

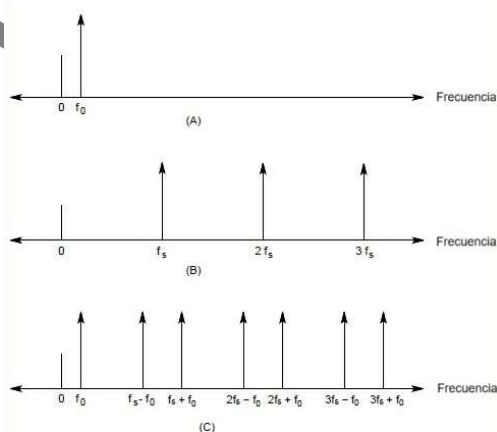


Figura 138. Espectro de una señal analógica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La operación de muestreo resulta equivalente a un procedimiento de mezcla: ambos ejecutan una multiplicación de las dos señales de entrada.

Es fundamental comprender que el espectro muestreado experimenta una reiteración en intervalos de f_s . Tales repeticiones reciben la denominación de solapamiento o más comúnmente llamada *aliasing* y poseen la misma entidad que la fundamental en los datos de la señal muestreada. Cada réplica contiene la información necesaria para describir completamente la señal original. Generalmente, solo se presta atención a la fundamental, pero conviene examinar las consecuencias cuando la frecuencia de muestreo resulta inferior a la de la entrada analógica.

4.16.1.2 Aliasing de la señal muestreada

Analicemos la situación donde la frecuencia de muestreo es menor que la correspondiente a la onda sinusoidal analógica, según se representa en la Figura 139 (A). La salida muestreada mostrada en (B) ya no reproduce exactamente la morfología de la onda de entrada.

Resulta significativo que la señal muestreada conserve la estructura general de una onda sinusoidal, aunque a una frecuencia inferior a la de entrada.

Este fenómeno constituye un *aliasing* de la señal muestreada que, desde la perspectiva de los datos muestreados, resulta tan fehaciente como la señal de entrada y no resulta susceptible de filtrado.

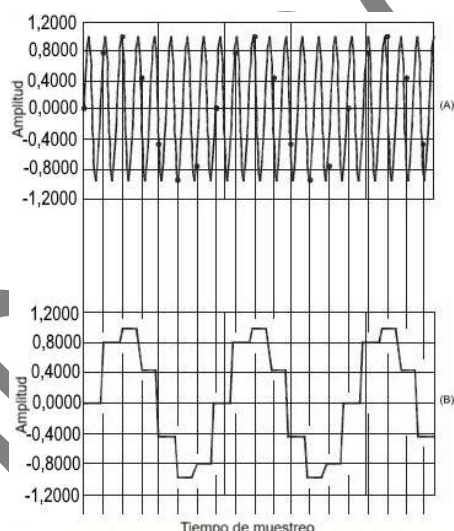


Figura 139. Onda de frecuencia sinusoidal mayor que la frecuencia muestreada. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Para prevenir la generación de *aliasing* por submuestreo, la frecuencia de muestreo (f_s) debe ser al menos el doble del componente de frecuencia máxima de la señal. Este requisito se conoce como el teorema de muestreo de Nyquist.

Para impedir la creación de señales *aliasing*, es necesario restringir el ancho de banda de la señal de entrada mediante un filtro paso bajo (*anti-aliasing*, evitar la generación de *aliasing*) que elimine cualquier componente de señal con frecuencias superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo.

4.16.2 Convertidores de datos

El instrumento empleado para efectuar el muestreo se denomina conversor analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés). En cada muestra, un ADC genera un número binario directamente proporcional a la tensión de entrada. La cantidad de bits en los números binarios limita el número de niveles de tensión discretos que se pueden representar. Un ADC de 8 bits, por ejemplo, puede generar uno de $2^8 = 256$ valores. Esto implica que la amplitud reportada no es la amplitud exacta de la entrada, sino únicamente el valor más próximo entre los disponibles.

La medición del ADC puede perfeccionarse con el tiempo mediante la “vibración”, incorporando pequeñas cantidades de ruido a la señal de entrada. Esto provoca que el valor de salida promedio del ADC sea más preciso con el transcurso del tiempo.

La resolución del ADC está determinada por la tensión de referencia correspondiente al valor máximo digitalizado y el número de bits que representa cada muestra. Como otro ejemplo, si un convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits tiene una tensión de referencia de 1 V, la resolución es $1 \text{ V} / 2^{10} = 1 / 1024 = 0,976 \text{ mV} \approx 1 \text{ mV}$. Suponiendo que el ruido atmosférico o térmico no sea superior, la resolución del ADC determina el nivel mínimo de señal detectable para un SDR.

El proceso de conversión de la señal de entrada a formato digital genera datos que pueden ser muy similares a la señal analógica original, pero no constituyen una copia exacta. Otros efectos en el proceso de digitalización incluyen el ancho de banda y la velocidad de respuesta de los circuitos de entrada del convertidor. El resultado es una ligera distorsión de la señal, que se mide como distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés), que es una medida de la calidad del convertidor.

Un convertidor digital-analógico (DAC, por sus siglas en inglés) realiza la conversión de números binarios a tensiones analógicas: la operación inversa de un ADC. La estructura de un DAC le permite operar a velocidad muy elevada, pero digitaliza los niveles de salida de la señal, al igual que un ADC solo puede generar un número fijo de valores digitales. Si un DAC crea una onda sinusoidal, esta tendrá una apariencia “escalonada” a medida que se crea cada nivel de tensión sucesivo. Los saltos entre valores generan armónicos no deseados que se eliminan con un filtro paso bajo, también denominado filtro de reconstrucción.

4.16.3 Transformadas de Fourier

La transformada de Fourier es el equivalente en software de un analizador de espectro de hardware. Recibe una señal en el dominio temporal y la convierte al dominio frecuencial. Esto muestra el contenido espectral de la señal de entrada. La transformada de Fourier se realiza sobre una señal digitalizada mediante un algoritmo DSP, generando datos de salida que representan el espectro de la señal de entrada (una transformada de Fourier inversa invierte el proceso, convirtiendo una señal del dominio frecuencial en una señal del dominio temporal).

El cálculo de la transformada de Fourier requiere una gran cantidad de cálculos. La Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) es un algoritmo especial que reduce el número de cálculos necesarios para un conjunto de datos de 1024 muestras en más de 100 veces, en comparación con los métodos originales.

4.16.4 Decimación e interpolación

El procesamiento DSP también puede realizar funciones en una señal que son imposibles de realizar eficazmente en sistemas analógicos. Por ejemplo, cambiar la frecuencia de muestreo efectiva modifica la frecuencia de las señales digitales. El proceso de decimación elimina cada n -ésima muestra, reduciendo la frecuencia de muestreo efectiva en el mismo factor. Para evitar la generación de solapamiento debido a la nueva frecuencia de muestreo más baja, se debe aplicar un filtro *anti-aliasing* digital de paso bajo antes de la decimación.

Un proceso similar, llamado interpolación, inserta nuevas muestras entre las existentes para aumentar la frecuencia de muestreo efectiva. En este caso, no se requiere un filtro *anti-aliasing*, ya que la frecuencia de muestreo efectiva aumenta, no disminuye.

4.16.5 Sistemas de radio definidos por software (SDR)

¿Qué es una radio definida por software? Para ser lo más precisos posible, se puede establecer que una radio por software constituye un dispositivo:

1. Cuya infraestructura hardware resulta capaz de gestionar prácticamente cualquier formato de modulación, anchura de banda señal y frecuencia deseados.

2. Cuya funcionalidad puede modificarse a voluntad mediante la descarga de un programa informático.
3. Que efectúa el procesamiento de señales radioeléctricas y opera con DSP. Es fundamental comprender que los sistemas DSP y SDR pueden ejecutar cualquier función de procesamiento de señales definida matemáticamente si se dispone de hardware para muestrear adecuadamente la señal y realizar las operaciones matemáticas necesarias con suficiente celeridad. Esto comprende modulación, demodulación, filtrado, procesamiento vocal, etc.

Algunos SDR utilizan un ordenador personal para realizar la mayor parte del trabajo computacional y hardware externo para convertir las señales de radiofrecuencia transmitidas y recibidas en señales de baja frecuencia que la tarjeta de sonido del computador puede digitalizar. Algunos SDR evitan el uso de la tarjeta de sonido al incorporar su propio códec de audio y transferir los datos al ordenador a través de algún puerto. También pueden ejecutar programas de registro y otro software, simultáneamente que realizan el procesamiento de señales requerido por el SDR.

Los SDR autónomos se asemejan más a los radios convencionales, con todo integrado en una única carcasa, lo que facilita una instalación más ordenada y compacta.

El procesamiento de señales se ejecuta mediante uno o más circuitos integrados DSP incorporados. Estas radios compactas cuentan con controles dedicados para funciones específicas, al igual que sus homólogas tradicionales, y no requieren un ordenador independiente para mostrar un panel frontal virtual ni para controlar las funciones radioeléctricas.

Cualquier método ofrece las ventajas más significativas de aplicar técnicas DSP al procesamiento de señales. Una vez que la señal está en el dominio digital, se pueden aplicar sofisticados algoritmos DSP, como filtros de rechazo de frecuencia automáticos, ecualización de canal adaptativa, reducción de ruido, supresión de ruido y control automático de ganancia de pre-alimentación.

Corregir errores, mejorar el rendimiento o añadir nuevas funcionalidades resulta tan sencillo como descargar un nuevo software.

4.16.6 Hardware SDR

La transición entre señales analógicas y digitales puede ocurrir en cualquier punto de la cadena de señal, entre la antena y la interfaz humana. Con la amplia variedad de equipos asequibles disponibles actualmente, la elección se basa principalmente en la comodidad.

Por ejemplo, muchos paquetes de software de comunicación digital populares utilizan la tarjeta de sonido de un ordenador personal conectada a la entrada y salida de audio de un transceptor. Las señales digitales se reciben y transmiten por aire mediante el mismo proceso que el audio de un micrófono convencional.

Todas las señales de radiofrecuencia se procesan dentro del transceptor, ya sea un superheterodino analógico o un SDR de última generación.

En algunas radios definidas por software, la transición de analógico a digital se realiza en una etapa de frecuencia intermedia donde un ADC muestrea las señales de recepción y un DAC crea la señal de transmisión. Estas señales digitales pueden ser procesadas por DSP en el transceptor o enviadas a un ordenador donde el software realiza la modulación y demodulación. La arquitectura SDR de vanguardia actual permite la transición entre los dominios analógico y digital justo en la frecuencia de transmisión o recepción, sin mezclador que convierta la frecuencia de las señales recibidas o transmitidas. Esto se denomina conversión digital directa (DDC, por sus siglas en inglés) y el diagrama de bloques de un transceptor DDC típico se muestra en la Figura 140. La DDC requiere que el ADC y el DAC funcionen a frecuencias de muestreo muy altas, al menos el doble del ancho de banda del transceptor que utiliza un convertidor analógico-digital de conversión directa. Otros tipos de convertidores, como las arquitecturas de canalización, también son populares. Para digitalizar señales de audio o datos de banda base, se puede utilizar

un convertidor mucho más lento, como un ADC de aproximación sucesiva o sigma-delta. La tecnología avanza rápidamente en este ámbito.

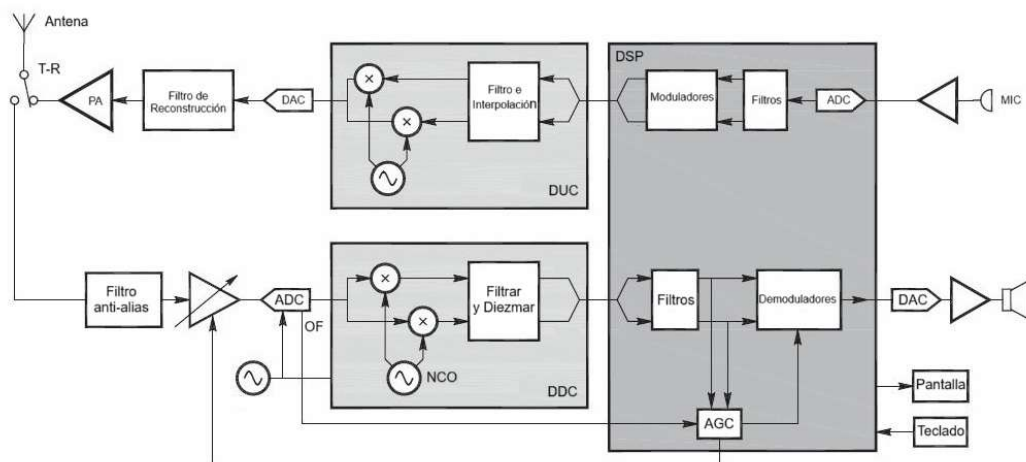


Figura 140. Diagrama de bloques de un transceptor DDC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En el transceptor DDS, los componentes analógicos remanentes en la trayectoria de señal se limitan a filtros *anti-aliasing* y de reconstrucción de amplio espectro, un amplificador destinado a optimizar la figura de ruido del ADC y amplificadores de potencia para la señal transmitida. El oscilador local, el mezclador, los filtros de FI, el AGC, los moduladores, los demoduladores y demás circuitos, con excepción de la salida de audio y los elementos de la fuente de alimentación, son reemplazados por hardware y software digitales.

Con independencia de si la digitalización se efectúa directamente sobre la señal de RF o en una señal de FI, los anchos de banda de recepción y transmisión quedan circunscritos por la frecuencia de muestreo del ADC y el DAC, respectivamente.

MODULACIÓN DSP

Una onda sinusoidal de cualquier magnitud y ángulo de fase puede representarse mediante la suma ponderada de una onda seno y coseno:

$$x(t) = I \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t)$$

Para una mayor comodidad matemática, los valores de I y Q se integran en un único número complejo, $x = I + jQ$. I y Q representan los flujos informativos del mensaje de banda base que se aplican a dos señales portadoras de RF con idéntica frecuencia (ωt), pero desfasadas 90° . Esto genera la señal modulada:

$$x(t) = (I + jQ)(\cos(\omega t) - j \sin(\omega t))$$

En esta ecuación, la porción $\cos(\omega t) - j \sin(\omega t)$ representa dos portadoras de RF y la porción $I + jQ$ representa el mensaje de banda base. I y Q pueden constituir bits de datos digitales (1 o 0) que activan y desactivan las portadoras, o pueden ser señales analógicas. El procedimiento de recuperación de I y Q a partir de la señal modulada resulta idéntico para ambos casos.

4.16.7 Modulación y demodulación I/Q

Un modulador I/Q regula la amplitud y fase de una señal de RF directamente desde los componentes I y Q. Consúltase la Figura 141 para examinar los diagramas de bloques de un modulador y un demodulador I/Q. Las señales I y Q son dos flujos de datos de banda base independientes. El demodulador I/Q de (B) corresponde esencialmente al mismo circuito que el modulador, pero en sentido inverso.

Recupera las señales I y Q que representan los componentes en fase y en cuadratura de la señal de RF entrante. Suponiendo que el oscilador local del demodulador opera a la misma frecuencia y fase que la portadora de la señal recibida, la salida I/Q del demodulador del receptor resulta teóricamente idéntica a la entrada I/Q del transmisor.

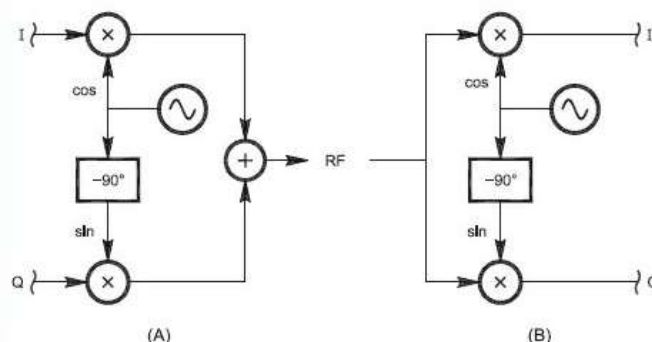


Figura 141. Modulador y demodulador I/Q. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En un modulador digital I/Q, los flujos de datos digitales correspondientes a las entradas I/Q provienen de los ADC situados en la sección superior del bloque DSP (Figura 140). Los elementos como mezcladores, oscilador, red de desplazamiento de fase y sumador representan funciones digitales del bloque convertidor digital ascendente (DUC, por sus siglas en inglés), mientras que el DAC los transforma a radiofrecuencia. La señal digital resultante exhibe una supresión absoluta de la banda lateral no deseada, sin manifestación de portadora ni distorsión dentro del rango dinámico proporcionado por la cantidad de bits en las palabras de datos.

Un procedimiento análogo se implementa en un demodulador digital. Cuando la señal de radiofrecuencia entrante se digitaliza inicialmente mediante un ADC, la demodulación puede ejecutarse digitalmente sin artefactos provocados por imperfecciones en circuitos analógicos. La fase inicial consiste en recuperar las señales I y Q en el bloque DDC (Figura 140) como señales en el dominio temporal. Posterior al filtrado, la siguiente etapa en el bloque DSP implica aplicar una FFT a las señales I y Q digitalizadas, trasladándolas al dominio frecuencial. Se pueden implementar funciones de demodulación en los espectros I y Q para recuperar las señales de banda base.

El nivel de precisión requerido para un desplazamiento de fase de audio de 90° aceptable resulta complejo de obtener mediante circuitos analógicos. No obstante, con DSP, producir un desplazamiento de fase de 90° en un amplio espectro de frecuencias se logra con facilidad mediante una combinación especial de filtros denominada transformada de Hilbert. Un sistema DSP que utiliza la transformada de Hilbert, como se ilustra en la Figura 142, genera una combinación especial de filtros que produce las señales necesarias (mensaje desfasado y portadoras de radiofrecuencia) y ejecuta la función de modulador balanceado multiplicando las señales muestreadas como números. La señal de SSB se genera sumando los dos conjuntos de datos multiplicados y empleando un DAC para convertir los números nuevamente a una forma de onda analógica. Esta técnica transforma la técnica de cuadratura en un método popular de generación de SSB en sistemas DSP.

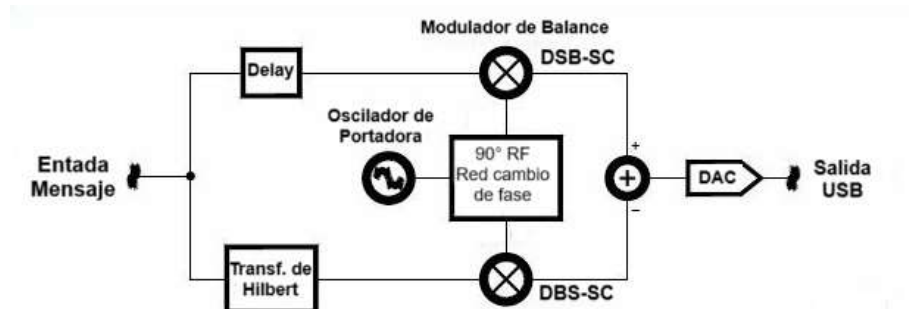


Figura 142. Sistema DSP con transformada de Hilbert. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

4.17 Filtros y adaptación de impedancia

4.17.1 Familias de filtros y tipos de respuesta

Los filtros constituyen dispositivos electrónicos diseñados para interceptar, permitir el tránsito o transformar señales dentro de un intervalo específico de frecuencias. Aunque los circuitos resonantes previamente mencionados también desempeñan esta función y pueden considerarse un filtro elemental, el concepto de filtro habitualmente se asocia con circuitos que operan en rangos de frecuencias más extensos con características distintivas y precisas.

4.17.2 Filtros activos y pasivos

En esta sección se profundizará sobre los filtros pasivos y activos. Los filtros pasivos se manufacturan con elementos sin alimentación eléctrica (resistencias, capacitores o inductores) y sistemáticamente experimentan cierta disminución en la intensidad de la señal.

Este fenómeno se denomina pérdida de inserción. Los filtros activos incorporan un amplificador energizado para compensar la pérdida de inserción del filtro y, en determinadas ocasiones, incluso proporcionar amplificación de señal. Algunos tipos de filtros únicamente pueden construirse mediante componentes activos.

Los filtros pasivos estructurados con inductores y capacitores se denominan filtros LC. No obstante, existen otras modalidades de filtros pasivos. A modo de ejemplo, los filtros mecánicos que emplean elementos internos como discos y varillas que vibran en las frecuencias de interés se utilizan como filtros de FI del receptor. Los filtros de cavidad aprovechan las características resonantes de un tubo o caja conductora para funcionar como filtro y se implementan en duplexores repetidores debido a su pérdida extremadamente reducida y su precisa sintonización.

Los filtros se categorizan en los grupos generales representados en la Figura 143. Un filtro paso bajo es aquel en el cual todas las frecuencias inferiores a la frecuencia de corte (f_{co} , punto donde la potencia de la señal de salida equivale a la mitad de la señal de entrada) transitan con mínima o nula atenuación. Por encima de la frecuencia de corte, la atenuación generalmente se incrementa proporcionalmente con la frecuencia. Un filtro paso alto representa el escenario inverso; las señales circulan por encima de la frecuencia de corte y se atenúan por debajo. El intervalo de frecuencias que transita se denomina banda de paso y el rango que se atenúa, banda de rechazo.

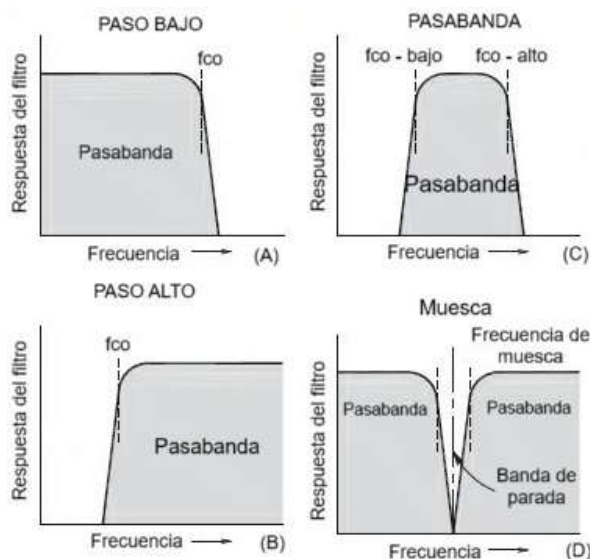


Figura 143. Clasificación de filtros. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un filtro pasa banda presenta una frecuencia límite superior e inferior. Las señales comprendidas entre dichas frecuencias de corte logran atravesar el filtro, mientras que aquellas ubicadas fuera de la banda de tránsito experimentan una reducción de su intensidad. El filtro supresor de banda constituye el complemento opuesto, atenuando las señales en el rango de frecuencias comprendido entre los puntos de corte. Cuando el intervalo de supresión resulta extremadamente reducido, se denomina filtro de muesca.

4.17.3 Diseño de filtros

La configuración de filtros emplea metodologías fundamentadas en determinadas ecuaciones matemáticas que describen sus propiedades intrínsecas.

Probablemente se haya familiarizado con filtros denominados Butterworth, Chebyshev o elípticos, nomenclatura que hace referencia a la familia de expresiones matemáticas utilizadas en su concepción. Cada tipología de ecuación genera filtros con características diferenciales, según se detallará a continuación.

Estos tres tipos de filtros representan los más habituales en equipamiento especializado, si bien existen múltiples variantes adicionales. Mediante estas ecuaciones, resulta factible desarrollar un catálogo exhaustivo de filtros con propiedades diversas.

Previo al análisis de las distintas tipologías, conviene establecer la terminología empleada para describir su comportamiento. La Figura 144 ilustra las curvas de respuesta que evidencian el efecto del filtro sobre la amplitud de la señal en función de la frecuencia. El eje vertical incorpora unidades de decibelios que representan la relación entre la señal de salida y entrada; consecuentemente, valores de respuesta inferiores corresponden a una mayor atenuación señal. La frecuencia se incrementa de izquierda a derecha, por lo que todas las respuestas filtradas son paso bajo, reduciendo las frecuencias superiores al punto de corte, donde la respuesta del filtro alcanza -3 dB.

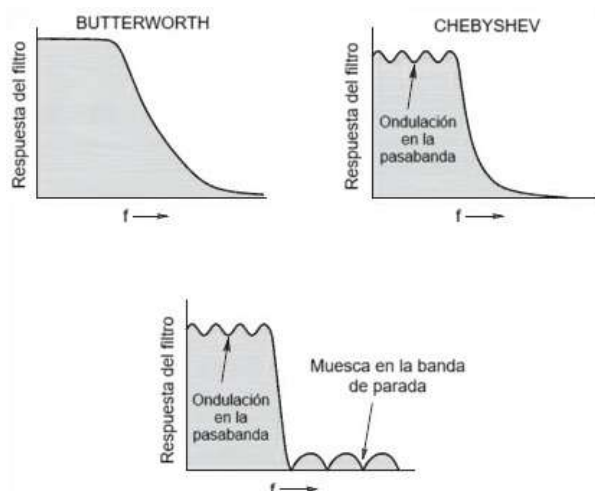


Figura 144. Curvas de respuesta que muestra el efecto del filtro. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Dos características complementarias describen la curva de respuesta: la transición de corte y la oscilación. El corte hace referencia a la pendiente mediante la cual la curva se desplaza desde la banda de tránsito hacia la banda de supresión a través de la región de transición. Un filtro con una curva pronunciada en dicha región se denomina “agudo”. La oscilación alude a las variaciones en la respuesta dentro de las bandas de tránsito y supresión. Una respuesta “plana” presenta oscilaciones mínimas.

La respuesta de fase de un filtro describe las variaciones en la fase de la señal entre entrada y salida a diferentes frecuencias. Habitualmente, conforme aumenta la atenuación de la señal, se incrementa el retardo de fase al atravesar el filtro. Una respuesta de fase lineal indica un cambio suave sin oscilaciones en diferentes frecuencias. Las oscilaciones en cualquiera de las bandas sugieren una respuesta no lineal, potencialmente generando distorsiones en las señales procesadas.

Los tres tipos de filtros tienen características que se complementan mutuamente.

- Butterworth: Tanto la banda de paso como la banda de rechazo presentan la máxima planitud posible sin oscilaciones. La transición de corte resulta suave, aunque no pronunciada. Los filtros Butterworth se implementan cuando es fundamental modificar gradualmente la respuesta de fase para minimizar la distorsión de la señal.
- Chebyshev: La banda de paso exhibe fluctuaciones variables en su amplitud, sacrificando la uniformidad por una transición de corte más definida. Los filtros Chebyshev se emplean cuando resulta prioritario contar con un filtro preciso con atenuación constante en la banda de rechazo, por encima de preservar la fase de la señal en la banda de paso.
- Elíptico: El corte presenta la mayor pronunciación entre los tres tipos de filtros, generando oscilaciones tanto en la banda de paso como en la banda de rechazo. Los filtros elípticos se utilizan cuando la característica primordial es la nitidez del corte. Las muescas en la banda de rechazo se posicionan en frecuencias específicas para optimizar la precisión del corte.

Los filtros paso banda, elimina banda y de rechazo también se distinguen por su ancho de banda, definido como la diferencia de frecuencia entre los puntos de corte del filtro u otras frecuencias con niveles específicos de atenuación. Al seleccionar un filtro para una señal determinada, es fundamental que los anchos de banda del filtro y la señal sean congruentes.

El filtro de rechazo, diseñado para eliminar una frecuencia específica (o un rango estrecho de frecuencias), y los filtros elimina banda se caracterizan por una profundidad de respuesta en decibelios, donde valores superiores indican un mayor rechazo en la frecuencia requerida.

Los filtros también poseen un factor de forma que compara el ancho de banda de frecuencia en dos niveles de atenuación. En equipos de radioaficionado, el factor de forma representa la relación entre la respuesta del filtro en los puntos de -6 dB y -60 dB. Por ejemplo, un filtro con un ancho de banda de -6 dB de 1,8 kHz y un ancho de banda de -60 dB de 5,4 kHz presenta un factor de forma de -6 a -60 dB de $1,8/5,4 = 3,0$ a 1. Las secciones de la curva de respuesta de un filtro paso banda fuera de la banda de paso se denominan faldones del filtro. Cuanto más cercano sea el factor de forma a 1,0, más agudo será su corte y más pronunciados sus faldones. Valores inferiores del factor de forma indican que el filtro posee un mayor rechazo de señales no deseadas fuera de su banda de paso, como en un canal adyacente.

4.17.4 Filtros de cristal

La etapa de FI de un receptor superheterodino analógico precisa de filtros de paso de banda de elevada calidad para garantizar la separación de una señal entre múltiples señales presentes en el espectro.

Estos filtros no pueden implementarse mediante componentes individuales como inductores y capacitores. Los filtros que incorporan cristales piezoeléctricos de cuarzo (previamente abordados en la sección de osciladores) pueden ofrecer las características de alto factor de calidad y reducido ancho de banda requeridas. Un receptor híbrido analógico-DSP podría emplear filtros de techo paso banda para impedir que señales intensas fuera del intervalo deseado deterioren el rendimiento del dispositivo receptor.

Aunque resulta factible utilizar cristales individuales como elementos de filtrado, la práctica habitual consiste en interconectar dos o más unidades en diversas configuraciones para generar la respuesta específica. Los filtros de red cristalina o de escalera pueden proporcionar un filtrado de ancho de banda reducido en frecuencias superiores a 500 kHz, presentes en los circuitos de procesamiento de señal de un transceptor. A modo de ejemplo, los transmisores analógicos de SSB implementan filtros de escalera de cristal tras el modulador balanceado para atenuar exclusivamente la banda lateral no deseada del par de bandas laterales próximas.

La Figura 145 ilustra un filtro con cristales en una configuración denominada semirretícula. En esta disposición, los cristales Y1 y Y2 operan en frecuencias diferenciadas. El ancho de banda total del filtro de semirretícula cristalino equivale aproximadamente de 1 a 1,5 veces la separación de frecuencias de los cristales. Cuanto más próximas resulten las frecuencias cristalinas, más reducido será el ancho de banda del filtro.

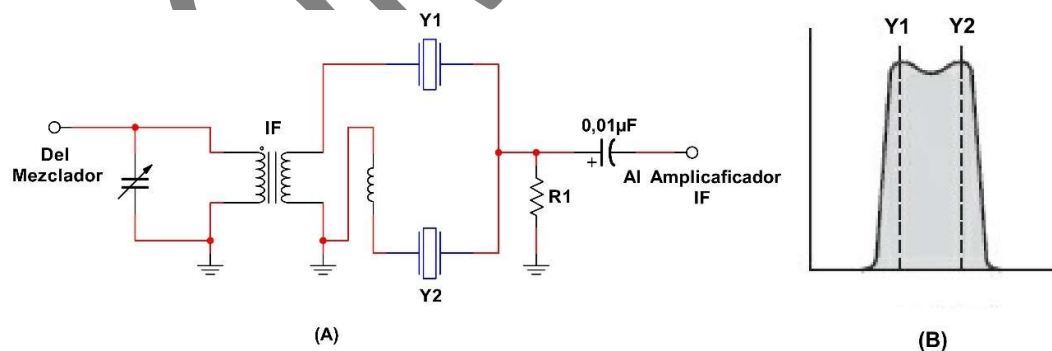


Figura 145. Filtro con cristales configuración semirretícula. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Generalmente, un filtro cristalino presenta un ancho de banda estrecho y una respuesta pronunciada, según se aprecia en (B). El ancho de banda y la morfología de respuesta de los filtros cristalinos dependen de sus frecuencias relativas.

El ancho de banda típico de un filtro cristalino para señales de SSB se sitúa en 2,4 kHz en los puntos de -6 dB. Para aplicaciones en CW, los filtros cristalinos habitualmente contemplan anchos de banda entre 250 y 500 Hz.

4.17.5 Filtros activos

Un filtro activo emplea un amplificador para generar su característica de respuesta en frecuencia. Generalmente, los filtros LC pasivos que incorporan elementos inductivos y capacitivos poseen una respuesta en frecuencia establecida y experimentan pérdida de inserción. Los filtros LC tienden a ser físicamente más voluminosos y de mayor masa en comparación con sus equivalentes activos. Los filtros activos exhiben diversas ventajas sobre los filtros LC en frecuencias audibles. Ofrecen amplificación y excelentes propiedades de selección de frecuencia. No precisan la utilización de inductores y pueden ajustarse con precisión a una frecuencia de diseño específica mediante un potenciómetro.

Los amplificadores operacionales se emplean frecuentemente para construir un filtro activo, dado que la ganancia y la respuesta en frecuencia del filtro pueden controlarse mediante algunas resistencias y capacitores conectados externamente al amplificador operacional. La implementación de filtros activos presenta ciertas desventajas, además de requerir una fuente de alimentación. Los amplificadores operacionales de bajo costo restringen la frecuencia superior útil a unos cuantos cientos de kilohercios. Su oscilación de tensión de salida debe ser inferior al voltaje de alimentación de CD. Las señales de entrada intensas fuera de banda pueden saturar el amplificador operacional y distorsionar la señal de salida. El amplificador operacional puede incorporar cierto nivel de ruido a las señales, lo que resulta en una relación señal-ruido inferior a la que se obtendría con un filtro LC.

La Figura 146 ilustra un filtro RC activo simple. Los valores de los componentes y la configuración del circuito corresponden a un filtro pasabanda adecuado para CW. Los filtros activos únicamente son compatibles con señales de baja potencia en audio y con un rango de RF muy reducido. Su aplicación principal en radioafición es como filtros de audio para receptores, proporcionando mayor selectividad. Un filtro RC bien diseñado no solo contribuye a disminuir las interferencias (QRM,) sino que también mejora la relación señal-ruido al reducir el ruido no deseado de alta y baja frecuencia.

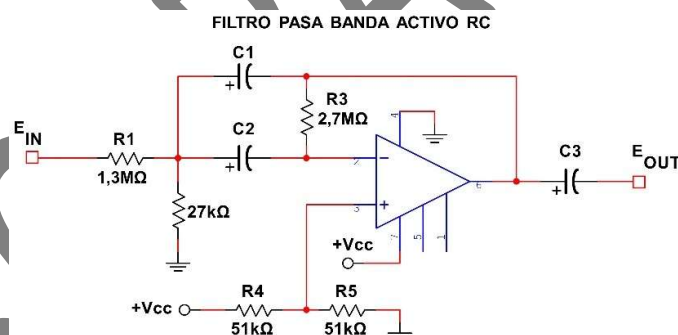


Figura 146. Filtro RC activo simple. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El esquema de filtrado de la Figura 146 constituye un filtro de banda intermedia de una única etapa (una etapa hace referencia a un circuito que ejecuta una función de filtrado específica). Las diferentes etapas del filtro pueden interconectarse en configuración secuencial para incrementar su selectividad. Es posible emplear una o dos etapas como filtros de banda intermedia o de baja frecuencia para perfeccionar las propiedades espectrales del canal acústico durante la recepción en SSB o AM. Habitualmente, se concatenan hasta cuatro secciones de filtrado para conseguir selectividad en la recepción de CW o RTTY. Cuantas más etapas de filtrado se incorporen, dentro de límites prácticos, más abruptas resultarán las pendientes del filtro.

Para determinar los parámetros de los componentes de un filtro específico, inicialmente se deben establecer las características del filtro de banda intermedia: el factor de calidad Q deseado (relación entre frecuencia central y anchura de banda), la ganancia de tensión (AV) y la frecuencia central (f_0). Los valores de los componentes del circuito se calcularon considerando una $f_0 = 900$ Hz, una AV de 1 y un factor Q de 5. Estos representan valores típicos de AV y Q para filtros de esta naturaleza. Ambos pueden incrementarse en una única etapa, aunque resulta

más conveniente restringir la ganancia a 2 o menos y limitar el Q a no más de 5 para prevenir oscilaciones indeseadas del filtro e inestabilidad acústica. La oscilación, fenómeno en el cual las vibraciones persisten más allá de la duración de la señal original, puede constituir un problema en circuitos de alta ganancia o con bandas de paso muy estrechas.

4.17.6 Filtros para procesamiento digital de señales (DSP)

El procesamiento digital de señales ofrece múltiples ventajas para el filtrado. La tecnología DSP permite generar una serie de filtros que resultarían poco viables o imposibles de construir mediante componentes físicos. Por ejemplo, los filtros con transiciones espectrales extremadamente pronunciadas requerirían componentes de precisión costosos y un número de etapas impracticable para su implementación con filtros activos. Sin embargo, estos resultan relativamente sencillos de construir mediante técnicas DSP.

La limitación de los filtros DSP radica en el equipamiento computacional necesario para su implementación. No obstante, modificar las características del filtro se reduce a una simple alteración del programa. De hecho, esto genera aplicaciones innovadoras, ya que el programa puede responder diferencialmente ante distintos tipos de señales o condiciones. Este fenómeno se denomina procesamiento adaptativo.

Un filtro adaptativo puede resultar útil para suprimir ruido parásito de una señal SSB recibida, por ejemplo. Un filtro de rechazo adaptativo o automático podría identificar autónomamente una señal interferente de portadora, bloquearla y eliminarla del audio recibido. Dicho filtro incluso podría rastrear la señal interferente mientras se desplaza a través de la banda de paso del receptor. Cualquier tipología de respuesta de filtro, sea pasiva o activa, puede implementarse en un filtro digital. Las restricciones de la técnica DSP residen primordialmente en la frecuencia de muestreo y la resolución con que puede muestrearse la señal de entrada, según se explicó en la sección precedente sobre DSP y SDR.

Los filtros digitales se clasifican según su respuesta a un pulso estrecho. Conforme un pulso se adelgaza, su espectro de frecuencia se expande progresivamente. Esto obedece a que se requieren componentes de frecuencia cada vez más elevadas para conformar los bordes nítidos del pulso. Si el pulso se adelgaza infinitamente, el espectro se torna plano desde cero hercios hasta el infinito. Un pulso infinitamente estrecho se denomina impulso y constituye un concepto sumamente útil por su espectro de frecuencia plano. La respuesta del filtro a un impulso se conoce como respuesta al impulso. A continuación, se describen las dos categorías principales de filtros DSP.

4.17.6.1 Filtros de respuesta de impulso finita (FIR)

Un filtro de respuesta de impulso finita (FIR, por sus siglas en inglés) constituye un sistema de procesamiento cuya respuesta de impulso concluye en un intervalo temporal determinado. Es fundamental señalar que los filtros analógicos presentan una respuesta de impulso perpetua; su salida, en el ámbito teórico, resulta indefinida. Incluso la señal de salida de un filtro paso bajo RC elemental decrece de manera exponencial hacia el valor cero, aunque teóricamente nunca lo alcanza completamente. En contraste, la respuesta de impulso de un filtro FIR se torna exactamente nula en un momento específico después de recibir el impulso y permanece así indefinidamente (o al menos hasta la recepción de otro impulso).

La Figura 147 ilustra el diagrama de bloques de un filtro FIR. La señal de entrada se almacena en un registro de desplazamiento. Cada bloque denominado "Retardo" representa un retraso de un intervalo de muestreo. En cada instante de muestreo, la señal se desplaza un registro hacia la derecha. Cada salida de cada bloque de retardo incremental se denomina toma.

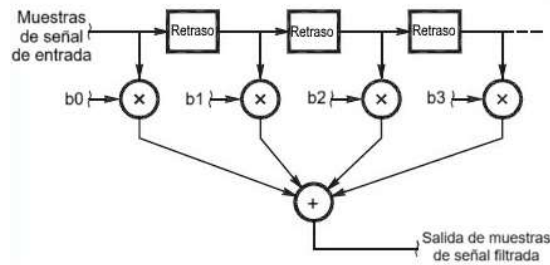


Figura 147. Diagrama de bloques filtro FIR. (Adaptado de (American Radio Relay League, 2020))

Cada registro alimenta un multiplicador. Los valores mediante los cuales se multiplica la señal de cada toma se denominan coeficientes de filtro. Las salidas resultantes de los multiplicadores se agregan para generar la salida del filtro. La combinación del número de tomas y los valores de los coeficientes de filtro constituye el algoritmo del filtro. Para una señal de entrada compuesta por un único impulso, el registro de desplazamiento provocará que todas las salidas de las tomas sean nulas, de modo que la salida del filtro también lo será. Por consiguiente, se ha creado un filtro con respuesta de impulso finito.

Cuanto mayor sea la cantidad de tomas, mayor será la precisión con la que se podrá calcular la salida del filtro. Esto posibilita implementar filtros con una caída de tensión extremadamente pronunciada y un ancho de banda reducido sin la oscilación ni la distorsión de un filtro analógico equivalente. La desventaja radica en que cada toma requiere un retardo de un intervalo de muestreo, por lo que un número superior de tomas genera un mayor retraso mientras la señal transita por el filtro.

4.17.6.2 Filtros de respuesta a impulsos infinitos (IIR)

Un filtro de respuesta a impulsos infinitos (IIR, por sus siglas en inglés) constituye un sistema de procesamiento con una característica de respuesta prolongada e indeterminada. Esta particularidad surge de la presencia de circuitos de retroalimentación y avanza en su estructura interna, tal como se representa en la Figura 148. Al introducir un impulso en su entrada, teóricamente la señal de salida nunca alcanzará una extinción completa, comportándose de manera similar a un filtro analógico convencional. En la realidad práctica, la señal experimenta una atenuación hasta situarse por debajo del umbral del bit menos significativo dentro de la resolución del dispositivo.

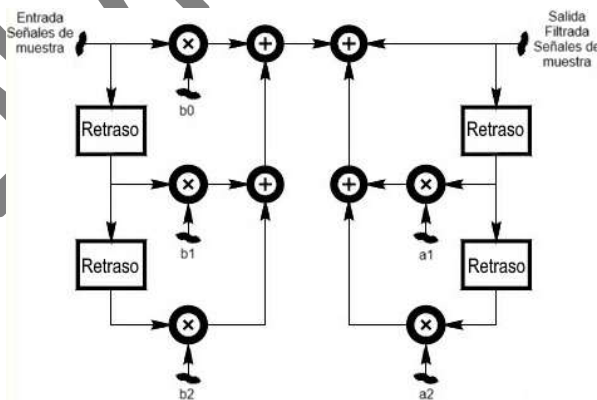


Figura 148. Filtro de respuesta a impulsos infinitos (IIR). (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

A diferencia de los filtros FIR simétricos, las componentes espectrales de la señal de entrada pueden experimentar retardos variables. Adicionalmente, estos filtros requieren una cantidad significativamente menor de elementos de procesamiento como sumadores y multiplicadores para obtener idénticas prestaciones en filtrado de bandas, lo que los convierte en una solución computacionalmente eficiente cuando se busca minimizar la carga de cálculo.

4.17.7 Adaptación de impedancia

Cuando los radioaficionados abordan los circuitos de adaptación de impedancia, generalmente se refieren a un dispositivo específico, una unidad de adaptación, empleado entre un transmisor o transceptor y el sistema de antena. Su función primordial consiste en transformar o acoplar la impedancia de entrada de la línea de alimentación con la salida del equipo transmisor, garantizando una carga resistiva apropiada. Estos dispositivos reciben diversas denominaciones como acopladores de antena, sintonizadores de antena y adaptadores de impedancia. Las redes de adaptación también se implementan en equipamiento radioeléctrico para conversión de impedancias.

En el contexto de un acoplador de antena, el circuito de adaptación resulta habitualmente necesario para convertir una impedancia de carga compleja —con componentes resistiva y reactiva— hacia un valor puramente resistivo, típicamente $50\ \Omega$. Para ejecutar esta transformación, el circuito neutraliza la parte reactiva de la impedancia y posteriormente transforma la componente resistiva remanente hacia el valor objetivo.

Una red de adaptación de impedancia efectúa la transformación mediante un intercambio energético entre elementos inductivos y capacitivos, modificando la relación entre tensión y corriente en los puntos de conexión de entrada y salida. Exceptuando pequeñas pérdidas resistivas, no se produce una disipación energética durante la transformación, sino únicamente una alteración en la relación tensión-corriente. Un análogo mecánico equivalente sería una caja de cambios, donde una combinación específica de velocidad y par motor se transforma en una configuración diferente.

REDES-L

La configuración más elemental de adaptación de impedancia LC corresponde a la red L. La Figura 149 ilustra sus cuatro configuraciones posibles, las cuales incorporan un elemento inductor y un elemento capacitivo (existen adicionalmente cuatro variantes que comprenden dos inductores o dos capacitores, aunque resultan menos frecuentes). La selección del circuito específico se determina mediante el análisis de la relación existente entre las dos impedancias que requieren adaptación y la factibilidad de implementar los valores de componentes necesarios.

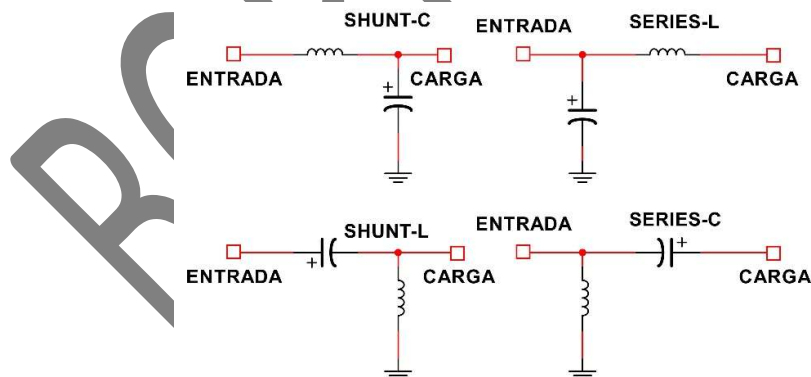


Figura 149. 4 variantes de red L. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La red L representada en la Figura 150 permitirá transformar a $50\ \Omega$ cualquier impedancia superior presente en el punto de entrada de la línea de alimentación (esto será viable siempre que se disponga de un conjunto ilimitado de valores para L y C). La mayoría de las antenas y líneas de alimentación presentan características de impedancia compatibles con una configuración de red L.

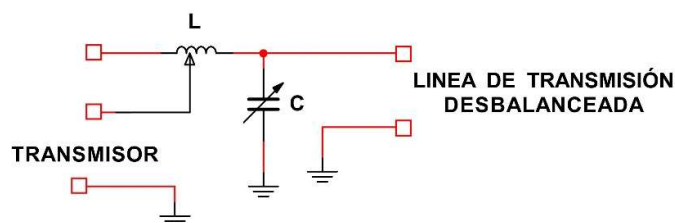


Figura 150. Red L que transforma impedancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Para optimizar esta configuración en L y conseguir un acoplamiento apropiado, el conexionado de la bobina se desplaza gradualmente, modificando C para conseguir el valor más bajo de ROE en cada etapa. Finalmente, se debería identificar una combinación que proporcione un coeficiente de ROE admisible. En caso de que la impedancia en el acceso de la línea de alimentación sea inferior a $50\ \Omega$, es posible invertir el circuito para modificar la relación de transformación.

¡Los dispositivos de adaptación constituidos exclusivamente por inductores y capacitores operan con idéntica eficacia en cualquier sentido!

La principal restricción de una red en L radica en que habitualmente se selecciona una combinación de inductor y capacitor para funcionar en una única banda de frecuencia, dado que una disposición LC específica presenta un rango de adaptación de impedancia relativamente reducido. Si la frecuencia de operación experimenta variaciones significativas, resultará necesario un conjunto diferente de componentes.

REDES PI Y PI-L

La mayoría de los amplificadores de válvulas emplean circuitos de acoplamiento de salida de red pi, como se ilustra en la Figura 151. La configuración más frecuente de esta red consiste en un capacitor en paralelo en la entrada y otro capacitor en paralelo en la salida. Un inductor se ubica en serie entre ambos capacitores. El circuito recibe la denominación de red pi porque su morfología recuerda a la letra griega pi (π) —con un poco de imaginación— disponiendo los dos capacitores verticalmente en los extremos del inductor horizontal. Mediante este circuito, es posible adaptar rangos muy amplios de impedancia de carga, proporcionando un mayor espectro de transformación de impedancia que la red L. La red pi puede considerarse como dos redes L consecutivas, con L1 dividido en dos inductores en serie.

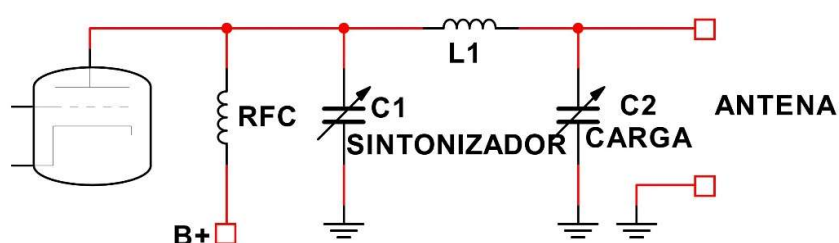


Figura 151. Red Pi. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Para ajustar la red pi en un amplificador de potencia y garantizar su funcionamiento óptimo, el capacitor de sintonización (C1) se calibra a la corriente de placa mínima y el capacitor de carga (C2) se configura a la corriente de placa máxima admisible. Los ajustes interactúan, por lo que este procedimiento generalmente requiere múltiples iteraciones para alcanzar la configuración más adecuada.

Gracias al inductor en serie y los capacitores en paralelo, este circuito opera como un filtro paso bajo para reducir armónicos, además de funcionar como dispositivo de adaptación de impedancia (una red pi con dos bobinas derivadas a tierra y un capacitor en serie constituiría un filtro paso alto y prácticamente nunca se utiliza como circuito de acoplamiento de salida para aficionados).

La supresión de armónicos mediante una red pi depende de la relación de transformación de impedancia y de la Q del circuito. Mientras que la Q de la red L está determinada por la relación de transformación de impedancia, la Q de la red pi puede controlarse seleccionando diferentes combinaciones de valores de componentes.

Si requiere mayor atenuación de armónicos en su transmisor, puede incorporar una red L en serie con una red pi para construir una red pi-L. La Figura 152 muestra una red pi y una red L conectadas en serie. Es habitual combinar los valores de C2 y C3 en un único capacitor variable, como se presenta en (B) como C4. Consecuentemente, la red pi-L consta de dos inductores en serie y dos capacitores en derivación. La red pi-L proporciona la mayor atenuación armónica de las tres redes de adaptación más utilizadas: las redes L, pi y pi-L.

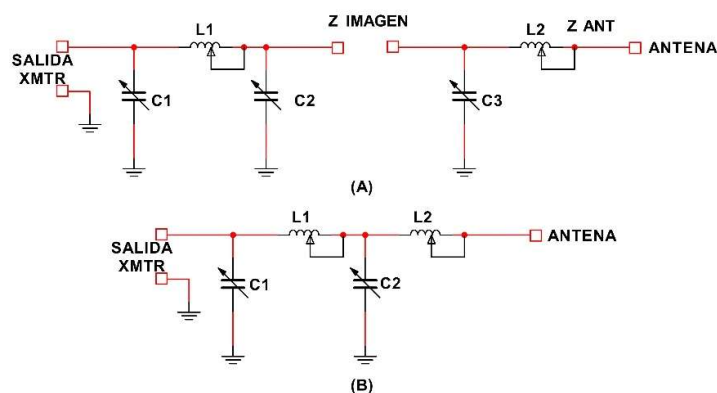


Figura 152. Red Pi y L conectadas en serie. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

REDES T

Una red en T, tal como se ilustra en la Figura 153, está compuesta por un par de capacitores dispuestos en serie con el cable de señal y un inductor ubicado en paralelo, o en derivación, conectado a tierra entre dichos elementos. Adicionalmente, esta configuración puede interpretarse como un par de redes en L, según se aprecia en la figura.

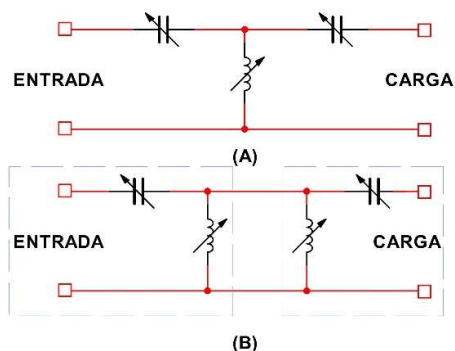


Figura 153. Red T. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Este dispositivo se emplea frecuentemente en equipamiento destinado al acoplamiento de antenas, ya que los capacitores en serie y el inductor en derivación presentan pérdidas más reducidas comparadas con una red pi.

No obstante, aunque esta tipología de red en T permite transformar un amplio espectro de impedancias, simultáneamente funciona como un filtro paso alto y proporciona un rechazo armónico limitado.

4.18 Fuentes De Poder

Prácticamente la totalidad de los artefactos electrónicos precisan algún tipo de fuente energética. Dicha fuente debe suministrar las tensiones requeridas cuando el aparato está operativo y demanda una corriente específica. La tensión de salida de la mayoría de las fuentes de alimentación simples, como baterías o circuitos rectificadores elementales, experimenta una variación inversamente proporcional a la corriente de carga. Cuando el dispositivo comienza a consumir mayor corriente, la tensión proporcionada experimentará una disminución. Adicionalmente, el comportamiento de la mayoría de los circuitos se modifica al alterarse la tensión de la fuente de alimentación. Por esta razón, la fuente de alimentación de casi todos los dispositivos electrónicos incorpora un circuito regulador de tensión. El objetivo de este circuito consiste en estabilizar la tensión o la corriente de salida de la fuente de alimentación bajo condiciones de carga variables.

4.18.1 Reguladores de Voltaje Lineales

Los reguladores de voltaje lineales representan una categoría significativa de reguladores de tensión. En estos circuitos, la regulación se obtiene modificando la conducción de un elemento de control en proporción directa a la corriente de carga. La conducción del elemento de control se ajusta para mantener la tensión de salida en un nivel constante.

4.18.2 Reguladores en Derivación y en Serie

En los circuitos reguladores con diodo Zener, el elemento de control es un diodo Zener (D1) que altera la corriente a través de una resistencia fija (R1), según se ilustra en la Figura 154. Dado que la tensión de ruptura inversa del diodo Zener resulta relativamente constante, las variaciones de la corriente de carga no alteran la tensión de salida regulada, siempre que circule suficiente corriente a través del diodo Zener. Puesto que el diodo Zener controla la tensión de salida extrayendo corriente de la fuente de alimentación en paralelo con la carga, se denomina regulador en derivación. Los reguladores en derivación resultan más útiles cuando una carga constante en la fuente de tensión de entrada produce una tensión de salida constante.

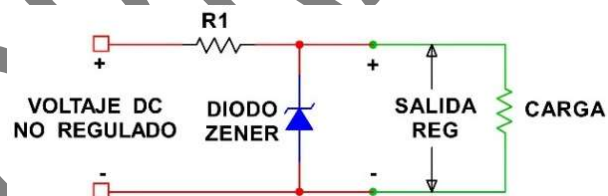


Figura 154. Circuito regulador con diodo zener. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La Figura 155 ilustra un prototipo de circuito regulador lineal en configuración serie. El componente de control consiste en un transistor de paso (Q1) cuya corriente en la base es gestionada por un amplificador de error. Este amplificador compara una porción de la tensión de salida con la tensión de referencia y modifica la corriente en la base del transistor de paso hasta lograr que la tensión de salida alcance el valor establecido. Mediante la modulación de la corriente directa en la base del transistor, la corriente de salida colector-emisor suministrada a la carga puede ajustarse según sea preciso para mantener una tensión de salida estable.

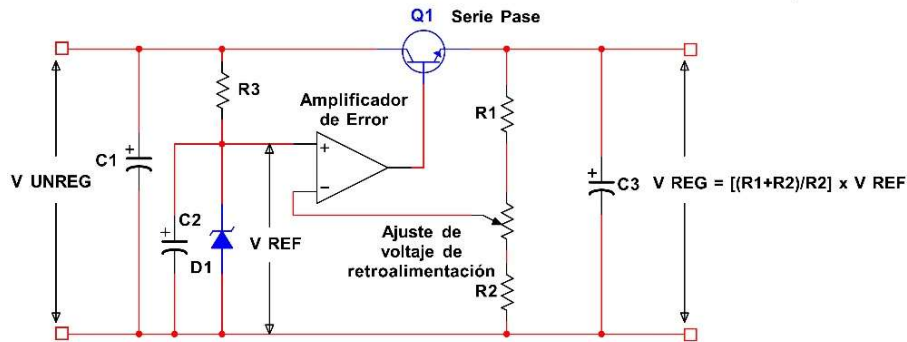


Figura 155. Circuito regulador lineal en serie. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un regulador en serie requiere adicionalmente una caída de tensión mínima en el elemento de paso para poder responder a las variaciones en la corriente de carga y preservar una tensión de salida constante. Cuando la tensión de entrada al regulador resulta insuficiente, este no podrá proporcionar la corriente de carga necesaria al elemento de paso, provocando que la tensión de salida descienda por debajo del valor regulado. La tensión mínima de entrada a salida representa la tensión de caída del regulador. El divisor resistivo de salida compuesto por R1, R2 y el potenciómetro genera una muestra de la tensión de salida y aplica una carga marginal al regulador de manera permanente. C1 filtra la tensión de entrada no regulada. Este capacitor habitualmente corresponde al capacitor de filtro de salida del rectificador. La referencia de tensión, generalmente un diodo Zener (D1), como se representa en la figura, proporciona una referencia estable para contrastar la tensión de salida con el valor deseado o punto de ajuste. R3 suministra corriente al diodo Zener. C2 a través del diodo Zener sirve para mitigar el zumbido, la ondulación y el ruido de la salida del rectificador alrededor de la referencia de voltaje. C3 a través de los terminales de salida previene que el regulador oscile si la carga se elimina o resulta insignificante.

4.18.3 Eficiencia y Disipación de Potencia

Como en cualquier sistema, la eficiencia de los reguladores de tensión se determina mediante el siguiente cálculo:

$$Eficiencia(\%) = 100\% * \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$$

En realidad, los reguladores en serie generan “resistencias inteligentes” cuya magnitud se ajusta dinámicamente para producir la caída de tensión necesaria, garantizando una tensión de salida estable. Consecuentemente, también liberan potencia de manera similar a una resistencia, cuantificada al multiplicar la diferencia de tensión a través del regulador por la corriente o carga de salida.

$$P_{DISS} = (V_{IN} - V_{OUT}) * I_{OUT}$$

Tanto los reguladores en serie como los de derivación eliminan una porción considerable de la potencia de entrada de la fuente en forma de calor para mantener una tensión de salida constante.

No obstante, dado que los reguladores en serie regulan directamente la corriente de carga, presentan una mayor eficiencia comparados con los reguladores de derivación.

4.18.4 Reguladores de Carga de Baterías

Para recargar baterías se emplea un dispositivo especializado de regulación de tensión, denominado controlador de carga. Cada tipología de batería demanda un controlador específico. El controlador suministra la corriente de recarga a la velocidad apropiada hasta alcanzar la

tensión objetivo. Posteriormente, proporciona la carga necesaria para mantener la batería en un estado de tensión óptimo. Esta característica resulta particularmente crucial si la batería se alimenta mediante una fuente energética intermitente o variable, como un sistema de energía eólica o solar. En caso de conectarse directamente la fuente de energía a la batería, podría provocarse una sobrecarga y consecuente deterioro.

Conforme los sistemas de energía alternativa incrementan su presencia, los controladores de carga de baterías se están transformando en un componente regulador de significativa relevancia.

4.18.4.1 Reguladores de Conmutación

La segunda categoría principal de reguladores de tensión corresponde al regulador de conmutación, donde el dispositivo de control se activa y desactiva electrónicamente. El regulador de conmutación opera almacenando energía en el campo magnético de un inductor o transformador y liberándola posteriormente a un circuito de filtro de salida. El ciclo operativo del elemento de control regula la velocidad de almacenamiento y liberación energética, ajustándose automáticamente para mantener una tensión de salida media constante.

Las frecuencias de conmutación superiores a decenas de kilohercios reducen las dimensiones del transformador o inductor de almacenamiento energético, así como de los capacitores requeridos para filtrar la tensión de salida. En una fuente de alimentación de CD a CA tipo inversor, el ahorro en peso y costo de componentes puede resultar significativo. Los reguladores de conmutación exhiben además una eficiencia sustancialmente superior comparados con reguladores lineales, lo que justifica su mayor complejidad y costo de diseño.

4.18.4.2 Técnicas de Alta Tensión

La construcción de fuentes de alimentación de alto voltaje exige consideraciones especiales, más allá de las prácticas convencionales de diseño y construcción utilizadas en fuentes de bajo voltaje. En general, debe garantizarse una separación física suficiente entre cables, conexiones, componentes y chasis para prevenir descargas eléctricas. Adicionalmente, la conexión en serie de componentes como cadenas de capacitores y resistencias debe realizarse considerando las tensiones de los elementos.

Los capacitores habitualmente se conectan en cadenas en serie para conformar un capacitor equivalente capaz de soportar la tensión aplicada. Para lograrlo, se deben incorporar resistencias de valor idéntico en cada capacitor de la cadena para distribuir uniformemente la tensión. Las resistencias de ecualización deben poseer un valor lo suficientemente reducido para compensar las diferencias en la resistencia de fuga de los capacitores, pero lo bastante elevado para no disipar una potencia excesiva. Estas resistencias también funcionan como elementos de descarga para los capacitores de filtro cuando se interrumpe la alimentación y aplicar una carga ligera y constante a la fuente de alimentación para evitar una tensión excesiva sin carga conectada.

Los cuerpos y carcasas de los capacitores en cadenas de alta tensión deben aislarse del chasis y entre sí mediante su montaje en paneles aislantes para prevenir la formación de arcos eléctricos en el chasis o en otros capacitores de la cadena.

Con el propósito de disminuir la tensión en los componentes electrónicos del transformador y rectificador de alta tensión pertenecientes a la fuente de alimentación durante su conexión, se implementa habitualmente una metodología de iniciación progresiva que permite la carga paulatina de los capacitores de filtrado. Este procedimiento técnico implica la incorporación de una resistencia en el circuito primario del transformador de potencia, cuya función específica consiste en restringir el flujo de corriente de entrada al sistema de alimentación. Transcurrido un breve lapso temporal de aproximadamente uno o dos segundos, el componente resistivo se desconecta mediante un mecanismo de relé, permitiendo que la fuente alcance su capacidad máxima de carga.

Resulta fundamental evitar los capacitores antiguos que contienen relleno oleoso. Estos pueden albergar bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés), sustancia química reconocida científicamente como un agente cancerígeno. Los capacitores de más reciente fabricación han eliminado completamente los PCB, incorporando además una etiqueta informativa en su estructura externa que lo certifica.

BORRADOR

Capítulo 5 Propagación, antenas y alimentadores

5.1 Propagación

Las ondas radioeléctricas se propagan desde un elemento transmisor en trayectoria rectilínea, salvo cuando experimentan fenómenos de reflexión o difracción durante su recorrido, de manera análoga a la propagación lumínica. Similar a las ondulaciones luminosas, la intensidad de una onda radioeléctrica disminuye proporcionalmente a su distancia desde el punto de emisión. Progresivamente, la señal se torna insuficientemente potente para ser captada, bien sea por su expansión excesiva o por procesos de absorción o dispersión en su trayecto. La distancia máxima de recepción de una transmisión radioeléctrica se denomina alcance.

Las ondas radioeléctricas pueden experimentar reflexión ante cualquier modificación súbita en su trayectoria, como al encontrarse con edificios, montañas o alteraciones atmosféricas. Los obstáculos, tales como edificaciones o elevaciones topográficas, generan zonas de sombra radioeléctrica, particularmente en frecuencias VHF y UHF. La masa vegetal también puede absorber ondas radioeléctricas en rangos VHF y UHF, lo que potencialmente deriva en un incremento del alcance durante la estación invernal. Las precipitaciones atmosféricas, como niebla o precipitaciones líquidas, pueden absorber ondas de microondas y UHF, aunque presentan una incidencia mínima en frecuencias HF y segmentos inferiores de VHF.

La Figura 156 ilustra cómo las ondas radioeléctricas pueden experimentar difracción al propagarse más allá de los bordes agudos de objetos de considerable dimensión. Este mecanismo de propagación se denomina difracción de filo de navaja.

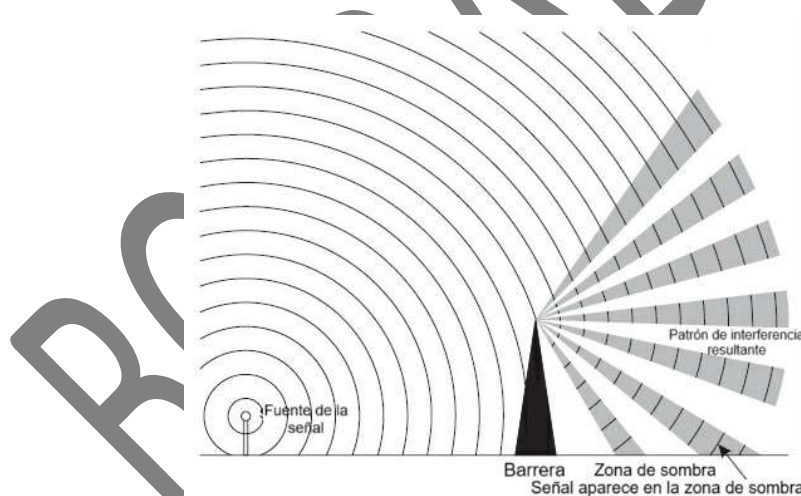


Figura 156. Difracción de las ondas de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

La desviación es otra modalidad de propagación correspondiente a: una curvatura progresiva de las ondulaciones radioeléctricas VHF y UHF en la atmósfera. Al desviar ligeramente las señales hacia la superficie terrestre, la refracción neutraliza la curvatura del planeta y posibilita que las señales en estas frecuencias sean recibidas más allá del horizonte visual.

Las transmisiones radioeléctricas que arriban a un receptor tras recorrer trayectorias diversas desde el emisor pueden generar interferencias si presentan desfases, ¡incluso anulándose completamente! Este fenómeno se denomina multitrayecto y puede provocar el debilitamiento y la distorsión de la señal. La propagación mediante trayectos múltiples provenientes de estaciones distantes origina un desvanecimiento irregular, aun cuando la recepción sea generalmente adecuada. Modificar la posición de la antena algunos metros puede evitar la zona donde ocurre

la cancelación. La reorientación del dispositivo receptor también puede contribuir al hacer que una de las señales interferentes resulte más intensa o más atenuada.

Dado que los "puntos ciegos" de los trayectos múltiples suelen distribuirse aproximadamente cada $1/2$ longitud de onda, las señales VHF o UHF de una estación en movimiento pueden experimentar una variación rápida en intensidad conocida como aleteo móvil o cercado de piquete.

La distorsión provocada por trayectos múltiples también puede generar que las señales de datos digitales VHF y UHF se reciban con una tasa de error superior, aunque la señal pueda ser robusta.

La propagación en y por encima de las frecuencias VHF asistida por variaciones atmosféricas se denomina propagación troposférica o simplemente "tropo". Variaciones como los frentes meteorológicos o las inversiones térmicas crean capas de aire contiguas con características distintivas. Las capas conforman estructuras denominadas conductos que pueden guiar incluso señales de microondas a grandes distancias. Tropo es utilizado regularmente por los aficionados para establecer contactos VHF y UHF que de otra manera resultarían imposibles por la propagación de línea visual. Los contactos de Tropo en trayectos superiores a 300 millas no resultan infrecuentes.

5.1.1 La ionosfera y sus capas

Por encima de la atmósfera inferior, caracterizada por una densidad atmosférica relativamente alta, y por debajo del espacio exterior, carente de masa gaseosa, se localiza la ionosfera. En esta región, que abarca desde los 48 hasta los 418 kilómetros sobre la superficie terrestre, los átomos de oxígeno y nitrógeno gaseoso quedan expuestos a la intensa radiación ultravioleta (UV) solar. Esta radiación posee la energía suficiente para generar iones con carga positiva a partir de los átomos gaseosos, mediante la eliminación de electrones con carga negativa. Los iones y electrones resultantes confieren a la ionosfera una conductividad débil.

La ionosfera se estructura en capas como se muestra en la Figura 157 identificadas como D, E, F1 y F2, siendo la capa D la más próxima a la superficie terrestre. Dependiendo de las condiciones diurnas o nocturnas y la intensidad de la radiación solar, estas capas pueden refractar (capas E, F1 y F2) o absorber (capas D y E) ondas radioeléctricas.

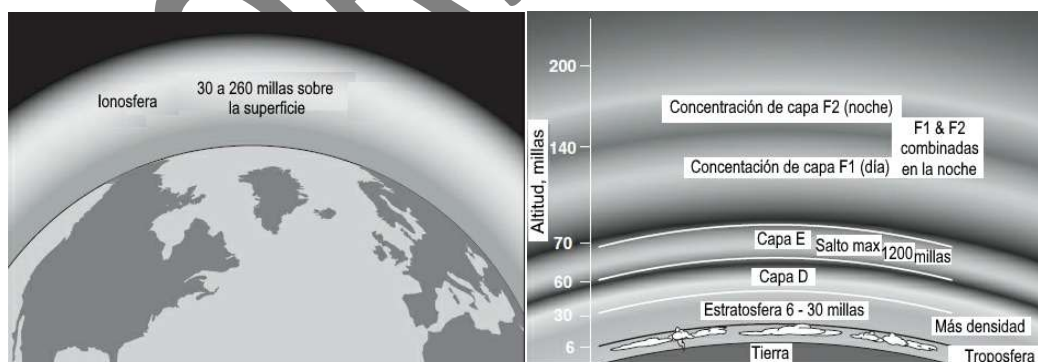


Figura 157. La ionosfera. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Las ondas radioeléctricas pueden ser completamente desviadas hacia la Tierra mediante refracción en los estratos E y F de la ionosfera, simulando un efecto de reflejo. Este fenómeno se denomina propagación de ondas celestes o salto. La capacidad de la ionosfera para refractar o curvar las ondas radioeléctricas también está condicionada por la frecuencia de la onda. Las ondas con frecuencias más elevadas experimentan una desviación menor comparadas con aquellas de frecuencias inferiores.

Considerando que la superficie terrestre también posee propiedades conductoras, igualmente puede reflejar ondas radioeléctricas. Esto implica que una onda radioeléctrica puede rebotar entre la ionosfera y el terreno en múltiples ocasiones. Cada reflexión desde la ionosfera se

identifica como lúpulo. Las reflexiones ionosféricas posibilitan que las ondas radioeléctricas sean recibidas a cientos o miles de kilómetros de distancia.

La propagación ionosférica de largo alcance constituye el método más habitual mediante el cual los radioaficionados establecen comunicaciones a gran distancia en las bandas de ondas decamétricas. Como se representa en la Figura 158, en VHF y frecuencias superiores, las ondas generalmente atraviesan la ionosfera con una mínima curvatura y se dispersan en el espacio. Esta circunstancia explica por qué las señales UHF de estaciones más allá del horizonte radioeléctrico raramente se perciben sin la retransmisión mediante un repetidor.

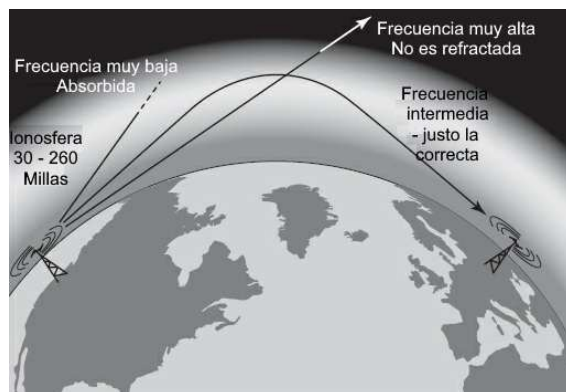


Figura 158. Propagación ionosférica para comunicación a larga distancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

A medida que se incrementa la actividad de las manchas solares, los rayos ultravioleta se tornan más potentes. Este fenómeno provoca un incremento en el nivel máximo de ionización dentro de la ionosfera, lo que eleva la frecuencia más alta para que las señales retornen a la Tierra a través de la trayectoria entre estaciones.

Durante los períodos de máxima actividad solar, es altamente probable que las bandas superiores de HF, como la de 10 metros, permanezcan operativas desde el alba hasta poco después del ocaso. En ocasiones, las capas F pueden incluso reflejar señales de 6 metros (50 MHz) en el punto culminante del ciclo de manchas solares.

En todas las etapas del ciclo solar, las zonas de la capa E de la ionosfera pueden ionizarse lo suficiente para reflejar señales VHF y UHF de vuelta a la superficie terrestre. Este fenómeno se denomina propagación esporádica E o ES (o E-skip) y resulta más frecuente durante los meses de inicios estivales y mediados invernales en bandas de 10, 6 y eventualmente 2 metros.

Junto con la propagación esporádica E, la ionosfera contiene otros reflectores de ondas radioeléctricas. La aurora boreal constituye el resplandor de delgadas láminas de partículas electrizadas que circulan a través de las capas inferiores de la ionosfera. Esas láminas delgadas ubicadas a 80 kilómetros o más sobre la superficie terrestre reflejan las señales VHF. Debido a la constante mutación de la aurora, las señales reflejadas experimentan variaciones rápidas de intensidad y frecuentemente se distorsionan.

La región E de la ionosfera también alberga rastros meteóricos. Un meteorito que se desintegra en la atmósfera superior genera un meteoro con un rastro de gas ionizado que perdura hasta varios segundos y puede reflejar señales radioeléctricas. Las señales que rebotan en estos rastros ionizados se denominan propagación por dispersión de meteoros. La banda más idónea para la dispersión meteórica es de 6 metros, permitiendo establecer comunicaciones a distancias de hasta 1920 a 2414 kilómetros.

5.1.2 Propagación en ondas decamétricas

En prácticamente la totalidad de los escenarios, las señales de HF efectúan su trayecto entre estaciones, bien sea desplazándose a través de la superficie terrestre (onda de fondo) o retornando a la Tierra tras interactuar con las capas superiores de la ionosfera (onda celeste o salto). Las variaciones de frecuencia entre la banda de radioaficionados de menor intensidad (1,8 MHz) y la banda de HF más elevada (28 MHz) provocan que el comportamiento de estos modos de propagación sea sustancialmente diferente en todo el espectro de HF.

PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE

La trayectoria de las ondas de cualquier naturaleza puede modificarse tanto mediante procesos de difracción como de refracción. La difracción se genera a través de la estructuración y potenciación de frentes ondulatorios después de que la onda radioeléctrica encuentra esquinas o perímetros de una superficie reflectante. La refracción constituye una flexión progresiva de la onda originada por modificaciones en la velocidad de propagación del medio por el cual transita la onda.

Existe una modalidad específica de difracción que impacta primordialmente las ondas radioeléctricas con polarización vertical en HF y frecuencias inferiores. Esta tipología de difracción acontece cuando la porción inferior de la onda experimenta una disminución energética debido a corrientes inducidas en el terreno. Este fenómeno ralentiza la sección inferior de la onda, provocando que la totalidad de la onda se incline sutilmente hacia adelante, siguiendo la curvatura terrestre.

Dicha inclinación genera como consecuencia la propagación de la onda terrestre, permitiendo que las señales de baja frecuencia sean perceptibles a distancias considerablemente más allá del horizonte visual. Aunque el término frecuentemente se aplica a comunicaciones de corto alcance, el mecanismo intrínseco resulta exclusivo de señales con longitudes ondulatorias más extensas. La propagación de onda de superficie resulta más significativa en bandas de ondas kilométricas, MF (radiodifusión de AM, 160 metros) y en bandas inferiores de HF (80 metros). Las distancias operativas de comunicación mediante onda de superficie en estas bandas de ondas hectométricas y decamétricas oscilan entre 50 y 100 millas.

La propagación de onda terrestre experimenta pérdidas porque la porción polarizada verticalmente del campo eléctrico de la onda que se extiende hacia el suelo es mayoritariamente absorbida. En la distancia, la señal que transita por la superficie terrestre se absorbe progresivamente hasta que deviene demasiado débil para ser recibida. Esta pérdida se incrementa significativamente con la frecuencia hasta alcanzar en 28 MHz (10 metros) un alcance máximo de onda terrestre de apenas algunas millas. La Figura 159 ilustra el rango típico de onda terrestre a diferentes frecuencias.

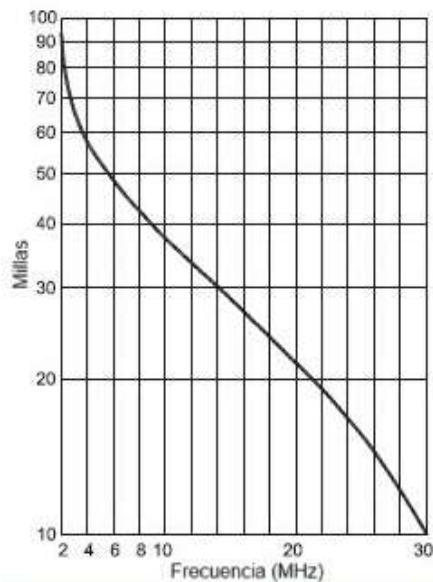


Figura 159. Ondas terrestres a diferentes frecuencias. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La transmisión mediante onda terrestre resulta más eficiente durante el periodo diurno a frecuencias de 1,8 MHz y 3,5 MHz, momento en que las atenuaciones en la capa ionosférica inferior imposibilitan la propagación por onda ionosférica. Las antenas con orientación vertical proporcionan resultados óptimos. Las pérdidas por ondas terrestres disminuyen significativamente en superficies de agua salada, mientras que se incrementan en terrenos secos y pedregosos.

Una metodología sencilla para observar los fenómenos de propagación de onda terrestre consiste en sintonizar emisoras de radiodifusión en la banda AM. Durante las horas diurnas, es posible recibir regularmente estaciones de elevada potencia ubicadas entre 160 y 240 kilómetros de distancia. No obstante, la recepción se interrumpe más allá de aproximadamente 320 kilómetros. En el periodo nocturno, cuando la propagación de ondas celestes se torna viable, comenzarán a captarse estaciones situadas a cientos de kilómetros. Naturalmente, las estaciones de transmisión AM de alta potencia generalmente implementan antenas verticales con sistemas de tierra excepcionales para irradiar señales robustas.

5.1.3 Propagación de ondas ionosféricas

Las señales que se desplazan hacia la ionosfera pueden experimentar refracción (curvatura) por el gas ionizado presente en las regiones E y F, retornando a la superficie terrestre a una distancia determinada. Este fenómeno de refracción ocurre porque la zona de gases ionizados provoca una ralentización de la onda radioeléctrica, provocando su curvatura. La refracción constituye principalmente un modo de propagación por debajo de VHF. Las señales que se alejan de la superficie terrestre se denominan ondas celestes. La trayectoria de una onda que regresa a la Tierra tras ser curvada por la ionosfera recibe el nombre de salto.

La distancia máxima de un salto para señales de radiofrecuencia de alta frecuencia a través de la capa F se estima aproximadamente en 4.023 kilómetros (el salto mediante la capa E puede extenderse hasta cerca de 2.414 kilómetros). La mayor parte de las comunicaciones en ondas decamétricas más allá de esa distancia se realizan mediante múltiples saltos ionosféricos donde la superficie terrestre refleja las señales de vuelta hacia la ionosfera para un nuevo salto. También resulta factible que las señales se reflejen entre las regiones E y F, o incluso múltiples veces dentro de la región F. Cuando la onda efectúa dos reflexiones consecutivas desde la ionosfera sin una reflexión intermedia desde el suelo, se denomina salto de cuerda. Evitar las reflexiones terrestres con pérdida implica que la señal será más intensa en el punto receptor del trayecto.

Diariamente se producen transformaciones significativas conforme la oscuridad se transmuta en luminosidad y viceversa. Los segmentos espectrales se expanden y contraen con celeridad, en ocasiones en lapsos mínimos. Al comprender los "fundamentos del segmento", es posible programar sus intervalos operativos y reaccionar ante las condiciones atmosféricas encontradas. Ilustrativamente, si se establecen comunicaciones de HF con estaciones europeas después del ocaso, pronto las señales en todo el segmento comenzarán a debilitarse. Cuando el segmento está próximo a su clausura, las señales empezarán a manifestar un rápido desvanecimiento que les otorga un sonido característico de oscilación. ¿Qué estrategias pueden implementarse para continuar estableciendo comunicaciones? Al comprender el mecanismo de propagación en ondas decamétricas, se comprenderá que la frecuencia máxima utilizable (MUF, por sus siglas en inglés) entre la estación y Europa está disminuyendo. Como respuesta, es recomendable migrar a un segmento de frecuencia inferior. El segmento de 160 metros sostiene la propagación de largo alcance óptimamente cuando la trayectoria completa permanece en penumbra. Este proceso se denomina "seguimiento de segmentos" y opera inversamente conforme el MUF se desplaza ascendentemente durante la mañana.

ONDAS ORDINARIAS Y EXTRAORDINARIAS

Un fenómeno fascinante acontece cuando una onda radioeléctrica ingresa a la ionosfera: se fragmenta en dos ondas polarizadas perpendicularmente entre sí. El campo eléctrico de una onda ordinaria (o-wave, por sus siglas en inglés) es paralelo al campo magnético terrestre. El campo eléctrico de una onda extraordinaria (x-wave, por sus siglas en inglés) es perpendicular al campo magnético terrestre. Estas ondas se desplazan a velocidades ligeramente distintas, generando una discrepancia de fase entre ambas. El resultado consiste en que una onda polarizada linealmente se polariza elípticamente. A frecuencias elevadas (10 MHz y superiores) ambas ondas recorren trayectorias prácticamente idénticas. No obstante, en los segmentos de 7 MHz e inferiores, las ondas pueden transitar por rutas sustancialmente divergentes y en direcciones marcadamente distintas.

Las investigaciones de propagación sugieren que las ondas radioeléctricas pueden propagarse ocasionalmente a cierta distancia a través de la región F2 superior de la ionosfera. En esta modalidad de propagación, una señal irradiada en un ángulo de elevación intermedio puede retornar a la superficie terrestre a una distancia superior comparada con una onda irradiada en un ángulo más reducido. Se postula que la onda de ángulo superior, denominada rayo de Pedersen, penetra hasta la región F2, alcanzando zonas más distantes que los rayos de ángulo inferior. En la región F2 menos densamente ionizada, el grado de refracción resulta menor, casi equiparando la curvatura de la propia región mientras circunda la Tierra. La Figura 160 ilustra cómo el rayo de Pedersen podría proporcionar propagación más allá de la distancia convencional de un único salto. La teoría del rayo de Pedersen encuentra respaldo en estudios de los intervalos de propagación y la intensidad de las señales que transitan completamente alrededor del globo terrestre. El tiempo requerido resulta significativamente menor al que sería necesario para saltar entre la Tierra y la ionosfera 10 o más veces durante una órbita terrestre.

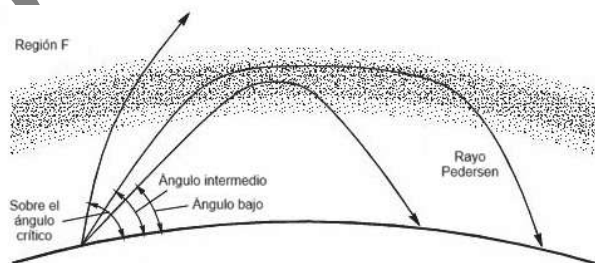


Figura 160. Propagación rayo de Pedersen. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

PREDICCIÓN DE LA PROPAGACIÓN

Se han elaborado modelos predictivos de propagación fundamentados en mediciones ionosféricas realizadas a lo largo de períodos anuales y ciclos completos de manchas solares. Dichos modelos han sido integrados en aplicaciones informáticas como VOACAP, diseñadas

para pronosticar la propagación de ondas decamétricas entre diferentes localizaciones. VOACAP se encuentra disponible como plataforma web en línea (www.voacap.com/prediction.html), permitiendo a los usuarios explorar sus propias interrogantes de propagación en cualquier momento. Estas herramientas demuestran que frecuentemente existen múltiples trayectorias que las ondas radioeléctricas pueden seguir durante su desplazamiento. Las ondas pueden refractarse entre estratos y en diversas direcciones antes de alcanzar su destino. La identificación de los posibles recorridos a través de la ionosfera que podría emprender una onda se denomina trazado de rayos. No obstante, la propagación en ondas decamétricas continúa siendo impredecible, independientemente de la sofisticación del modelo. ¡No existe alternativa a la transmisión directa para determinar su recepción!

Con este propósito, operan diversas redes de informes de propagación en línea, entre las que se incluyen WSPRnet (www.wsprnet.org/drupal/wsprnet/map) y PSKReporter (www.pskreporter.info/pskmap.html), las cuales rastrean los distintivos de llamada detectados durante transmisiones en WSPR, PSK, PSK31, CW y múltiples modos digitales. Estos recursos pueden proporcionar información de propagación en tiempo real para cualquier banda y región mundial.

REFLEXIÓN

El hecho de que la ionosfera sea un conductor débil le permite influir en las ondas radioeléctricas que la atraviesan doblándolas o refractándolas gradualmente, como se ilustra en la Figura 161. La capacidad de la ionosfera para curvar las ondas radioeléctricas depende de la intensidad de ionización de los gases de la región y de la frecuencia de la onda.

Cuanto mayor sea la ionización regional, más se doblará la onda. Cuanto más elevada sea la frecuencia de la onda, menos se dobla. De hecho, en VHF y UHF, las ondas prácticamente no se curvan y tienden a perderse en el espacio. (La propagación de dispersión, que se analiza posteriormente, constituye una excepción).

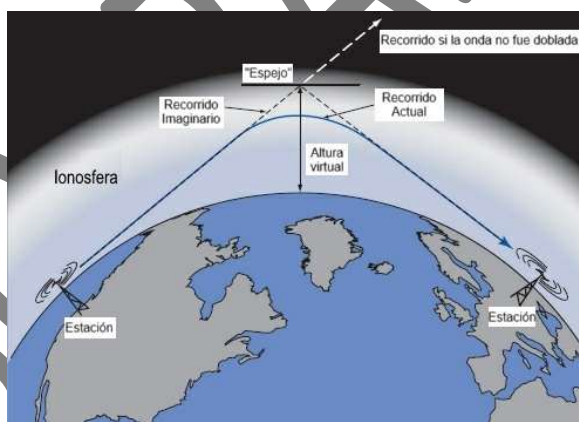


Figura 161. Refracción de las ondas de radio. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

En HF, las ondas radioeléctricas frecuentemente pueden curvarse de manera suficiente para retornar a la superficie terrestre, simulando un efecto de reflejo contra un supuesto espejo ubicado en la parte superior de la ionosfera. La Figura 161 muestra gráficamente cómo se determina la altura de este "espejo", denominada altura virtual de la región.

No obstante, es fundamental comprender que las ondas radioeléctricas experimentan en realidad un fenómeno de refracción al interactuar con la ionosfera. Cada interacción de la onda con la ionosfera se conceptualiza como un salto, mecanismo que posibilita la recepción de señales radioeléctricas a distancias que oscilan entre cientos y miles de kilómetros. Las señales captadas mediante este procedimiento se clasifican como onda ionosférica, y el proceso de propagación a través de la ionosfera recibe la denominación de salto.

La extensión del salto guarda una relación directa proporcional con la altura de la región desde donde se origina la reflexión. Las ondas que experimentan su reflejo desde la capa superior F2 generalmente recorren trayectorias de hasta 2.,500 millas antes de contactar nuevamente la superficie terrestre. Los lúpulos que utilizan la capa E presentan trayectorias más reducidas, alcanzando aproximadamente 1.,200 millas, consecuencia de su menor altura reflectante.

Determinadas combinaciones de frecuencia y niveles de ionización provocan una flexión marginal. En tales escenarios, la onda necesita emerger desde la superficie terrestre con un ángulo lo suficientemente reducido para que su curvatura permita su retorno. El ángulo máximo de emisión bajo el cual una onda puede ser reintegrada a la superficie terrestre se denomina ángulo crítico. Si la onda penetra la ionosfera con un ángulo más pronunciado, podría experimentar difracción, pero sin la intensidad requerida, perdiéndose irremediabilmente en el espacio, tal como ilustra la Figura 162. La configuración del ángulo crítico depende directamente de las condiciones ionosféricas y del espectro de frecuencia.

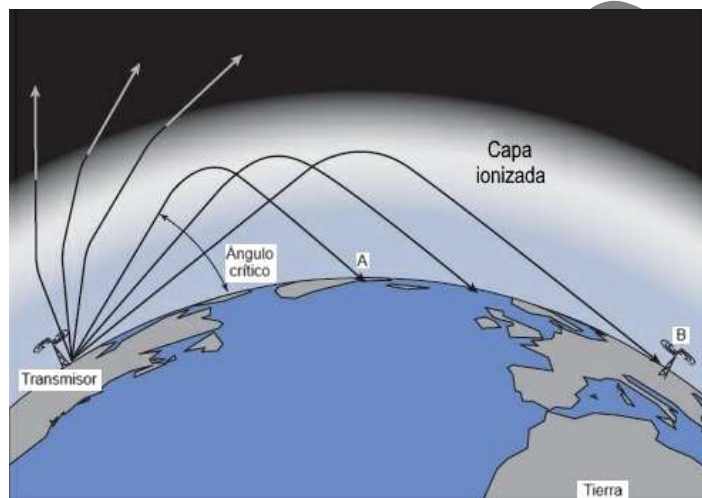


Figura 162. Ángulo crítico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

La compañera del ángulo crítico es la frecuencia crítica, definida como la frecuencia máxima en la cual una onda transmitida verticalmente será reflejada de vuelta a la superficie terrestre. La determinación de la frecuencia crítica mediante equipamiento de ionosonda (dispositivo radar especializado para evaluar parámetros ionosféricos) permite establecer la altitud de todas las regiones ionosféricas y contribuye a generar un diagnóstico diario sobre el estado y la dinámica de la ionosfera. (Una ionosonda constituye un dispositivo radar especializado para evaluar parámetros ionosféricos).

ABSORCIÓN Y RUIDO

La capa inferior de la ionosfera, denominada capa D, se ubica entre 56,3 y 96,6 km sobre la superficie terrestre. Esta capa se caracteriza por una densidad relativamente elevada en comparación con el resto de la ionosfera. Ello implica que los átomos y moléculas ionizados se encuentran más próximos y se recombinan con rapidez. Consecuentemente, la capa D únicamente existe durante la iluminación solar. Generada al amanecer y alcanzando su máxima intensidad próximo al mediodía local, la capa D se desvanece rápidamente tras la puesta del sol.

Cuando una onda en tránsito provoca el desplazamiento de electrones en la capa D, estos colisionan con otros electrones e iones con tal frecuencia que una proporción significativa de la energía ondulatoria se disipa en forma de calor. Este fenómeno recibe el nombre de absorción ionosférica. Cuanto mayor sea la longitud de onda radioeléctrica, más extenso será el desplazamiento electrónico y mayor la porción energética perdida como calor. Esto determina que la absorción elimine la propagación de ondas ionosféricas de largo alcance en las bandas de 1,8 y 3,5 MHz durante el día, especialmente en periodos de elevada actividad solar. Sin embargo, la propagación de onda ionosférica de incidencia vertical cercana (NVIS, por sus siglas en inglés) y onda terrestre permanecen utilizables durante las horas diurnas en estas bandas.

Las perturbaciones geomagnéticas y erupciones solares incrementan adicionalmente la absorción. Las interrupciones ionosféricas generadas por campos magnéticos variables provocan una mayor disipación energética en forma de calor. A medida que los índices A y K aumentan, también lo hace la absorción, particularmente en trayectorias polares que atraviesan zonas aurorales donde predomina el ingreso de partículas solares cargadas a la atmósfera terrestre. La intensa emisión de rayos X y radiación ultravioleta producida por una erupción solar intensifica la ionización atmosférica superior, aumentando la disipación de ondas radioeléctricas de baja frecuencia en el sector diurno terrestre frente al Sol. Durante una erupción solar, los niveles de ruido en bandas de HF se incrementan gradualmente mientras las señales se desvanecen. Los efectos persisten durante varias horas hasta que los niveles de ionización retornan a la normalidad.

El factor adverso para la propagación resulta ser la absorción. En las zonas D y E, las ondas que atraviesan el medio gaseoso más denso experimentan una absorción parcial, incluso durante su proceso de refracción. De hecho, la región D presenta limitaciones significativas en términos de refracción. En las bandas de HF inferiores a 10 MHz, correspondientes a transmisiones de AM, y en frecuencias más reducidas, la región D absorbe totalmente las ondas radioeléctricas durante el periodo diurno, impidiendo su retorno a la superficie terrestre hasta después del ocaso. Generalmente, la absorción se incrementa durante el día y cuando la radiación ultravioleta solar alcanza su máxima intensidad.

El ruido constituye otro elemento perjudicial para la propagación, ya que enmascara señales de baja intensidad. Su magnitud resulta considerablemente superior en frecuencias inferiores a VHF. Esto obedece a fenómenos tormentosos y otros procesos atmosféricos. Cuanto más reducida sea la frecuencia, más pronunciado se torna el ruido o "estática". El ruido atmosférico experimenta variaciones estacionales, siendo particularmente notable en las bandas HF de menor frecuencia durante el periodo estival, cuando su intensidad resulta más elevada.

5.1.4 Camino largo y camino corto

A medida que el profesional perfecciona su destreza en la interpretación y análisis de la propagación, irá descubriendo y aprovechando progresivamente los efectos de propagación poco convencionales y temporales. Entre estos fenómenos, destaca particularmente el trayecto extenso, donde las estaciones establecen comunicación a través de una ruta que transita por el camino más dilatado. No obstante, la mayoría de las conexiones se realizan mediante el trayecto más directo, que representa la trayectoria circular más breve entre estaciones.

Cuando la ionosfera en el trayecto directo no permite la propagación de señales, es posible que el trayecto extenso sí ofrezca condiciones de transmisión. La orientación del trayecto extenso se posiciona exactamente a 180 grados del rumbo correspondiente al trayecto directo, tal como se representa gráficamente en la Figura 163.

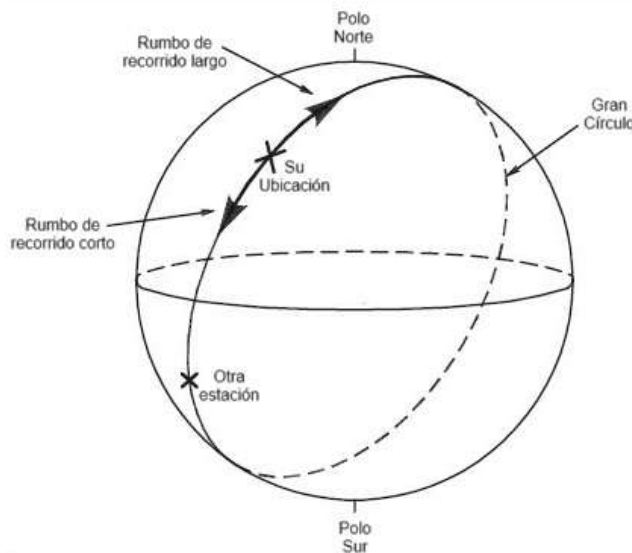


Figura 163. Esquema de la Tierra que muestra la trayectoria corta y larga. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

PROPAGACIÓN POR TRAYECTO LARGO Y LÍNEA DE GRISES

Generalmente, las señales HF se transmiten siguiendo una trayectoria de círculo máximo entre el emisor y el receptor. La ruta del círculo máximo se representa gráficamente en la Figura 163. Un análisis detallado revela que en realidad existen dos rutas circulares principales, una de menor extensión que la otra. El trayecto más extenso de ambos caminos puede resultar igualmente efectivo para establecer comunicaciones cuando las condiciones resultan propicias. Este fenómeno se denomina propagación de recorrido extenso. Es fundamental que ambas estaciones cuenten con antenas direccionales, como haces, capaces de orientarse específicamente hacia la dirección del trayecto largo para optimizar al máximo este tipo de propagación. Típicamente, las direcciones de los trayectos largos y cortos suelen presentar una diferencia angular de 180° .

La difusión de trayectoria extendida puede manifestarse en cualquier banda con propagación de onda ionosférica, lo que implica la posibilidad de percibir señales de recorrido prolongado en las bandas comprendidas entre 160 y 10 metros (excepcionalmente, se ha documentado una trayectoria de seis metros de extensión). La optimización de largo recorrido se presenta con mayor frecuencia en la banda de 20 metros. Para establecer comunicaciones (QSOs) de trayectoria extendida, resulta indispensable contar con una antena direccional modesta que exhiba una ganancia relativamente superior comparada con un dipolo, como un haz de tres elementos. La estructura radiante debe ubicarse a una altura sobre la superficie terrestre que facilite ángulos de emisión reducidos.

Para distancias inferiores a 9656 km, la señal de trayectoria corta será casi invariablemente más intensa debido al incremento de pérdidas provocadas por las reflexiones múltiples en el terreno y la absorción ionosférica en el trayecto prolongado. No obstante, cuando la trayectoria corta supera las 6000 millas, la propagación de trayectoria larga generalmente se observará a lo largo de la línea gris (el límite entre la oscuridad y la luminosidad que circunda completamente el planeta) o sobre el sector nocturno terrestre.

La línea gris constituye una franja adyacente al terminador que se extiende en ambas direcciones durante un número determinado de millas. La Figura 164 representa gráficamente la línea gris. Obsérvese que, en un hemisferio terrestre, la línea gris está transitando hacia la iluminación diurna (alba) mientras que en el hemisferio opuesto está ingresando en la oscuridad (ocaso).

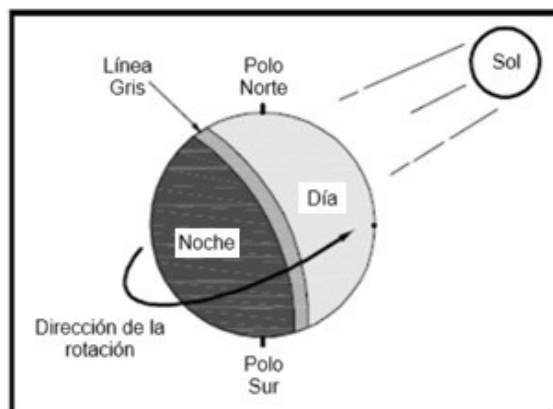


Figura 164. Representación de la línea gris. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La línea de grises o la propagación de la línea de grises, a menudo a través de un camino largo, ocurre entre dos estaciones que están simultáneamente cerca del amanecer y el atardecer. La propagación de la línea gris puede ser bastante eficaz porque la capa D, que absorbe las señales de HF, desaparece rápidamente en el lado de la línea gris del atardecer antes de que haya tenido tiempo de acumularse en el lado del amanecer. Mientras tanto, las capas E y F, al estar en altitudes más altas, todavía están iluminadas y proporcionan propagación. Las señales pueden viajar a lo largo del terminador, pero a menudo viajan desde la región de la línea gris a través de la oscuridad a través de un camino sesgado hasta la estación receptora que puede o no estar en su propia región de línea gris. Este tipo de propagación dura hasta que, en algún punto del trayecto, la absorción de la capa D o la pérdida de la refracción de la capa F impiden que la señal llegue a la estación receptora. Busque la propagación de la línea gris alrededor del amanecer y el atardecer. Si tienes un rayo, apúntalo a lo largo del terminador. De 160 a 20 metros son los más propensos a experimentar un aumento de la línea de grises porque son los más afectados por la absorción de la capa D.

5.1.5 Efectos solares

El astro solar constituye la principal fuente generadora de efectos en la transmisión de ondas radioeléctricas en nuestro planeta, llegando incluso a impactar las frecuencias UHF y microondas en determinadas ocasiones. La propagación de HF está condicionada por las variaciones diarias y estacionales, así como por el ciclo de manifestaciones solares de 11 años. Con una amplia disponibilidad de información sobre la actividad solar en la red digital, el radioaficionado cuenta actualmente con herramientas más sofisticadas para pronosticar y comprender la propagación que en cualquier período histórico precedente. Este apartado identifica algunas de las mediciones más relevantes y su metodología de utilización.

La mayoría de los registros pueden consultarse en plataformas web como el “Panel de Comunicaciones Radioeléctricas” de la NOAA en www.swpc.noaa.gov/communities/radiocommunications. Existen numerosos sitios similares, como www.hfradio.org y www.spaceweather.com. Al incorporar uno de estos portales entre los marcadores del navegador web y visitarlo periódicamente, se mantendrá informado sobre las condiciones radioeléctricas y adquirirá conocimientos significativos sobre el astro solar.

MANCHAS SOLARES Y CICLOS

La cantidad de manchas solares y agrupaciones de estas presentes en el disco solar en un momento específico determina el índice de manchas solares. Este parámetro resulta fundamental para evaluar la actividad solar global. La actividad solar experimenta fluctuaciones correlacionadas con la presencia de manchas solares, desarrollándose en un ciclo aproximado de 11 años. El gráfico de la Figura 165 ilustra la variación del número de manchas solares durante los ciclos precedentes.

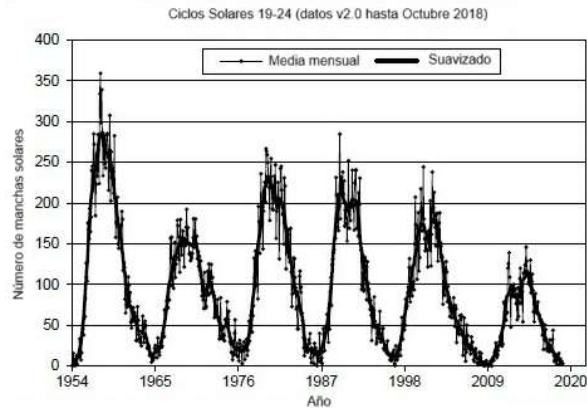


Figura 165. Ciclos solares 19-24. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Cuando se registra un incremento en la presencia de manchas solares en la superficie solar, se produce una mayor emisión de rayos ultravioleta, provocando una ionización más pronunciada en la ionosfera y optimizando la propagación en frecuencias superiores a 10 MHz, incluso alcanzando el espectro inferior de VHF. Durante el punto máximo del ciclo de manchas solares, la radiación ultravioleta solar puede ser lo suficientemente intensa como para mantener abiertas las bandas de frecuencias más elevadas, como 10 metros, permitiendo comunicaciones de largo alcance incluso durante las horas nocturnas. La elevada ionización impacta negativamente las bandas de baja frecuencia, como 80 y 160 metros, incrementando su absorción. En contraste, durante la fase inferior del ciclo de manchas solares, cuando la actividad solar es reducida, las bandas de HF más bajas presentan una propagación favorable, mientras que las bandas de HF superiores a 20 MHz (15 metros y superiores) tienden a permanecer inactivas. La banda de 20 metros (14 MHz) destaca por mantener una propagación consistente durante todo el ciclo solar, sosteniendo comunicaciones globales diurnas casi de manera cotidiana.

Las manchas solares aparentemente se desplazan a través de la superficie solar debido a la rotación del astro, que completa un ciclo cada 28 días. Este fenómeno explica por qué las condiciones de propagación en bandas HF tienden a repetirse cíclicamente cada 28 días, conforme las manchas solares retornan a la perspectiva terrestre.

Se observan significativas variaciones diarias y estacionales en la propagación de HF en cualquier etapa del ciclo de manchas solares. La Tabla 18 ilustra las variaciones típicas de propagación diaria a través de las bandas de ondas decamétricas bajo condiciones de actividad solar promedio.

Las estaciones climáticas influyen directamente en la propagación, dado que los hemisferios reciben diferentes niveles de iluminación solar. Durante el verano, la mayor exposición e intensidad lumínica complican la propagación diurna de ondas decamétricas, desplazando la actividad hacia el período nocturno. El escenario se invierte durante el invierno. Los periodos cercanos a los equinoccios de marzo y septiembre pueden presentar condiciones de propagación particularmente interesantes, independientemente de la fase del ciclo de manchas solares.

Tabla 18. Propagación HF día/noche. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Banda HF (metros)	Día	Noche
160, 80, 60	Local y regional hasta los 100–200 millas	Local a larga distancia con DX mejor cerca del atardecer o amanecer en uno o ambos extremos del contacto
40, 30	Local y regional hasta los 300–400 millas	Corto alcance (20 o 30 millas) y distancias medias (150 millas) a nivel mundial
20, 17	Regional a larga distancia, abriendo al amanecer o cerrando por la noche	Los 20 metros suelen estar abiertos hacia el oeste por la noche y pueden estar abiertos las 24 horas del día

Banda HF (metros)	Día	Noche
15, 12, 10	Distancia principalmente larga (1000 millas o más), abriendo hacia el este después del amanecer y hacia el oeste por la tarde	Los 10 metros se utilizan a menudo para comunicaciones locales las 24 horas del día

MEDICIÓN DE LA ACTIVIDAD SOLAR

La actividad solar reviste tal trascendencia para la propagación y las comunicaciones que es objeto de monitoreo permanente durante las 24 horas del día por centros de observación solar distribuidos globalmente. Los hallazgos se encuentran disponibles a través de plataformas web, distribución electrónica y comunicados radiales. Mediante el aprovechamiento de esta información, complementada con su experiencia y herramientas computacionales para predecir la propagación, los aficionados pueden programar con seguridad su actividad aérea y ser prevenidos sobre modificaciones súbitas en las condiciones.

Adicionalmente al recuento de manchas solares, existen tres índices fundamentales utilizados para cuantificar la actividad solar:

- **Índice de flujo solar (SFI, por sus siglas en inglés):** caracteriza la magnitud de energía radioeléctrica de 2800 MHz (10,7 cm de longitud de onda) proveniente del astro solar. Este indicador guarda una correlación significativa con la cantidad de radiación ultravioleta solar, cuya medición resulta compleja a nivel terrestre. El SFI se inicia en un valor mínimo de 65 y carece de límite máximo. Niveles superiores sugieren una mayor actividad solar y, en términos generales, una propagación más favorable en ondas decamétricas superiores a 10 MHz. La Figura 166 ilustra la correlación existente entre el SFI y el número de manchas solares.
- **Índice K:** los valores K comprendidos entre 0 y 9 reflejan la estabilidad momentánea del campo magnético terrestre o geomagnético, siendo actualizado cada tres horas en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés) ubicado en Boulder, Colorado. Las cifras estables sugieren un campo geomagnético equilibrado. Valores numéricos más elevados indican que el campo geomagnético experimenta alteraciones, provocando interrupciones en las comunicaciones de alta frecuencia.
- **Índice A:** fundamentado en los ocho valores precedentes del índice K a nivel mundial, el índice A proporciona una representación precisa de la estabilidad geomagnética a largo plazo. Las magnitudes del índice A fluctúan entre 0 (completamente estable) y 400 (severamente perturbado).

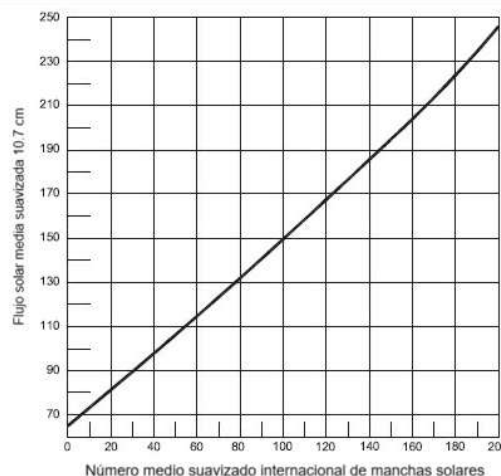


Figura 166. Correlación entre el SFI y el número de manchas solares. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Los tres índices y datos solares adicionales se encuentran disponibles en el portal web de la NASA www.spaceweather.com y en el Centro de Predicción del Clima Espacial de la NOAA (www.swpc.noaa.gov/communities/radio-communications).

PERTURBACIONES SOLARES

Sería extraordinario si el astro solar irradiara de manera uniforme, estimulando la ionosfera sin generar ninguna alteración en la región superior. Desafortunadamente, la realidad es diferente. El sol presenta un comportamiento altamente dinámico, especialmente durante los períodos de máxima actividad en el ciclo de manchas solares. Existen diversos fenómenos solares habituales que interrumpen la propagación de HF. Sus características son registradas en observatorios especializados e incluidas en boletines e informes periódicos para alertar a los usuarios del espectro de ondas decamétricas.

- **Erupción solar:** una significativa liberación de energía y material solar cuando ocurren disrupciones en el campo magnético de la superficie solar.
- **Agujero coronal:** una zona de menor intensidad en la corona solar (capa externa) por donde el plasma (gas ionizado y partículas electrizadas) escapa del campo magnético solar y se proyecta al espacio a velocidades elevadas.
- **Eyección de masa coronal (CME, por sus siglas en inglés):** una expulsión de grandes volúmenes de material desde la corona. Un CME puede dirigir el material en un flujo relativamente estrecho o en una dispersión amplia.

PERTURBACIONES IONOSFÉRICAS SÚBITAS

La radiación ultravioleta y de rayos X procedente de una erupción solar se desplaza a la velocidad lumínica para impactar la ionosfera aproximadamente 8 minutos después. Cuando la radiación impacta la ionosfera, el nivel de ionización se incrementa rápidamente, particularmente en la región D (ver Figura 167). Esto aumenta drásticamente la absorción, provocando una perturbación ionosférica repentina (SID, por sus siglas en inglés) también denominada apagón de radio. Tras una llamada significativa, las bandas de HF pueden quedar completamente desprovistas de señales de onda ionosférica durante períodos que oscilan entre varios segundos y horas, retornando gradualmente a su estado normal. Las bandas inferiores resultan más afectadas, por lo que la comunicación podría mantenerse viable en bandas superiores. Los SID impactan únicamente el lado terrestre iluminado, por lo que las comunicaciones en el lado oscuro pueden experimentar una alteración relativamente menor.

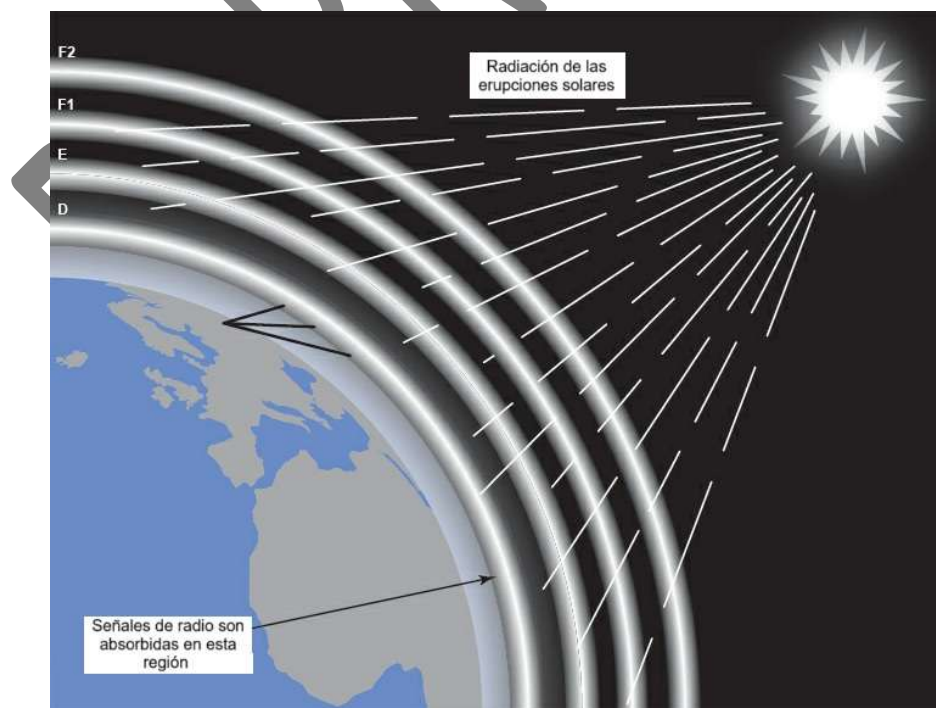


Figura 167. Aproximadamente 8 minutos después de ocurrir una llama solar, (American Radio Relay League, 2023))

PERTURBACIONES GEOMAGNÉTICAS

El astro solar emite de manera continua un flujo de partículas electrizadas denominado viento solar. La interacción entre este flujo y el campo geomagnético terrestre genera una zona espacial conocida como magnetosfera. Las partículas cargadas y otros materiales provenientes de agujeros coronales y eyecciones de masa coronal se desplazan considerablemente más despacio, requiriendo entre 20 y 40 horas para alcanzar nuestro planeta.

Cuando dichas partículas arriban, pueden quedar capturadas y perturbar la magnetosfera terrestre próxima a los polos magnéticos septentrionales y australes. Al transferir su energía al campo geomagnético, incrementan la ionización en la región E de la ionosfera, provocando manifestaciones aurorales y generando una tormenta geomagnética.

La modificación súbita del campo geomagnético interrumpe las capas superiores de la ionosfera, lo que provoca que la propagación en las bandas HF superiores se vea inicialmente afectada. Los trayectos de gran distancia que atraviesan latitudes elevadas, especialmente aquellos que discurren cerca de los polos magnéticos, pueden desaparecer completamente durante un período que oscila entre horas y días.

Las auroras constituyen en realidad el resplandor de gases ionizados por las partículas cargadas entrantes mientras fluyen verticalmente hacia la atmósfera, guiadas por el campo magnético. Las láminas conductoras resultantes que iluminan el firmamento nocturno también reflejan las ondas radioeléctricas por encima de los 20 MHz. Particularmente, la propagación auroral resulta más intensa en 6 y 2 metros, modulando las señales con un silbido o zumbido característico.

5.1.6 Modos de Propagación Avanzados

Considerando los parámetros de actividad solar y un modelo suficientemente preciso del campo geomagnético terrestre, los profesionales de comunicaciones han elaborado herramientas computacionales altamente eficaces para pronosticar la propagación. Los entusiastas realizan un aprovechamiento extenso de estos programas y, como radioaficionado que opera en HF, resultará conveniente conocerlos.

Dos conceptos fundamentales empleados por los programas predictivos resultan de especial relevancia para los radioaficionados: frecuencia máxima utilizable (MUF, por sus siglas en inglés) y frecuencia utilizable más baja (LUF, por sus siglas en inglés). Tanto el MUF como el LUF dependen de la ruta específica entre dos puntos: su localización geográfica y distancia recíproca. MUF y LUF experimentan variaciones según la hora del día, la estación, la intensidad de radiación solar y la estabilidad ionosférica.

La MUF representa la frecuencia superior con potencial de propagación entre dos puntos. Las ondas en o bajo la MUF experimentarán refracción hacia la superficie terrestre. Es importante destacar que MUF contempla la propagación en todos los segmentos del trayecto entre estaciones. El MUF será distintivo para cada ruta desde su estación. Debe considerarse las variaciones ionosféricas en cada reflexión probable mientras la onda salta entre ubicaciones. Las ondas que superen la MUF en algún momento penetrarán la ionosfera perdiéndose en el espacio. MUF también debe incorporar los ángulos de despegue probables del sistema de antena, dado que esto influye en la capacidad ionosférica de reflejar la señal.

El LUF especifica la frecuencia inferior con posibilidad de propagación entre dos puntos. Las ondas bajo el LUF serán completamente absorbidas por la ionosfera. Para establecer comunicación con una estación distante, será necesario utilizar una frecuencia entre LUF y MUF para que la onda se desvíe de regreso a la Tierra sin ser totalmente absorbida. Si el MUF desciende bajo el LUF, no existirá propagación entre esos dos puntos mediante una onda celeste convencional.

Operar próximo a la MUF frecuentemente produce resultados óptimos porque la absorción es mínima justo bajo la MUF. Los ángulos de despegue reducidos también elevan el MUF porque

las ondas requieren menor flexión para completar un salto. Se presentan dos ejemplos ilustrativos:

- Si la MUF en un trayecto específico es 19 MHz, la banda más adecuada será 17 metros (18 MHz).
- Si la MUF en un trayecto específico es 25 MHz, la banda más adecuada será 12 metros (24 MHz).

Un método para verificar las condiciones reales de banda entre dos puntos consiste en escuchar las balizas de propagación. Existe una red internacional de estaciones de balizas mantenidas por la Northern California DX Foundation (www.ncdxf.org) que transmiten continuamente. Adicionalmente, existen numerosas estaciones de radiobaliza entre 28,190 MHz y 28,225 MHz que constituyen fuentes excepcionales de información sobre propagación en 10 metros.

MODOS DE DISPERSIÓN

Como se habrá experimentado en VHF, las ondas radioeléctricas frecuentemente se transmiten mediante rebotes de elementos terrestres y alteraciones atmosféricas. Análogamente sucede con las ondas de radio HF a mayor escala. Particularmente, la ionosfera no presenta una estructura tan estratificada horizontalmente o por regiones como se suele imaginar. Existen zonas que se encuentran inclinadas en ángulos considerables y que reflejan las ondas casi horizontalmente. Otras regiones pueden presentar variaciones significativas en su densidad que permiten reflexiones localizadas, como la propagación esporádica de E (E-skip) habitual en 6 metros. Estos constituyen modos de dispersión de propagación y pueden resultar muy provechosos cuando no se dispone de ondas ionosféricas convencionales.

CARACTERÍSTICAS DE DISPERSIÓN

Si la frecuencia de una señal está muy próxima a la MUF, las reflexiones de las características superficiales terrestres, como el océano o una cordillera, pueden devolver parte de la onda hacia la estación transmisora. Este fenómeno se denomina retrodispersión y se ilustra en la Figura 168. Las ondas también pueden dispersarse desde el interior de la ionosfera, lo que posibilita que las señales sean perceptibles desde estaciones demasiado distantes para ser captadas por la onda terrestre y en frecuencias demasiado elevadas para la propagación de ondas ionosféricas de salto corto. La dispersión y la retrodispersión contribuyen a cubrir la zona de omisión donde las señales no serían audibles de otro modo.

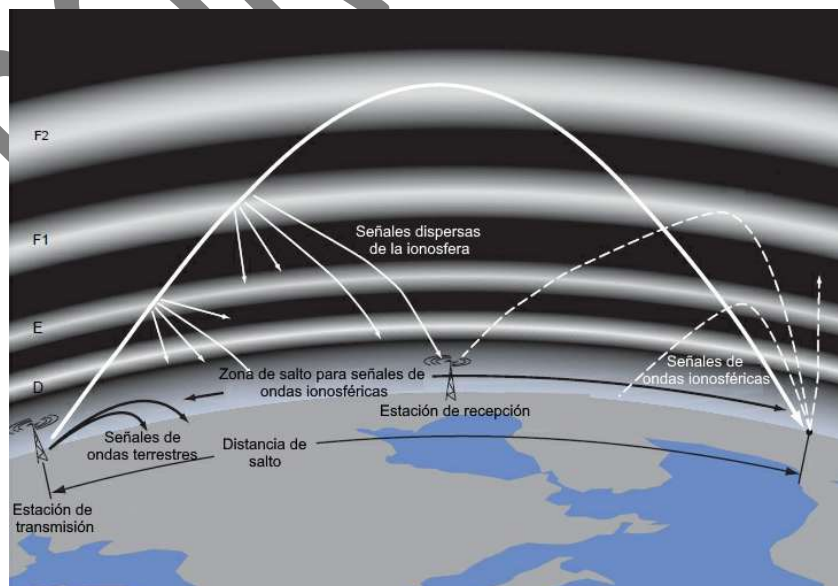


Figura 168. Efecto de retrodispersión. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Las señales recibidas a través de la dispersión en ondas decamétricas suelen ser más débiles que las recibidas por la propagación normal de ondas ionosféricas porque la reflexión no es muy eficiente y tiende a dispersar la señal, entregando sólo una pequeña fracción de la señal a la estación receptora. Las señales dispersas en la zona de salto a menudo suenan distorsionadas porque las ondas reflejadas pueden llegar al receptor por muchos caminos diferentes, lo que resulta en interferencia multitrayecto, al igual que en VHF y UHF. El efecto habitual es una característica de aleteo o vacilación.

PROPAGACIÓN DE ONDA IONOSFÉRICA DE INCIDENCIA VERTICAL CERCANA (NVIS, por sus siglas en inglés)

Se recordará que, para las ondas situadas bajo la frecuencia crítica, la ionosfera efectúa un proceso de reflexión de las ondulaciones electromagnéticas que arriban con cualquier ángulo de incidencia, incluso en posición vertical. En la mayoría de las localizaciones geográficas, la frecuencia crítica permanece sistemáticamente por encima de 5 MHz y frecuentemente se eleva sobre la banda de 40 metros. Es factible emplear frecuencias superiores durante el periodo diurno conforme la frecuencia crítica incrementa debido a la radiación solar.

Para una señal que se encuentra por debajo del umbral de frecuencia crítica, cuando se emite verticalmente, la reflexión dispersa la señal de retorno hacia la superficie terrestre a través de una zona que comprende entre 200 y 300 millas, circundando el punto de transmisión. La comunicación que implementa este modo de dispersión específico se denomina onda ionosférica de incidencia vertical cercana (NVIS). Para aprovechar NVIS según se ilustra en la Figura 169, los dipolos con polarización horizontal se posicionan próximos a la superficie terrestre, de manera que su patrón de radiación resulte prácticamente omnidireccional y se concentre en ángulos de elevación pronunciados.

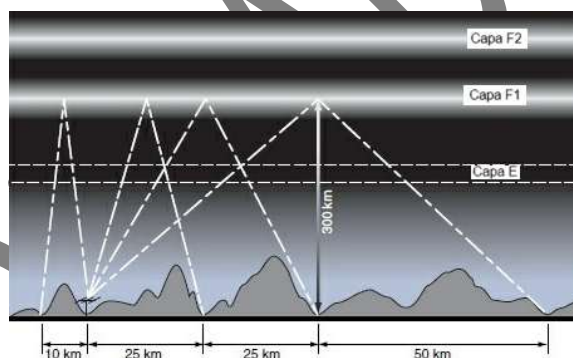


Figura 169. Propagación NVIS. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

PROPAGACIÓN VHF/UHF/MICROONDAS

Ante la ausencia de una propagación sistemática e invariable de ondas ionosféricas, los operadores de VHF y UHF recurren a métodos propagativos alternativos para establecer comunicaciones. Las opciones disponibles superan significativamente las existentes en HF, permitiendo incluso enlaces a distancias considerablemente extensas. Este apartado explora diversos modos de propagación fascinantes que probablemente se encontrarán al intentar utilizar SSB, CW o alguno de los modos digitales por encima de 30 MHz.

Para las señales que se desplazan fundamentalmente en trayectoria rectilínea entre transmisor y receptor (denominada propagación de ondas espaciales), resultan óptimas las antenas con radiación de ángulo reducido (que concentran las señales hacia el horizonte). Es fundamental recordar que la orientación de las antenas receptora y transmisora debe ser idéntica en comunicaciones VHF y UHF, dado que la polarización de una onda espacial permanece constante durante su desplazamiento.

HORIZONTE RADIOFÓNICO

Durante los inicios de las comunicaciones de radioaficionados en VHF, predominaba la creencia de que los enlaces requerían trayectos directos con visibilidad entre antenas de estaciones comunicantes. No obstante, tras experimentaciones con equipamiento y sistemas radiantes de alta calidad, se demostró que las ondas radioeléctricas VHF experimentan fenómenos de curvatura o dispersión bajo diversas circunstancias, posibilitando comunicaciones más allá del horizonte visual o geométrico.

En condiciones estándar, las variaciones de densidad atmosférica próximas a la superficie terrestre provocan desviaciones ondulatorias que mantienen las señales más próximas al terreno que en una trayectoria estrictamente rectilínea. La Figura 170 ilustra cómo esta curvatura radioeléctrica genera que la distancia del horizonte radioeléctrico supere la distancia del horizonte visual. El horizonte radiofónico se extiende aproximadamente un 15% más allá del horizonte geométrico, según se representa gráficamente en la Figura 171.

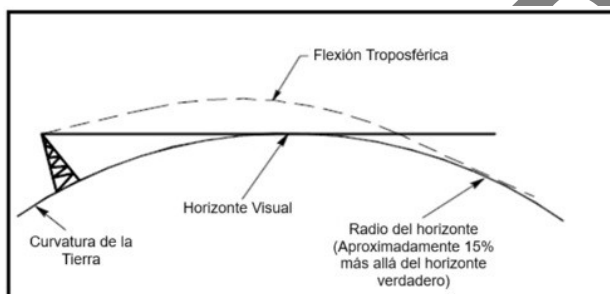


Figura 170. Horizonte visual y curvatura de la Tierra. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

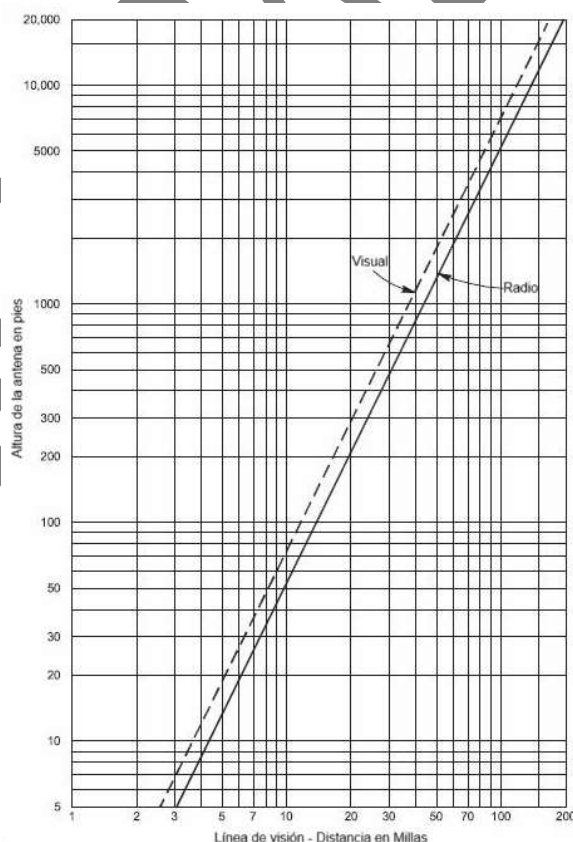


Figura 171. Distancia del horizonte visual y la altura de la antena. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Se entiende que la distancia al horizonte radioeléctrico corresponde a un punto específico en la superficie terrestre. Una antena ubicada en una elevación topográfica pronunciada o en una estructura arquitectónica de considerable altura, significativamente por encima de cualquier obstáculo circundante, presenta un horizonte de radio sustancialmente más extenso que una antena situada en una depresión geográfica o parcialmente obstruida por elementos cercanos.

Cuando la antena receptora también se encuentra en una posición elevada, la distancia máxima de propagación de onda espacial entre ambos dispositivos de comunicación equivale a la sumatoria de las distancias al horizonte radioeléctrico, considerando tanto la antena transmisora como la receptora. La representación gráfica ilustrada en la Figura 172 ejemplifica de manera precisa este principio fundamental.

En el supuesto de que las dos estaciones de comunicación no sean completamente idénticas en sus características técnicas, cada una presentará un horizonte de radio intrínsecamente diferenciado.

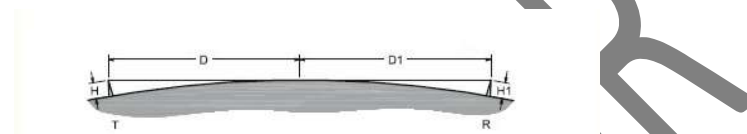


Figura 172. Comunicación por horizonte a mayor altura de antena. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

ZONA FRESNEL

La zona de Fresnel representa un conjunto de elipsoides concéntricos que se extienden entre un emisor y un receptor (remítase a la Figura 173). La zona de Fresnel primaria se conceptualiza como el área inicial delante de la antena desde donde los rayos reflejados potencian el rayo directo en el ángulo de elevación específico. Los dispositivos receptores de ondas decamétricas ubicados en zonas de Fresnel de numeración impar experimentan una recepción más robusta comparados con aquellos situados en zonas pares, debido a que las ondas radioeléctricas se reflejan en ángulos inferiores a 180° , o bien, en concordancia de fase (sus crestas se alinean), lo que incrementa la ganancia en la transmisión. En contraste, las zonas pares generan reflexiones en oposición de fase (donde las crestas se alinean con los valles) en un rango angular entre 180° y 360° , provocando una distorsión en la propagación de la onda.

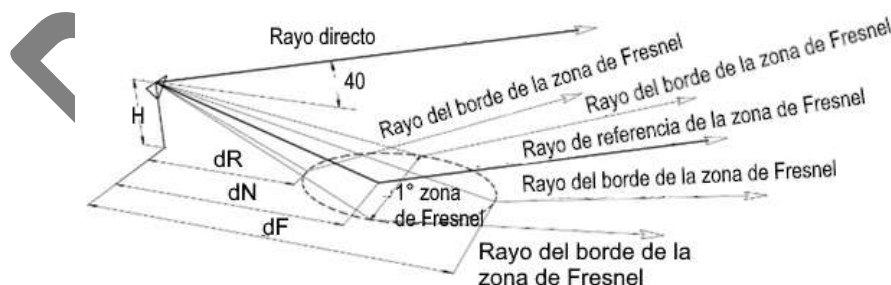


Figura 173. Representación de la zona de Fresnel. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En los rangos de frecuencia VHF, UHF y microondas, los obstáculos tienden a absorber en lugar de reflejar las ondulaciones electromagnéticas de corta longitud. La zona primaria de Fresnel determina el espacio donde la captación será óptima y los impedimentos tendrán una influencia mínima. Es fundamental comprender que conforme se incrementa la frecuencia, el diámetro de las zonas de Fresnel experimenta una reducción progresiva. La banda de 5,8 GHz presenta una zona de Fresnel inicial más reducida comparada con la banda de 3,4 GHz, y así sucesivamente hasta llegar a HF, donde las zonas de Fresnel pueden alcanzar dimensiones considerables.

MULTIPATH

Un factor frecuente de atenuación lo constituye un fenómeno denominado trayecto múltiple. Diversos componentes de una misma señal transmitida pueden arribar a la antena receptora desde diferentes direcciones. Las interrelaciones de fase entre las señales múltiples pueden provocar que se neutralicen o se potencien recíprocamente. Este fenómeno se representa gráficamente en la Figura 174. Los efectos de trayecto múltiple pueden manifestarse cuando la señal transmitida transita más de una ruta hasta la estación receptora. El multitrayecto y la distorsión que genera en la señal recibida representa un desafío significativo para proporcionar un servicio digital de alta velocidad mediante sistemas inalámbricos.

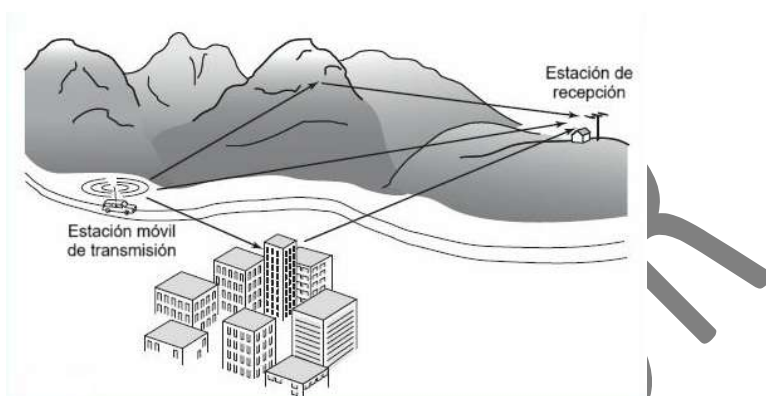


Figura 174. Propagación multitrayecto. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

PROPAGACIÓN TROPOSFÉRICA

En determinadas circunstancias atmosféricas, fenómenos meteorológicos como las inversiones térmicas y los sistemas frontales cálidos o fríos pueden originar transiciones abruptas entre estratos de aire. Tales discontinuidades pueden reflejar o canalizar ondas radioeléctricas de VHF, UHF y microondas, generando conductos en la troposfera (regiones inferiores atmosféricas), de manera análoga a la propagación en una guía de ondas. Este mecanismo de transmisión se denomina conducto troposférico.

La probabilidad de propagación mediante conductos troposféricos incrementa proporcionalmente con la frecuencia. Los conductos resultan poco frecuentes a 50 MHz, moderadamente habituales a 144 MHz y más comunes en rangos de frecuencia superiores. Considerando que estos conductos se generan frecuentemente sobre superficies acuáticas, las regiones costeras los experimentan con mayor regularidad. Los conductos pueden sostener la propagación de microondas a distancias superiores a 160-480 kilómetros, con extensiones progresivamente mayores en frecuencias más bajas.

Dado que estas inversiones son imperceptibles visualmente, determinar su ocurrencia puede resultar complejo. La única alternativa consiste en intentarlo directamente! No obstante, la probabilidad de propagación troposférica puede estimarse mediante el análisis de condiciones meteorológicas. William Hepburn desarrolló una metodología para generar cartografías de zonas con potencial propagación troposférica. Estos mapas, denominados "mapas de Hepburn", están disponibles en plataformas digitales (www.dxinfocentre.com/tropo_wam.html) para uso de aficionados.

PROPAGACIÓN ESPORÁDICA E

La propagación E esporádica (Es o E-skip) comprende la propagación originada en capas delgadas altamente ionizadas que se constituyen temporalmente en la región E ionosférica. El proceso de formación de estas capas permanece parcialmente inexplorado. Habitualmente propaga señales radioeléctricas de 28 MHz, 50 MHz y 144 MHz entre 500 y 2.300 km. Las señales tienden a manifestarse con intensidad extraordinaria, permitiendo que estaciones de modesta potencia establezcan comunicaciones. Los eventos de E esporádica en latitudes medias pueden oscilar desde duraciones efímeras hasta prolongarse durante múltiples horas.

La E esporádica en latitudes medias (aproximadamente 15° a 45°) puede manifestarse en cualquier momento, aunque resulta más frecuente en el hemisferio norte próximo al solsticio estival durante mayo, junio y julio, con una temporada menos intensa alrededor del solsticio invernal a finales de diciembre y principios de enero. Su aparición resulta independiente del ciclo solar. La propagación esporádica de E puede acontecer en cualquier momento del día, si bien presenta mayor probabilidad entre las 9 a.m. y el mediodía, hora local, y nuevamente durante el inicio del período nocturno entre las 5 p.m. y las 8 p.m.

PROPAGACIÓN TRANSECUTORIAL

La propagación transecuatorial (TE) constituye una modalidad de propagación ionosférica de la capa F descubierta por aficionados a finales de los años cuarenta. Practicantes de radioaficionados de todos los continentes reportaron simultáneamente el fenómeno en múltiples trayectos norte-sur a 50 MHz durante horas nocturnas. En ese momento, la frecuencia máxima utilizable prevista no superaba los 40 MHz durante periodos diurnos. Investigaciones realizadas por aficionados han demostrado que el modo TE opera a 144 MHz e incluso, hasta cierto punto, a 432 MHz. La propagación TE se produce entre estaciones de latitudes medias aproximadamente equidistantes del ecuador magnético terrestre (Figura 175).

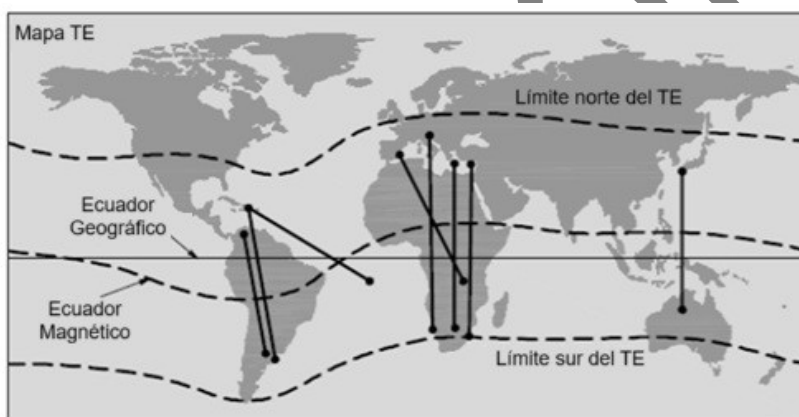


Figura 175. Contactos realizados utilizando propagación TE. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Se podría anticipar que la ionización de los estratos superiores de la ionosfera alcanzaría su punto máximo sobre la línea ecuatorial durante los momentos de los equinoccios de primavera y otoño. En realidad, durante estos períodos no existe una única zona de ionización máxima, sino dos regiones diferenciadas. Estos máximos se generan al amanecer, se consolidan alrededor del mediodía y se prolongan más allá de la medianoche. Las zonas de ionización con alta densidad se configuran aproximadamente entre 10° y 15° a ambos lados del ecuador magnético terrestre, no del ecuador geográfico, constituyendo un par de regiones capaces de reflejar señales de VHF e incluso de UHF.

Conforme la posición solar relativa se distancia del ecuador, los niveles de ionización en los hemisferios septentrional y meridional experimentan un desequilibrio, reduciendo el máximo de frecuencia utilizable (MUF) para la propagación TE. Consecuentemente, el periodo óptimo para investigar la propagación transecuatorial corresponde aproximadamente al 21 de marzo y al 21 de septiembre. El MUF para la propagación TE será significativamente superior durante los periodos de máxima actividad solar. Las condiciones más favorables para la propagación TE se presentan cuando el campo magnético terrestre permanece estable. La propagación TE permite señales extraordinariamente potentes en las bandas de HF durante el atardecer y las primeras horas nocturnas, constituyendo los momentos más propicios para explorar este modo de propagación. En etapas más avanzadas de la noche, e incluso ocasionalmente al alba, se perciben señales tenues y difusas transmitidas mediante la propagación TE.

A medida que se incrementa la frecuencia de la señal, las zonas de comunicación se tornan más restringidas, circunscribiéndose a las áreas equidistantes y perpendiculares al ecuador

magnético. Adicionalmente, la duración de la apertura tiende a reducirse, aproximándose más cercanamente a las 8 p.m. horas en tiempo local. La tasa de desvanecimiento y el grado de dispersión frecuencial aumentan proporcionalmente con la frecuencia de la señal. El alcance de la propagación TE se extiende aproximadamente hasta 8.045 kilómetros, distribuidos en 4.023 kilómetros a cada lado del ecuador magnético.

5.2 Conceptos básicos de antenas y ondas de radio

CONCEPTOS BÁSICOS DE ONDA

Una antena constituye un elemento conductor, típicamente configurado como un cable, elemento metálico cilíndrico o tubo, diseñado para transmitir y captar señales radioeléctricas. Para garantizar un rendimiento óptimo en la emisión y recepción, sus dimensiones estructurales deben corresponder proporcionalmente a una fracción significativa de la longitud de onda de la señal específica. En la representación de la Figura 176 se ilustran dos configuraciones de antenas habitualmente empleadas por radioaficionados.

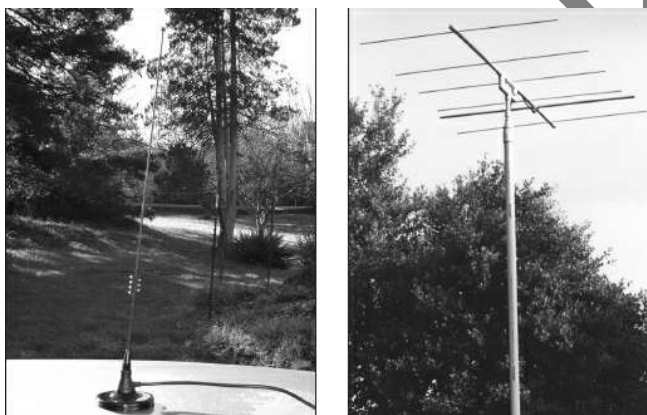


Figura 176. Ejemplos de antenas comunes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

La corriente de radiofrecuencia (RF) en un elemento radiante genera ondas radioeléctricas que se propagan alejándose del emisor y extendiéndose por el espacio, similar a la propagación de ondulaciones acuáticas. La onda radioeléctrica transporta energía electromagnética proporcionada por el movimiento oscilatorio de electrones dentro del elemento radiante. Los campos eléctricos y magnéticos de la onda vibran con idéntica frecuencia a la corriente de RF presente en la antena. La onda constituye una integración de campos eléctricos y magnéticos. Precisamente por componerse de ambas tipologías de campos, se denomina onda electromagnética.

La polarización representa la disposición espacial del campo eléctrico de la onda radioeléctrica. Una antena con orientación horizontal emite una onda cuyo campo eléctrico mantiene paralelismo horizontal. Cuando el campo eléctrico de la onda y el elemento radiante presentan idéntica polarización, se genera la máxima intensidad de señal. Por consiguiente, resulta fundamental mantener el dispositivo de comunicación de manera que su antena mantenga alineación con la antena de la estación receptora.

Cuando las polarizaciones de las antenas transmisora y receptora carecen de alineamiento, la señal recibida experimenta una reducción significativa. La falta de coincidencia en la polarización provoca una disminución de la corriente generada en la antena.

Durante la propagación de la onda radioeléctrica a través de la ionosfera, su polarización experimenta una transformación desde configuraciones verticales u horizontales hacia una combinación denominada polarización elíptica. Este fenómeno implica que cualquier antena receptora, independientemente de su orientación, responderá parcialmente a la onda incidente. Consecuentemente, tanto antenas verticales como horizontales resultan eficientes para recepción y transmisión en bandas de ondas decamétricas con propagación mediante saltos.

5.2.1 Conceptos básicos de las antenas

RELACIONES DE ANCHURA DE HAZ Y PATRÓN

Al realizar comparaciones entre antenas, resulta fundamental conocer su anchura de haz. Este parámetro representa la distancia angular entre puntos ubicados en ambos extremos del lóbulo principal, donde la ganancia disminuye 3 dB respecto al máximo. Alternativamente, se denomina ancho de haz de 3 dB. La Figura 177 ejemplifica este concepto. La antenna ilustrada presenta un ancho de haz de 30°, significando que al girar aproximadamente 15° respecto a su orientación óptima, la señal recibida y transmitida experimentará una reducción de 3 dB.

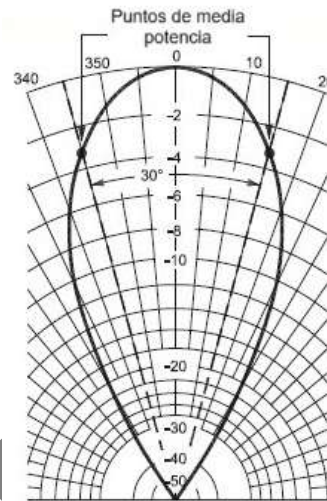
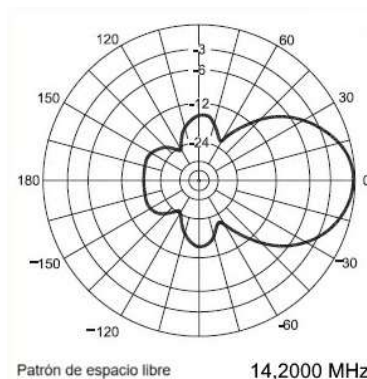


Figura 177. Representación del ancho de haz. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La Figura 178 muestra gráficamente cómo determinar la amplitud del haz a través de un diagrama de radiación. El lóbulo principal de radiación de la antenna representada se dirige hacia la dirección derecha y permanece centrado sobre el eje de 0°. Se puede realizar una evaluación bastante precisa del ancho de haz de este dispositivo de transmisión examinando meticulosamente el gráfico. El analista debe advertir que los ángulos están demarcados con intervalos de 15° y que el círculo correspondiente a -3 dB se ubica inicialmente dentro del círculo perimetral externo. El diagrama intercepta el círculo de -3 dB en puntos aproximadamente situados a 25° en ambos laterales del punto central 0. Consecuentemente, es posible calcular y estimar el ancho de haz de esta antenna como 50°.



Hay diversas mediciones relevantes que se pueden obtener del diagrama de radiación de una antena. ¡La ganancia no constituye el único factor determinante! La capacidad de desestimar las señales captadas desde direcciones no prioritarias también resulta fundamental. Esta aptitud, denominada relación de diagrama, se evalúa con referencia a la directividad de la antena en la dirección de avance o frontal. Existen tres proporciones de patrones principales:

- **De adelante hacia atrás (F/B):** el diferencial de ganancia en la dirección del lóbulo principal con respecto a la ganancia en la dirección diametralmente opuesta (posterior).
- **De adelante hacia atrás (F/R):** el diferencial de ganancia en la dirección del lóbulo principal con respecto a la ganancia promedio en un ángulo específico centrado en la dirección trasera.
- **De adelante a lado (F/S):** el diferencial de ganancia en la dirección del lóbulo principal con respecto a la ganancia a 90° respecto a la dirección frontal (F/S generalmente presupone un patrón simétrico en ambos lados del lóbulo principal).

En el ejemplo presentado en la Figura 178, se determina la relación entre la parte delantera y trasera mediante la lectura del valor máximo del lóbulo menor a 180° . Este máximo parece ubicarse aproximadamente a medio camino entre los círculos de -12 dB y -24 dB, por lo que se estima que está cerca de 18 dB por debajo del lóbulo principal.

El diagrama de la Figura 178 presenta un lóbulo menor en cada lado de la antena cuya intensidad máxima es ligeramente superior a 12 dB por debajo del lóbulo principal. Una relación frontal-lateral de 14 dB parece constituir una estimación bastante precisa para este patrón.

RADIACIÓN Y RESISTENCIA ÓHMICA

La energía suministrada a una antena se dispersa en forma de ondas radioeléctricas y en pérdidas térmicas en el cable y materiales circundantes que absorben las ondas, como follaje o estructuras edilicias. La energía radiada representa, por supuesto, la porción útil. La potencia irradiada por la antena puede considerarse como si la energía se disipara en una resistencia.

Seguidamente, la antena puede modelarse mediante dos resistencias: una para la potencia radiada y otra para la potencia disipada en forma de calor.

En el caso de las pérdidas térmicas, corresponde a una resistencia real u óhmica que experimenta calentamiento (RLOSS, por sus siglas en inglés). Respecto a la potencia radiada, se considera una resistencia hipotética (RR) que, de estar efectivamente presente, disiparía idéntica potencia a la radiada por la antena.

Esta resistencia hipotética se denomina resistencia a la radiación (RR). Dichas resistencias se consideran dispuestas en serie, de modo que la potencia total disipada por la corriente (I), en la antena equivale a $I^2 (RR + RLOSS)$. La suma de estas dos resistencias conforma la resistencia total de un sistema de antena (RT).

Tomando como referencia una antena dipolo de media onda convencional para bandas de HF, la potencia perdida en forma de calor no supera un reducido porcentaje de la potencia total suministrada a la antena. Esto obedece a que la resistencia de RF del cable de cobre, incluso siendo tan delgado como # 14 AWG, resulta muy baja en comparación con la resistencia a la radiación si la antena está razonablemente libre de objetos circundantes y no demasiado próxima al suelo. Es razonable presumir que la pérdida óhmica (calor) en una antena adecuadamente ubicada resulta insignificante y que toda la resistencia mostrada por la antena corresponde a resistencia a la radiación. ¡Tal antena constituye un radiador altamente eficiente de ondas radioeléctricas! Sin embargo, si la antena resulta muy corta en términos de longitud de onda, el RR es bastante reducido. Por ejemplo, para los populares bucles magnéticos de menos de $1/10$ de longitud de onda de circunferencia, ¡RR puede ser mucho menor que 1Ω ! Esto puede originar que la potencia aplicada se disipe en gran medida en forma de calor por pérdidas en los materiales utilizados para construir la antena y los materiales circundantes.

GANANCIA DE ANTENA

En diversas aplicaciones, la característica más relevante de una antena radica en su capacidad para concentrar la potencia radiada hacia direcciones específicamente provechosas. Esta propiedad, no obstante, únicamente adquiere significación en relación con otros dispositivos de transmisión, por lo que resulta indispensable establecer un punto de referencia.

5.2.2 El radiador isotrópico

Un radiador isótropo constituye un dispositivo teórico de dimensión puntual que se presume emite energía de manera uniforme en todas las direcciones posibles. El diagrama de radiación tridimensional de un radiador isotrópico (ver Figura 179) presenta una configuración esférica, dado que se distribuye idéntica cantidad de potencia en cada dirección. Este dispositivo hipotético exhibe un diagrama de radiación completamente omnidireccional, puesto que la señal mantiene una intensidad equivalente en todos los ángulos. En la práctica, no existe ningún dispositivo de tales características, pero funciona como una referencia de ganancia teórica sumamente útil para establecer comparaciones con antenas reales. Adicionalmente, el radiador isotrópico proporciona un punto de referencia fundamental para contrastar las diferencias de ganancia entre diversos sistemas de antenas.

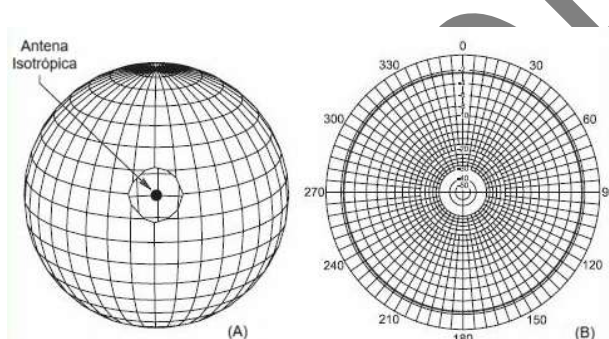


Figura 179. Diagrama de radiación de una antena isotrópica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La ganancia de una antena representa el cociente (expresado en unidades de decibel) entre la señal emitida desde una antena en la dirección de su lóbulo principal y la señal radiada por una antena de referencia en idéntica dirección y con potencia equivalente.

Un haz característico puede presentar 6 dB de ganancia en contraste con un dipolo, lo que implica que amplifica su señal hasta cuatro veces (6 dB) más intensa que si empleara un dipolo con el mismo transmisor. La ganancia de antenas direccionales surge de la concentración de la onda radioeléctrica en una dirección específica, reduciendo la radiación en direcciones alternativas. No existe variación en la potencia total radiada.

Dos antenas de referencia se utilizan para contrastar los diagramas de radiación de otros dispositivos: el dipolo de media longitud de onda y la antena isotrópica. La ganancia referenciada a la antena isotrópica se expresa en dBi, mientras que la ganancia referenciada al dipolo en su dirección de máxima radiación se consigna en dBd. Afortunadamente, resulta sencillo convertir entre la ganancia respecto a una antena isotrópica y la ganancia respecto a un dipolo, considerando que el dipolo posee 2,15 dB de ganancia sobre un radiador isotrópico.

La ganancia en dBi y dBd se correlaciona de la siguiente manera:

- Ganancia en dBd = Ganancia en dBi – 2,15 dB
- Ganancia en dBi = Ganancia en dBd + 2,15 dB

Dónde:

- dBd representa la ganancia de la antena en comparación con un dipolo en su dirección de radiación máxima.
- dBi indica la ganancia de la antena en relación con un radiador isotrópico.

Las ganancias de dBd y dBi corresponden a ganancias en espacio libre, lo que significa la ausencia de superficies reflectantes próximas a la antena. Las superficies reflectantes cercanas pueden modificar significativamente la ganancia de una antena, incrementándola o reduciéndola. Al comparar las especificaciones de diversos dispositivos, es fundamental asegurar que todas las mediciones utilicen la misma antena de referencia o realizar las conversiones correspondientes. Las especificaciones deberán consignar la ganancia de espacio libre o especificar la altura de la antena.

DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DE LA ANTENA

Un diagrama de radiación de antena encierra una significativa cantidad de información concerniente a las características y el rendimiento proyectado del dispositivo. Al comprender cómo interpretar determinados modelos de patrones y su representación, será posible identificar múltiples características fundamentales de la antena y contrastar las diversas variaciones de su diseño. La Figura 180 constituye un ejemplo representativo del diagrama de radiación correspondiente a un dipolo, incorporando adicionalmente una perspectiva tridimensional (A).

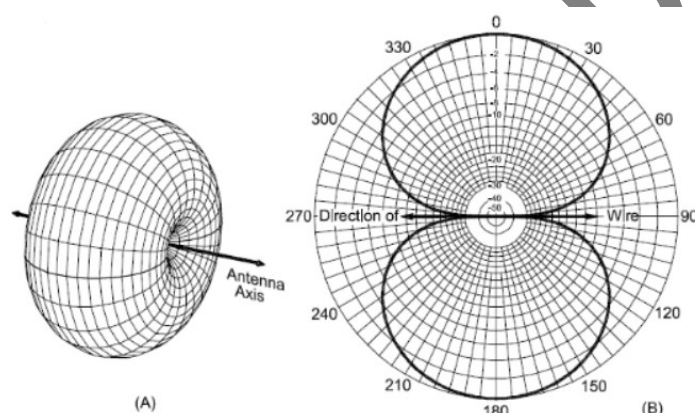


Figura 180. Diagrama de radiación de un dipolo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

(B) presenta una sección transversal del modelo tridimensional mostrado en (A). Se ilustra la disposición de la antena y las direcciones circundantes se representan en el círculo perimetral. La escala de intensidad desde el centro hacia el borde del modelo generalmente se expresa en decibelios, si bien el incremento de cada anillo puede ajustarse para revelar los aspectos específicos del patrón. Es fundamental garantizar que las escalas de intensidad sean equivalentes al contrastar los patrones de distintas antenas.

El diagrama de radiación típicamente se estructura de modo que contacte el círculo exterior en el punto de máxima intensidad. Posteriormente, la escala refleja la intensidad relativa de las señales irradiadas en cualquier dirección, donde el punto máximo representa 0 dB en relación con todas las demás orientaciones. Frecuentemente, una leyenda en el gráfico proporciona el valor de ganancia en el círculo perimetral. Para establecer comparaciones entre antenas, es recomendable utilizar diagramas con idéntico valor de ganancia en el círculo exterior. Alternativamente, si se están modelando antenas, se sugiere trazar los diagramas de radiación de todas en un gráfico común.

Los diagramas de radiación de la antena describen la señal irradiada en el campo lejano, que se inicia a varias longitudes de onda de la antena y se extiende hasta el infinito. Las antenas poseen además una región de campo cercano que resulta demasiado próxima para que emerja el patrón definitivo. En el campo lejano, la morfología del patrón permanece independiente de la distancia.

EFECTOS DEL SUELO

La impedancia en el punto de conexión de un dipolo, así como su patrón de radiación, experimentan modificaciones significativas en función de su altura física sobre la superficie terrestre. Estos cambios se originan por la presencia de la representación especular eléctrica de la antena, generada en el terreno con capacidad conductora ubicado bajo la estructura radiante. Aunque el terreno podría no constituir un conductor eléctrico óptimo, la imagen especular permanece presente e influye en el desempeño del sistema de antena.

La impedancia del punto de alimentación sufre alteraciones porque la representación especular, siguiendo las características de toda imagen reflejada, se invierte eléctricamente respecto al dipolo original. Conforme la imagen y la antena reducen su distancia, la estructura radiante real comienza a experimentar un efecto de cortocircuito provocado por su reflejo. Cuando la altura es inferior a $1/2$ de longitud de onda, la impedancia del punto de alimentación del dipolo disminuye de manera progresiva hasta aproximarse prácticamente a cero cuando se encuentra a nivel del suelo. En alturas superiores a $1/2$ de longitud de onda, la impedancia presenta variaciones según lo ilustrado en la Figura 181, convergiendo finalmente hacia un valor estable cuando se alcanza una altura equivalente a múltiples longitudes de onda.

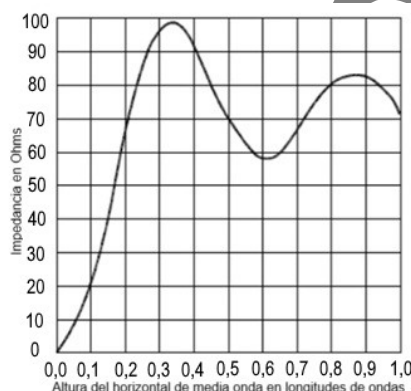


Figura 181. Variación de la impedancia del punto de alimentación y altura física del suelo.
(Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

La elevación respecto a la superficie terrestre influye igualmente en los patrones de radiación electromagnética, debido a la reflexión de la energía irradiada por la antena sobre el terreno. El diagrama de radiación efectivo se constituye mediante la combinación de la energía transmitida directamente desde la antena y aquella que ha experimentado una reflexión superficial. Las señales propagadas de manera directa y las reflejadas presentan diferentes intervalos temporales en su trayectoria hacia la antena receptora, lo que permite que puedan superponerse, anularse recíprocamente o generar una interacción intermedia. Este fenómeno genera un patrón modificado de lóbulos y zonas de cancelación que no existirían en un escenario de propagación en espacio libre.

La Figura 182 ilustra la progresión cuando un dipolo experimenta incrementos graduales de altura, desde niveles próximos al suelo hasta superar una longitud de onda completa. En alturas inferiores a $1/2$ longitud de onda, el patrón del dipolo resulta prácticamente omnidireccional, con máxima intensidad en trayectoria rectilínea. Conforme se alcanza una elevación equivalente a $1/2$ longitud de onda, la energía reflejada y directa se neutralizan en dirección vertical, mientras se potencian en ángulos intermedios, generando un diagrama de radiación caracterizado por picos y zonas de anulación.

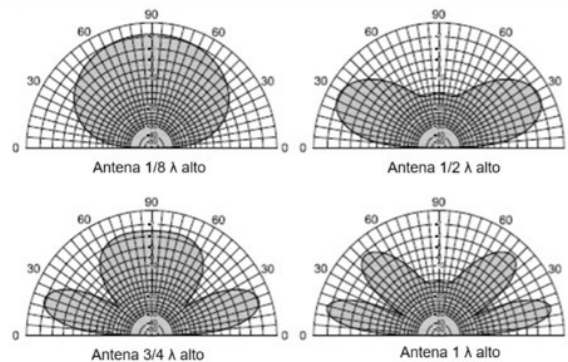


Figura 182. Patrón de radiación de un dipolo en función de la variación de la altura. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Determinar la altura correcta de la antena resulta fundamental para alcanzar los propósitos previstos.

Por ejemplo, diversas organizaciones de servicio público emplean HF para comunicaciones regionales, aprovechando la propagación NVIS.

Los dipolos horizontales situados entre $1/10$ y $1/4$ de longitud de onda de altura generan un patrón omnidireccional de ángulo elevado ideal para aplicaciones NVIS. La Figura 182 ilustra el patrón NVIS característico de un dipolo de $1/8$ de longitud de onda sobre la superficie terrestre.

La polarización influye en la cantidad de señal que se pierde por la resistencia del terreno. Las ondas radioeléctricas que se reflejan desde la superficie presentan menores pérdidas cuando la polarización es paralela al plano horizontal. Es decir, cuando las ondas están polarizadas horizontalmente. Dado que el diagrama de radiación de la antena se compone de ondas reflejadas que se combinan con ondas directas no refractadas, una reducción en las pérdidas de reflexión produce una intensidad de señal máxima más potente.

No obstante, las antenas verticales instaladas en tierra pueden generar señales más intensas en ángulos de radiación bajos comparadas con antenas polarizadas horizontalmente a alturas reducidas. Esto implica que frecuentemente se prefieren para contactos DX en bandas HF inferiores, donde no resulta práctico elevar antenas polarizadas horizontalmente a la altura necesaria para señales de ángulo bajo robustas.

IMPEDANCIA DEL PUNTO DE ALIMENTACIÓN

Una característica esencial de una antena radica en la impedancia del punto de alimentación que se presenta en la línea de transmisión. La impedancia del punto de alimentación representa simplemente la relación entre la tensión de RF y la corriente en el punto de conexión de la línea de transmisión con la antena. Si la tensión y la corriente están en fase, la impedancia del punto de alimentación es puramente resistiva y la antena es resonante, independientemente del valor de la resistencia. Si la tensión y la corriente no están en fase, la impedancia también contendrá cierta reactancia que puede ser inductiva o capacitiva. La impedancia del punto de alimentación comprende la resistencia a la radiación de la antena, las pérdidas óhmicas, incluyendo las pérdidas de tierra, y cualquier reactancia provocada por la no resonancia de la antena.

La impedancia en el punto de alimentación experimenta variaciones según la posición dentro de la antena. Analícese un dipolo resonante de media longitud de onda donde la corriente alcanza su máximo en el punto central y su mínimo en los extremos. La impedancia en el punto de alimentación resulta más reducida en el centro de la antena, donde la proporción entre tensión y corriente es menor. No obstante, al desplazar el punto de alimentación hacia cualquiera de los extremos del dipolo, la tensión se incrementa mientras la corriente disminuye, provocando un aumento en la impedancia del punto de alimentación. En las proximidades del centro, la impedancia del punto de alimentación es inferior a 100Ω , mientras que en los extremos puede

alcanzar varios miles de ohmios. Si se transfiere idéntica cantidad de energía al dipolo en ambas ubicaciones del punto de alimentación, la señal radiada permanecerá constante.

El valor de la impedancia del punto de alimentación de una antena resulta influenciado adicionalmente por diversos factores. Uno de ellos es la ubicación de la antena en relación con objetos circundantes, particularmente con respecto a la superficie terrestre. Por ejemplo, en un espacio completamente libre sin elementos próximos, la resistencia a la radiación de un dipolo resonante de 1/2 longitud de onda fabricado con alambre delgado es aproximadamente 73 Ω en su región central. Conforme la antena se aproxima al suelo, la resistencia a la radiación disminuye, reduciendo consecuentemente la impedancia del punto de alimentación. Otras superficies conductoras cercanas, como estructuras edilicias y antenas adicionales, pueden igualmente incidir en la impedancia del punto de alimentación.

Otro factor relevante es la proporción longitud/diámetro del conductor que compone la antena. A medida que el conductor incrementa su grosor, la resistencia a la radiación experimenta una reducción. Para la mayoría de los calibres de cable prácticos, la resistencia a la radiación del dipolo de media onda se aproxima a 65 Ω . En frecuencias VHF y superiores, la resistencia a la radiación del dipolo oscilará entre 55 Ω y 60 Ω para antenas construidas con varillas o tubos.

EFICIENCIA DE LA ANTENA

La eficiencia de la antena, esto es, el cociente entre la potencia electromagnética emitida en forma de ondulaciones radioeléctricas y la potencia total que ingresa al dispositivo de transmisión, se determina mediante:

$$Eficiencia = \frac{R_R}{R_T} * 100\%$$

Dónde:

- R_R = resistencia radiante.
- R_T = resistencia integral.

El valor efectivo de la resistencia radiante posee una incidencia marginal sobre la eficiencia radiológica de un dispositivo antena práctico. Esta circunstancia obedece a que la resistencia óhmica representa únicamente una magnitud cercana a 1 Ω con los conductores empleados en antenas de considerable sección transversal. La resistencia óhmica no adquiere relevancia significativa hasta que la resistencia radiante desciende a valores sumamente reducidos, por ejemplo, menos de 10 Ω , situación que puede presentarse cuando múltiples elementos del sistema de antena se encuentran extremadamente próximos entre sí o en configuraciones como látigos móviles y bucles compactos que resultan considerablemente reducidos en proporción a su longitud de onda.

5.2.3 Antenas simples y multibanda

Cualquier elemento conductor puede funcionar potencialmente como una antena, aunque seleccionar un dispositivo de radiación eficiente y provechoso demanda cierto conocimiento especializado. No resulta imperativo que los radioaficionados sean especialistas en diseño de sistemas radiantes, pero deben comprender los principios fundamentales de estas estructuras. El profesional aprenderá detalles más profundos sobre el funcionamiento de antenas elementales y sistemas de alimentación, posteriormente expandiendo su comprensión sobre configuraciones direccionales habituales.

5.2.3.1 Antenas móviles de HF

Las antenas móviles de HF generalmente corresponden a alguna tipología de sistema de plano terrestre. La configuración más popularmente utilizada es indiscutiblemente el látigo orientado verticalmente, consistente en una delgada varilla metálica montada sobre la superficie conductora del vehículo, proporcionando cobertura omnidireccional. Los látigos resultan habituales en las bandas VHF y UHF.

No obstante, en ondas decamétricas, resulta impracticable implementar un látigo móvil de longitud $\lambda/4$ completa en bandas inferiores a 28 MHz y 24 MHz. Para emplear látigos prácticos en rangos de frecuencia más reducidos, se implementan técnicas de carga destinadas a incrementar su longitud eléctrica. Algunas metodologías de carga más comunes comprenden:

- **Bobinas de carga:** incorporación de una bobina en la base o en posiciones intermedias de la antena.
- **Sombreros de capacitancia:** adición de radios o estructuras similares a rueda cerca de la zona superior del elemento radiante.
- **Carga lineal:** plegamiento parcial de la antena sobre sí misma.

Otra característica recurrente en látigos móviles es la presencia de una bola de corona en el extremo superior. Aunque aporta una mínima capacitancia de carga, su función primordial radica en prevenir descargas de alta tensión desde la punta afilada durante los procesos de transmisión.

Si bien las técnicas de carga pueden generar impedancias razonables en el punto de alimentación, una antena modificada resulta menos eficiente que un látigo rectilíneo de dimensiones completas, presentando además un ancho de banda operativo más reducido sin necesidad de resintonización. El diseño denominado “destornillador” —un látigo incorporando una bobina de carga ajustable en su base— ha ganado significativa popularidad para operaciones móviles de HF, representando un equilibrio óptimo entre rendimiento y practicidad.

5.2.3.2 Dipolos y planos de tierra

La configuración más elemental de un sistema radiante corresponde al dipolo, cuya denominación implica fundamentalmente dos componentes eléctricas. Estos elementos conductores se estructuran mediante un segmento rectilíneo de cable metálico o tubo con una extensión equivalente a media longitud de onda ($1/2 \lambda$), incorporando un punto de conexión en alguna zona de la estructura, habitualmente en su región central. Los dipolos presentan características de construcción y operación sumamente accesibles, mostrando un rendimiento satisfactorio en diversos contextos de implementación. Predominantemente, estos dispositivos se disponen en orientación horizontal, especialmente en rangos de frecuencia inferiores, generando una radiación con polarización horizontal.

Adicionalmente, estos elementos radiantes admiten configuraciones alternativas como instalación vertical, disposición inclinada o suspensión desde un único soporte central (configuraciones denominadas V invertida).

Un dipolo emite la radiación más intensa hacia el elemento de la antena y la señal más atenuada desde sus terminales. El modelo de propagación de un dipolo aisladamente ubicado en el espacio presenta una morfología similar a una dona, tal como se visualiza en la Figura 180. La representación gráfica despliega patrones bidimensionales y tridimensionales. El patrón bidimensional constituye un corte transversal del patrón tridimensional.

Una tipología de antena de uso frecuente es la denominada antena de plano terrestre. La variante más extendida de este modelo de antena corresponde a un diseño de un cuarto de longitud de onda ($1/4 \lambda$) con el punto de conexión ubicado en la base estructural (ver Figura 183). El plano de tierra funciona como la mitad de un dipolo, complementándose con un espejo eléctrico generado por la superficie de referencia. La construcción del plano de tierra puede realizarse mediante una lámina metálica o una red de conductores denominados radiales que se proyectan desde la base del elemento radiante.

La configuración de antena de plano terrestre de $5/8 \lambda$ presenta ventajas significativas respecto a la versión de $1/4 \lambda$. Producto de su longitud ampliada, la disposición vertical $5/8 \lambda$ concentra una mayor proporción de energía en dirección horizontal, lo que resulta en una optimización del alcance de transmisión.

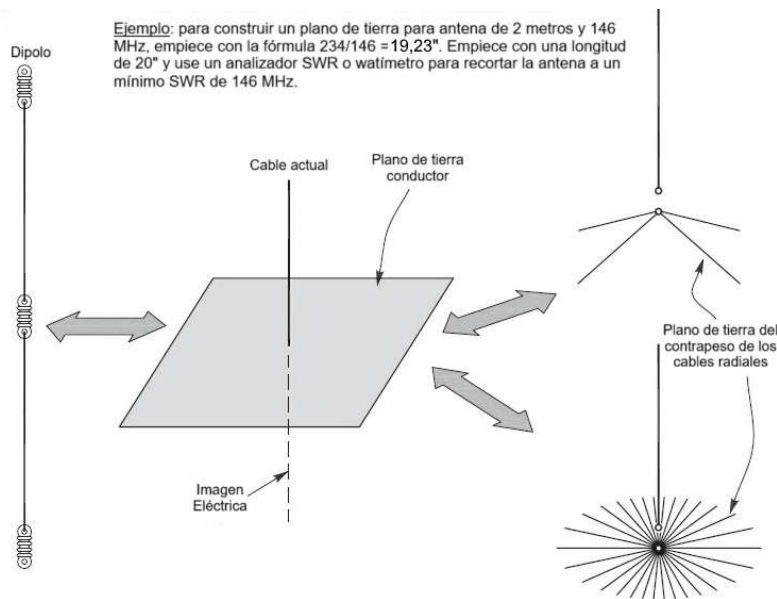


Figura 183. Antena de plano terrestre. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

En las bandas de HF por debajo de 24 MHz, el aumento de la longitud de onda hace que un plano de tierra de $1/4 \lambda$ sea menos práctico para el funcionamiento portátil y móvil. Para reducir el tamaño físico de la antena, a menudo se construye con parte del conductor radiante enrollado en una bobina o un inductor separado insertado en la antena. Esta técnica se denomina carga inductiva y hace que la antena sea más larga eléctricamente de lo que es físicamente.

5.2.3.3 Dipolos

El elemento radiante más elemental corresponde a un dipolo (derivado de dos polaridades eléctricas), un conductor rectilíneo que posee una longitud equivalente a $1/2$ de la longitud de onda ($\lambda/2$), con su punto de alimentación ubicado en la región central. Un dipolo emite radiación con mayor intensidad en los laterales de su eje, específicamente en un plano que contiene el conductor de la antena. La emisión de menor potencia se concentra en los extremos, tal como se ilustra en la Figura 180. Esta configuración denominada figura de ocho, representa la morfología del patrón de acimut para un dipolo en un entorno de espacio libre. Cuando se implementa sobre una superficie terrestre real, las reflexiones generadas provocarán modificaciones en los patrones de radiación tanto de acimut como de elevación, según se detallará posteriormente en esta sección.

Considerando que un dipolo presenta un patrón de radiación claramente establecido y resulta tan esencial, frecuentemente se emplea como antena de referencia para evaluar mediciones de ganancia. La ganancia con relación a la radiación máxima de una antena dipolo se expresa en dBd. En caso de utilizarse una antena isotrópica como punto de referencia (una antena teórica que emite uniformemente en todas las direcciones), la ganancia se determina en dBi. Es posible convertir dBd a dBi adicionando 2,15 dB y de dBi a dBd restando 2,15 dB.

La corriente en un dipolo de media onda alcanza su valor máximo en el centro y resulta nula en los extremos. La tensión a lo largo del dipolo es más elevada en los extremos y más reducida en la zona central (véase Figura 184.) La impedancia del punto de alimentación (la relación entre la tensión de RF y la corriente) en el centro de un dipolo en espacio libre es aproximadamente 72 Ω , aunque varía significativamente dependiendo de su altura sobre la superficie terrestre, como se discutirá posteriormente en esta sección.

La impedancia se incrementa a medida que el punto de alimentación se distancia del centro, pudiendo alcanzar varios miles de ohmios en los extremos. Un ejemplo representativo lo constituye la antena de media onda alimentada por el extremo (EFHW, por sus siglas en inglés),

popular para operaciones portátiles debido a su ligereza y sencilla instalación. El EFHW corresponde simplemente a un dipolo de media onda alimentado en su extremo.

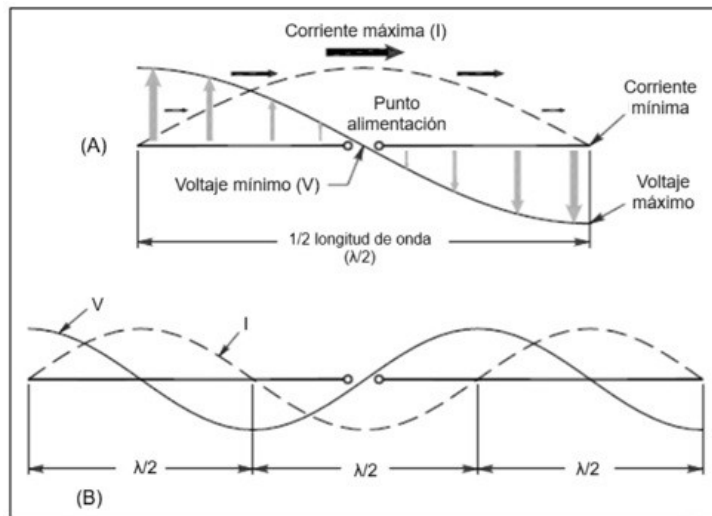


Figura 184. Dipolo de media onda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

En el medio abierto, 1/2 de la longitud de onda expresada en pies equivale a 492 dividido por la frecuencia en MHz. No obstante, si se corta un segmento de conductor con esa dimensión, generalmente se encontrará que resulta excesivamente extenso para entrar en resonancia a dicha frecuencia. Durante la resonancia, un dipolo de 1/2 onda fabricado con cable convencional será más reducido que la longitud de onda de 1/2 en el espacio libre por diversas causas.

Primeramente, el diámetro físico del conductor provoca que eléctricamente parezca ligeramente más extenso de lo que es dimensionalmente. Conforme la proporción longitud-diámetro (l/d) del cable se torna más reducida, lo que implica que el conductor se vuelve más grueso, será más breve cuando alcance la resonancia. En segundo término, la elevación del dipolo sobre la superficie terrestre también incide en su frecuencia de resonancia. Adicionalmente, los conductores próximos, el aislamiento del cable, los mecanismos mediante los cuales el conductor se asegura a los aisladores y a la línea de alimentación también influyen en la longitud resonante.

Por estas consideraciones, una fórmula universal única para la longitud del dipolo, como la habitual $468/f$, no resulta demasiado útil. Será necesario iniciar con una longitud cercana a la del espacio libre y estar preparado para ajustar el dipolo hasta lograr la resonancia empleando un medidor de ROE o un analizador de antena.

Los dipolos alimentados por centro resultan los más sencillos de utilizar en la banda para la cual son resonantes. La impedancia del punto de alimentación de una antena de este tipo representa una combinación adecuada para el cable coaxial de $50\ \Omega$ o $75\ \Omega$ empleado por la mayoría de los radioaficionados. La impedancia del punto de alimentación de un dipolo de media onda también constituye una correspondencia apropiada para el cable coaxial en múltiplos impares de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, un dipolo para la banda de 40 metros (7 MHz) puede igualmente utilizarse en 15 metros (21 MHz). En su tercer armónico, el dipolo opera como tres dipolos de media onda conectados consecutivamente. En armónicos pares y bandas no resonantes, la impedancia del punto de alimentación del dipolo puede resultar elevada, justo cuando se aproxima al extremo de la antena.

Un dipolo no requiere ser rectilíneo para ser eficaz. Si se cuenta con un único soporte de antena, puede apoyarse un dipolo en su centro, donde resulta conveniente conectar la línea de alimentación. Esta configuración se denomina V invertida. Siempre que los segmentos del dipolo conformen un ángulo de 90 grados o superior, la V invertida resulta casi tan efectiva como un dipolo instalado horizontalmente.

5.2.4 Antenas direccionales

Los dipolos, planos de tierra y bucles elementales presentan un rendimiento adecuado, aunque exhiben una ganancia limitada. Es decir, sus patrones de radiación carecen de direccionalidades marcadamente preferenciales. En numerosos escenarios, resulta fundamental concentrar la potencia transmitida y optimizar la recepción en una dirección específica, por lo que se implementa una antena con haz direccional. Los haces pueden emplearse para incrementar el nivel de señal en una estación distante o para minimizar interferencias o ruidos parásitos. En VHF y UHF, cuando una trayectoria de señal directa se encuentra obstruida por una edificación u otro obstáculo, es posible utilizar una antena de haz para dirigir la señal hacia una superficie reflectante y evadir la obstrucción.

Las vigas se generan mediante matrices de múltiples elementos (los dipolos y planos de tierra constituyen antenas de elemento único). Los modelos de antenas directivas más frecuentemente utilizado por los radioaficionados son los Yagis (denominados así por uno de sus creadores).

CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS DIRECCIONALES

Las antenas direccionales se emplean extensivamente porque generan ganancia y rechazan interferencias y ruidos provenientes de direcciones distintas a la deseada. Lograr una recepción óptima con la estación contactada implica orientar el lóbulo principal de la antena hacia dicha estación. Para posicionar la antena con precisión cuando la estación se ubica más allá del horizonte visual, será necesario un mapa cartográfico especializado denominado mapa de proyección azimutal. Este documento representa el mundo en un círculo centrado en una ubicación particular (como la estación propia), de modo que las trayectorias hacia otras ubicaciones se visualizan como grandes círculos, proporcionando el rumbo y distancia exactos hacia cualquier punto.

El dipolo, plano de tierra y cable aleatorio utilizan un único elemento radiante. Un conjunto de antenas emplea dos o más elementos para generar la máxima intensidad de campo en una dirección específica, denominada lóbulo principal o lóbulo principal del diagrama de radiación. Existen dos tipologías de matrices: impulsadas y parásitas. En un conjunto accionado, todos los elementos de antena se conectan al transmisor y se denominan elementos impulsados. En un conjunto parásito, uno o más elementos no se vinculan a la línea de alimentación, pero influyen en el diagrama de antena mediante interacción con la energía radiada de los elementos impulsados.

Independientemente de que el conjunto sea impulsado o parásito, su patrón de radiación se determina por interferencias constructivas y destructivas. Cuando dos ondas interactúan, pueden reforzarse mutuamente si se encuentran en fase y anularse si están desfasadas. En caso contrario, se produce una cancelación parcial.

Si dos elementos de antena se separan más allá de una pequeña fracción de longitud de onda, las diferencias en los tiempos de propagación hacia una antena distante desde cada elemento son suficientes para generar una cancelación variable según la posición de la antena distante. La figura ilustra un ejemplo de cancelación para un par de antenas dipolo. Los campos radiados de cada antena se suman y restan en diversos ángulos alrededor de las antenas, formando lóbulos y nulos.

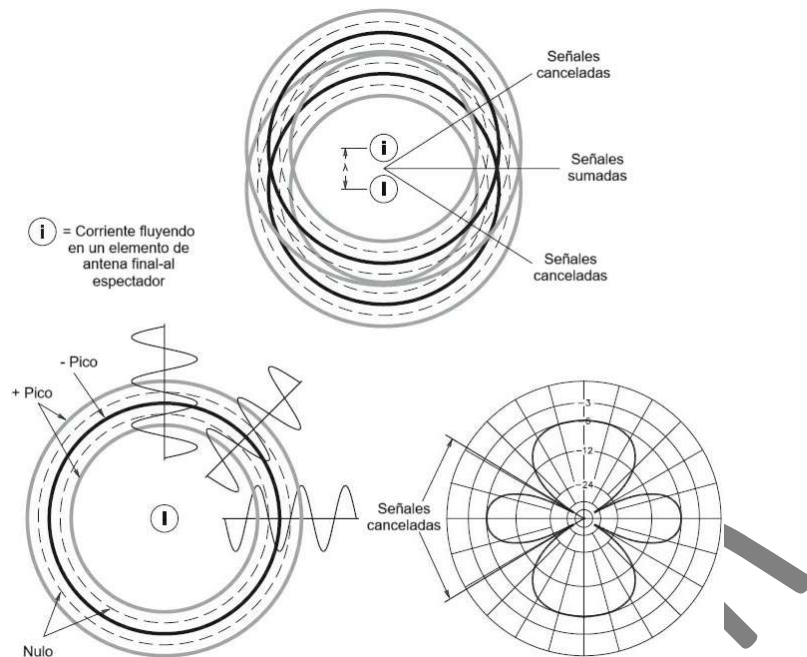


Figura 185. Cancelación para un par de antenas separadas una longitud de onda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

En una matriz controlada, la potencia se aplica a todos los elementos, como en la Figura 185. En un conjunto parásito, los elementos de la antena están tan cerca uno del otro que la energía del elemento impulsado induce una corriente para fluir en el elemento parásito. Esa corriente irradia un campo, llamado re-radiación, ¡como si hubiera sido suministrado por una línea de alimentación! Mediante la colocación y el ajuste cuidadosos de los elementos parásitos y accionados, se puede crear un diagrama de antena direccional.

ANTENAS DIRECCIONALES

Las antenas direccionales están diseñadas específicamente para concentrar su potencia radiada en una (o más) direcciones. La dirección en la que se concentra la mayor parte de la potencia es el lóbulo principal o el lóbulo principal de la radiación y se designa como la dirección de avance. La mayoría de las antenas direccionales también tienen lóbulos menores en las direcciones posterior y lateral. Las direcciones de radiación mínima entre los lóbulos son los nulos del patrón.

La Figura 186 es un ejemplo de un diagrama de radiación para una antena de haz VHF típica, que ilustra lóbulos mayores y menores. Al reducir la radiación en las direcciones lateral y trasera y concentrarla en cambio en la dirección de avance, una antena de haz puede transmitir o recibir una señal más fuerte en esa dirección.

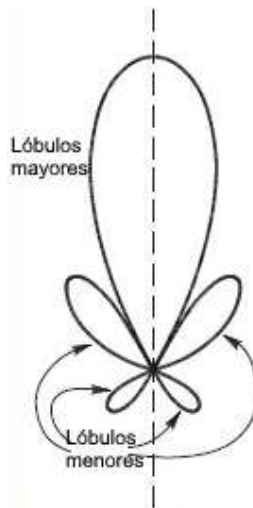


Figura 186. Patrón de radiación típico de una antena VHF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

ESTRUCTURA YAGI

Por la conjunción de eficiencia económica, prestaciones y sencillez, resulta complicado superar la antena Yagi. Con mayor precisión denominada antena Yagi-Uda, su diseño fue inicialmente descrito en 1927. La Yagi continúa siendo la más preponderante entre las antenas direccionales debido a su configuración elemental y excelente funcionamiento. Incluso un Yagi básico puede disminuir las señales de interferencia y el ruido provenientes de direcciones no deseadas hacia la zona posterior y laterales de la antena, una característica fundamental en una banda congestionada como la de 20 metros.

El Yagi representa una matriz parásita con un único elemento excitado y al menos un elemento parásito, según se ilustra en la Figura 187. El elemento impulsado constituye un dipolo resonante, de aproximadamente $1/2$ longitud de onda de extensión. Los elementos se disponen físicamente para generar ganancia en un único lóbulo principal y cancelar señales en la dirección opuesta. Los elementos parásitos ubicados en la dirección de máxima ganancia se denominan directores y resultan ligeramente más reducidos que el elemento impulsado. Los elementos parásitos en la dirección de ganancia mínima se identifican como reflectores y son ligeramente más extensos que el elemento impulsado. En una antena Yagi, la relación frontal-trasera representa la proporción entre la intensidad de señal en el pico del lóbulo principal del diagrama de radiación y el ubicado exactamente en dirección contraria.

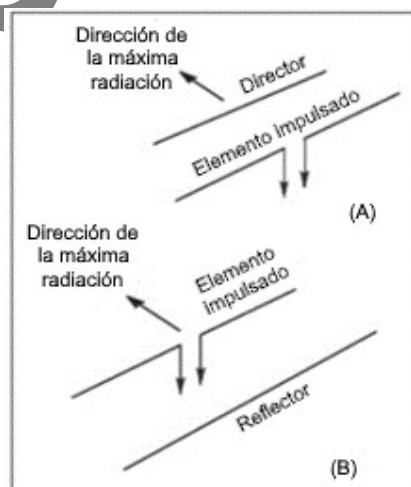


Figura 187. Antena Yagi de 2 elementos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

COMPENSACIONES DE DISEÑO

Una vez establecidos los principios fundamentales de diseño, existen múltiples estrategias para perfeccionar un diseño Yagi adaptándolo a requerimientos específicos. ¿Resulta prioritario maximizar la ganancia o lograr una superior relación frontal-trasera? ¿Qué margen de variación de ROE se considera aceptable en el espectro completo? Desarrollar una antena de configuración universal representa un desafío considerable.

Las variables fundamentales de las antenas Yagi comprenden la extensión y el diámetro de cada elemento, así como su disposición a lo largo del brazo del soporte central. Estos parámetros impactan de manera diferenciada la ganancia, la ROE y la relación entre las secciones frontal y posterior:

La incorporación de más directores incrementa la ganancia.

Un elemento conductor más extenso, manteniendo constante el número de directores, aumenta la ganancia hasta alcanzar una longitud máxima, tras la cual experimenta una reducción.

Elementos con diámetros superiores disminuyen la variación de ROE en función de la frecuencia (ampliando el margen de ancho de banda de ROE).

El posicionamiento y ajuste de los elementos influye en la ganancia y la impedancia del punto de alimentación (consecuentemente en la ROE). Indudablemente existen principios adicionales de causalidad, pero estos representan decisiones típicas que diseñadores y adquirentes deben considerar.

El proceso de modificación de un diseño para obtener determinado rendimiento se denomina optimización. Ciertos programas de modelado de antenas permiten iniciar desde un diseño básico y posteriormente perfeccionarlo para conseguir la máxima ganancia, mejor relación frontal-trasera, impedancia del punto de alimentación, entre otros parámetros. Por ejemplo, al adquirir una antena comercial, es factible experimentar para incrementar la ganancia o mejorar la relación frontal-trasera. El diseño y modificación de antenas constituye una actividad muy popular entre los radioaficionados.

ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIA

La mayoría de los diseños Yagi con patrones de radiación deseables presentan una impedancia de punto de alimentación ligeramente inferior a los 50 Ω del cable coaxial convencional; típicamente, la impedancia del punto de alimentación oscila entre 20 Ω y 25 Ω . Esto genera una ROE no deseable superior a 2:1. Para reajustar la impedancia del punto de alimentación a 50 Ω , se implementan diversas técnicas de adaptación de impedancia.

La técnica más frecuente es la coincidencia gamma, ilustrada en la Figura 188 (A). Esta corresponde a una sección breve de línea de transmisión de conductor paralelo que utiliza el elemento impulsor como uno de sus conductores. La línea de transmisión transforma la baja impedancia del punto de alimentación a un valor superior. Se emplea un capacitor ajustable, ya sea un capacitor variable real o un segmento corto de cable aislado dentro de una varilla gamma hueca, para calibrar la coincidencia gamma hasta lograr una ROE de 1:1. Una ventaja mecánica de la coincidencia gamma respecto a otras técnicas radica en que el elemento impulsor no requiere aislamiento de la pluma, simplificando su construcción.

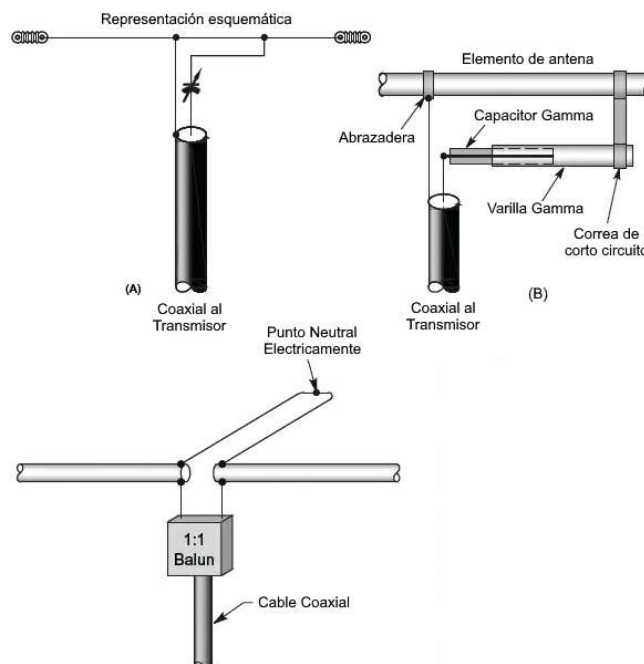


Figura 188. Coincidencia gamma. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Existen otras técnicas de adaptación de impedancia de las antenas Yagi, como la coincidencia beta que se muestra en (B). La coincidencia beta es un segmento corto o muñón de la línea de transmisión de conductor paralelo conectada directamente a través del punto de alimentación del elemento impulsado. El muñón actúa como una reactancia inductiva que puede compensar cualquier reactancia capacitiva en el punto de alimentación. El balun¹ se utiliza para mantener el equilibrio eléctrico entre ambas mitades del elemento accionado.

En VHF y UHF, también es posible utilizar elementos de diámetro relativamente grande para que la impedancia del punto de alimentación esté cerca de 50Ω sin ningún dispositivo de adaptación externo.

5.2.5 Antenas de bucle

Las antenas de bucle abarcan completamente un espacio que puede presentar una configuración circular, cuadrangular, triangular o cualquier geometría abierta simple que no resulte excesivamente estrecha. La línea de alimentación puede establecerse mediante una interrupción en el bucle o mediante la utilización de un bucle de menor dimensión para transferir la energía de radiofrecuencia al bucle principal.

BUCLÉS GRANDES

Un bucle cuadrado donde cada lado mide $1/4$ de longitud de onda ($1/4 \lambda$) recibe la denominación de bucle cuádruple. Los bucles triangulares o delta generalmente presentan simetría, con cada segmento equivalente a $1/3$ de longitud de onda. Algunos bucles delta modifican la longitud de un segmento, extendiendo proporcionalmente las otras dos porciones para mantener su configuración simétrica.

Un bucle con una longitud de onda opera eléctricamente como dos dipolos conectados consecutivamente, con sus extremos abiertos unidos. La ubicación de conexión de la línea de alimentación en un bucle se convierte en un punto de elevada intensidad de corriente, similar al centro de un dipolo. Independientemente del punto de conexión de alimentación, emerge una

¹ Es un acrónimo de BALanced to UNbalanced (balanceado y no balanceado en español), es decir, un dispositivo que permite conectar una línea balanceada (como un dipolo) a una línea no balanceada (como un cable coaxial).

imagen especular del punto de alta corriente a $1/2$ longitud de onda del punto de alimentación a través del bucle, según se ilustra en la Figura 189.

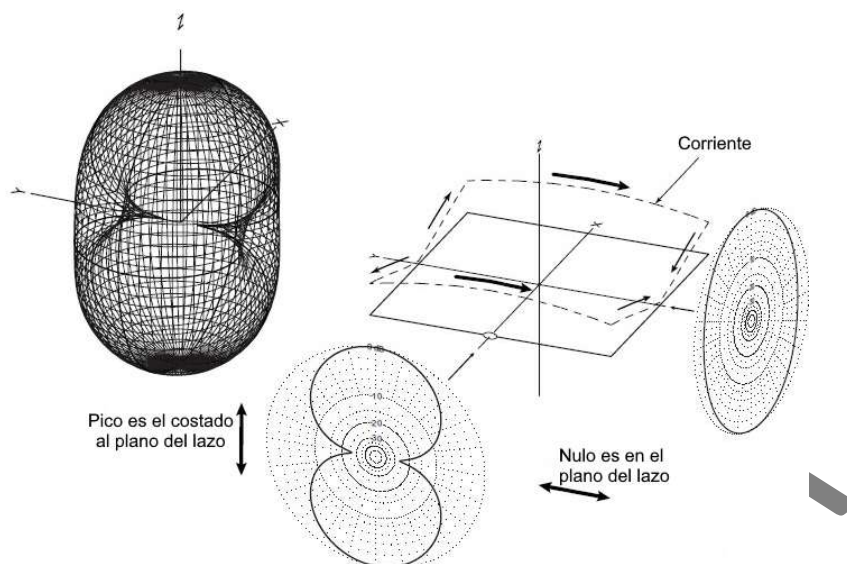


Figura 189. Antena de bucle. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

El diagrama de radiación del bucle de 1λ en la Figura 189 anterior evidencia que la dirección de la señal máxima se propaga lateralmente al plano del bucle, independientemente de su configuración geométrica: circular, cuadrangular o triangular. Cuando el bucle se dispone horizontalmente, la mayor proporción de su señal se propagará verticalmente hacia arriba, lo que lo convierte en un dispositivo radiante eficiente para establecer comunicaciones locales y regionales. Por otro lado, la orientación vertical del bucle direcciona la señal máxima hacia el horizonte, resultando óptimo para realizar contactos DX.

Cuando la circunferencia del bucle supera significativamente 1 longitud de onda, los patrones de corriente periféricos desarrollan más de dos puntos de máxima y mínima intensidad. Al alcanzar múltiples longitudes de onda, pueden generarse numerosos picos y zonas de anulación de corriente. Tales variaciones generan múltiples lóbulos y regiones de nulo en el diagrama de radiación, según se ilustra en la Figura 190. El resultado final es un patrón prácticamente omnidireccional con un ángulo máximo de radiación ligeramente inferior al de un dipolo situado a idéntica altura.

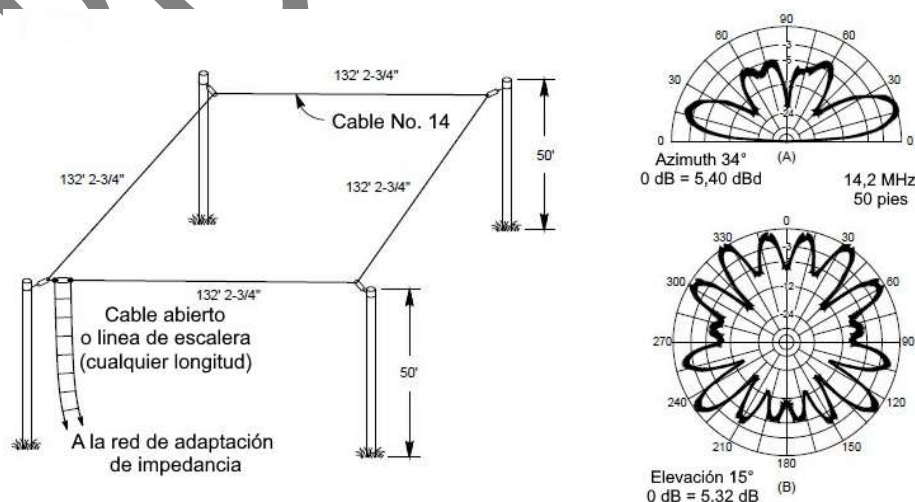


Figura 190. Diagrama de antena y patrón de radiación. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

VIGAS DE BUCLE CUÁDRUPLE Y DELTA

Los bucles pueden implementarse en matrices, de manera similar a los dipolos. De hecho, existe una variante frecuente de la antena Yagi que incorpora bucles cuádruples para sus elementos. No resulta sorprendente que esta antena direccional reciba la denominación de cuádruple. El quad comprende dos o más bucles de dimensión completa montados en una estructura similar a los elementos de un Yagi: reflector, elemento excitado y director(es). Los elementos direccionales de bucle cuádruple o delta poseen aproximadamente 1λ de circunferencia y operan bajo idénticos principios de reradiación y desplazamiento de fase que el Yagi. El elemento excitado de un cuádruple presenta aproximadamente $1/4\lambda$ por lado, mientras que un bucle delta simétrico exhibe aproximadamente $1/3\lambda$ por lado. Los reflectores de bucle cuádruple y delta presentan cerca de un 5% más de longitud circunferencial que el elemento excitado, y los directores resultan aproximadamente un 5% más reducidos. Un bucle cuádruple o delta de dos elementos con un elemento excitado y un reflector posee aproximadamente la misma ganancia direccional que un Yagi de tres elementos. La relación entre la ganancia frontal y trasera generalmente resulta superior en el Yagi. Los haces de bucle cuádruple y delta con idéntica cantidad de elementos presentan ganancias prácticamente equivalentes.

BUCLES PEQUEÑOS

Cuando la circunferencia del bucle es inferior a $1/3\lambda$, la corriente en el bucle se torna relativamente uniforme en todo su contorno. Este fenómeno provoca que el diagrama de radiación desarrolle nulos pronunciados laterales al plano del bucle. Imagínese el patrón de radiación en la Figura 189 pero generado por un bucle pequeño rotado 90 grados respecto al bucle de la figura.

Los circuitos de reducidas dimensiones se emplean extensivamente como dispositivos receptores y emisores portátiles o de perfil discreto. La anulación aguda y precisa de estos circuitos los convierte en herramientas eficaces para la localización direccional mediante la utilización del punto neutro para identificar la orientación de la mínima intensidad señalética. En zonas alejadas del punto neutro, estos pequeños circuitos presentan características prácticamente omnidireccionales. En el ámbito de la transmisión, pueden implementarse estas configuraciones para escenarios temporales o con limitaciones espaciales, orientándose típicamente en posición vertical según la representación gráfica. Considerando sus proporciones reducidas, estos circuitos no exhiben una eficiencia significativa, requiriendo una meticulosa atención para minimizar las pérdidas tanto en el elemento transmisor como en el conducto de alimentación.

ANTENAS HALO

El halo no constituye propiamente un circuito continuo, sino un dipolo curvado formando una circunferencia o cuadrilátero con sus extremos separados por un intersticio mínimo. No obstante, frecuentemente se percibe como un circuito de longitud de onda equivalente a $1/2$. De manera análoga a los circuitos continuos previamente descritos, el halo emite radiación con mayor intensidad en el plano del dispositivo. Generalmente se instalan horizontalmente, generando un patrón de propagación omnidireccional con polarización horizontal preferente para operaciones de señal débil de VHF. Los halos correspondientes a 6 metros y 2 metros pueden igualmente acoplarse a vehículos para funcionamiento móvil.

5.2.6 Antenas apiladas y sistemas de alta ganancia.

Es probable que el lector haya observado una configuración con un conjunto (¡o incluso más!) de antenas Yagi idénticas dispuestas verticalmente o en disposición paralela. La disposición de elementos radiantes de la manera ilustrada en la Figura 191 genera como consecuencia un incremento en la ganancia del sistema.

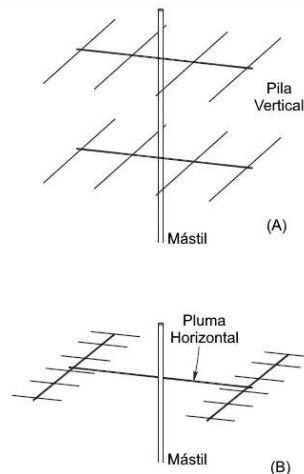


Figura 191. Antenas apiladas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Hay una ventaja complementaria en la disposición en serie de antenas. Al examinar los diagramas de radiación acimutal de las Yagis, se aprecia que conforme se incrementa el número de directores, la anchura del haz principal (el ángulo entre los puntos del lóbulo principal donde la ganancia disminuye 3 dB respecto al máximo) se torna más estrecha. No obstante, si se analiza el patrón de elevación, la adición de más directores no produce un efecto tan significativo. El apilamiento vertical de antenas incrementa la ganancia y reduce la amplitud del haz de elevación.

La mayoría de las configuraciones verticales, con antenas dispuestas directamente una sobre otra, separan los elementos aproximadamente $\lambda/2$ de distancia, aunque en ocasiones se utilizan separaciones superiores a 1λ . Con un espaciado de $\lambda/2$, la ganancia adicional para una pila vertical de dos haces con polarización horizontal es cercana a 3 dB. En algunos casos, las antenas se alinean de manera que los elementos son paralelos pero adyacentes, conformando una pila horizontal. En esta disposición, la separación es mayor para prevenir una interacción excesiva entre los elementos.

REGISTRO DE PUBLICACIONES PERIÓDICAS

Si no se observa con detenimiento una antena de televisión, podría considerarse simplemente otra Yagi. Una inspección más minuciosa revelará una sorpresa: ¡se trata de una antena periódica logarítmica! Comúnmente denominadas “logs”, la antena logarítmica periódica mostrada en la Figura 192 está diseñada para presentar un patrón de radiación consistente y una ROE reducida en un amplio espectro de frecuencias, hasta 10:1, lo que significa que el logarítmico periódico puede emplearse en múltiples bandas. Sin embargo, una antena logarítmica periódica no proporcionará la misma ganancia o relación frontal-trasera que una antena Yagi.

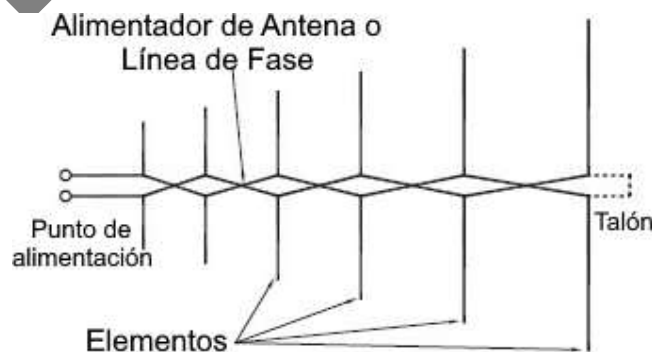


Figura 192. Arreglo de dipolos log periódico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

El término “log” en logarítmico hace referencia a su naturaleza logarítmica, mientras que “periódico” describe la distribución espacial de los componentes a lo largo de la estructura. La extensión y la disposición de los elementos experimenta un incremento logarítmico desde un extremo hasta el otro. Como consecuencia, la sección de la antena destinada a la radiación y recepción varía según la frecuencia: los elementos de menor longitud resultan activos en frecuencias elevadas, mientras que los elementos más extensos lo son en frecuencias reducidas. Cada elemento posee aproximadamente la dimensión de dipolos $\lambda/2$ en la frecuencia específica de su actividad. Una antena logarítmica periódica podría constituir una alternativa óptima para abarcar múltiples bandas cuando únicamente es viable instalar una antena rotatoria.

ANTENAS BEVERAGE

Desarrollada en 1922 por Harold Beverage, esta antena receptora fue concebida no para maximizar la ganancia, sino para minimizar el ruido y las señales de interferencia procedentes de direcciones no deseadas. El resultado es una disminución en la intensidad de la señal, pero una mejora significativa en la relación señal-ruido. La configuración representada corresponde a una antena de onda viajera. Conforme la onda incidente se desplaza a través del cable de la antena, genera una acumulación de tensión, de manera análoga a cómo el viento genera ondas al atravesar una superficie acuática. Cuando la onda alcanza el término de la antena, su energía se transfiere a la línea de alimentación.

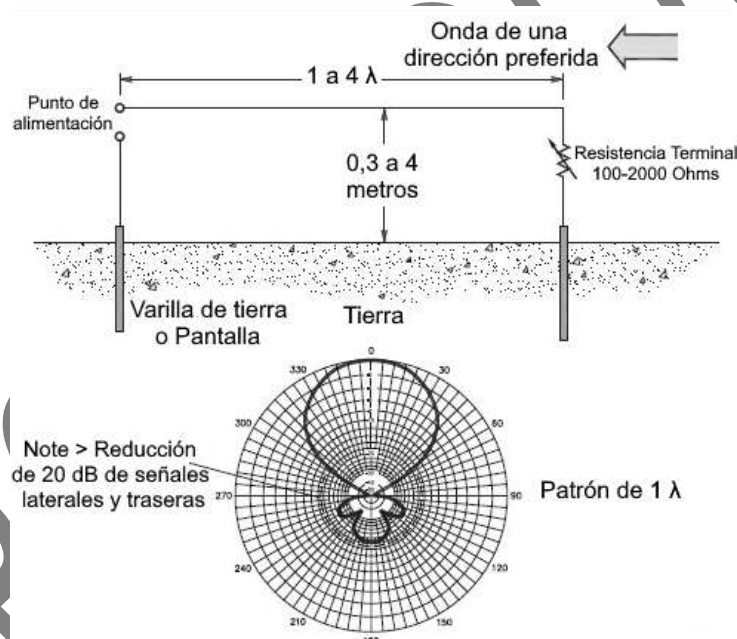


Figura 193. Antena Beverage. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Consiste en un conductor extenso y de baja elevación (típicamente inferior a 6,1 metros de altura) orientado paralelamente a la trayectoria de señal preferencial. Empleada de manera exclusiva para recepción direccional en las bandas de HF más inferiores (40 metros y longitudes de onda más extensas), la estructura presenta elevadas pérdidas terrestres y resulta demasiado ineficiente para funcionar como elemento transmisor.

ANTENAS MULTIBANDA

Hasta el momento, la discusión se ha concentrado primordialmente en elementos radiantes diseñados para una única banda. Resulta extraordinario poder instalar un dispositivo separado para cada banda, aunque rara vez resulta viable. La alternativa son antenas multibanda con rendimiento óptimo en más de una banda, frecuentemente en varias.

Como se analizó previamente, un dipolo de media onda puede utilizarse en sus armónicos impares sin un sintonizador y proporciona un rendimiento satisfactorio. Un cable aleatorio o una antena no resonante también pueden emplearse en múltiples bandas con un sintonizador. No obstante, lo que generalmente se comprende por antena multibanda es un diseño que se reconfigura eléctricamente para cada banda de operación.

La antena multibanda más elemental, el dipolo trampa, se ilustra en la Figura 194.

Cada trampa constituye un circuito LC paralelo. En su punto de resonancia funciona como un circuito abierto, por debajo de la resonancia como un inductor y por encima como un capacitor. En sus frecuencias de resonancia, las trampas operan como interruptores eléctricos abiertos, seccionando efectivamente el resto del elemento radiante más allá de su ubicación. A frecuencias más bajas, las trampas incorporan inductancia a la antena, provocando que el elemento parezca eléctricamente más extenso. A frecuencias más elevadas, la capacitancia acorta eléctricamente la antena.

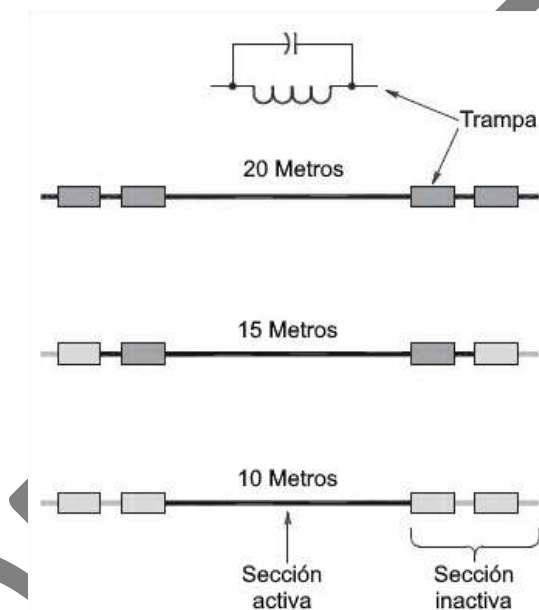


Figura 194. Antena multibanda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Para el dipolo de la trampa en la Figura anterior, en la frecuencia más reducida de funcionamiento, el elemento radiante se comporta como un dipolo convencional, cuya longitud está modificada por la inductancia de la estructura de trampa. En el rango de frecuencia donde la trampa presenta resonancia, los segmentos externos del elemento quedan desconectados eléctricamente, permaneciendo únicamente activo el segmento interior. Ciertos diseños de estructuras de antena con trampas resultan igualmente efectivos en rangos de frecuencia superiores. Las configuraciones Yagi también pueden incorporar trampas para operar en múltiples bandas. El modelo Yagi tribanda de tres elementos con trampas integradas en sus elementos representa una solución comprobada para las bandas de 20 metros, 15 metros y 10 metros.

Existen algunas limitaciones inherentes al empleo de técnicas como las trampas para implementar antenas multibanda. Primeramente, dado que el sistema radiante opera en diversos rangos espectrales, potencialmente emitirá armónicos y señales parásitas como si fueran intencionales. Corresponde al operador del transmisor garantizar que tales emisiones no se produzcan. En segundo término, las trampas presentan pérdidas intrínsecas que reducen la eficiencia del elemento radiante en cierta medida. Adicionalmente, debido a la reducción de longitud en las frecuencias inferiores de operación, el rendimiento de radiación será inferior comparado con una antena de dimensiones completas. No obstante, la utilización de antenas con trampas generalmente representa un equilibrio óptimo entre prestaciones, disponibilidad espacial y restricciones presupuestarias.

5.2.7 Líneas de alimentación y SWR

Los conductores de transmisión se emplean para establecer la conexión entre un dispositivo de radiocomunicación y su sistema de recepción. Igualmente, resultan fundamentales cuando se requiere transportar una señal de radiofrecuencia entre distintos equipos. Estos conductores están compuestos por dos elementos metálicos separados mediante un material dieléctrico, generalmente polimérico. La señal radioeléctrica se propaga tanto por los conductores como en el espacio intersticial entre ellos.

Los conductores de transmisión implementados en frecuencias radioeléctricas incorporan técnicas y materiales especializados con el propósito de minimizar la disipación energética en forma térmica y prevenir fugas de señales tanto hacia el interior como hacia el exterior. La atenuación del conductor se incrementa proporcionalmente con el aumento de la frecuencia para todas las tipologías de líneas de transmisión.

5.2.7.1 Cable coaxial

La línea de alimentación más frecuentemente empleada por los aficionados para establecer conexiones entre radios y antenas es el cable coaxial. Su utilización resulta sencilla y demanda consideraciones mínimas durante su instalación. La Figura 195 ilustra la estructura constructiva del cable coaxial. Un conductor central se encuentra rodeado por un aislamiento (denominado aislante central o dieléctrico). Este aislamiento está cubierto por un escudo protector de malla metálica trenzada o lámina. Finalmente, el cable se recubre con una envoltura plástica llamada cubierta. La denominación coaxial deriva del eje central común del conductor central y el blindaje.

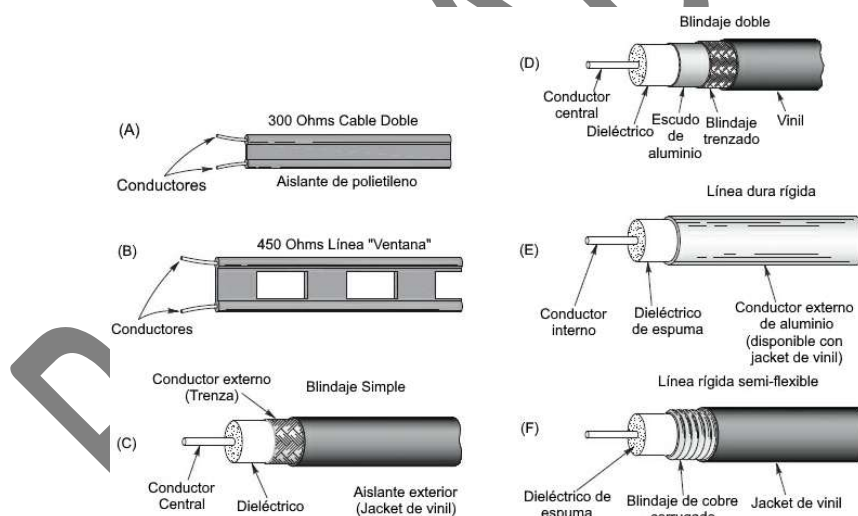


Figura 195. El cable coaxial. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

El cable coaxial transmite la señal radiofónica en la superficie del conductor central y en el revestimiento interior del blindaje. Esto implica que puede ubicarse junto a otros conductores o superficies metálicas, como canalizaciones o estructuras de soporte de antenas, sin provocar interferencias en la señal interna.

Un tipo particular de línea de alimentación coaxial se denomina línea rígida debido a que su protección está constituida por un tubo sólido semidúctil de aluminio o cobre. Esta configuración restringe la capacidad de flexión del cable, aunque la línea rígida presenta la menor atenuación entre todos los tipos de líneas de alimentación coaxial.

5.2.7.2 Selección y mantenimiento de la línea de alimentación

Los modelos de cable coaxial más utilizados por los aficionados se presentan en la Tabla 19. Junto a la impedancia característica, la característica más relevante del cable coaxial es su pérdida de transmisión. La atenuación se cuantifica en decibelios por cada cien pies de cable a una frecuencia determinada. En el cuadro se documenta la pérdida del cable a 30 MHz (próximo a la banda de 10 metros) y a 150 MHz (cercano a la banda de 2 metros). Generalmente, un cable de mayor diámetro como el RG-8 experimentará menores pérdidas comparado con un cable más delgado como el RG-58.

Tabla 19. Tipos comunes de cable coaxial. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Tipo de Cable	Impedancia (Ω)	Pérdida a 30 MHz (dB/100 pies)	Pérdida a 150 MHz (dB/100 pies)
RG-6	75	1,4	3,3
RG-8	50	1,1	2,5
RG-8X	50	2	4,5
RG-58	50	2,5	5,6
RG-59	75	1,8	4,1
RG-174	50	4,6	10,3
RG-213	50	1,1	2,5
LMR-400	50	0,7	1,5

El desempeño del cable coaxial está condicionado por la preservación de su envoltura externa. Las incisiones, cortes y abrasiones pueden comprometer la cubierta protectora y facilitar la penetración de humedad, que constituye la causa primordial de deterioro del cable coaxial. La exposición continua a la radiación ultravioleta proveniente de la luz solar provocará la degradación del material plástico de la cubierta, generando microfisuras que permiten la infiltración de agua en el cable. Para contrarrestar el daño producido por los rayos UV, la cubierta generalmente incorpora un pigmento capaz de absorber y bloquear dichas radiaciones. Adicionalmente, el cable coaxial no debe experimentar flexiones bruscas, ya que podría provocar el desplazamiento gradual del conductor central a través del aislamiento interno, lo que eventualmente ocasionaría un cortocircuito en la malla exterior.

5.2.7.3 Conectores de línea de alimentación coaxial

Los conectores para cable coaxial (conectores coaxiales) resultan indispensables para establecer conexiones con radios, equipos complementarios y la mayoría de las antenas. En una conexión flexible, la malla y el conductor central se separan y se vinculan a terminales de tornillo o se soldan directamente sobre la antena. Las coletas generalmente no resultan apropiadas en UHF y frecuencias superiores. Asimismo, presentan dificultades para su sellado y exponen el interior del cable a la humedad, incrementando las pérdidas en la línea de alimentación.

La selección del conector dependerá de la frecuencia de la señal. La serie de conectores UHF (enchufes PL-259 y receptáculos SO-239) constituye la opción más utilizada para equipos de HF (UHF no significa frecuencia ultra alta en este contexto). Por encima de 400 MHz, se implementan los conectores Tipo N. Se encontrarán conectores UHF y N en equipos de 6 metros, 2 metros y 1¼ metros.

Los conectores coaxiales expuestos a condiciones climáticas externas requieren una impermeabilización meticulosa. La presencia de humedad en el cable coaxial deteriora significativamente la eficiencia del blindaje trenzado e incrementa sustancialmente las pérdidas de señal. Cuando se emplea un núcleo de aire con baja atenuación o un cable coaxial de espuma de celda abierta, resultan indispensables técnicas especializadas para prevenir la penetración de agua en dicho cable. Se debe prestar una atención primordial a la protección e impermeabilización de los conectores en este tipo de configuraciones.

5.2.7.4 Impedancia característica

Todas las líneas de alimentación comprenden dos conductores. El cable coaxial contiene un conductor interno o central y un blindaje o trenza exterior. El conductor central está aislado del conductor externo mediante aire o mediante espuma o material plástico sólido. Las líneas de alimentación equilibradas constan de dos conductores paralelos separados por material aislante en forma de tiras o espaciadores. La Figura 195 ilustra diversos ejemplos de líneas de alimentación comúnmente utilizadas por los radioaficionados.

Al igual que los conductos y canalizaciones presentan distintas impedancias acústicas para la transmisión sonora o del fluido aéreo, los sistemas de alimentación exhiben impedancias características (Z_0) específicas que determinan la manera en que la energía electromagnética es transportada a través de la línea de conducción. Este concepto difiere sustancialmente de la resistencia inherente de los conductores del sistema de alimentación.

La configuración geométrica de los conductores de la línea de alimentación establece directamente su impedancia característica. En el caso de líneas con conductores paralelos, el diámetro de los conductores y su separación espacial determinan el valor de Z_0 . La tipología más frecuente corresponde a la línea de ventana, caracterizada por un aislamiento plástico sólido con aberturas rectangulares practicadas en el material aislante, cuyo propósito es minimizar la pérdida energética y reducir el peso estructural. La impedancia típica para este modelo de línea se sitúa en torno a los 450 Ω , si bien existen variantes que pueden descender hasta los 400 Ω .

En las líneas de alimentación coaxiales, la impedancia característica Z_0 viene determinada por los diámetros de los conductores internos y externos, así como por el espacio intermedio que los separa. Las propiedades del material aislante ejercen una influencia secundaria sobre la impedancia característica, aunque su impacto resulta más significativo en términos de pérdida de la línea de alimentación y velocidad de propagación. Entre los aficionados, las impedancias características más habituales en líneas coaxiales se concentran en los 50 Ω y 75 Ω .

5.2.7.5 Pérdida de la línea de alimentación

Al elegir una línea de alimentación, es necesario considerar diversos factores potencialmente conflictivos y realizar ciertas concesiones. Habitualmente, los entusiastas buscan una línea de transmisión económicamente accesible. Simultáneamente, se requiere un medio de transmisión que minimice la degradación energética de la señal. Para múltiples aplicaciones, el cable coaxial representa una alternativa viable, aunque las líneas de conductores paralelos generalmente exhiben menores pérdidas y ofrecen ventajas adicionales, como la capacidad de operar con elevada ROE en la línea.

La atenuación de línea adaptada (pérdida sin considerar pérdidas adicionales derivadas de la ROE) incrementa proporcionalmente al aumento de la frecuencia operativa. Consecuentemente, en bandas de HF de menor frecuencia, podría resultar conveniente emplear un cable coaxial de menor costo con mayor pérdida respecto a la configuración en 10 metros. Las líneas de alimentación de alambre abierto o tipo escalera típicamente presentan menor atenuación que los cables coaxiales en cualquier rango de frecuencia. Es importante destacar que estos valores experimentan variaciones significativas según la frecuencia. Adicionalmente, existirán ligeras variaciones en las especificaciones entre cables similares de diferentes fabricantes.

Una ROE elevada genera mayores pérdidas de señal en la línea de alimentación, debido a que la energía se refleja recíprocamente entre transmisor y antena. Eventualmente, la energía se transferirá a la antena, pero cada trayecto a lo largo de la línea de alimentación implica pérdidas adicionales. Cuanto mayor sea la pérdida de línea adaptada, más significativa será la atenuación provocada por los desajustes de impedancia en la antena.

¡Es fundamental comprender que una unidad de adaptación de impedancia en el transmisor no reduce la ROE en la línea de alimentación hacia la antena!

5.2.7.6 Factor de velocidad y longitud eléctrica

Una tensión de CA aplicada a una línea de alimentación genera el tipo de corriente representado en la Figura 196. Si la frecuencia de la tensión de CA es 10 MHz, cada ciclo requerirá 0,1 microsegundos. Por consiguiente, un ciclo completo de corriente estará presente a lo largo de cada 30 metros de línea (asumiendo velocidad en espacio libre). Esta distancia corresponde a una longitud de onda.

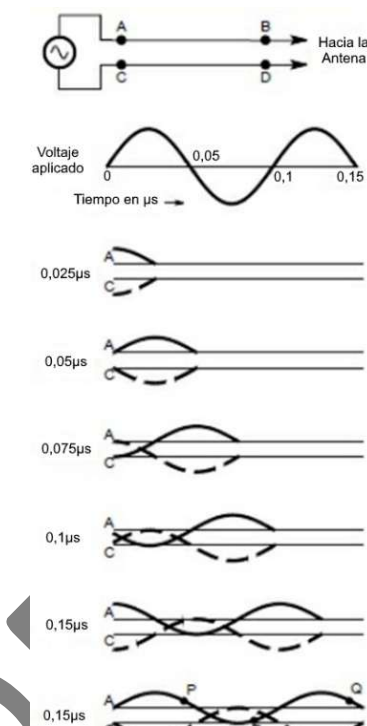


Figura 196. Factor de velocidad y longitud eléctrica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La corriente detectada en el punto B emerge cronológicamente un ciclo posterior a la corriente en A. Dicho de otro modo, la corriente generada en A no se manifiesta en B, separada por una longitud de onda, hasta que la tensión aplicada ha transcurrido un ciclo completo.

En la Figura anterior, la secuencia de ilustraciones representa cómo podría visualizarse la corriente instantánea si fuera posible capturar instantáneas a intervalos de un cuarto de ciclo temporal.

La corriente se propaga desde el extremo de entrada de la línea mediante ondas. En cualquier punto seleccionado de la línea, la corriente recorre su rango completo de valores de CA en el transcurso de un ciclo, de manera idéntica a como ocurre en el extremo de entrada.

En el escenario precedente, se presumió que la energía se desplazaba a lo largo de la línea a la velocidad lumínica. La velocidad real es prácticamente equivalente a la de la luz si el aislamiento entre conductores consiste únicamente en aire. La presencia de materiales dieléctricos distintos al aire reduce la velocidad, dado que las ondas electromagnéticas se propagan más lentamente en medios diferentes al vacío. Consecuentemente, la longitud de línea que conforma una longitud de onda dependerá de la velocidad de propagación de la onda a lo largo de la línea.

La relación entre la velocidad real de propagación de una señal a través de una línea y la velocidad de la luz en el vacío se denomina factor de velocidad.

$$VF = \frac{\text{velocidad de la onda en la línea}}{\text{velocidad de la luz en el vacío}}$$

donde VF representa el factor de velocidad.

El factor de velocidad también mantiene una relación con la constante dieléctrica, ϵ , mediante:

$$VF = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}}$$

A modo de ejemplo, diversos tipos de cable coaxial habituales presentan un dieléctrico de polietileno sólido, con una constante dieléctrica de 2,3. Para estos tipos de cable coaxial, es posible emplear la ecuación anterior para calcular el factor de velocidad de la línea.

$$VF = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{2.3}} = 0.66$$

Debido a la velocidad de propagación más reducida, la longitud eléctrica de una línea de transmisión (o antena) no coincide con su longitud física. La longitud eléctrica se cuantifica en longitudes de onda para una frecuencia específica. Las ondas se desplazan más lentamente en la línea comparado con el aire, por lo que la longitud física de la línea será invariablemente más breve que su longitud eléctrica. Para determinar la longitud física de una línea de transmisión eléctricamente equivalente a una longitud de onda, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\text{distancia (metros)} = VF * \frac{300}{f(\text{MHz})}$$

o

$$\text{distancia (pies)} = VF * \frac{984}{f(\text{MHz})}$$

Donde:

- f = frecuencia de operación (en MHz).
- VF = factor de velocidad.

Consideremos un escenario donde se requiere una sección de cable coaxial RG-8 de 1/4 de longitud de onda a 14,1 MHz. ¿Cuál sería su longitud física? La respuesta depende del dieléctrico empleado en el cable coaxial. RG8 se fabrica con polietileno o polietileno dieléctrico espumado; los factores de velocidad para ambas versiones son 0,66 y 0,80, respectivamente. Utilizaremos la línea de polietileno con un factor de velocidad de 0.66 para este ejemplo. La longitud física en metros de 1 longitud de onda de la línea de alimentación se determina mediante:

$$\text{distancia (metros)} = 0.66 * \frac{300}{14.1} = 14.1 \text{ m}$$

Para obtener la longitud física de una sección de línea de 1/4 de longitud de onda, es necesario dividir este valor por 4. Una sección de longitud de onda de 1/4 de este cable coaxial mide 3,52 metros.

5.2.7.7 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión de tensión representa la proporción existente entre la tensión reflejada en un punto específico de una línea de alimentación y la tensión incidente en ese mismo punto. Simultáneamente, equivale a la relación entre la corriente reflejada y la corriente incidente en la ubicación mencionada. La determinación de este coeficiente se fundamenta en la correlación entre la impedancia característica de la línea de alimentación, Z_0 , y la impedancia de carga real, Z_L . Constituye un parámetro significativo para caracterizar las interacciones en el extremo de carga de una línea de transmisión con desajuste.

El coeficiente de reflexión se presenta como una magnitud compleja, caracterizada por poseer tanto magnitud como fase. Tradicionalmente se representa mediante la letra griega minúscula ρ (rho), aunque cierta documentación especializada emplea la letra griega mayúscula Γ (gamma).

La fórmula para el coeficiente de reflexión es:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Dónde:

- Z_0 es la impedancia característica de la línea
- Z_L es la impedancia de la carga.

Evalúe esta ecuación cuando $Z_L = Z_0$ o 0Ω (en corto) o $\infty \Omega$ (abierto). La única situación en la que $\rho = 0$, lo que significa que no se refleja ninguna potencia y se entrega toda a la carga, se produce para $Z_L = Z_0$. La ROE se relaciona con la magnitud del coeficiente de reflexión mediante:

$$SWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

y, a la inversa, la magnitud del coeficiente de reflexión puede definirse a partir de una medición de la ROE como:

$$|\rho| = \frac{SWR - 1}{SWR + 1}$$

Cuando tanto la impedancia de línea como la de carga son puramente resistivas, la ROE se puede calcular directamente a partir de las impedancias de la línea y la carga:

$$\text{Para } Z_L > Z_0, SWR = \frac{Z_L}{Z_0} \text{ y para } Z_L < Z_0, SWR = \frac{Z_0}{Z_L}$$

5.2.8 Relación de Onda Estacionaria (ROE/SWR) y Adaptación

La energía transmitida por una línea de transmisión se transfiere completamente a un receptor, como un elemento radiante, cuando las resistencias del receptor y del conducto son equivalentes o concordantes. Si el conducto de suministro y las resistencias del receptor no coinciden, una porción de la energía es devuelta por el receptor. La energía que se desplaza hacia el receptor se denomina energía directa. La energía devuelta por el receptor se conceptualiza como energía reflejada. Cuanto más significativa sea la disparidad entre el conducto de suministro y las resistencias del receptor, mayor será la energía que el receptor reflejará. En el escenario más crítico, cuando el conducto de suministro se conecta o finaliza en un circuito abierto o cortocircuito, se refleja la totalidad de la energía directa.

La energía reflejada y directa que se propaga en direcciones opuestas genera un patrón de interferencia estacionario semejante a una onda en el conducto de suministro denominado onda estacionaria. La correlación entre el valor máximo y el valor mínimo del diagrama de interferencia se identifica como relación de onda estacionaria o ROE. La ROE permanece constante en toda la extensión de un conducto de suministro, aunque generalmente se cuantifica en la conexión del transmisor al conducto de suministro.

Dado que la ROE está determinada por las cantidades de energía directa y reflejada, la ROE en un sistema de elemento radiante también constituye una medición de la concordancia entre las resistencias del elemento radiante (o receptor) y del conducto de suministro. La ROE equivale a la proporción entre las resistencias del elemento radiante respecto al conducto de suministro o viceversa, siendo esta relación superior a 1. Cuando no existe energía reflejada, no se genera patrón de interferencia y la ROE es 1:1. Esta condición se denomina coincidencia perfecta. A medida que se refleja más energía, la ROE se incrementa. La ROE siempre será mayor o igual a 1:1. Una ROE superior a 1:1 se conceptualiza como desajuste de impedancia o simplemente desajuste. Considerando que la resistencia del punto de alimentación de un elemento radiante varía con la frecuencia, mientras que la del conducto de suministro permanece constante, la ROE también experimenta modificaciones con la frecuencia.

¿Por qué resulta relevante la ROE? Una ROE reducida indica una transferencia eficiente de energía desde el conducto de suministro porque el elemento radiante refleja mínima energía. Esto implica menores pérdidas energéticas reflejadas en el conducto de suministro que se

desplazan entre el elemento radiante y el transmisor. En cada trayecto a través del conducto de suministro, una porción de la energía se transfiere al elemento radiante, mientras otra fracción se disipa en forma de calor. Conforme aumenta la ROE, se refleja más energía y se incrementan las pérdidas.

Otro efecto de una ROE elevada radica en que el patrón de interferencia provoca incrementos de tensión en el conducto de suministro y en la salida del transmisor donde se conecta el conducto. Las tensiones superiores pueden provocar daños en los circuitos de salida de un transmisor.

La mayoría de los equipos de transmisión de aficionados están diseñados para operar a potencia total con una ROE de 2:1 o inferior. Una ROE superior a 2:1 puede activar los circuitos de protección del transmisor para reducir automáticamente la potencia y prevenir daños en los transistores de salida.

¿Qué origina una ROE elevada? Los elementos radiantes que resultan demasiado cortos o extensos para la frecuencia utilizada frecuentemente presentan resistencias extremas en el punto de alimentación, generando una ROE alta. Un conducto de suministro defectuoso o sus conectores también pueden incrementar la ROE. Una ROE errática generalmente indica una conexión inestable en el conducto de suministro o elemento radiante.

POTENCIA DIRECTA Y REFLEJADA

En el proceso de transmisión de señales, una línea de alimentación transfiere completamente su potencia a una antena cuando las impedancias de ambos elementos son idénticas. Cuando existe una discrepancia entre las impedancias de la línea de alimentación y la antena, una porción de la potencia es devuelta por la antena. La energía que se desplaza hacia la antena se denomina potencia directa, mientras que la energía que retorna se conoce como potencia reflejada. La potencia en una línea de alimentación experimenta un fenómeno de reflexión en cualquier punto donde se produzca una modificación en la impedancia de la línea de alimentación. Este fenómeno puede ocurrir en una antena, un conector o al cambiar a un tipo diferente de línea de alimentación.

Las ondas que transportan energía en dirección forward y energía reflejada generan patrones de interferencia estacionarios dentro de la línea de alimentación. Estos se denominan ondas estacionarias. La proporción entre el valor máximo de tensión en la onda estacionaria y su valor mínimo se conoce como relación de onda estacionaria (ROE), utilizada para evaluar la compatibilidad de impedancias entre la antena y la línea de alimentación. Una ROE de 1:1, considerada una coincidencia perfecta, indica que no existe reflexión de potencia, sino una transferencia total a la antena. Por el contrario, una ROE infinita sugiere que la totalidad de la potencia ha sido reflejada.

La ROE siempre presenta un valor superior a 1:1 (por ejemplo, 3:1 y no 1:3). Se calcula como la relación entre la impedancia máxima del punto de alimentación de la antena o la impedancia característica de la línea de alimentación y la impedancia mínima. Esto implica que la relación será invariablemente mayor o igual a 1:1.

La medición de la ROE puede realizarse en cualquier punto a lo largo de la línea de alimentación, aunque generalmente se efectúa en el transmisor donde la línea está conectada. Los medidores de ROE (también denominados puentes de ROE) se emplean para determinar la relación de onda estacionaria presente en la línea de alimentación entre el transmisor y la antena. La mayoría de los equipos de transmisión de aficionados están configurados para operar a potencia máxima con una ROE en la entrada de la línea de alimentación de 2:1 o inferior. Una ROE superior a 2:1 puede provocar una reducción de potencia en el transmisor. Cuanto más elevada sea la ROE, más compleja resultará la transferencia de energía a la línea de alimentación. Una ROE significativamente alta podría incluso provocar daños en el transmisor.

Las antenas que presentan dimensiones inadecuadas, ya sea demasiado cortas o excesivamente largas, manifestarán un rendimiento deficiente y exhibirán impedancias extremas en su punto de alimentación, lo que generará una ROE elevada. Este fenómeno puede originarse

por múltiples factores, como un desajuste en las impedancias de la línea de alimentación y el transmisor, una incompatibilidad entre las impedancias de la antena y la línea de alimentación, o la presencia de una línea de alimentación defectuosa.

ACOPLAMIENTO CON “STUBS” Y TRANSFORMADORES

En un sistema de transmisión, cuando una onda de tensión y corriente de RF encuentra una impedancia diferente a la impedancia característica de la línea de transmisión, Z_0 , una porción de la energía de la onda experimenta una reflexión hacia el origen de la onda. La fase de la tensión y las corrientes que conforman la onda reflejada presentarán variaciones respecto a las de la onda entrante o incidente, dependiendo del valor de la impedancia que provoca la reflexión.

Las ondas de tensión y corriente incidente y reflejada se fusionan en cada punto a lo largo de la línea. En cada ubicación, la combinación genera tensión y corriente con una relación de fase distinta de las ondas incidentes o reflejadas. Es como si la energía presente en la línea se hubiera aplicado a una impedancia con valores de resistencia y reactancia que generan idéntica relación de fase.

La primera y más sencilla regla para memorizar establece que, si cualquier línea de transmisión tiene una longitud equivalente a un múltiplo entero de $1/2$ longitud de onda, la impedancia en un extremo será equivalente a la del otro. No resulta relevante cuál sea la impedancia de terminación, la cantidad de longitudes de onda $1/2$ involucradas (ignorando la pérdida de línea), o incluso la impedancia característica de la línea. Cada $1/2$ longitud de onda a lo largo de la línea, la impedancia se reproduce. Si la impedancia de terminación constituye un cortocircuito, el medidor de impedancia detectará un cortocircuito cada $1/2$ longitud de onda de distancia, aplicándose la misma situación a una terminación de circuito abierto. Este fenómeno puede observarse en el gráfico de Smith, donde el punto de impedancia se desplaza en un círculo completo alrededor del gráfico cada $1/2$ longitud de onda.

La segunda regla, casi igualmente sencilla de recordar, indica que, si la línea de transmisión representa un múltiplo impar de $1/4$ de longitud de onda, la impedancia en un extremo se invierte respecto a la del otro extremo. Si la impedancia de terminación está abierta, la impedancia a $1/4$ de longitud de onda será corta, y viceversa.

Este comportamiento se reproduce a $3/4$ de longitud de onda, $1 1/4$ longitudes de onda, $1 3/4$ longitudes de onda de distancia, y así sucesivamente.

Los casos restantes de líneas de longitud de onda de $1/8$ no resultan tan simples de memorizar, pero con un breve estudio, pueden descifrarse. Se iniciará con una línea de transmisión de circuito abierto extremadamente corta. Un medidor de impedancia percibirá este breve tramo de línea de transmisión como un circuito abierto. Conforme la línea se extiende, exhibirá una pequeña reactancia capacitiva, siendo esencialmente un diminuto capacitor formado por los conductores interno y externo. Cuando la línea alcanza una longitud de onda de $1/8$, la reactancia capacitiva llegará al valor de $-jZ_0$. En otras palabras, un segmento de línea de transmisión abierta de $1/8$ de longitud de onda con 50Ω presentará una impedancia de $-j50 \Omega$ en su extremo opuesto.

Abordando el escenario complementario, una línea en estado de cortocircuito, la impedancia de dicha línea cuando es extremadamente breve presenta características propias de un cortocircuito. Conforme la línea experimenta un incremento en su extensión, manifiesta una reactancia de naturaleza inductiva debido a que el bucle conformado por los conductores interno y externo configura un inductor. Al momento en que la línea alcanza $1/8$ de su longitud de onda, el dispositivo de medición registrará $+jZ_0 \Omega$ de reactancia inductiva.

Las representaciones de la Figura 197 y Figura 198 exponen el comportamiento de líneas de transmisión abiertas y en cortocircuito hasta 1λ de longitud. Se aprecia nítidamente el desenvolvimiento cíclico de las impedancias en la línea. La impedancia percibida al examinar diversas longitudes de línea de alimentación se consigna directamente sobre el gráfico. Las curvas situadas por encima del eje etiquetado con R, XL y XC indican el valor relativo de la impedancia presentada en la entrada de la línea. Los símbolos circuitales representan los circuitos equivalentes para las líneas en esa longitud específica. Las ondas estacionarias de

tensión (V) y corriente (I) se despliegan sobre cada línea. Conviene recordar que $Z = V / I$, según la Ley de Ohm, por lo que es factible utilizar las curvas sobre cada segmento de línea para estimar la impedancia de entrada de una longitud de línea determinada.

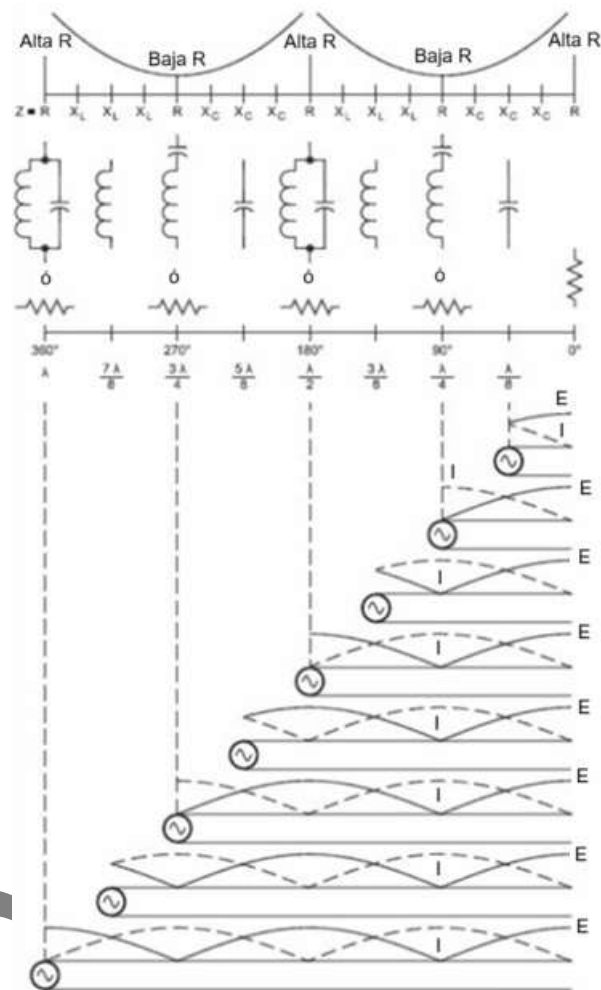


Figura 197. Línea de transmisión abierta. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

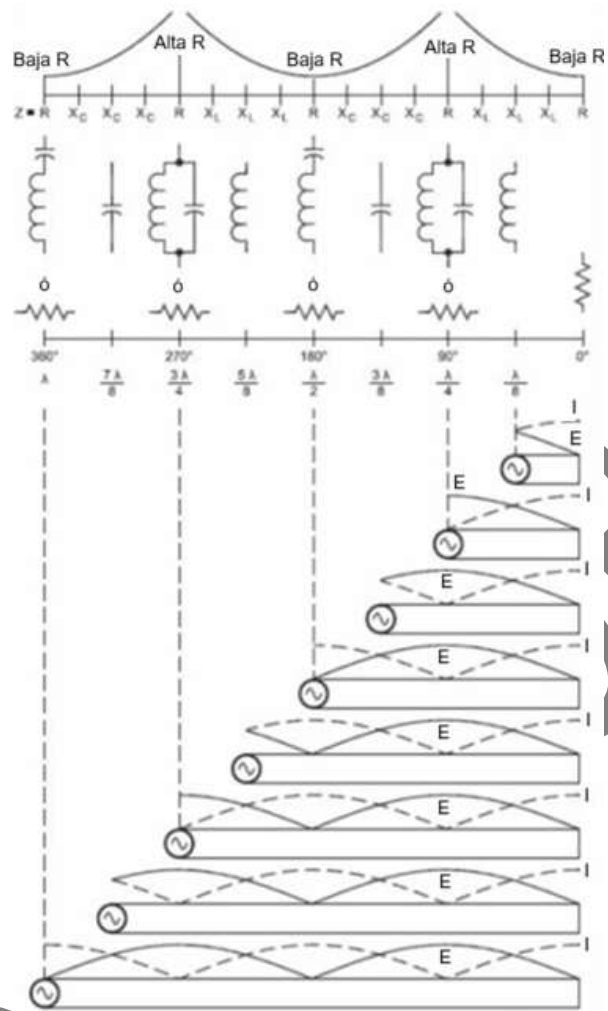


Figura 198. Línea de transmisión cortocircuito. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

TRANSFORMADORES SÍNCRONOS

Existe una metodología especializada de acoplamiento de impedancias mediante líneas de transmisión que se recomienda que todo radioaficionado debería dominar: el transformador síncrono representado en la Figura 199. Este procedimiento de adaptación consiste en establecer una secuencia de reflexiones con la magnitud y orientación de fase precisas para permitir la interconexión de dos líneas de transmisión o una línea de transmisión con una carga de impedancias heterogéneas, evitando la generación de ondas estacionarias en los conductos de transmisión.

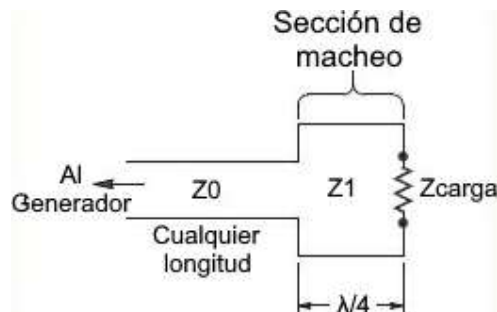


Figura 199. Transformador síncrono. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Para que coincidan con dos impedancias diferentes, como la línea de transmisión y la carga que se muestran en la figura, Z_0 y Z_{LOAD} , una sección de longitud de onda de $1/4$ de longitud de onda de la línea de transmisión con una impedancia característica, Z_1 , igual a la media geométrica de Z_0 y Z_{LOAD} . En forma matemática:

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_{LOAD}}$$

El transformador se llama síncrono porque debe tener una cierta fracción de una longitud de onda de largo ($1/4 \lambda$) para funcionar. Por ejemplo, para hacer coincidir una línea de transmisión de 50Ω con una antena cuádruple con una impedancia de punto de alimentación de 100Ω , la línea de transmisión utilizada para el transformador síncrono debe tener una impedancia característica de:

$$Z_1 = \sqrt{50 * 100} = 70.7 \Omega$$

Un segmento de cable RG-59/U con impedancia de 75Ω resultará adecuado para esta implementación. La impedancia de carga susceptible de igualación puede corresponder igualmente a la impedancia característica de otro medio de transmisión. Adicionalmente, diversos transformadores síncronos con longitudes variables pueden equiparar diferentes niveles de impedancias.

PARÁMETROS DE DISPERSIÓN (S)

Los parámetros de dispersión reconocidos como parámetros "S", representan un método para caracterizar un circuito, línea de transmisión o antena mediante las ondas de tensión incidentes, reflejadas y transmitidas en las conexiones del circuito, denominadas puertos. Los parámetros S presuponen la existencia de dos puertos, según se ilustra en la Figura 200. Las ondas de tensión se identifican mediante las letras a_1 , b_1 , a_2 y b_2 . Las ondas a se consideran ondas que inciden en los puertos y funcionan como variables independientes. Las ondas b constituyen el resultado de la reflexión o dispersión. Los subíndices del parámetro indican qué puerto recibió la onda de entrada y cuál fue la fuente de la onda reflejada. Por ejemplo, S12 es el parámetro que describe la onda generada en el puerto 1 como consecuencia de la onda incidente en el puerto 2.

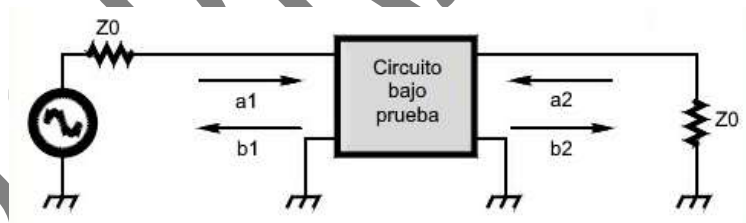


Figura 200. Medición del parámetro S. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los dos parámetros S más relevantes empleados por los aficionados corresponden a S11, que representa la proporción entre la onda reflejada y la onda incidente en la entrada, puerto 1. Este constituye el coeficiente de reflexión del puerto de entrada. S11 puede transformarse en pérdida de retorno (RL) o ROE recíprocamente. La mayoría de los equipos que evalúan la impedancia de la antena o de la línea de transmisión pueden suministrar valores de S11, RL o ROE.

De forma análoga, S21 es la onda de tensión que se origina en la salida, puerto 2, como consecuencia de una onda incidente en la entrada de red, puerto 1. En otros términos, S21 representa una ganancia direccional.

Una medición estrechamente vinculada proporcionada por los analizadores de líneas de transmisión y utilizada por profesionales de RF es la pérdida de retorno (RL). La pérdida de retorno y la ROE miden idéntico fenómeno (qué cantidad de potencia incidente, PINC, en la línea de transmisión se transfiere a la carga y cuánta se refleja en ella, PREFL), pero presentan el resultado de manera diferenciada.

$$R_L(dB) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{REFL}}{P_{INC}} \right)$$

5.2.9 Técnicas Avanzadas de Diseño

GRÁFICO DE SMITH

Antes de abordar el gráfico de Smith, conviene realizar una breve contextualización. Toda impedancia está compuesta por dos elementos constitutivos: resistencia y reactancia. Desde una perspectiva gráfica, estos componentes se representan mediante un sistema de coordenadas rectangulares destinado a ilustrar la impedancia. El eje horizontal simboliza la resistencia: con valores positivos hacia la derecha del punto de origen y negativos hacia su lado izquierdo. El eje vertical, por su parte, representa la reactancia: positiva (de naturaleza inductiva) por encima del origen y negativa (de carácter capacitivo) por debajo.

Cualquier impedancia susceptible de existencia puede ser representada como un punto (Z) en dicho gráfico, correspondiente a los valores específicos de resistencia y reactancia. Estos dos valores constituyen las coordenadas rectangulares de la impedancia. Cuando una impedancia se conecta a una línea de transmisión y se aplica una señal de determinada frecuencia en el extremo opuesto de la línea, la interacción entre la energía presente en la línea y dicha impedancia terminal genera un fenómeno de reflexión energética que se propaga de un extremo a otro de la línea de transmisión.

Las relaciones de tensión y corriente (definición intrínseca de impedancia) experimentan modificaciones según la posición a lo largo de la línea. Consecuentemente, si se introdujera un dispositivo de medición de impedancia en diversos puntos de la línea, se observarían valores de impedancia diferentes, derivados de las variaciones en tensión y corriente. Iniciando en la propia impedancia terminal, a medida que se avanza a lo largo de la línea, la impedancia registrada por el instrumento de medición experimentaría transformaciones hasta que, a una distancia equivalente a 1/2 longitud de onda de la impedancia terminal, nuevamente reportaría el valor original, reiniciándose el ciclo.

Representado en coordenadas rectangulares, el trayecto de dicha medición de impedancia mientras se modifica la posición del instrumento resultaría considerablemente complejo, descrito por una ecuación matemática de notable complejidad. El descubrimiento de Phillip Smith consistió en que, mediante una distorsión específica del gráfico rectangular (denominada mapeo), ¡la trayectoria del punto de impedancia a lo largo de la línea de transmisión se transforma en un círculo! Este concepto se ilustra gráficamente en el gráfico de Smith.

Concíbase el gráfico Smith como un peculiar espejo deformante. En lugar de transformar una imagen bella volviéndola extraña, toma el intrincado recorrido de la impedancia en el gráfico rectangular y lo convierte en un círculo elegante. Esta representación facilita significativamente el análisis. Por esta razón, el gráfico de Smith se utiliza, entre otros propósitos, para calcular impedancias y ROE en cualquier punto de una línea de transmisión.

¿En qué consiste este mapeo transformador? Imagínese situado en el origen del gráfico rectangular, con el eje de resistencia positivo frente a sí y el negativo a su espalda. El eje de reactancia positiva se inicia en sus pies, extendiéndose verticalmente hacia arriba, mientras el negativo desciende. Todos los ejes se prolongan hasta el infinito.

Seguidamente, visualice cómo extiende su mano por encima de su cabeza y dobla el eje de reactancia positiva hacia adelante en un semicírculo, cuyo extremo distante converge con el punto más lejano del eje de resistencia positiva. Repita el proceso con el eje de reactancia negativa, esta vez doblándolo hacia arriba. El eje de resistencia negativa permanece invariablemente recto detrás de usted. Este proceso se describe en la Figura 201.

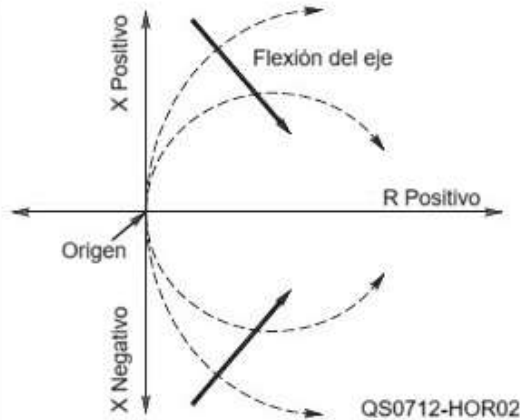


Figura 201. Principio de la carta de Smith. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Ha configurado una circunferencia partiendo de los dos ejes de reactancia, segmentados en dos por la única línea recta del diagrama, el eje de resistencia horizontal que atraviesa el centro. Los puntos infinitos se conectan con el punto infinito del eje de resistencia positiva ubicado en el lado derecho del gráfico. Todas las coordenadas que previamente se situaban en el sector derecho del gráfico rectangular ahora se encuentran en algún punto dentro o sobre el perímetro de dicha circunferencia. Las coordenadas localizadas en el sector izquierdo del gráfico rectangular se han proyectado más allá del círculo. Ningún elemento se ha eliminado, simplemente se ha comprimido o distendido.

El gráfico de Smith representado en la Figura 202 únicamente comprende la circunferencia y su contenido interior. Desestima todo lo que se ubica fuera del círculo debido al valor de resistencia negativa de esas coordenadas originales. Estaban situadas en el sector izquierdo del gráfico, ¿lo recuerdas? Esas impedancias no pueden estar presentes en una línea de transmisión.

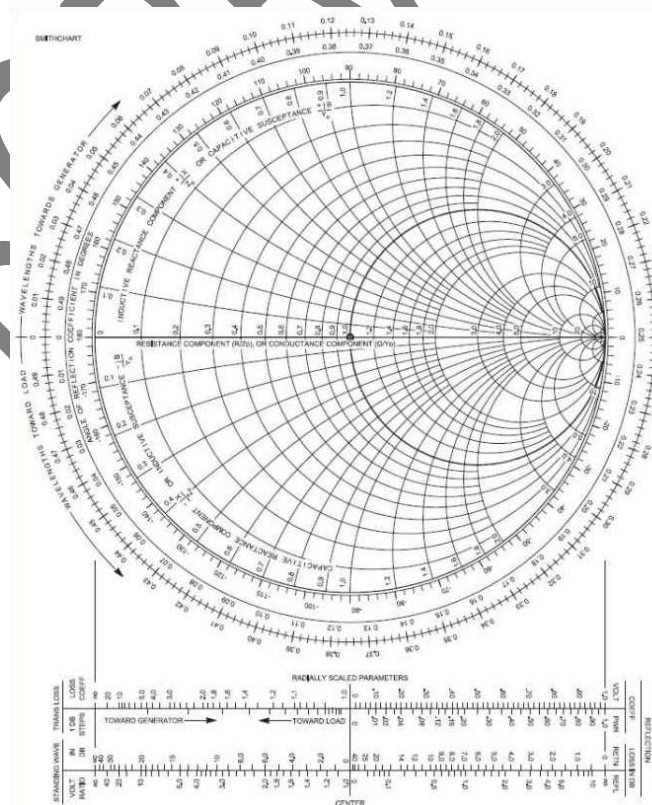


Figura 202. Carta de Smith. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los círculos y segmentos curvos en la representación gráfica de Smith ilustran la transformación geométrica de las líneas rectas del diagrama rectangular tras la reasignación. Las trayectorias de resistencia invariable, que originalmente se disponían en posición vertical y donde cada punto compartía idéntico valor de resistencia, se convierten ahora en círculos concéntricos de resistencia constante que convergen en el extremo derecho del diagrama. Esta configuración resulta lógica, considerando que dichas líneas rectas originalmente se dirigían hacia un punto específico: el infinito, que actualmente se representa en el lateral derecho del gráfico de Smith.

Las trayectorias horizontales de reactancia uniforme, que previamente representaban puntos con reactancia idéntica, se metamorfosean en segmentos arqueados de reactancia constante. Estos arcos presentan un extremo situado en el círculo exterior (correspondiente al eje de reactancia) y el extremo opuesto proyectado hacia el infinito. Esta deformación geométrica provoca que la trayectoria del punto de impedancia se transforme en una circunferencia dentro del diagrama de Smith, según se observa cada punto a lo largo de la línea.

NORMALIZACIÓN

Examine minuciosamente el diagrama de Smith en la Figura 202. Si busca el punto de impedancia de $50 + j0 \Omega$, lo localizará comprimido en el conjunto de círculos en el lateral derecho del gráfico, lo cual resulta poco práctico. Smith evitó la dificultad de los valores extensos mediante la normalización de todas las coordenadas respecto a la impedancia característica de la línea, Z_0 . Ese punto de impedancia representa el núcleo central del diagrama de Smith.

La normalización reasigna los valores de todos los puntos según su relación con Z_0 en el centro primordial, dividiéndolos por 50Ω . De este modo, en lugar de 50Ω en la sección de difícil lectura a la derecha, se ubica justo en el centro del gráfico en 1.0. ¡Significativamente más accesible! A partir de este momento, todos los valores que se tracen en el diagrama de Smith serán el valor leído en el medidor dividido por 50Ω .

CÍRCULOS DE ROE CONSTANTE

Si se consideran todos los puntos de impedancia normalizados en el diagrama de Smith que generan un determinado valor de ROE en una línea de transmisión de 50Ω , se observará que los puntos conforman un círculo centrado en el punto $Z = 1.0 + j0$ ubicado en el centro del gráfico. Este fenómeno recibe el nombre de círculo de ROE constante. La ROE inferior genera círculos cada vez más reducidos hasta que en $ROE = 1.0$, el círculo se convierte simplemente en el punto central del gráfico, lo que indica que la impedancia de terminación es equivalente a $Z_0 = 50 \Omega$.

Conforme aumenta la ROE, los círculos incrementan su dimensión hasta que en $ROE = \infty$, el círculo abarca el perímetro exterior del gráfico. La ROE provocada por cualquier impedancia puede determinarse midiendo la distancia desde el centro del gráfico hasta el punto de impedancia, y posteriormente traduciendo esa distancia a la escala lineal de ROE en la sección inferior del gráfico. Estas escalas se denominan de escala radial porque representan mediciones efectuadas radialmente desde el centro de la carta.

ESCALAS DE LONGITUD DE ONDA

Observe cuidadosamente el lateral izquierdo del diagrama de Smith a lo largo del borde y distinguirá dos flechas que apuntan en direcciones opuestas, etiquetadas como “Longitudes de onda hacia el generador” y “Longitudes de onda hacia la carga”. La escala externa del gráfico, el eje de reactancia, está marcada para mostrar el desplazamiento en longitudes de onda a lo largo de la línea de transmisión.

Existen dos escalas, una que inicia en 0 y aumenta en sentido horario y otra que comienza en 0,5 y disminuye en sentido horario. Ambas se calibran en fracciones de longitud de onda eléctrica dentro de la línea de transmisión. Estos se utilizan para resolver problemas que involucran la impedancia cambiante a lo largo de una línea de transmisión, como se describirá en la siguiente sección.

5.2.10 Modelado y optimización de antenas

La capacidad computacional de los equipos personales contemporáneos facilita el diseño y análisis de antenas mediante modelización matemática. El procesamiento informático permite examinar las variaciones de rendimiento según la modificación de la altura de la antena o predecir los impactos de diferentes condiciones topográficas. Las características del dispositivo pueden ajustarse sistemáticamente hasta lograr un diseño que satisfaga completamente las expectativas previstas. La precisión de las herramientas computacionales resulta sobresaliente cuando son manipuladas por un profesional con habilidades de modelado razonables. Esta metodología representa una significativa optimización temporal en comparación con los tradicionales métodos de experimentación empírica.

MODELADO Y DISEÑO DE ANTENAS

Existe una variedad de aplicaciones informáticas especializadas en el análisis de estructuras de antenas. La mayoría de estos programas derivan de una herramienta desarrollada originalmente en laboratorios gubernamentales estadounidenses, denominado Código Electromagnético Numérico (NEC, por sus siglas en inglés). Este complejo software, concebido inicialmente para sistemas informáticos centralizados, implementa una técnica de modelización conocida como método de momentos.

En la técnica de momentos, los componentes conductores de la antena se representan mediante una secuencia de segmentos, calculándose un valor de corriente uniforme para cada segmento. Se evalúa el campo electromagnético resultante de la corriente de radiofrecuencia en cada segmento, considerando simultáneamente los efectos de acoplamiento mutuo entre segmentos adyacentes. Generalmente, un mayor número de segmentos incrementa la precisión de los resultados de modelado. No obstante, la mayoría de las aplicaciones establecen límites en la cantidad de segmentos por restricciones de memoria y capacidad computacional. Una reducción en el número de segmentos disminuirá el tiempo de procesamiento, aunque provocará una menor precisión en parámetros como la configuración del patrón de radiación o la impedancia del punto de alimentación.

Los resultados de un modelo de antena pueden presentarse mediante diversas representaciones. Para la mayoría de los profesionales, el diagrama de radiación constituye el elemento de máximo interés. Estos se representan habitualmente en formato polar estándar para elevación de campo lejano y diagramas acimutal. Numerosos programas ofrecen adicionalmente una visualización tridimensional del patrón. Como mínimo, los programas calculan parámetros como ganancia de antena, anchura de haz, relaciones de patrón, impedancia del punto de alimentación y gráficos de barrido de ROE en función de la frecuencia.

Junto con las representaciones gráficas de un único parámetro en relación con la frecuencia, el programa informático puede efectuar evaluaciones sofisticadas del diagrama de antena. A modo de ilustración, el coeficiente de directividad receptora analizado previamente en la sección sobre antenas receptoras resultaría extremadamente complejo de calcular manualmente o a partir de conjuntos de diagramas de radiación. La capacidad de establecer y computar nuevas metodologías para evaluar el rendimiento constituye una modalidad significativa mediante la cual el modelado permite a los aficionados experimentar e innovar en el diseño de antenas.

COMPENSACIONES Y OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

Cualquier configuración de antena implica determinados equilibrios. Podría modificar la estructura de una antena específica para perfeccionar alguna característica deseada, siempre que comprenda las interrelaciones. Como se indicó precedentemente, los métodos de técnicas de modelado computacional que han ganado popularidad pueden resultar sumamente útiles para determinar qué modificaciones estructurales generarán la antena "óptima" para su contexto particular.

Cuando analice la ganancia de una antena, será necesario considerar una serie de parámetros. Deberá incorporar la impedancia del punto de alimentación de la antena, cualquier resistencia

de pérdida en los elementos y los componentes de adaptación de impedancia, así como los diagramas de radiación de campo eléctrico (E) y campo magnético (H).

También resulta fundamental evaluar la antena en toda la banda de frecuencia para la cual fue diseñada. Podría descubrir que la ganancia experimenta variaciones significativas al desplazarse de su frecuencia de diseño (quizás esté dispuesto a aceptar esa compensación si todas sus operaciones en esa banda se circunscriben a un rango de frecuencia reducido). Igualmente, podría constatar que la impedancia del punto de alimentación fluctúa ampliamente conforme varía la frecuencia en la banda, lo cual complejiza el diseño de un sistema de adaptación de impedancia único para la antena. Adicionalmente, podría verificar que la relación entre la zona frontal y posterior oscila excesivamente a lo largo de la banda, generando una variabilidad excesiva en los lóbulos del patrón posterior.

La ganancia directa de una antena Yagi puede incrementarse mediante el empleo de un brazo más extenso, separando los elementos a mayor distancia o incorporando elementos adicionales. Naturalmente, existen limitaciones prácticas respecto a la extensión que puede alcanzar el brazo de cualquier antena. Las longitudes de los elementos deberán reajustarse conforme varíe la longitud de la pluma.

Podría optar por optimizar una antena Yagi para obtener la máxima ganancia frontal, pero en tal caso, la relación frontal-posterior generalmente disminuirá, la impedancia del punto de alimentación se tornará muy reducida y el ancho de banda ROE se contraerá. La optimización del rendimiento de un parámetro frecuentemente conduce a una reducción del desempeño en otros parámetros. En términos generales, la interdependencia de la ganancia, el ancho de banda ROE y las relaciones de patrón requiere compromisos por parte del modelador de antenas para alcanzar objetivos realistas.

5.3 Sistemas Prácticos y Aplicaciones

5.3.1 Elección de antenas para diferentes bandas (HF, VHF/UHF)

ANTENAS DIRECCIONALES

Los Yagis con orientación horizontal se emplean comúnmente para establecer comunicaciones de largo alcance, particularmente para establecer contactos SSB y CW con señales tenues en las bandas de VHF y UHF. La polarización horizontal resulta preferente debido a que genera menores atenuaciones terrestres cuando la onda electromagnética se refleja o se desplaza paralelamente a la superficie.

Conforme se incrementa la frecuencia y los elementos del arreglo Yagi reducen su dimensión, surge una mayor complejidad para construir antenas funcionales. En frecuencias superiores a 1 GHz, se torna viable una configuración de antena diferente: la antena parabólica. Las antenas parabólicas destinadas a aficionados operan de manera sustancialmente similar a los dispositivos de recepción satelital frecuentemente visualizados en inmuebles residenciales.

5.3.2 Antenas especializadas

Esta sección aborda diversos temas fascinantes relacionados con tipologías específicas de antenas o modalidades particulares de implementación. Existen literalmente cientos de variantes de antenas especializadas, aunque los siguientes ejemplos resultan habituales en las bandas de HF. ¡Además, se descubrirá que una antena convencional puede proporcionar resultados sorprendentes si se construye e instala con la metodología apropiada!

CABLES ALEATORIOS

No siempre resulta factible contar con una antena resonante de longitud de onda de $1/2$ o $1/4$. Para operaciones portátiles y circunstancias especiales, se puede emplear una antena de cable aleatorio. La antena corresponde exactamente a lo que su denominación sugiere, una extensión indeterminada de cable desplegada de la manera más extensa posible. La impedancia del punto

de alimentación y el modelo de radiación de un cable aleatorio presentan características impredecibles. El diagrama de radiación de la antena podría exhibir múltiples lóbulos en diversos ángulos verticales y horizontales.

Un cable aleatorio genuino se conecta directamente a la salida del transmisor (más comúnmente a la salida de un sintonizador de antena) sin una línea de alimentación. Consecuentemente, el equipamiento de la estación y su conexión a tierra también integran el sistema de antenas. La utilización de este tipo de antena puede generar corrientes y tensiones de RF significativas en el equipo de la estación que potencialmente podrían provocar quemaduras de RF. No obstante, este simple dispositivo puede proporcionar resultados excepcionales en cualquier banda para la cual el transmisor o sintonizador pueda aceptar la impedancia del punto de alimentación.

ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIA

La adaptación de la línea de alimentación y las impedancias de carga (antena) elimina las ondas estacionarias de la potencia reflejada y maximiza la potencia entregada a la carga. Sin embargo, esto no siempre resulta viable, por lo que la adaptación de impedancia se ejecuta con mayor frecuencia en el extremo del transmisor de la línea de alimentación, según se ilustra en la Figura 203.

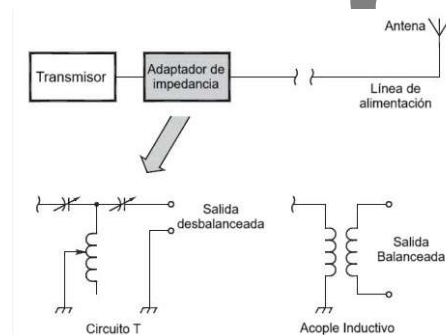


Figura 203. Adaptación de impedancia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

El elemento empleado para disminuir la ROE en la conexión del transmisor a la línea de alimentación presenta diversas denominaciones como adaptador de impedancia, acoplador de antena y sintonizador de antena. Es fundamental comprender que un sintonizador de antena no ajusta la antena en modo alguno, simplemente modifica la impedancia del sistema de antena en el extremo de la línea de alimentación para lograr una correspondencia con la impedancia del transmisor.

Los mecanismos de adaptación de impedancia se estructuran mediante inductores y capacitores que pueden ser reglados por el operador. La topología de circuito más frecuente es la red en configuración T, representada en la Figura anterior. Este circuito permite equiparar un amplio espectro de impedancias en la conexión de la línea de alimentación a 50 Ω , coincidiendo con la impedancia de salida del transmisor.

Con independencia de la metodología empleada para transformar las impedancias, resulta crucial recordar que la ROE en la línea de alimentación entre el dispositivo de adaptación de impedancia y la antena permanece invariable. Si la ROE en la línea de alimentación presenta una relación de 5:1 y un dispositivo de adaptación de impedancia genera una carga de 50 Ω para el transmisor, la ROE continuará siendo de 5:1 en la línea de alimentación.

5.3.3 Presupuestos de enlace y márgenes de potencia

Un presupuesto de enlace constituye un concepto técnico en telecomunicaciones que contempla la totalidad de incrementos y decrementos de potencia que experimenta una señal al interior de un sistema de comunicación. En el ámbito de la radioafición, este cálculo se circunscribe fundamentalmente a la potencia de transmisión y las ganancias de antena de la estación emisora, descontando las pérdidas sistémicas que experimenta la estación receptora. A continuación, se

presenta una ecuación fundamental para determinar la potencia total captada en la estación receptora:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} + G_{RX} - L_M - L_{RX}$$

Donde:

- **P_{RX}**: corresponde a la potencia total captada en la estación receptora.
- **P_{TX}**: representa la potencia total del transmisor.
- **G_{TX}**: indica la ganancia agregada de la antena en la estación transmisora.
- **L_{FS}**: comprende las pérdidas totales a lo largo de la trayectoria de transmisión.
- **L_M**: abarca otras pérdidas complementarias como el cableado de la estación transmisora, entre otros aspectos.
- **G_{RX}**: refleja la ganancia total de la antena receptora en la estación receptora.
- **L_{RX}**: engloba las pérdidas sistémicas totales de la antena receptora y de la estación.

5.3.4 Antenas para comunicaciones espaciales

En los capítulos precedentes se examinan los satélites de radioaficionados y su operatividad. En esta sección, se abordan los requerimientos de ganancia y polarización para los dispositivos radiantes empleados en las comunicaciones radioeléctricas espaciales.

GANANCIA Y TAMAÑO DE LA ANTENA

En VHF y UHF, las configuraciones tipo Yagi representan las estructuras más frecuentes para los enlaces satelitales y comunicaciones Tierra-Luna-Tierra (EME, por sus siglas en inglés). Para un diseño Yagi técnicamente optimizado, la extensión del elemento determina directamente su rendimiento: a mayor longitud, superior ganancia. No obstante, en rangos de microondas, podría resultar imperativo recurrir a antenas parabólicas, considerando la significativa atenuación de trayectoria y la complejidad de construir Yagis con prestaciones suficientes.

Las antenas parabólicas obtienen su denominación por la geometría de su sección transversal, configurada según una parábola con el punto de alimentación ubicado en su foco. Aunque estas estructuras pueden presentar dimensiones considerables en frecuencias superiores a algunos gigahercios, a 10 GHz resultan notablemente compactas. Concretamente, a dicha frecuencia, un reflector parabólico típicamente requiere poco más de treinta centímetros de diámetro para generar ganancias sustanciales. La eficiencia de estas antenas guarda una relación directa con el cuadrado de su diámetro y la frecuencia de operación. Consecuentemente, duplicar cualquiera de estos parámetros implica un incremento de 6 decibelios en su rendimiento.

EFFECTOS DE LA POLARIZACIÓN

Las comunicaciones radioeléctricas espaciales alcanzan su máxima efectividad no mediante polarización horizontal o vertical convencional, sino implementando una configuración combinada denominada polarización circular. Cuando dos ondas equivalentes, una horizontalmente polarizada y otra verticalmente, se integran con un desfase de noventa grados, se genera una onda con polarización circular.

Una antena con polarización circular puede construirse mediante dos dipolos o Yagis dispuestos perpendicularmente y alimentados con un desplazamiento de fase de noventa grados. La Figura 204 muestra un ejemplo de una antena polarizada circularmente constituida por dos antenas Yagi. Los elementos excitados deben ubicarse en idéntica posición a lo largo del brazo. Dichos elementos se sitúan en un plano perpendicular al eje y a la dirección de máxima radiación.

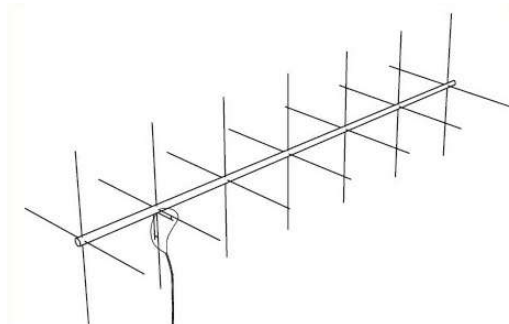


Figura 204. Antena con polarización circular con 2 Yagis. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

COMUNICACIONES DE DISPERSIÓN DE METEOROS

Los meteoroides constituyen fragmentos de sustancia mineral o metálica que transitan por trayectorias sumamente elípticas alrededor del astro solar. La mayoría de estos elementos poseen dimensiones microscópicas. Diariamente, cientos de millones de estos cuerpos celestes penetran en la envoltura atmosférica terrestre. Atraídos por el campo gravitacional planetario, logran alcanzar velocidades comprendidas entre 6 y 60 metros por segundo (22.000 a 220.000 metros por hora).

Conforme un meteorioide incrementa su aceleración a través de las capas atmosféricas superiores, experimenta un proceso de calentamiento y comienza a desintegrarse al colisionar con las moléculas del aire. Esta interacción genera calor y luminosidad, y produce un rastro de electrones libres e iones con carga positiva denominado meteoro. La dimensión de la estela guarda una relación directa con el volumen de las partículas y su velocidad de desplazamiento. Un meteorito típico con dimensiones equivalentes a un grano de arena genera un rastro aproximado de 0,91 metros de diámetro y 19,31 kilómetros o más, dependiendo de su velocidad de desplazamiento.

Las precipitaciones meteóricas incrementan significativamente las comunicaciones de dispersión de meteoros en VHF. El nivel de optimización depende de variables como la franja horaria, la intensidad del fenómeno y la frecuencia de utilización. Las precipitaciones meteóricas más prominentes del ciclo anual corresponden a las Perseidas en agosto y las Gemínidas en diciembre.

Las ondas radioeléctricas pueden ser reflejadas por la traza ionizada de un cuerpo celeste en tránsito. La capacidad de una traza meteórica para reflejar señales radioeléctricas está condicionada por la concentración de electrones. Una concentración electrónica más elevada genera una mayor capacidad reflectante y posibilita la reflexión en frecuencias más elevadas. La densidad electrónica en una estela meteórica típica impactará significativamente las ondas radioeléctricas en las bandas superiores de HF y VHF inferior. Las frecuencias de señal que oscilan entre 20 MHz hasta 432 MHz resultarán aprovechables para la comunicación mediante dispersión meteórica en determinadas circunstancias.

El intervalo de frecuencias óptimo para las comunicaciones de dispersión meteórica de aficionados comprende desde 28 hasta 148 MHz.

Las estelas meteóricas se generan aproximadamente a la altitud correspondiente a la capa ionosférica E, entre 50 y 75 millas sobre la superficie terrestre. Esto implica que el alcance para la propagación por dispersión meteórica resulta prácticamente equivalente al salto E de trayecto único (o E esporádico), con un máximo aproximado de 1200 millas, según se ilustra en la Figura 205.

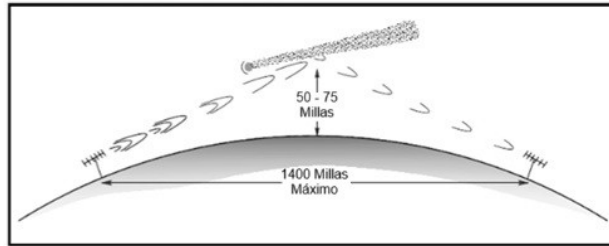


Figura 205. Propagación por la dispersión de meteoros. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El principio fundamental para el éxito en la comunicación mediante dispersión meteórica radica en las transmisiones breves. ¡Un QSO completo con información intercambiada y verificada bilateralmente puede consumir su duración en escasos segundos!

Un único meteorito puede generar una trayectoria lo suficientemente intensa como para sostener la comunicación durante el lapso necesario para completar un QSO sucinto. En determinadas circunstancias, se requieren múltiples irrupciones para finalizar el QSO, particularmente en frecuencias más elevadas. Como respuesta estratégica, los aficionados estructuraron un protocolo operativo fundamentado en transmisiones de 15 segundos que alternaban entre las ubicaciones de las estaciones. Eventualmente, una cascada de caracteres arribaría. Otra convención establecida consistía, una vez que un rastro meteórico estaba presente y reflejaba señales, en utilizar transmisiones concisas con indicativos de llamada que se reiteraban velozmente e informes de señales susceptibles de ser captados antes de la desaparición del rastro.

MSK144, componente de la suite de software WSJT-X, fue desarrollado específicamente para comunicaciones de dispersión meteórica para aficionados. En este modo, las estaciones ejecutan transmisiones repetitivas breves de paquetes especialmente configurados para aprovechar cualquier fugaz "quemada" meteórica dentro del alcance de ambas estaciones.

COMUNICACIONES TIERRA-LUNA-TIERRA

El concepto de comunicaciones Tierra-Luna-Tierra (EME), popularmente conocido como rebote lunar, resulta conceptualmente simple: las estaciones que pueden visualizar simultáneamente la Luna se comunican reflejando señales VHF o UHF desde la superficie lunar. Dichas estaciones pueden hallarse separadas prácticamente por medio perímetro terrestre, una distancia cercana a 12.000 millas, siempre que ambas puedan percibir la Luna. A este fenómeno se le denomina su ventana lunar recíproca, donde el satélite natural se ubica por encima del horizonte radioeléctrico para ambas estaciones simultáneamente. Considerando que la distancia promedio lunar a la Tierra es de 239.000 millas, las pérdidas de trayectoria resultan monumentales en comparación con trayectorias VHF locales (la pérdida de trayecto alude a la merma total de señal entre estaciones transmisora y receptora en relación con la energía total radiada. La pérdida de trayectoria disminuye cuando la Luna se encuentra en perigeo, es decir, más próxima a la Tierra). No obstante, para cualquier modalidad de comunicación de aficionados a distancias superiores a 500 millas a 432-MHz, por ejemplo, el rebote lunar resulta superior a las trayectorias de propagación terrestre considerando la totalidad de factores limitantes.

Uno de los aspectos más complejos en la recepción de una señal reflejada lunática, además de la significativa pérdida de trayectoria y la atenuación de la rotación de Faraday en la capa ionizada atmosférica, radica en la disminución de la libración. Las libraciones representan oscilaciones momentáneas en el movimiento aparente del satélite natural en relación con el planeta terrestre. El desvanecimiento de libración de una señal EME se manifiesta como una fluctuación agitada, veloz e impredecible, con características muy similares a las observadas en la propagación mediante dispersión troposférica. Las libraciones provocan un desvanecimiento combinado con la dispersión multitrayecto de las ondas radioeléctricas provenientes de la superficie lunar, caracterizada por su extensa dimensión (2000 millas de diámetro) y su topografía accidentada.

Para los contactos EME en modalidad analógica o digital, la duración del trayecto de ida y retorno y las señales extremadamente tenues tornan poco viable el método convencional de llamada y respuesta. Como solución alternativa, los aficionados han implementado un procedimiento de llamada normalizado para CW y SSB que emplea secuencias transmisivas alternativas. La modalidad digital EME utiliza un modo específico, JT65, que igualmente recurre a transmisiones sincronizadas temporalmente. Los mensajes transmitidos mediante JT65 implementan técnicas de codificación avanzadas que posibilitan la decodificación de señales con relaciones señal-ruido extraordinariamente reducidas. JT65 constituye un componente de la suite de software WSJT-X.

5.4 Recomendaciones UIT sobre la influencia del entorno en la propagación de las ondas electromagnéticas

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es un organismo especializado de las Naciones Unidas que coordina a nivel global el desarrollo y la regulación de las telecomunicaciones y las tecnologías de la información y comunicación (TIC). La UIT se organiza en tres sectores principales, cada uno con funciones específicas:

- UIT-R (Sector de Radiocomunicaciones)
 - Se encarga de la gestión internacional del espectro radioeléctrico y de las órbitas de satélites.
 - Elabora normas técnicas (Recomendaciones UIT-R) para garantizar la interoperabilidad de los sistemas de radiocomunicación.
 - Coordina conferencias mundiales como la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR).
- UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones)
 - Desarrolla estándares técnicos globales para redes y servicios de telecomunicaciones.
 - Su objetivo es asegurar la compatibilidad e interoperabilidad de infraestructuras y dispositivos.
 - Es el sucesor del antiguo CCITT (Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico).
- UIT-D (Sector de Desarrollo de las Telecomunicaciones)
 - Promueve el acceso equitativo y asequible a las TIC, especialmente en países en desarrollo.
 - Trabaja en reducir la brecha digital y fomentar la transformación digital.
 - Coordina proyectos de cooperación técnica, formación y políticas inclusivas.

Cada sector tiene sus propias comisiones de estudio, conferencias y publicaciones. Juntos, forman el núcleo técnico y estratégico de la UIT para impulsar la conectividad global.

El presente apartado muestra a manera de resumen los aspectos más importantes de las normas: UIT-R P.526, UIT-R P.676, UIT-R P.838, UIT-R P.370, UIT-R P.529, UIT-R P.1812 y UIT-R P.1546 de la UIT-T, los cuales se consideran como fundamentales y de conveniente conocimiento para cualquier persona que opere el espectro radioeléctrico. No obstante, es necesario señalar que el contenido en esta sección no será parte de los temas evaluados en la prueba teórica para la obtención de un permiso de licencia de radioaficionados y/o banda ciudadana.

Las diferentes normas mencionadas anteriormente, presentan formas complejas para calcular las influencias más comunes del entorno en las ondas electromagnéticas, por lo que esta Superintendencia se dio a la tarea de resumir y facilitar la comprensión del contenido de estas normas, tratando de explicar estos aspectos de una manera más práctica, con el objetivo de acoplarlas a las actividades de un radioaficionado.

Seguidamente se presentan los modelos de propagación más utilizados, la difracción debida a obstáculos, atenuación de gases y lluvia y finalmente métodos para calcular la intensidad del campo eléctrico.

5.4.1 Influencia del entorno en la propagación de ondas electromagnéticas

MODELOS DE PROPAGACIÓN

La propagación en el entorno puede calcularse de diferentes maneras, el siguiente apartado muestra algunas de ellas, cada una de las cuales se adapta a un tipo particular de servicio. Los parámetros requeridos para estos cálculos se muestran en la siguiente figura.

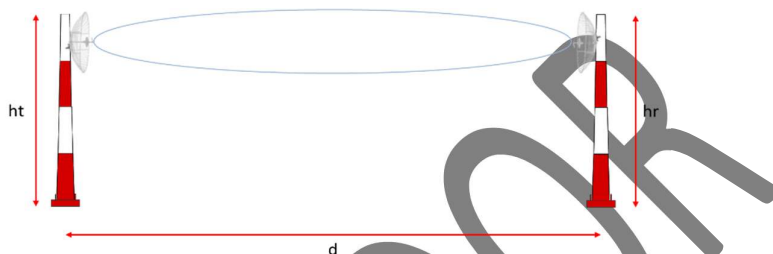


Figura 206. Pérdidas en el espacio libre. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

PÉRDIDAS BÁSICAS DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE

El modelo de propagación en el espacio libre es utilizado para predecir las pérdidas (L_{bf}) de la señal cuando existe línea vista entre el transmisor y el receptor. Este modelo predice lo que decae la potencia en función de la distancia de separación entre los dos puntos indicados anteriormente y la frecuencia utilizada en el sistema.

Estas pérdidas se presentan en la propagación de una onda electromagnética en un medio dieléctrico ideal homogéneo e isotrópico que se puede considerar infinito en todas las direcciones. Este es un modelo ideal, que no existe en la realidad, pero permite conocer las mínimas pérdidas que existen en la propagación. Para calcular dichas pérdidas se consideran dos antenas isotrópicas suspendidas en el entorno libre de obstáculos y separadas una distancia d , donde una actuará como transmisora y la otra como receptora.

El cálculo de estas pérdidas se realiza con la siguiente ecuación:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$$

donde:

- **Lbf:** pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)
- **d:** distancia entre transmisor y receptor (km).

La ecuación anterior puede también escribirse en función de la longitud de onda en lugar de la frecuencia:

$$L_{bf} = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

donde:

- **f:** frecuencia (MHz).
- **l:** longitud de onda
- **d** y **l** se expresan en las mismas unidades.

PÉRDIDAS POR EL MÉTODO OKUMURA HATA

El modelo Okumura-Hata es una fórmula derivada de las curvas de pérdida proporcionadas por Okumura, se utiliza para proporcionar el nivel de atenuación media relativa en espacio libre, en función de la frecuencia, la distancia entre transmisor y receptor, la altura de las antenas de la estación base y la estación remota, además de varios factores de corrección específicos para diferentes tipos de trayecto. Este modelo está considerado entre los más simples y mejores en términos de su precisión en el cálculo de las pérdidas en el trayecto.

El modelo de Okumura-Hata expresa la pérdida de propagación de la siguiente manera:

$$L_{bf(dB)} = 69,55 + 26,16 * \log f_{(MHz)} - 13,82 * \log h_{t(m)} - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_{t(m)}) * \log d_{(Km)}$$

donde:

- **f**: es la frecuencia de la comunicación comprendida entre 400 MHz y 1500 MHz
- **ht**: es la altura del transmisor (debe estar entre 30m y 200m)
- **hr**: es la altura del receptor (debe estar ente 1m y 10m)
- **d**: es la separación entre antenas (1 Km a 20 Km)
- **a(hr)**: es un factor de corrección que depende de la altura del móvil y que se calcula como sigue:

1) Para áreas urbanas:

a) Para ciudades pequeñas o medianas:

$$a(h_r) = (1,1 * \log f_{(MHz)} - 0,7) * h_{r(m)} - (1,56 * \log f_{(MHz)} - 0,8)$$

donde $1 \leq h_r \leq 10$ m

b) Para ciudades grandes:

$$a(h_r) = \begin{cases} 8,29 * (\log 1,54 h_r)^2 - 1,1 & \rightarrow f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2 * (\log 11,75 h_r)^2 - 4,97 & \rightarrow f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$$

2) Para áreas suburbanas:

$$L_{bf(dB)} = L_{bf(dB)}(\text{urban}) - 2 \left(\log \frac{f_{(MHz)}}{28} \right)^2 - 5,4$$

3) Para áreas rurales:

$$L_{bf(dB)} = L_{bf(dB)}(\text{urban}) - 4,78 * \log(f)^2 + 18,33 * \log f - 40,94$$

De manera general, este método de cálculo proporciona buenos resultados en entornos urbanos y suburbanos, pero no así en áreas rurales, ya que no tiene en cuenta la ondulación del terreno ni los efectos derivados del grado de urbanización a lo largo del trayecto.

PÉRDIDAS POR EL MÉTODO COST231-HATA

El modelo COST231-Hata nació con el fin de tener mejor correspondencia con las curvas de Okumura en el rango de 1500 MHz a 2000 MHz, esto para lo que fue la implementación del sistema GSM1800 en Europa.

Este modelo posee un comportamiento similar al de Okumura-Hata en un área urbana, sin embargo, cuando el estudio se lleva a cabo en un área abierta o suburbana, el modelo Hata se desvía mucho más que el modelo COST231.

Las pérdidas de propagación por medio del método COST-231 se calculan de la siguiente manera:

$$L_{bf(dB)} = 46,3 + 33,9 * \log f_{(MHz)} - 13,82 * \log h_{t(m)} - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_{t(m)}) * \log d_{(Km)} + C_m$$

donde:

- **f**: es la frecuencia de la comunicación comprendida entre 1500 MHz y 2000 MHz
- **ht**: es la altura del transmisor (debe estar entre 30m y 200m)
- **hr**: es la altura del receptor (debe estar ente 1m y 10m)

- **d**: es la separación entre antenas (1 a 20 Km)
- **Cm**: factor de corrección que depende de la geografía
- **Ciudad media o suburbana**: Cm=0
- **Ciudad densamente urbana**: Cm=3
- **a(hr)**: es un factor de corrección que depende de la altura del móvil y que se calcula como sigue:

1) Para áreas urbanas:

a) Para ciudades pequeñas o medianas:

$$a(h_r) = (1,1 * \log f_{(MHz)} - 0,7) * h_{r(m)} - (1,56 * \log f_{(MHz)} - 0,8)$$

donde $1 \leq h_r \leq 10$ m

b) Para ciudades grandes:

$$aa \ a(h_r) = \begin{cases} 8,29 * (\log 1,54 h_r)^2 - 1,1 & \rightarrow f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2 * (\log 11,75 h_r)^2 - 4,97 & \rightarrow f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$$

2) Para áreas suburbanas:

$$L_{bf(dB)} = L_{bf(dB)}(urban) - 2 \left(\log \frac{f_{(MHz)}}{28} \right)^2 - 5,4$$

3) Para áreas rurales:

$$L_{bf(dB)} = L_{bf(dB)}(urban) - 4,78 * \log(f)^2 + 18,33 * \log f - 40,94$$

Es importante mencionar que las recomendaciones de la UIT hacen mención a otros tipos de modelos de propagación en el espacio libre específicos a alguna comunicación, pero en este documento solo se hace mención de estos tres modelos básicos.

DIFRACCIÓN POR OBSTÁCULOS CON CLARIDAD DE AL MENOS 60% DEL RADIO DE LA PRIMERA ZONA DE FRESNEL

Un enlace punto a punto es aquel que responden a un tipo de arquitectura de red en la que el canal se usa para comunicar únicamente dos nodos. Estos enlaces para aumentar su eficiencia deben poseer línea vista entre los transmisores de cada nodo, donde la línea vista se refiere a la inexistencia de obstáculos en la trayectoria de las ondas electromagnéticas. Los obstáculos en una comunicación pueden producir fenómenos como las multitrayectorias, que son las diferencias de fase en la señal debido a la reflexión y difracción de las ondas, los cuales generan un efecto neto de atenuación o amplificación.

Debido a este y otros efectos, existe una tolerancia en la existencia de obstáculos en una comunicación. Para saber si una comunicación es posible, se debe saber que tanto interfiere el objeto en la línea, donde se incorpora el concepto de las zonas de Fresnel.

Estas zonas son elipsoides coaxiales alrededor del eje de línea vista entre los puntos de transmisión. Las mismas se especifican empleando números ordinales que corresponden a múltiples medias longitudes de onda que resulta de la diferencia de trayectos generados por fenómenos mencionados anteriormente.

Típicamente la primera zona de Fresnel (n=1), determina las pérdidas por obstrucción ya que el 50% de la energía del enlace está contenida dentro de esta. Se recomienda permitir obstrucciones de un máximo del 20%, pero existe una tolerancia de hasta un 40%, por lo tanto, debe asegurarse como mínimo una claridad del 60% del radio de la primera zona de Fresnel para poder establecer la transmisión.

Luego de todo lo anterior, seguidamente se describe la utilización de este método para calcular la altura de los obstáculos máxima permitida para la comunicación según las condiciones del enlace.

FRESNEL CON TRANSMISORES A LA MISMA ALTURA

Los elipsoides de Fresnel se muestran en la siguiente figura:

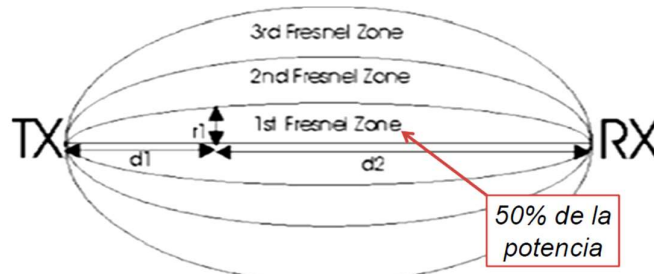


Figura 207. Diagrama de los radios de Fresnel. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

Para el cálculo de los radios de Fresnel se emplea la siguiente fórmula:

$$r_n = 17,32 \sqrt{\frac{nd_1d_2}{f * (d_1 + d_2)}}; d \text{ en Km}, f \text{ en GHz}$$

donde n es un número entero que caracteriza el elipsoide correspondiente, n = 1 corresponde al primer elipsoide de Fresnel, n = 2 al segundo y así sucesivamente, en cuanto a las otras variables se muestran en la siguiente figura:

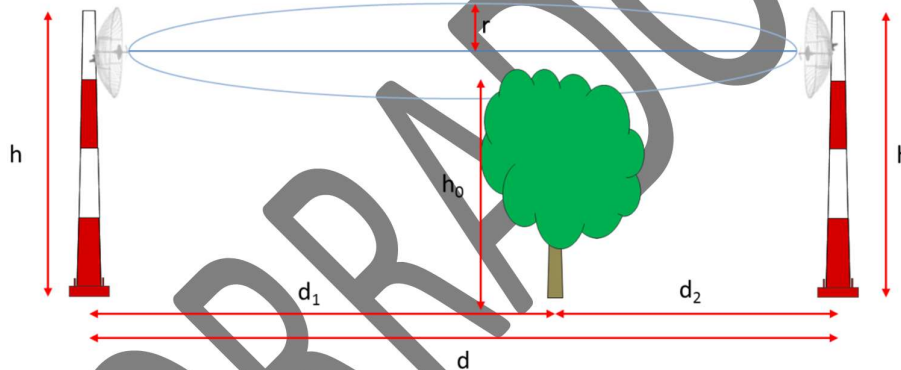


Figura 208. Diagrama para Fresnel con transmisores a la misma altura. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

Para que la comunicación sea efectiva debe cumplirse que la altura del objeto h_0 sea menor a $h_{o \max}$ (altura del obstáculo máxima), la cual se calcula de la siguiente manera:

$$h_{o \max} = h - 0,6r$$

FRESNEL CON TRANSMISORES A DIFERENTE ALTURA.

Para el caso particular en que los transmisores se encuentren a diferente altura, como se muestra en la figura 39, se debe tomar en cuenta que el cálculo de las diferentes variantes se hace como se muestra a continuación:

$$h_{o \max} = h_1 + h_p - 0,6r$$

$$h_p = \frac{d_1(h_2 - h_1)}{d}$$

Donde las diferentes magnitudes se muestran en la siguiente figura:

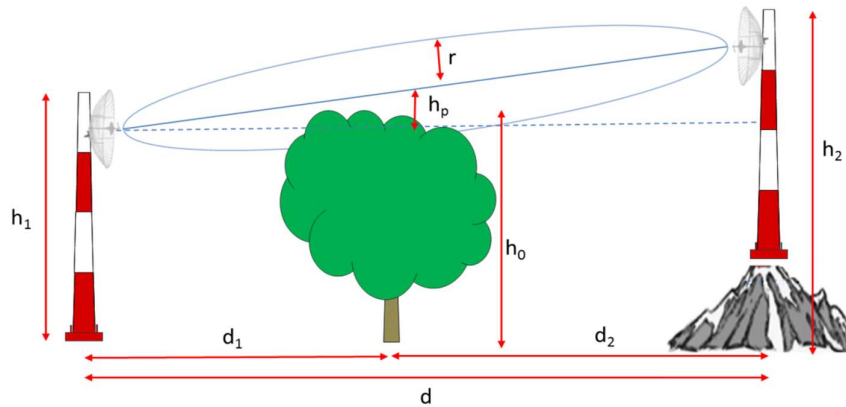


Figura 209. Diagrama para Fresnel con transmisores a diferente altura. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

CORRECCIÓN DEL OBSTÁCULO PARA DISTANCIAS ENTRE TRANSMISORES MAYOR A 10KM

Si la distancia entre transmisores es mayor a 10 Km se debe hacer una corrección (h_c) en la altura del objeto (h_o) debido a la refracción atmosférica, esto se realiza de la siguiente manera:

$$h_{c(m)} = \frac{d_1 d_2}{2KR_0}; d_1, d_2 \text{ y } R_0 \text{ en Km}$$

donde

- $k=4/3$ en Costa Rica y
- $R_0=6370$ Km (radio de la tierra), por lo que la altura que se deberá considerar del objeto es $h_o + h_c$.

PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN DE OBSTÁCULOS CUANDO NO SE POSEE CLARIDAD DE AL MENOS EL 60% DEL RADIO DE LA PRIMERA ZONA DE FRESNEL

Para calcular las pérdidas debidas a un obstáculo que obstruya más del 60% del primer radio de la zona de Fresnel, podemos integrar el campo para todas las fuentes secundarias que no son absorbidas por el obstáculo. Podemos distinguir dos casos, $v > 0$ y $v \leq 0$:

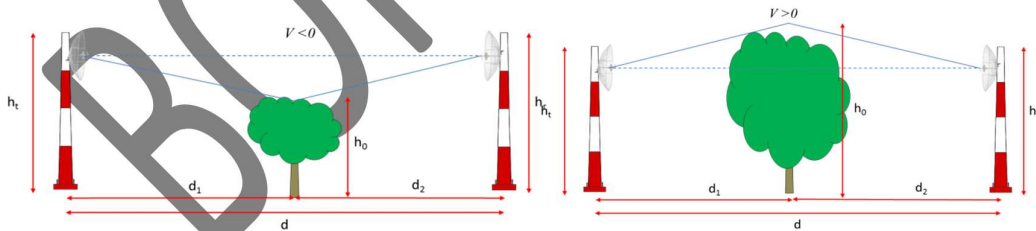


Figura 210. Diagrama para pérdidas con obstáculos dentro de la zona de Fresnel (<60%). (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

El cálculo de v se realiza de la siguiente manera:

$$v = h \sqrt{\frac{2 * (d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

$h = h_o$ para transmisores a la misma altura.

$h = h_o - h_t + \frac{d_1 * (h_t - h_r)}{d_2 + d_1}$ para transmisores a diferente altura.

Luego que se averigua el valor de v , se calcula el valor de la pérdida extrayendo el valor de x del siguiente cuadro:

$$\begin{aligned}
 L_d &= -20 \log(x) \\
 x &= 1 \quad \text{para } v < -0.8 \\
 x &= 0.5 - 0.62v \quad \text{para } -0.8 \leq v < 0 \\
 x &= 0.5e^{-0.95v} \quad \text{para } 0 \leq v < 1 \\
 x &= 0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2} \quad \text{para } 1 \leq v \leq 2.4 \\
 x &= \frac{0.225}{v} \quad \text{para } 2.4 \leq v
 \end{aligned}$$

ATENUACIÓN POR GASES (LG)

Los vapores de agua y de oxígeno no condensados poseen líneas de absorción en la banda de frecuencias de microondas y de ondas milimétricas, causando atenuación en trayectos radioeléctricos terrenales y oblicuos. En concreto, existen frecuencias donde se produce una gran atenuación, separadas por ventanas de transmisión donde la atenuación es mucho menor. En el caso del vapor de agua, se producen fuertes líneas de absorción para longitudes de onda de 1,35 cm, 1,67 mm e inferiores. En el caso del oxígeno, las longitudes de onda de los picos de absorción son 0,5 cm y 0,25 cm.

La atenuación debida al efecto conjunto de los vapores de agua y oxígeno es aditiva. En aquellas bandas donde los valores de atenuación exceden los 10 dB/km el alcance de las comunicaciones se encuentra enormemente limitado. Pero escogiendo adecuadamente las frecuencias de trabajo es posible obtener niveles de atenuación mucho menor: por ejemplo, a 30 GHz la atenuación es inferior a 0,1 dB/km. Para frecuencias por encima de 300 GHz, en cambio, la atenuación mínima es todavía elevada (6 dB/km o más) e impone una gran restricción en el caso de enlaces terrestres con visión directa.

Para calcular la atenuación causada por los gases y vapores atmosféricos se debe acudir a la Recomendación UIT-R P.676. En este documento se indica que la atenuación de la señal radioeléctrica por efecto de los gases, L_g , puede calcularse como:

$$L_g = \gamma_g d$$

donde γ_g es la atenuación específica total en dB/km (vapor de agua y aire seco), obtenida de una gráfica como la mostrada en la figura 36, y d es la longitud del trayecto radioeléctrico en km.

Para frecuencias por debajo de 10 GHz, la atenuación suele ser despreciable. Sin embargo, a frecuencias milimétricas empieza a ser importante, y en especial para una frecuencia de 60 GHz, donde la molécula de oxígeno presenta un pico de absorción (atenuación específica de unos 15 dB/km). No obstante, la banda de 60 GHz todavía encuentra aplicaciones especializadas, gracias a que las longitudes de onda cortas posibilitan el uso de antenas de alta ganancia muy compactas que compensan en parte las pérdidas introducidas, se dispone de un mayor ancho de banda para la transmisión de datos y se reduce el alcance de las interferencias, permitiendo incluso la instalación de sistemas privados de corto alcance dentro de edificaciones.

La Figura 211 muestra la atenuación específica de 1 GHz a 350 GHz a nivel del mar para aire seco y para vapor de agua con una densidad de 7,5 g/m³. Asimismo, es importante indicar que se debe considerar para realizar cálculos de atenuación por gases, la gráfica resultante de color negro, la cual corresponde a un promedio de los valores de las gráficas de aire seco y vapor de agua.

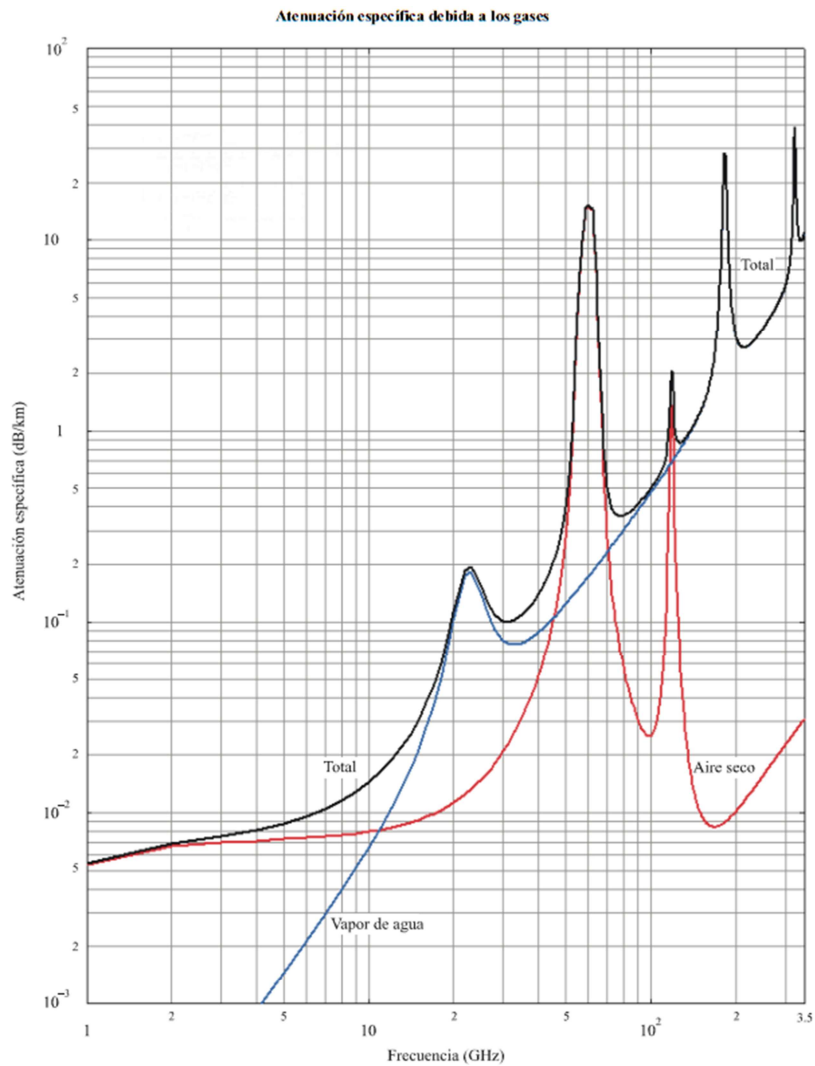


Figura 211. Gráfica para cálculo de atenuación específica. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

ATENUACIÓN POR LLUVIA (LR)

La atenuación real por lluvia con un porcentaje de indisponibilidad del 0.01% (valor típico), se obtiene a partir de la atenuación específica γ_R (dB/km) y la distancia del tramo de extensión de la lluvia d_R :

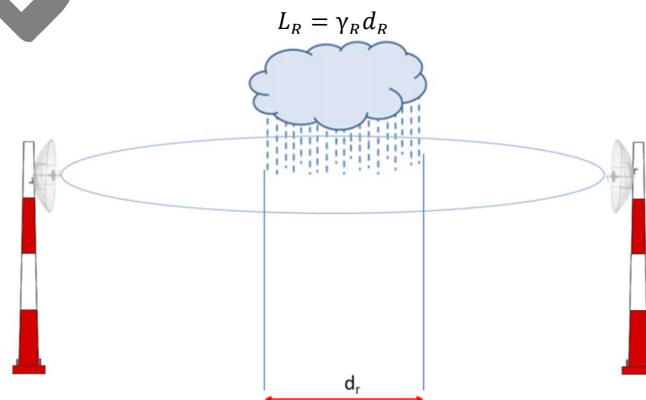


Figura 212. Diagrama para atenuación por lluvia. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

La atenuación específica γ_R (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia R (mm/h) mediante la ley potencial:

$$\gamma_R = kR^\alpha$$

Los valores de los coeficientes k y α se determinan en función de la frecuencia, f (GHz), en la gama de 1 a 1000 GHz, y en función del tipo de polarización utilizada (vertical u horizontal).

A continuación, se detallan los valores de los coeficientes k y α en función de la frecuencia y el tipo de polarización, según lo indicado en la Recomendación UIT-R P.838:

Tabla 20. Tabla para los valores de K y α en función de la frecuencia. (Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel), 2017)

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
1,5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957
2	0,0000847	1,0664	0,0000998	0,9490
2,5	0,0001321	1,1209	0,0001464	1,0085
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688
3,5	0,0001155	1,4189	0,0002346	1,1387
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2476
4,5	0,0001340	1,6948	0,0002347	1,3987
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317
5,5	0,0003909	1,6499	0,0003115	1,5882
6	0,0007056	1,5900	0,0004878	1,5728
7	0,001915	1,4810	0,001425	1,4745
8	0,004115	1,3905	0,003450	1,3797
9	0,007535	1,3155	0,006691	1,2895
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
11	0,01772	1,2140	0,01731	1,1617
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
13	0,03041	1,1586	0,03266	1,0901
14	0,03738	1,1396	0,04126	1,0646
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
16	0,05282	1,1086	0,05899	1,0273
17	0,06146	1,0949	0,06797	1,0137
18	0,07078	1,0818	0,07708	1,0025
19	0,08084	1,0691	0,08642	0,9930
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
21	0,1032	1,0447	0,1063	0,9771
22	0,1155	1,0329	0,1170	0,9700
23	0,1286	1,0214	0,1284	0,9630
24	0,1425	1,0101	0,1404	0,9561
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491
26	0,1724	0,9884	0,1669	0,9421
27	0,1884	0,9780	0,1813	0,9349
28	0,2051	0,9679	0,1964	0,9277
29	0,2224	0,9580	0,2124	0,9203
30	0,2403	0,9485	0,2291	0,9129
31	0,2588	0,9392	0,2465	0,9055
32	0,2778	0,9302	0,2646	0,8981
33	0,2972	0,9214	0,2833	0,8907
34	0,3171	0,9129	0,3026	0,8834
35	0,3374	0,9047	0,3224	0,8761
36	0,3580	0,8967	0,3427	0,8690
37	0,3789	0,8890	0,3633	0,8621
38	0,4001	0,8816	0,3844	0,8552

Frecuencia (GHz)	k_H	a_H	k_V	a_V
39	0,4215	0,8743	0,4058	0,8486
40	0,4431	0,8673	0,4274	0,8421
41	0,4647	0,8605	0,4492	0,8357
42	0,4865	0,8539	0,4712	0,8296
43	0,5084	0,8476	0,4932	0,8236
44	0,5302	0,8414	0,5153	0,8179
45	0,5521	0,8355	0,5375	0,8123
46	0,5738	0,8297	0,5596	0,8069
47	0,5956	0,8241	0,5817	0,8017
48	0,6172	0,8187	0,6037	0,7967
49	0,6386	0,8134	0,6255	0,7918
50	0,6600	0,8084	0,6472	0,7871
51	0,6811	0,8034	0,6687	0,7826
52	0,7020	0,7987	0,6901	0,7783
53	0,7228	0,7941	0,7112	0,7741
54	0,7433	0,7896	0,7321	0,7700
55	0,7635	0,7853	0,7527	0,7661
56	0,7835	0,7811	0,7730	0,7623
57	0,8032	0,7771	0,7931	0,7587
58	0,8226	0,7731	0,8129	0,7552
59	0,8418	0,7693	0,8324	0,7518
60	0,8606	0,7656	0,8515	0,7486
61	0,8791	0,7621	0,8704	0,7454
62	0,8974	0,7586	0,8889	0,7424
63	0,9153	0,7552	0,9071	0,7395
64	0,9328	0,7520	0,9250	0,7366
65	0,9501	0,7488	0,9425	0,7339
66	0,9670	0,7458	0,9598	0,7313
67	0,9836	0,7428	0,9767	0,7287
68	0,9999	0,7400	0,9932	0,7262
69	1,0159	0,7372	1,0094	0,7238
70	1,0315	0,7345	1,0253	0,7215
71	1,0468	0,7318	1,0409	0,7193
72	1,0618	0,7293	1,0561	0,7171
73	1,0764	0,7268	1,0711	0,7150
74	1,0908	0,7244	1,0857	0,7130
75	1,1048	0,7221	1,1000	0,7110
76	1,1185	0,7199	1,1139	0,7091
77	1,1320	0,7177	1,1276	0,7073
78	1,1451	0,7156	1,1410	0,7055
79	1,1579	0,7135	1,1541	0,7038
80	1,1704	0,7115	1,1668	0,7021
81	1,1827	0,7096	1,1793	0,7004
82	1,1946	0,7077	1,1915	0,6988
83	1,2063	0,7058	1,2034	0,6973
84	1,2177	0,7040	1,2151	0,6958
85	1,2289	0,7023	1,2265	0,6943
86	1,2398	0,7006	1,2376	0,6929
87	1,2504	0,6990	1,2484	0,6915
88	1,2607	0,6974	1,2590	0,6902
89	1,2708	0,6959	1,2694	0,6889
90	1,2807	0,6944	1,2795	0,6876
91	1,2903	0,6929	1,2893	0,6864
92	1,2997	0,6915	1,2989	0,6852
93	1,3089	0,6901	1,3083	0,6840
94	1,3179	0,6888	1,3175	0,6828

Frecuencia (GHz)	k_H	a_H	k_V	a_V
95	1,3266	0,6875	1,3265	0,6817
96	1,3351	0,6862	1,3352	0,6806
97	1,3434	0,6850	1,3437	0,6796
98	1,3515	0,6838	1,3520	0,6785
99	1,3594	0,6826	1,3601	0,6775
100	1,3671	0,6815	1,3680	0,6765
120	1,4866	0,6640	1,4911	0,6609
150	1,5823	0,6494	1,5896	0,6466
200	1,6378	0,6382	1,6443	0,6343
300	1,6286	0,6296	1,6286	0,6262
400	1,5860	0,6262	1,5820	0,6256
500	1,5418	0,6253	1,5366	0,6272
600	1,5013	0,6262	1,4967	0,6293
700	1,4654	0,6284	1,4622	0,6315
800	1,4335	0,6315	1,4321	0,6334
900	1,4050	0,6353	1,4056	0,6351
1 000	1,3795	0,6396	1,3822	0,6365

INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO

Ampliando lo mencionado, con respecto a la intensidad de campo, en secciones anteriores, el siguiente apartado muestra como calcular la intensidad de campo de dos maneras diferentes.

MÉTODO BÁSICO

En el caso de un solo transmisor que brinde servicio a varios receptores distribuidos al azar (radiodifusión, servicio móvil), se calcula el campo en un punto situado a una cierta distancia del transmisor mediante la relación siguiente:

$$e = \frac{\sqrt{30p}}{d}$$

donde:

- **e:** intensidad de campo eficaz (V/m)
- **p:** potencia isotropa radiada equivalente (P.I.R.E.) del transmisor en la dirección del punto considerado (W).
- **d:** distancia del transmisor al punto considerado (m).

Se sustituye a menudo la ecuación anterior por la ecuación la siguiente ecuación, en la que se emplean unidades prácticas:

$$e_{mV/m} = 173 \frac{\sqrt{p_{kW}}}{d_{km}}$$

MÉTODO OKUMURA HATA

El método de Okamura Hata se describe de la siguiente manera:

$$E = 69,82 - 6,16 * \log f + 13,82 * \log H_1 + a(H_2) - (44,9 - 6,55 \log H_1) * (\log d)^b$$

donde:

- **E:** intensidad de campo (dB(μV/m)) para una Potencia Radiada Aparente (P.R.A) de 1 KW
- **f:** frecuencia (MHz)
- **H1:** altura efectiva de la antena de la estación base por encima del suelo (m) dentro de un rango de 30 a 200 m
- **H2:** antena de la altura de la estación móvil por encima del suelo (m) dentro de un rango de 1 a 10 m
- **d:** distancia entre el transmisor y el receptor (Km)
- **a(H2):** $(1,1 * \log f_{(MHz)} - 0,7) * H_2 - (1,56 * \log f_{(MHz)} - 0,8)$
- **b:** 1 para $d \leq 20$ Km.

▪ **b:** $1 + (0,14 + 0,000187 * f_{(MHz)} + 0,00107 * H'_1) * (\log[0,05 * d])^{0,8}$, para $d > 20$ Km
donde:

$$H'_1 = \frac{H_1}{\sqrt{1 + 0,000007 * H_1^2}}$$

5.5 Recomendaciones UIT sobre la operación del servicio de radioaficionados

Esta información se considera como un insumo de motivación para que los aspirantes a radioaficionados, que no poseen un trasfondo académico en temas relacionados a la ingeniería, puedan ampliar sus conocimientos en el área de las radiocomunicaciones.

Asimismo, la SUTEL considera que cualquier persona que utilice el espectro debe tener conocimientos mínimos generales sobre las radiocomunicaciones, especialmente por tratarse de recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). No obstante, es necesario señalar que el contenido en esta sección no será parte de los temas evaluados en la prueba teórica para la obtención de un permiso de licencia de radioaficionados y/o banda ciudadana.

Los contenidos que son de utilidad según lo descrito anteriormente son las recomendaciones UIT-R M.1544 sobre las “Calificaciones mínimas de los radioaficionados” y la UIT-R M.1740 sobre la “Guía para la aplicación de textos del UIT-R relacionados con los servicios de aficionados y de aficionados por satélite”.

Asimismo, la recomendación UIT-R M.1740 toma en cuenta otras recomendaciones útiles para la actividad de los radioaficionados, las cuales se enlistan a continuación: UIT-R M.1172, UIT-R M.1041, UIT-R M.1042, UIT-R M.1043, UIT-R M.1044, UIT-R M.1544, UIT-R M.1677, UIT-R M.1732.

5.5.1 Ética y Procedimientos Operativos para el Radioaficionado (IARU)

En adición a las recomendaciones y material desarrollado en el presente manual, se insta la lectura del documento “Ética y Procedimientos Operativos para el Radioaficionado” de la IARU-R2 en su última edición. Dicho documento realiza un análisis profundo de la correcta forma de operar de un radioaficionado e incursiona acerca de temas de interés general procurando el uso eficiente del espectro por parte de los autorizados para su explotación.

Esta referencia se encuentra en el sitio WEB oficial de la IARU (<http://www.iaru-r2.org>).

Capítulo 6 Equipos para radioaficionados

6.1 Modulación

ANCHO DE BANDA

Una señal puede caracterizarse por su frecuencia y su magnitud o amplitud. No obstante, las señales empíricas se distribuyen sobre un espectro de frecuencias. A este intervalo se le denomina ancho de banda.

La comunicación vocal, por ejemplo, está integrada por múltiples señales individuales que abarcan frecuencias desde aproximadamente 300 Hz hasta más de 3000 Hz. Esto determina que el ancho de banda característico de la voz humana sea ligeramente superior a 2700 Hz, resultado de la diferencia entre sus límites frecuenciales.

Una señal compleja, como el lenguaje hablado, se compone de diversas señales individuales denominadas componentes. La mayoría de las transmisiones radioeléctricas que transportan información corresponden a señales compuestas. El ancho de banda de estas señales representa la diferencia entre su componente de frecuencia máxima y mínima.

Ilustrativamente, al sintonizar una emisora de radiodifusión AM que transmite contenido musical, podría observarse que su señal ocupa un espectro frecuencial entre 870 y 890 kHz. Su ancho de banda correspondería a 20 kHz, resultado de la resta entre sus frecuencias límite.

El ancho de banda se puede definir como el segmento de frecuencias continuas que se encuentra entre segmentos de frecuencia donde la potencia media de la señal transmitida se ha atenuado al menos 26 dB por debajo de esta potencia media dentro de la banda. La Figura 213 ejemplifica gráficamente cómo se efectúa esta medición.

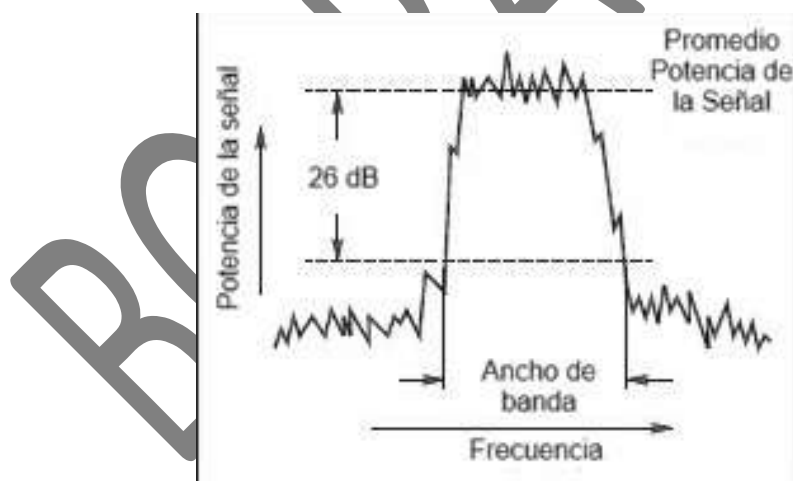


Figura 213. Medición de ancho de banda. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

ONDA CONTINUA (CW)

La señal radiofónica más elemental, caracterizada por una frecuencia e intensidad invariables, se denomina onda continua, abreviada CW (por *continuous wave*). La modalidad de modulación más primigenia consiste en activar y desactivar dicha onda siguiendo un patrón codificado, como el código Morse. Consecuentemente, las transmisiones radioeléctricas que emplean código Morse se identifican como señales CW.

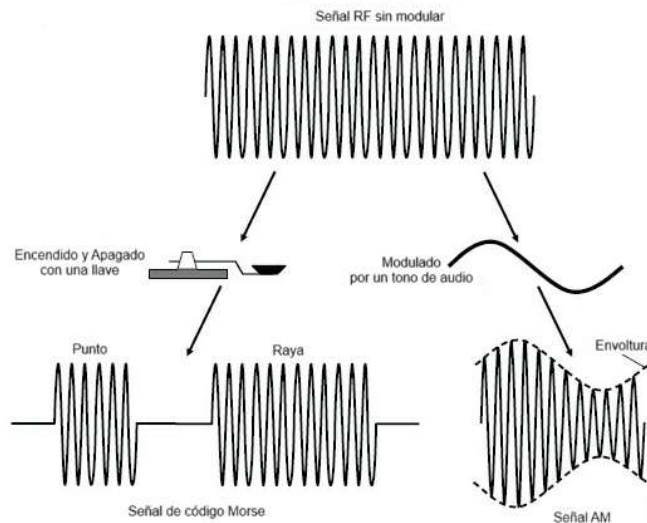


Figura 214. Añadir información a una señal RF modulando la amplitud. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

BANDA LATERAL ÚNICA (SSB)

En una señal de amplitud modulada (AM), la onda portadora carece de contenido informativo. Adicionalmente, cada banda lateral reproduce una réplica de la señal moduladora. Únicamente se requiere una banda lateral para transmitir la información, y precisamente eso caracteriza a las señales de banda lateral única, o SSB (Single Side Band, por sus siglas en inglés).

La Figura 215 ilustra una señal de banda lateral única: el mismo esquema de señal AM presentado en la Figura 214, pero con la portadora y una banda lateral eliminadas o suprimidas.

La totalidad de la potencia de la señal SSB se concentra en una única banda lateral.

La banda lateral superior (USB, por sus siglas en inglés) se emplea en las frecuencias muy altas (VHF) y ultra altas (UHF). Tanto la USB como la banda lateral inferior (LSB) se utilizan en las bandas de frecuencia media (MF) y alta frecuencia (HF).

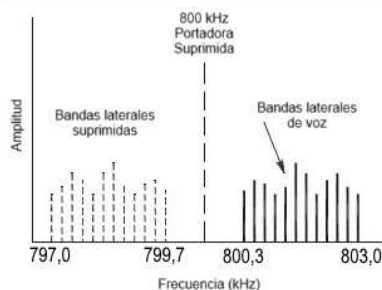


Figura 215. Señal de banda lateral única. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

ANCHO DE BANDA DE LAS SEÑALES MODULADAS

Considerando que la energía de la señal SSB se halla concentrada en un espectro de frecuencia reducido, resulta factible establecer comunicaciones a distancias considerablemente más extensas y bajo condiciones menos favorables en comparación con FM o AM, particularmente en las bandas de frecuencias muy altas (VHF) y frecuencias ultra altas (UHF). Esta característica motiva que los operadores especializados en comunicaciones de larga distancia (DX) y participantes en competencias de VHF y UHF empleen preferentemente señales SSB. La Tabla 21 presenta una descripción detallada del ancho de banda correspondiente a diversos tipos de señales.

Tabla 21. Ancho de banda para diferentes señales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Tipo de Señal	Ancho de Banda Típico
CW	150 Hz (0.15 kHz)
SSB digital	500 a 3000 Hz (0.5 a 3 kHz)
SSB voz	2 a 3 kHz
AM voz	6 kHz
AM radiodifusión	10 kHz
FM voz	10 a 15 kHz*
FM radiodifusión	150 kHz
Radiodifusión de video comercial	6 MHz

*En 10 metros por debajo de 29.0 MHz, la voz FM debe ser de banda estrecha (máx. 6 kHz).

Desde principios de 2018, la mayoría de las señales de repetidores FM de voz en VHF/UHF tienen aproximadamente 15 kHz de ancho, aunque existe equipo de banda estrecha que usa 5-6 kHz.

Para lograr una cobertura aún más extensa, las señales CW, caracterizadas por su extrema estrechez, resultan más sencillas de transmitir y captar por un operador humano, especialmente en entornos con interferencias o desvanecimiento de señal. Aunque las señales pueden presentar una intensidad considerable, los radioaficionados denominan a CW y SSB como modalidades de señal débil, debido a su mayor eficacia en comparación con FM cuando las señales poseen baja intensidad. Los modos digitales más recientes, como JT65 y FT8, precisan de un dispositivo computacional para su decodificación, pero proporcionan un rendimiento aún óptimo en condiciones de señales tenues.

Si una señal SSB puede emplear una banda lateral superior o inferior. Aunque USB y LSB operan de manera idéntica, la radioafición ha establecido las siguientes convenciones:

- Debajo de 10 MHz, se usa LSB
- Por encima de 10 MHz, se usa USB, incluyendo todas las bandas VHF y UHF

Existe una excepción: los radioaficionados deben usar USB en los cinco canales de la banda de 60 metros (5 MHz).

MODULACIÓN

La modulación de una señal es el proceso mediante el cual se modifica una señal portadora para que pueda transportar información, como audio, video o datos digitales. Una señal carente de información se considera no modulada. Recuperar la información de una señal modulada se conoce como demodulación.

Cuando se emplea la voz como información para modular una señal, se obtiene una señal de tipo vocal o fono. Si se utilizan caracteres de datos, se genera una señal de tipo digital o modo de datos. Los modos analógicos transportan información comprensible directamente por un ser humano, como la voz o el código Morse. Los modos digitales transmiten información en forma de caracteres que son interpretados o visualizados por sistemas computacionales.

Las tres características de una señal susceptibles de modulación son: su amplitud o intensidad, su frecuencia y su fase. Los tres tipos de modulación se implementan en la radioafición. Ya se conocen dos formas habituales: las señales AM y FM de las emisoras de radiodifusión.

MODULACIÓN EN AMPLITUD (AM)

Alterar la magnitud o extensión de una señal para incorporarle contenido (voz o datos) se denomina modulación en amplitud, o AM. (El código Morse representa, en realidad, la modalidad más elemental de AM). Si alguna vez se observó un medidor oscilar al compás de la voz o música, de manera análoga acontece con la amplitud de una señal AM cuando transporta información.

Un transmisor AM incorpora la voz a la señal no modulada alterando su amplitud. El contenido informativo reside en el perfil de la señal, denominado envoltorio. El receptor únicamente requiere seguir estas oscilaciones para recuperar la voz. Este procedimiento se conoce como detección.

Una señal AM genuina está constituida por tres señales diferenciadas que interactúan: una portadora y dos bandas laterales (ver Figura 215). La portadora representa una señal constante, no modulada. La banda lateral superior o USB está situada en una frecuencia superior a la portadora por la frecuencia del tono. La banda lateral inferior o LSB se ubica en una frecuencia inferior a la portadora.

Los datos precisos para restablecer el tono se encuentran almacenados en la extensión de las bandas laterales y en sus variaciones de frecuencia respecto a la onda portadora. Cada banda lateral alberga una reproducción idéntica de la señal moduladora.

MODULACIÓN EN FRECUENCIA Y EN FASE

Las otras dos características de la señal susceptibles de modificación para transportar información son la frecuencia y la fase.

Los procedimientos que alteran la frecuencia de una señal para incorporar información vocal o de datos se denominan modulación en frecuencia o FM. La frecuencia experimenta variaciones proporcionales a la amplitud instantánea de la señal moduladora. El grado de modificación de la frecuencia en una señal FM cuando es modulada recibe el nombre de desviación. La frecuencia de una señal FM fluctúa en concordancia con la amplitud de la señal moduladora, según se ilustra en la Figura 216.

La modulación en fase o PM (*phase modulation*) presenta una gran similitud con la FM. Esta técnica modifica la fase de una señal en lugar de transformar su frecuencia. Debido a sus sobresalientes cualidades de supresión de ruido, FM constituye el método preferente empleado por la mayoría de los repetidores VHF y UHF.

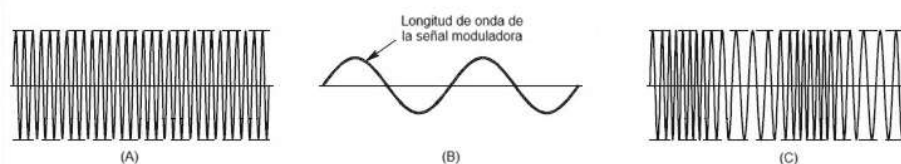


Figura 216. Modulación FM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

La FM también se usa comúnmente para radio por paquetes en VHF y UHF. Los datos se intercambian como tonos de audio utilizando la entrada de voz y la salida de audio de la radio FM. Esto permite usar radios de voz FM económicas.

6.2 Bloques fundamentales de la radio

Prácticamente la totalidad de los dispositivos radiofónicos se estructuran a partir de unos cuantos esquemas de circuitos fundamentales. El procedimiento mediante el cual los especialistas en diseño de circuitos optan por construirlos presenta considerables variaciones, las funcionalidades esenciales de estos permanecen constantes.

Aunque la presente sección se concentra en los circuitos que ejecutan las tareas de generación y procesamiento de señales, idénticas funciones pueden ser implementadas sobre datos digitales mediante aplicaciones informáticas en un radio que emplea procesamiento digital de señales o DSP (*Digital Signal Processor*). Esta modalidad se denomina generalmente radio definida por software o SDR. Sin embargo, las funciones resultan similares en ambas tipologías de radio — analógica y digital.

6.2.1 Multiplicadores

Un circuito que opera de manera análoga a un mezclador es el multiplicador. En contraste con generar la suma y diferencia de dos señales de frecuencia, un multiplicador produce un armónico de una señal de frecuencia de entrada. La representación simbólica en diagrama de bloques para un circuito multiplicador se ilustra en la Figura 217 (A). Los multiplicadores se emplean frecuentemente cuando se requiere una señal VHF o UHF con estabilidad, pero desarrollar un oscilador a esa frecuencia resultaría complejo. Un oscilador de baja frecuencia proporciona la señal de entrada al multiplicador, y su salida se ajusta al armónico específico deseado de la señal original. Adicionalmente, estos dispositivos encuentran aplicación en transmisores de modulación de frecuencia (FM).

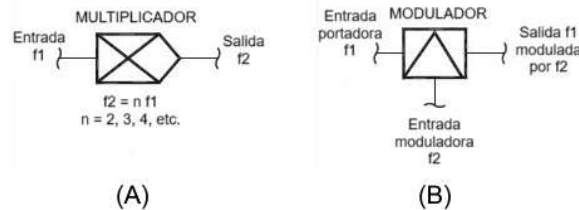


Figura 217. Símbolo para diagrama de bloques de multiplicador y modulador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

6.2.2 Moduladores

Los moduladores son aquellos circuitos electrónicos encargados de incorporar información a una señal portadora mediante la alteración de la amplitud, frecuencia o fase de la onda transmisora. El símbolo representativo en diagramas de bloques para un modulador se presenta en la Figura 217 (B). Típicamente, la señal de entrada en el lateral izquierdo corresponde a la entrada no modulada. La entrada desde la parte inferior contiene la información que se pretende adicionar a la señal no modulada, mientras que la salida se ubica en el lateral derecho. (Podría observarse que todos los símbolos para diagramas de bloques utilizan el flujo de señal de izquierda a derecha, dirección recomendada para esquemas y diagramas de bloques). El mismo símbolo se emplea para representar circuitos demoduladores, igualmente.

MODULACIÓN DE AMPLITUD

La AM se originó inicialmente modificando la tensión de la fuente de alimentación hacia el circuito de salida de un transmisor CW. Puede concebirse fácilmente este proceso: conforme la tensión experimenta variaciones, la amplitud de la envolvente de la señal de salida la réplica. Este procedimiento se denomina modulación de placa o colector (o drenaje) debido a que la tensión modificada se conecta a la placa de un tubo de vacío o al colector o drenaje de un transistor. Se utilizaba un transformador de modulación para incorporar y sustraer una versión amplificada de la voz del operador a la tensión de la fuente de alimentación, generando la modulación.

Una señal AM comprende una señal portadora y dos bandas laterales; una de frecuencia superior a la portadora (banda lateral superior o USB) y otra inferior (banda lateral inferior o LSB). Esto se representa en la Figura 218. Si se elimina o suprime la señal portadora, el resultado es una señal de doble banda lateral o DSB, conteniendo únicamente las señales USB y LSB. Finalmente, también es posible eliminar una de las bandas laterales, dejando exclusivamente la USB o LSB. Al transmitir solamente una banda lateral, la potencia de señal disponible puede aprovecharse de manera más eficiente en comparación con AM.

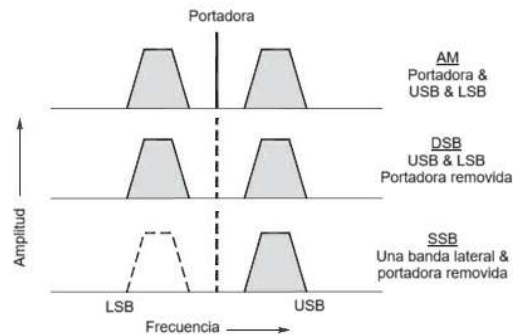


Figura 218. Señal AM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

El DSB también puede generarse mediante un modulador equilibrado — un dispositivo especial de mezcla donde f_1 representa la señal portadora y f_2 la señal moduladora. El modulador equilibrado produce DSB al cancelar internamente la señal portadora.

Partiendo de una señal DSB, la SSB se obtiene mediante el filtrado de la banda lateral no requerida. Este constituye el método de filtrado para generar SSB. El procedimiento de desfase para crear señales SSB sin filtros emplea un par de moduladores equilibrados alimentados por señales portadora y moduladora con un desfase de 90° . Las señales DSB resultantes se combinan, produciendo como resultado una señal SSB.

MODULACIÓN DE FRECUENCIA Y DE FASE

La modulación de frecuencia (FM) surge cuando únicamente la frecuencia de la señal modulada varía proporcionalmente a la amplitud de la señal moduladora. Esta variación en la frecuencia de la señal se denomina desviación. La modulación de fase (PM) acontece si la desviación es proporcional tanto a la amplitud como a la frecuencia de la señal moduladora. La configuración del circuito modulador determina si la señal de salida será FM o PM. Es fundamental destacar que, salvo en circunstancias muy específicas, FM y PM suenan idénticas al aire y ambas pueden ser demoduladas mediante los mismos circuitos.

El método más habitual para realizar modulación angular es un modulador de reactancia, ilustrado en la Figura 219. Si el modulador se conecta al circuito sintonizado que controla la frecuencia del oscilador, la frecuencia cambiará al aplicar modulación, generando modulación de frecuencia. Para producir modulación de fase, el modulador de reactancia se conecta a un amplificador RF sintonizado que sigue al oscilador. Cuando se aplica la modulación, se modificará la fase de la portadora, sin afectar la frecuencia promedio.

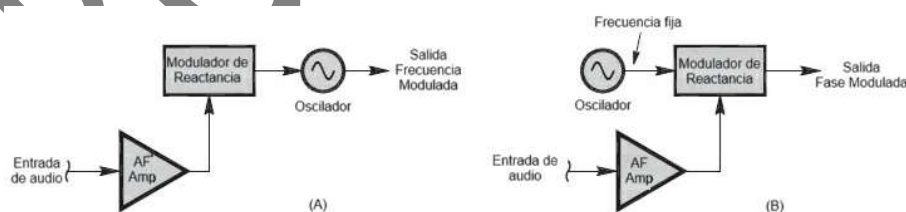


Figura 219. Modulador de reactancia para crear modulación por frecuencia o por fase. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

MODULACIÓN EN CUADRATURA

La modulación en cuadratura, denominada también modulación I/Q por las señales I y Q que generan la señal modulada de salida, constituye una técnica principalmente empleada para la transmisión de datos digitales. No obstante, diversas combinaciones de las señales I y Q pueden producir señales con cualquier modalidad de modulación. Esta metodología resulta especialmente apropiada para el procesamiento digital de señales (DSP) y se implementa extensivamente en radios SDR (Software Defined Radio).

“I” hace referencia a “in-phase” (en fase) y “Q” a “quadrature” (en cuadratura). Dichas señales I y Q representan señales de entrada. La Figura 220 ilustra el mecanismo operativo de la modulación I/Q. Una portadora de radiofrecuencia proveniente de una señal de oscilador local (LO) se bifurca en dos señales, una de las cuales experimenta un desplazamiento de fase de 90 grados. (De este fenómeno deriva el término “cuadratura”). Las señales del oscilador local se aplican a un mezclador juntamente con la señal I o Q. El resultado consiste en un par de señales moduladas que posteriormente se suman en la etapa de combinación. La salida de radiofrecuencia del combinador comprende un conjunto de señales moduladas que presentan portadoras con una diferencia de fase de 90 grados.

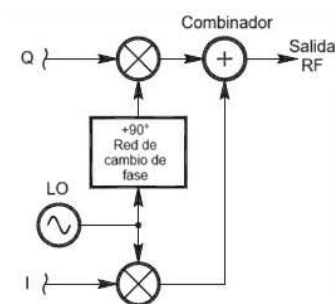


Figura 220. Modulador I/Q. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

6.3 Transmisores y Receptores

Actualmente, esta sección abordará los controles y funcionalidades habituales de equipamiento radiofónico, ilustrados mediante representaciones gráficas y fotográficas. Naturalmente, cada dispositivo radioeléctrico presenta particularidades específicas, por lo cual se recomienda consultar detalladamente el manual del usuario para obtener información integral. Adicionalmente, los manuales de usuario pueden ser accesibles mediante descarga en los portales web de los fabricantes.

Se explorará la implementación de antenas, sistemas de alimentación y fuentes energéticas. Igualmente, se abordarán aspectos fundamentales relacionados con el tratamiento de interferencias. La comprensión de estas técnicas prácticas facilitará la aproximación del aficionado al dominio radioeléctrico. Asimismo, este conocimiento simplificará la comprensión de las convenciones operativas, normativas y regulaciones.

SELECCIÓN DE BANDA, FRECUENCIA Y MODO

Independientemente de utilizar un transceptor (opción más probable) o receptores y transmisores independientes, existen dos funcionalidades comunes: control de frecuencia y modo. La radioafición se distingue entre servicios radioeléctricos por permitir sintonización libre dentro de bandas asignadas, sin requerir canales predeterminados.

Los repetidores operan en canales establecidos, aunque sus frecuencias son determinadas por los propios aficionados.

Los radioaficionados pueden emplear múltiples modalidades de comunicación. La mayoría de los servicios radioeléctricos permanecen restringidos a una única modalidad. Esta flexibilidad conlleva la responsabilidad de comprender la selección y configuración de frecuencias y modos.

Comienza seleccionando la banda si tu radio opera en múltiples bandas. Por ejemplo, podrías tener un transceptor portátil de doble banda para las bandas de 2 metros y 70 centímetros o un equipo HF multibanda que cubre de 160 a 10 metros.

Los controles de selección de banda pueden estar etiquetados en términos de frecuencia o longitud de onda.

Tabla 22 muestra cómo las etiquetas en tu radio pueden indicar la banda.

Tabla 22. Etiquetas para la selección de la banda.

Banda	Frecuencia (MHz)	Longitud de onda (metros o cm)
HF y MF	1,8	160 metros
	3,5	80 metros
	5	60 metros
	7	40 metros
	10	30 metros
	14	20 metros
	18	17 metros
	21	15 metros
	24	12 metros
	28	10 metros
VHF	50	6 metros
	144	2 metros
	222	1.25 metros
UHF	440	70 cm
	902	33 cm
	1240	23 cm
	2300	13 cm

Luego se procede a elegir una frecuencia dentro del espectro de la banda; este proceso se denomina sintonización. El dispositivo de control empleado para sintonizar es el VFO, acrónimo que representa oscilador de frecuencia variable. En equipos radiofónicos más antiguos, el mando del VFO modifica la frecuencia de un circuito oscilador que consecuentemente determina la frecuencia operativa de la radio.

En la mayoría de los dispositivos radioeléctricos contemporáneos, el control VFO es interpretado por un microprocesador que gestiona la frecuencia del equipo. Algunos equipos también incorporan un teclado que permite ingresar frecuencias de manera directa. El teclado estará ubicado en el panel frontal del dispositivo o en el micrófono. Se utilizan teclas numéricas para introducir la frecuencia con precisión. El manual de la radio proporcionará instrucciones detalladas sobre su uso. En radios multimodo, el operador también selecciona el modo de señal:

- SSB (USB o LSB)
- AM
- FM
- CW o código Morse
- Datos (para RTTY u otros modos digitales)

Las radios que abarcan HF y los transceptores que cubren HF/VHF/UHF son multimodo. La mayoría de los transceptores portátiles y móviles diseñados para operar con repetidores son equipos de modo único que únicamente utilizan FM o un modo digital específico. Las memorias o canales de memoria se emplean para almacenar frecuencias y modos con fines de recuperación posterior. Las memorias se implementan para permitir una sintonización rápida de frecuencias habituales o preferidas.

6.3.1 Transmisor

FUNCIONES DEL TRANSMISOR

En equipos de radiocomunicación que funcionan mediante tecnologías AM/SSB y CW, la energía de emisión del dispositivo transmisor se regula a través de un mecanismo de control de potencia de radiofrecuencia, este puede constituir una alternativa de menú o un elemento de control compartido para múltiples funcionalidades del equipo. Los dispositivos portátiles y móviles con modulación de frecuencia disponen de niveles de potencia predeterminados seleccionables.

La ganancia del micrófono (MIC GAIN o MIC) regula la intensidad acústica de la voz que se introduce al circuito modulador de un transmisor SSB. Los transmisores FM típicamente

presentan una ganancia de micrófono establecida previamente. El cambio entre la recepción y transmisión vocal puede efectuarse de manera manual mediante un interruptor de pulsar para hablar (PTT) o a través de un mecanismo de control automático de transmisor activado por voz (VOX).

Para transmitir código Morse, se emplea una llave para activar y desactivar la señal de salida del transmisor. Los puntos y rayas del código Morse se denominan elementos del código. Al utilizar una llave recta, el operador genera de forma personal los puntos y las rayas. Este proceso se conoce como tecleo manual.

TRANSMISORES DE CW

El dispositivo transmisor más elemental comprende dos etapas fundamentales para la emisión de CW, según se ilustra en la Figura 221. Su configuración integra un generador de oscilaciones y un módulo amplificador, donde el componente amplificador se activa y desactiva mediante un conmutador o manipulador. Un generador de oscilaciones con cristal único puede ser sustituido por un oscilador de frecuencia variable (VFO) para posibilitar la sintonización del transmisor en distintas frecuencias.

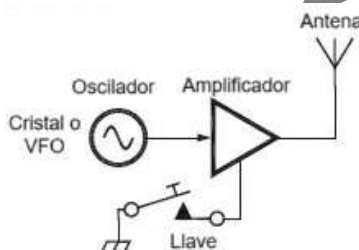


Figura 221. Transmisor CW dos etapas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

En un transmisor gobernado por un VFO que funciona en múltiples bandas de frecuencia, se implementan dispositivos mezcladores para modificar la banda de frecuencia de salida del equipo transmisor sin alterar el intervalo de frecuencia del oscilador de frecuencia variable. Esta estrategia preserva la configuración del VFO de manera simple y estable, garantizando una óptima calidad de señal.

La Figura 222 ilustra un diagrama esquemático elemental para un transmisor de tres bandas controlado mediante VFO. La señal de entrada al mezclador proveniente del VFO abarca sistemáticamente el mismo espectro de frecuencias. El oscilador local (LO) genera una señal en una de tres frecuencias específicas, determinadas por la conmutación selectiva de cristales. Posteriormente, un filtro sintonizado a una de las tres bandas sucede al mezclador, con el propósito de suprimir la frecuencia de suma o diferencia no deseada.

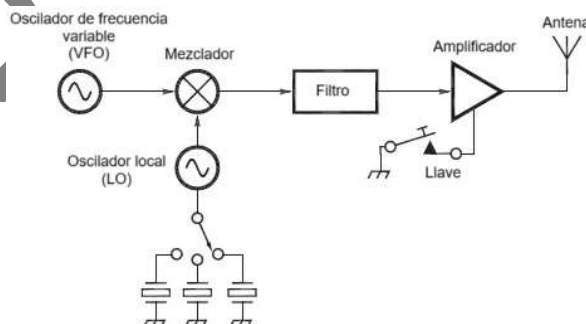


Figura 222. Transmisor simple de 3 bandas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

TRANSMISORES DE VOZ SSB

La Figura 223 ilustra el procedimiento de transformación del transmisor CW en un transmisor de voz SSB. Partiendo del transmisor CW de triple banda presentado en la Figura 222, se incorpora una etapa de modulador balanceado situada entre el oscilador y el mezclador. Las señales acústicas captadas por el micrófono (mic) son inicialmente amplificadas mediante un circuito de amplificación vocal y posteriormente canalizadas hacia el modulador balanceado. El oscilador portador con frecuencia ajustable constituye la señal de entrada complementaria al modulador balanceado. El resultado de esta interacción es una señal DSB, por consiguiente, se implementa un filtro especializado para suprimir la banda lateral no requerida.

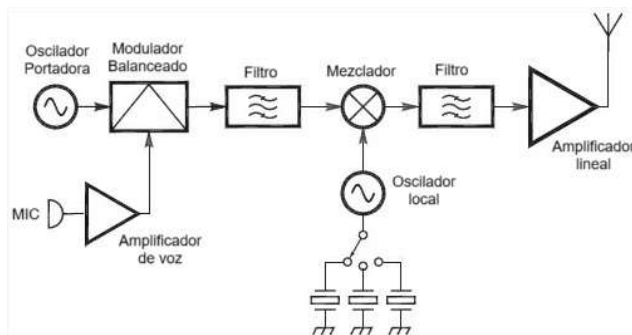


Figura 223. Como crear un transmisor SSB a partir del CW. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Obsérvese que el amplificador de salida ha sido ahora denominado como “Amplificador Lineal”. Esta modificación resulta imperativa debido a que el transmisor debe reproducir con exactitud la morfología de la onda vocal que experimenta variaciones rápidas. En un transmisor CW, únicamente se requiere la activación y desactivación de una onda senoidal. No obstante, en un transmisor AM o SSB, es fundamental que todas las etapas estén concebidas para replicar con precisión la señal de entrada, independientemente de que realicen amplificación, mezcla o filtrado. Cualquier distorsión en segmento alguno de la cadena transmisora (es decir, la secuencia de circuitos que genera la señal transmitida) provocará la generación de señales parásitas no deseadas.

TRANSMISORES FM

La modulación y alteración de la frecuencia se efectúan de manera distintiva en los transmisores FM. Si bien resulta factible generar una señal FM y posteriormente emplear mezcladores, resulta considerablemente más económico y eficiente producir la señal FM a una frecuencia reducida y posteriormente multiplicarla para alcanzar la banda específica. Esta metodología se representa gráficamente en la Figura 224. En un transmisor FM correspondiente a la banda de 2 metros, la frecuencia del oscilador modulado se sitúa aproximadamente en 12 MHz, y el multiplicador selecciona la duodécima armónica para la transmisión. A modo de ilustración, para una salida en 146.52 MHz, el oscilador debe generar una señal de $146.52 / 12 = 12.21$ MHz.

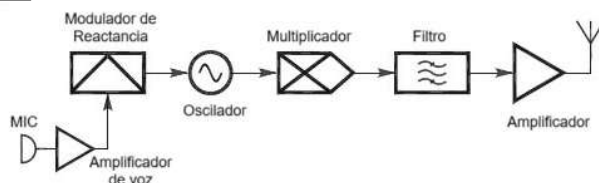


Figura 224. Transmisor FM de 2 bandas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Es fundamental comprender que la variación de frecuencia en la salida del oscilador modulado también experimenta una multiplicación, incrementándose con cada armónica. A modo de ilustración, si se pretende que la señal de 146,52 MHz posea una desviación estándar de 5 kHz, la oscilación del oscilador podría alcanzar como máximo $5 / 12 = 416,7$ Hz.

Del mismo modo que para las señales AM, se exige que los radioaficionados y afines restrinjan el ancho de banda (BW) de las señales FM a lo que represente una práctica aficionada adecuada. Toda señal modulada angularmente presenta un número teóricamente infinito de bandas laterales, por lo que surge la interrogante: ¿cuál es el ancho de banda de una señal FM? La Regla de Carson constituye una fórmula que proporciona una aproximación precisa del ancho de banda de una señal FM: $BW = 2 \times (\text{desviación pico} + \text{frecuencia de modulación más alta})$.

Como ejemplo ilustrativo, si la desviación pico de una señal de voz FM se encuentra limitada a 5 kHz y la frecuencia de modulación más alta es 3 kHz, entonces $BW = 2 \times (5 + 3) = 16$ kHz. Esta señal se mantendrá de manera segura dentro de los canales estándar de 20 kHz especificados por los coordinadores de repetidores. Resulta crucial controlar tanto la desviación como el contenido en frecuencia de la señal moduladora.

Un aspecto destacable de la figura anterior radica en que el amplificador de salida ya no requiere ser un amplificador lineal. Las señales FM y PM presentan un nivel de potencia constante, por lo que carece de relevancia si un amplificador puede reproducir fielmente la forma de onda de entrada. La única característica significativa de la señal FM es su frecuencia. Los amplificadores en un transmisor FM pueden ser altamente no lineales siempre que se filtren los armónicos y las señales espurias fuera de canal.

6.3.2 Receptores

El receptor enfrenta un desafío complejo: discernir únicamente la señal deseada entre la multiplicidad de señales concurrentes. No obstante, los receptores contemporáneos ejecutan una labor sobresaliente cuando se encuentran calibrados de manera precisa. Comprender el funcionamiento de los controles de un receptor resulta fundamental, como se evidenciará al iniciar la exploración de las diferentes bandas.

El ajuste más habitual es el de amplificación sonora o modulación de volumen. De manera similar a un dispositivo receptor en espacios domésticos o vehículos, este determina el nivel de audición del transductor acústico o los dispositivos de escucha personal. En un equipo de alta frecuencia, el control de ganancia de radiofrecuencia estará próximo. La ganancia de radiofrecuencia regula la capacidad receptiva del dispositivo para las señales entrantes. Un atenuador disminuye la potencia de las señales para impedir que saturen el receptor.

El circuito de control automático de ganancia (AGC, *Automatic Gain Control*) de un receptor ajusta permanentemente la sensibilidad del dispositivo para mantener una salida acústica uniforme tanto para señales tenues como intensas.

Para evitar percibir ruido constante cuando no existe una señal presente, se desarrolló el circuito de silenciamiento (*squelch*). El circuito de silenciamiento (ocasionalmente denominado silenciamiento por portadora) inhibe la salida acústica del receptor cuando no hay una señal detectable.

RECEPTORES SUPERHETERODINOS BÁSICOS

La mayoría de los receptores analógicos en uso por radioaficionados actualmente son algún tipo de superheterodino, un diseño concebido en los años 1920 por Edwin Armstrong. Como se comprendió previamente, la combinación de señales para obtener las frecuencias suma y diferencia se denomina heterodinación. El superheterodino se fundamenta en ese proceso.

Las señales recibidas son increíblemente atenuadas —del orden de nanowatts o picowatts. Por consiguiente, un receptor debe ser suficientemente sensible para permitir que un operador perciba dicha señal. Simultáneamente, se debe seleccionar una señal única de un espectro congestionado donde las señales adyacentes podrían ser miles de millones de veces más potentes.

Así, el receptor también debe ser altamente selectivo. Ambos requerimientos se satisfacen con la estructura fundamental del receptor superheterodino que se ilustra en la Figura 225. Se seguirá la señal a través del receptor desde la antena hasta el altavoz.

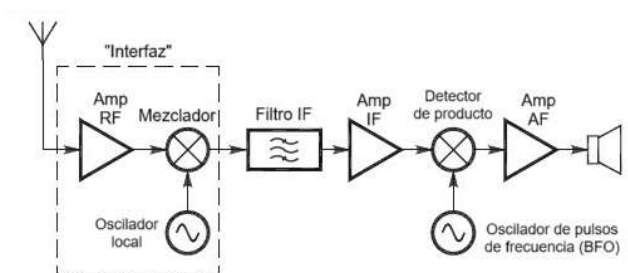


Figura 225. Receptor superheterodino. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Las señales captadas son inicialmente potenciadas por el amplificador de radiofrecuencia, y posteriormente canalizadas hacia la entrada de RF de un mezclador. El oscilador local (LO) se configura de manera que la señal objetivo genere un producto de mezcla en una frecuencia constante, denominada frecuencia intermedia (IF). Un filtro de IF elimina las señales externas al ancho de banda del receptor y las señales remanentes son amplificadas por el amplificador de IF. La mayor proporción de ganancia de un superheterodino se proporciona mediante las etapas de IF del receptor. Un detector o fase de demodulación sucede a la IF para recuperar la información modulada. El superheterodino más elemental posible consiste en un mezclador conectado a la antena, un oscilador que funciona como LO, y un detector que opera directamente sobre la señal de IF resultante.

Las etapas de IF de una única frecuencia facilitan enormemente la creación de filtros de alta calidad y amplificadores de elevada ganancia sin necesidad de sintonización. Únicamente el LO requiere sintonización en un receptor superheterodino. Por ejemplo, para transformar una señal de RF en 14,250 MHz a una IF de 455 kHz, el LO debe sintonizarse bien sea a $14,250 - 455 \text{ kHz} = 13,795 \text{ MHz}$ o a $14,250 + 455 \text{ kHz} = 14,705 \text{ MHz}$.

Para abarcar toda la banda de 20 metros y asumiendo que se utiliza el producto de mezcla por diferencia, el LO se sintonizaría de $14,000 \text{ MHz} - 0,455 \text{ MHz} = 13,545 \text{ MHz}$ a $14,350 \text{ MHz} - 0,455 \text{ MHz} = 13,895 \text{ MHz}$.

Una vez amplificadas a un nivel más aprovechable, las señales de SSB y CW son demoduladas por un detector de producto, un tipo especial de mezclador. Si se está recibiendo una señal AM, se emplea un detector de producto o un detector de envolvente para recuperar la señal modulada. La salida del detector de producto o de envolvente es una señal de audio que se amplifica mediante un amplificador de frecuencia de audio (AF) y se aplica a un altavoz, auriculares o tarjeta de sonido.

El amplificador de RF y el mezclador conforman la "etapa frontal" del receptor. Esta sección del receptor procesa señales débiles en sus frecuencias originales, por lo que debe operar sobre un amplio rango de frecuencias y tanto para señales intensas como tenues. En ocasiones se utiliza un filtro sintonizable o preselector entre la antena y el amplificador de RF para rechazar señales intensas fuera de banda, como las de emisoras comerciales. Estas señales fuera de banda no se encuentran en la banda de frecuencia deseada, pero podrían saturar la circuitería. Si se requiere mayor sensibilidad, se implementa una etapa adicional de amplificación de RF denominada preamplificador (o preamp).

Los receptores de FM son muy similares a un superheterodino de AM/SSB/CW, pero presentan diferencias fundamentales, como se ilustra en la Figura 226. La única información relevante en una señal FM es la frecuencia, por lo que un amplificador de IF especial y no lineal llamado limitador reemplaza al amplificador de IF lineal en un receptor AM. Un limitador amplifica la señal recibida hasta que toda la información modulada en amplitud, como el ruido, es eliminada y solo permanece una onda cuadrada de frecuencia variable. La información de audio se recupera mediante un discriminador o un detector de cuadratura que sustituye al detector de producto, y posteriormente el audio se amplifica.

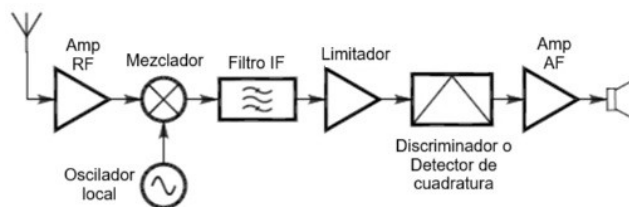


Figura 226. Receptor FM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Como todo diseño, el superheterodino presenta ciertas limitaciones inherentes. En virtud de la generación de productos de mezcla tanto en frecuencias sumatorias como diferenciales, señales no intencionadas pueden generar sus propios productos de interacción en la Frecuencia Intermedia (IF). A modo de ilustración, si la IF se establece en 455 kHz y la frecuencia del Oscilador Local (LO) es de 13,800 MHz, señales ubicadas en 14,255 MHz y 13,345 MHz producirán un producto de mezcla en 455 kHz. El primer caso resulta de $14,255 \text{ MHz} - 13,800 \text{ MHz} = 455 \text{ kHz}$, mientras que el segundo emerge de $13,800 \text{ MHz} - 13,345 \text{ MHz} = 455 \text{ kHz}$. Considerando que el receptor está configurado para captar la señal de 14,255 MHz, la señal alterna en 13,345 MHz constituye una respuesta de imagen.

Se requieren filtros en la etapa frontal del receptor para suprimir señales susceptibles de generar imágenes.

Otra deficiencia se origina por el LO y circuitos osciladores internos del receptor. La propagación de estas señales dentro del trayecto de señal puede provocar la manifestación de señales continuas. Tales señales reciben la denominación de pájaros (birdies). Incluso en ausencia de señales en la entrada del receptor, los birdies permanecerán audibles debido a que son generados por señales internas del propio dispositivo.

El receptor ilustrado en las figuras anteriores representa un receptor de conversión simple, con un único mezclador que transforma la señal de Radiofrecuencia (RF) a Frecuencia Intermedia (IF). Las etapas de IF proporcionan la mayor parte de la ganancia receptora y prácticamente toda su selectividad (capacidad de rechazar señales no deseadas). Dependiendo del número de bandas de frecuencia que el receptor debe cubrir y las exigencias selectivas, los receptores superheterodinos pueden incorporar una, dos o tres etapas de IF, configurando así un receptor de conversión simple, doble o triple. Se implementa filtrado en cada IF, permitiendo al operador seleccionar anchos de banda de filtro apropiados para la señal objetivo. Esto resulta en una calidad óptima de señal recibida, minimizando ruido e interferencias no deseadas, maximizando consecuentemente la relación señal a ruido (SNR).

SELECTIVIDAD Y SENSIBILIDAD

Los receptores se evalúan considerando dos atributos fundamentales: sensibilidad y selectividad. La sensibilidad de un dispositivo receptor determina su aptitud para captar señales. Esta característica se cuantifica mediante el nivel mínimo de señal detectable, típicamente expresado en microvoltios (mV). Cuanto más reducido sea el MDS (señal mínima discernible o detectable), mayor será la capacidad receptiva del equipo. En escenarios donde la sensibilidad resulta insuficiente, se puede implementar un preamplificador o "preamp". Este componente se instala como un elemento intermedio entre la antena y el receptor.

La selectividad representa la capacidad del receptor para diferenciar señales, extrayendo únicamente la información correspondiente a la señal de interés en presencia de señales parásitas. Una selectividad elevada implica que un receptor puede operar correctamente incluso cuando existen señales intensas en frecuencias adyacentes.

FILTRACIÓN Y SINTONIZACIÓN

Un receptor desestima señales no deseadas mediante la implementación de filtros. En el punto de entrada, un filtro permite el tránsito exclusivo de señales pertenecientes a la banda seleccionada. Posteriormente, estas señales atraviesan filtros lo suficientemente precisos como

para descartar todo excepto la señal objetivo. (El término "estrecho" se asocia con un ancho de banda reducido, mientras que "ancho" representa un ancho de banda superior).

Los filtros de mayor amplitud (aproximadamente 2.4 kHz) se emplean en la recepción de SSB. Los filtros más restringidos (cerca de 500 Hz) resultan idóneos para la recepción de CW y modos de datos. La disponibilidad de múltiples filtros facilita la reducción de ruido o interferencias mediante la selección de un filtro con el ancho de banda apropiado para transmitir la señal deseada.

La sintonización incremental del receptor (RIT, por sus siglas en inglés) constituye un mecanismo de ajuste preciso utilizado en operaciones SSB o CW. RIT permite al operador modificar la frecuencia del receptor sin alterar la frecuencia del transmisor. Esta funcionalidad posibilita la sintonización de una estación ligeramente desalineada o el ajuste del tono vocal de un operador que resulte demasiado agudo o grave. En determinados equipos de radio, el RIT recibe la denominación de clarificador y se identifica mediante la etiqueta CLAR.

El espectro radioeléctrico presenta diversas tipologías de ruido. Se implementan circuitos especializados para eliminar o minimizar sus efectos. Un supresor de ruido (NR) detecta impulsos abruptos provenientes de líneas eléctricas con descargas, motores o sistemas de ignición vehicular, provocando una interrupción temporal de la recepción durante el pulso.

GANANCIA DE RF Y CONTROL AUTOMÁTICO DE GANANCIA (AGC)

La magnitud de amplificación del receptor se determina mediante el mecanismo de control de ganancia de radiofrecuencia. Durante la exploración del receptor en búsqueda de señales tenues, el operador probablemente establecerá la ganancia de RF en su nivel máximo para optimizar la sensibilidad receptora. Una vez localizada una señal, salvo que sea extremadamente débil, no resulta necesario mantener la ganancia máxima, por lo que puede ajustarse para lograr una recepción más confortable. Configuraciones inferiores de ganancia de RF también contribuyen a reducir la intensidad del ruido de fondo en la salida acústica.

Los sistemas de control automático de ganancia (AGC, por sus siglas en inglés) modulan la amplificación de los amplificadores de radiofrecuencia y frecuencia intermedia para mantener un volumen de salida relativamente estable tanto en señales débiles como intensas. La configuración del AGC del receptor permite que el circuito responda de manera ágil o pausada (o permanezca inactivo) ante variaciones volumétricas, según la preferencia del operador. Una respuesta dinámica del AGC se emplea típicamente para señales CW y de datos, mientras que una respuesta más gradual resulta más adecuada para comunicaciones telefónicas.

El circuito AGC regula la ganancia receptora mediante la modulación de una tensión que controla la amplificación del amplificador de frecuencia intermedia. Esta tensión también es interpretada por el medidor S del receptor, utilizado para cuantificar la intensidad de la señal recibida. Cuanto mayor sea la reducción de ganancia requerida por el circuito AGC para mantener un volumen constante, más elevada será la lectura en el medidor S, dado que señales más potentes demandan menor amplificación para generar idéntico volumen de salida. Se observará que al disminuir la ganancia de RF también se incrementa la lectura del medidor S, puesto que el control de ganancia de RF emplea idéntica tensión de control que el circuito AGC.

Los medidores S se encuentran calibrados en unidades S, donde una variación de una unidad S generalmente equivale a una modificación de 6 dB (cuatro veces) en la intensidad señal, aunque esta proporción puede variar según el fabricante. Un circuito AGC puede manifestar comportamientos diferenciados en función de la intensidad de la señal. No obstante, el medidor S constituye un indicador útil de la potencia de señal, considerándose S-9 como una señal robusta. Se aprecia que S-9 se ubica en el punto medio de visualización del medidor S. A la derecha se presentan marcaciones adicionales de 20, 40 y 60, correspondientes a "dB por encima de S-9", de modo que una lectura "S-9 + 20 dB" representa una señal 20 dB (100 veces) más intensa que una señal S-9.

El AGC puede responder con rapidez o lentitud ante modificaciones en la intensidad de señal. Una respuesta ágil se implementa para señales CW y datos. Una respuesta pausada resulta apropiada para señales AM y SSB. Los receptores FM no implementan AGC.

El umbral de silenciamiento, regulado por el control de silenciamiento, representa el nivel de señal en el cual se desactiva la función de silenciar y la señal deviene audible. Si la salida del receptor no está silenciada, el silenciamiento permanece abierto. Si la señal está silenciada, el silenciamiento se encuentra cerrado. Incrementar el umbral de silenciamiento se denomina ajustar el silenciamiento.

RECHAZO DE INTERFERENCIAS Y RUIDO

Los filtros IF, tanto en versión analógica como digital mediante procesamiento de señal digital (DSP), reducen el ancho de banda del receptor y descartan señales parásitas. Existe una amplia gama de filtros adaptables a diversos modos operativos y estilos de comunicación. No obstante, cuando una señal interferente penetra la banda pasante del receptor, su eliminación puede resultar compleja.

Se pueden implementar múltiples estrategias para neutralizar estas señales:

- Filtros de muesca (notch filters) suprimen señales en una franja espectral extremadamente reducida, como un tono único proveniente de una portadora perturbadora. El tono se elimina, preservando el habla, código o datos originales prácticamente sin alteraciones.
- Desplazamiento de banda pasante o IF (Passband o IF shift) reposiciona la banda pasante del receptor por encima o debajo de la frecuencia de portadora mostrada para evadir señales interferentes en rangos adyacentes. Este procedimiento genera una modificación en el tono de la señal recibida, aunque frecuentemente mejora la inteligibilidad.
- Controles de banda lateral inversa (Reverse sideband controls) facultan al operador para conmutar entre recepciones de señales CW por encima o por debajo de la frecuencia de portadora mostrada (USB y LSB). Esta técnica puede contribuir a eludir señales próximas que generen interferencia, reubicándolas en el "lado opuesto" de la frecuencia de portadora, donde los filtros las rechazan.

La mayoría de los receptores también incorporan supresores de ruido y funcionalidades de reducción de ruido. Los supresores de ruido operan detectando impulsos breves y agudos en señales IF y disminuyen rápidamente la ganancia de amplificadores IF y audio durante el pulso. Este proceso se denomina "supresión". Si el supresor de ruido es graduable, puede configurarse para suprimir el receptor en diversos niveles de ruido. Los supresores de ruido podrían confundir señales intensas en otras secciones de una banda con un pulso de ruido, provocando distorsión de señales deseadas. Esta distorsión puede minimizarse utilizando la mínima supresión necesaria o desactivando completamente el supresor de ruido.

La reducción de ruido se ejecuta en la salida de audio del receptor mediante DSP. Este sistema intenta eliminar el siseo y ruido del audio ajeno al habla, datos o CW deseados. Pueden existir múltiples ajustes de reducción de ruido optimizados para diferentes tipologías de señales. Incrementar el nivel de reducción de ruido podría provocar la eliminación parcial de la señal deseada, generando distorsión. Se recomienda emplear la menor cantidad de reducción de ruido requerida para minimizar la distorsión.

RENDIMIENTO DEL RECEPTOR

La comunicación radiofónica eficaz depende de una recepción de señales de alta calidad, prácticamente exenta de interferencias y distorsiones, capaz de descartar señales parásitas, y con suficiente capacidad de captación para percibir transmisiones de mínima intensidad. Por consiguiente, resulta crucial poder cuantificar y valorar la calidad del dispositivo receptor.

Al examinar críticas de productos sobre equipos de radio emergentes, se observará que se dedica una proporción significativa de análisis a evaluar las prestaciones del receptor. Su

funcionamiento se determinará mediante los parámetros que se van a explorar. Al profundizar en cada uno de ellos, será posible establecer comparativas entre receptores y adoptar decisiones fundamentadas sobre qué configuración radiofónica resulta más adecuada. Se iniciará el estudio con la capacidad receptora de captación y posteriormente se analizará su rendimiento con señales específicas.

SENSIBILIDAD Y RUIDO

Una de las especificaciones principales del receptor es la sensibilidad o señal mínima detectable (MDS, por sus siglas en inglés). La MDS de un receptor representa la intensidad de la señal de entrada más tenue que puede ser identificada.

Otro concepto fundamental es la relación señal/ruido o SNR, definida como la potencia de la señal dividida por la potencia de ruido, expresada en decibelios. Una SNR superior a 0 dB indica que la señal posee mayor intensidad que el ruido.

Otra modalidad de relación señal/ruido es la señal/ruido y distorsión (SINAD). Esta cifra incorpora la capacidad receptora para detectar o demodular con precisión la señal de entrada. Cualquier alteración de la señal se adiciona al ruido en el sentido que reduce la proporción entre la energía de la señal deseada y la energía no deseada.

La MDS también se denomina umbral de ruido del receptor, puesto que representa la intensidad de una señal que genera idéntica potencia de salida acústica que el ruido del receptor. Es posible medir la MDS del receptor cuantificando su potencia de salida acústica cuando la entrada de antena está conectada a una carga ficticia de impedancia apropiada. (El sistema AGC debe desactivarse para prevenir su influencia en la ganancia receptora). Posteriormente, se introduce una señal portadora sin modificar desde un generador de señales calibrado en la entrada de antena del receptor. Cuando la potencia de salida acústica sea el doble de la inicial sin señal de entrada (un incremento de 3 dB), entonces la señal de entrada resulta suficientemente intensa para producir una salida acústica equivalente al ruido interno del receptor.

Dado que las potencias de señal y ruido son equiparables, la relación señal/ruido es de 0 dB. La intensidad de esa señal corresponde a la MDS para ese receptor. Cuanto menor sea la MDS, más sensible será el receptor. (Resulta igualmente necesario especificar el ancho de banda del receptor según se discute seguidamente).

La MDS y otras especificaciones de rendimiento del receptor frecuentemente se expresan en dBm. Esta abreviatura denota “decibelios relativos a un miliwatt”. 0 dBm equivale a 1 mW, +10 dBm representa 10 mW, -20 dBm corresponde a 0.01 mW (o 10 μ W), y así progresivamente. Emplear dBm permite discutir un rango extraordinariamente amplio de niveles de potencia de señal.

La MDS también puede presentarse en μ V, como por ejemplo 0,5 μ V. Esto resulta convertible a potencia si se conoce la impedancia de entrada del receptor — típicamente 50 Ω . La potencia, $P = V^2 / 50$ en este caso. El equivalente en dBm = $10 \log (P / 0,001)$. Ilustrativamente, una MDS de 0,5 μ V se traduce a una MDS de -113 dBm. Esta constituye una MDS práctica en las bandas de HF donde existe ruido natural.

Resulta provechoso comprender que la potencia de ruido teórica en la entrada de un receptor ideal, con un ancho de filtro de entrada de 1 Hz, alcanza -174 dBm a temperatura ambiente. Este se considera el mejor (más reducido) piso de ruido teórico que cualquier receptor puede presentar. En otros términos, para este receptor ideal, la intensidad de cualquier señal recibida debería ser al menos de -174 dBm para ser detectable.

Dado que la potencia de ruido aumenta linealmente con el ancho de banda, la MDS teórica con un filtro de ancho de banda de 1 Hz se especifica como -174 dBm/Hz.

Naturalmente, -174 dBm representa un nivel de potencia increíblemente diminuto — apenas cuatro milmillonésimas de una milmillonésima de miliwatt. Con una antena conectada, el piso de ruido de un receptor de HF lo determina realmente el ruido atmosférico, significativamente

superior al piso de ruido teórico. El ruido atmosférico, por consiguiente, constituye el factor limitante para la sensibilidad de los receptores en las bandas de HF. Esta es la razón por la cual activar el atenuador de un receptor de HF —para reducir la sobrecarga, por ejemplo— produce escaso o ningún impacto en la relación señal/ruido. Tanto la señal como el ruido se atenúan proporcionalmente.

El ruido atmosférico guarda proporción directa con el ancho de banda, lo que implica que, al duplicarse el ancho de banda del receptor, también lo hace el ruido (un incremento de 3 dB). Si se expande el ancho de banda de un receptor de 50 a 1.000 Hz (aproximadamente un aumento de 4,5 ×), se elevará el piso de ruido en aproximadamente 13 dB.

Una forma sencilla de conceptualizar esto es equiparar cada duplicación a un incremento de 3 dB, así:

- $50 \times 2 = 100 = 3 \text{ dB}$
- $100 \times 2 = 200 = 6 \text{ dB}$
- $200 \times 2 = 400 = 9 \text{ dB}$
- $400 \times 2 = 800 = 12 \text{ dB}$

Un ancho de banda del receptor de 1 Hz resulta poco funcional, pero se utiliza como referencia para comparar filtros más extensos. Un receptor real podría presentar un ancho de banda de 500 Hz para operación en CW, o incluso más amplio para voz en SSB o FM. Conforme el filtro se expande, se receptorá más ruido proporcionalmente a la relación del filtro respecto a 1 Hz. Por ejemplo, un ancho de banda de 500 Hz incrementa la potencia de ruido recibida por un factor de 500 sobre el ancho de banda de 1 Hz, una relación de $27 \text{ dB} = 10 \log 500$. Ese incremento en el ancho del filtro también eleva el piso de ruido de este receptor teórico a $-174 \text{ dBm} + 27 \text{ dB} = -147 \text{ dBm}$.

Para cualquier ancho de banda que emplee el receptor, es posible calcular la MDS teórica calculando el logaritmo del ancho de banda y multiplicando ese valor por 10. Se suma el resultado a -174 dBm , que es el valor de MDS para un ancho de banda de 1 Hz.

FIGURA DE RUIDO (NOISE FIGURE)

La figura de ruido constituye un “parámetro de evaluación” para el receptor. Se expresa en decibelios, representando la correlación entre el ruido generado internamente por el dispositivo receptor y el nivel de señal mínima detectable (MDS) teórico.

La figura de ruido permite determinar la cantidad de ruido que aportan los circuitos internos del receptor. Cuando la figura de ruido de un receptor es más elevada, implica una mayor generación de ruido en el propio sistema. Consecuentemente, esto significa que el receptor presentará un nivel de ruido base más alto.

Se consideran más adecuadas las figuras de ruido más reducidas. El ruido interno del receptor incrementa el nivel de ruido base al aumentar la potencia requerida para que las señales reales sean perceptibles.

Es posible calcular el nivel de ruido real de un receptor adicionando la figura de ruido (expresada en dB) al valor teórico más bajo de MDS en dBm:

$$\text{Piso de Ruido Real} = \text{MDS Teórico} + \text{Figura de Ruido}$$

A modo de ilustración, consideremos un receptor con un ancho de banda de 500 Hz y una figura de ruido de 8 dB. Mediante la Ecuación podemos determinar su nivel de ruido real:

$$\text{Piso de Ruido Real} = -147 \text{ dBm} + 8 \text{ dB} = -139 \text{ dBm}$$

La figura de ruido del receptor mantiene una estrecha relación con la proporción señal-ruido (SNR, por sus siglas en inglés) de las señales de entrada y salida.

Disminuir la figura de ruido de un receptor reduce su nivel de ruido real y optimiza la sensibilidad para señales débiles. Al minimizar el ruido sin modificar el nivel de señal de entrada, se incrementa la relación SNR, lo que facilita la recepción y decodificación de la señal.

SELECTIVIDAD

El dispositivo receptor ideal posee la capacidad de captar cualquier señal de frecuencia y descartar todas las transmisiones excepto aquella que se pretende obtener. Esta constituye una conceptualización de selectividad: la habilidad de discriminar una señal específica. Esta definición genérica de selectividad presenta significados más particulares en diversos componentes del receptor.

Por ejemplo, la selectividad en la etapa de ingreso del dispositivo receptor puede relacionarse con la eliminación de señales intensas fuera de rango, como transmisiones de onda corta o emisores próximos de servicios de emergencia.

El concepto de selectividad varía según el contexto de aplicación.

Filtros de entrada con banda pasante que permiten la transmisión de toda una banda de radioaficionados (o una porción representativa) se implementan en la entrada de antena del receptor. Estos proporcionan selectividad de entrada y su objetivo primordial consiste en prevenir que señales potentes externas provenientes de estaciones radiodifusoras o transmisores cercanos saturen los circuitos sensibles de entrada.

Un preselector representa un filtro de entrada sintonizable ajustado para facilitar el tránsito de señales en la frecuencia deseada e incrementar el rechazo de transmisiones no intencionadas fuera de rango.

Ambos elementos optimizan el rendimiento del receptor al descartar señales susceptibles de generar respuestas de imagen en un receptor analógico o eliminar la sobrecarga en un receptor SDR.

El nivel de selectividad para un receptor analógico está determinado por la anchura de banda del conjunto de filtros del receptor, desde la entrada hasta la salida de audio. En los receptores superheterodinos, existen múltiples filtros en la trayectoria de la señal. Conforme la señal transita por el receptor, encuentra filtros progresivamente más restrictivos que eliminan sistemáticamente señales no deseadas.

En un SDR, el filtrado se ejecuta matemáticamente sobre señales digitalizadas, manteniendo idéntica la definición de parámetros del filtro. Numerosos SDR y paquetes de software para modos digitales poseen capacidad para receptar, demodular y decodificar múltiples señales simultáneamente, por lo que el concepto de filtrar todas las señales excepto la deseada no resulta aplicable. En este tipo de receptor, la selectividad también puede interpretarse como la capacidad de extraer información de una señal entre múltiples transmisiones presentes.

FILTROS DE FI EN RECEPTORES ANALÓGICOS

En etapas posteriores del trayecto de la señal, los receptores analógicos implementan habitualmente filtros de considerable amplitud en cada circuito amplificador de FI. Estos dispositivos pueden corresponder a filtros inductivo-capacitivos, filtros elaborados con cristales de cuarzo o filtros de resonador cerámico que presentan características análogas a los filtros cristalinos.

Su función primordial consiste en descartar productos de mezcla indeseados e impedir la introducción de señales espurias en la trayectoria señal del receptor. Tales filtros permiten la transmisión de múltiples señales ubicadas en la frecuencia objetivo o las próximas a esta.

La elevación de la frecuencia intermedia (FI) en un receptor superheterodino optimiza su selectividad. Conforme se incrementa la FI, la frecuencia donde ocurren respuestas de imagen se distancia más de la señal deseada, facilitando su filtrado. Este proceso de filtrado puede

ejecutarse tanto en los circuitos de entrada del receptor como en cada etapa de conversión. Ilustrativamente, si se emplea una FI reducida, como 455 kHz, para captar una señal en 14,300 MHz, el BFO podría configurarse en $14,3 \text{ MHz} + 0,455 \text{ MHz} = 14,755 \text{ MHz}$ (o alternativamente en $14,3 \text{ MHz} - 0,455 \text{ MHz} = 13,845 \text{ MHz}$).

El receptor captaría simultáneamente una señal de imagen en 15,210 MHz, dado que $15,210 \text{ MHz} - 14,755 \text{ MHz} = 0,455 \text{ MHz}$.

Si la FI se incrementa hasta 9 MHz, el BFO se establecería en $14,3 \text{ MHz} + 9 \text{ MHz} = 23,3 \text{ MHz}$, mientras que la frecuencia de imagen resultaría $23,3 \text{ MHz} + 9 \text{ MHz} = 32,3 \text{ MHz}$, ubicándose considerablemente más distante y resultando más sencilla de filtrar.

En el acceso de cada etapa de FI, donde se desarrolla el filtrado más riguroso, típicamente se implementa un filtro de techo (roofing filter). La mayoría de los receptores superheterodinos incorporan dos o más etapas de FI. Los filtros de techo constituyen dispositivos de alto rendimiento (generalmente cristalinos) con un ancho de banda superior al de la señal más amplia susceptible de recepción.

Su propósito fundamental radica en expandir el rango dinámico del receptor, rechazando la máxima cantidad posible de señales intensas en frecuencias adyacentes sin comprometer la señal objetivo. Tales señales podrían provocar saturación en los amplificadores o afectar el sistema AGC, generando distorsiones en las señales deseadas.

La Figura 227 ejemplifica la denominación "roofing filters" o filtro de techo: su amplia respuesta opera como un "techo" sobre los filtros más estrechos destinados a permitir el tránsito de una señal específica.

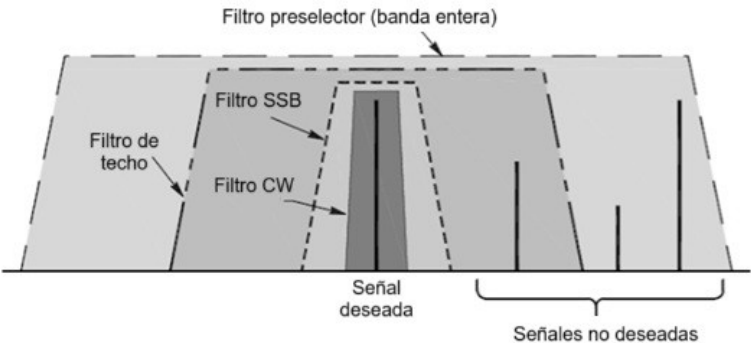


Figura 227. Roofing filter. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

En la fase conclusiva de FI de un receptor analógico, se implementan filtros de reducida amplitud para discriminar únicamente una señal entre las múltiples potencialmente presentes. Para tal propósito, se emplean filtros de cristal o de resonador mecánico. El espectro de estos filtros resulta configurable según la tipología de señal requerida.

Resulta fundamental que la anchura del filtro sea concordante con la señal objetivo. La Tabla 23 exhibe los anchos de banda característicos de filtros destinados a captar una señal única de radioaficionados de diversas modalidades. Cuando el filtro presenta una amplitud excesivamente amplia, se captarán señales parásitas no intencionadas. Si, por el contrario, el filtro resulta demasiado restrictivo, la señal deseada experimentará distorsión. A modo de ilustración, utilizar un filtro de 500 Hz para CW con el propósito de receptar una señal SSB la tornaría prácticamente incomprensible. De manera general, seleccionar un ancho de banda de filtro de FI ligeramente superior al ancho de banda de la señal modulada que se pretende recibir optimiza la relación señal-ruido y minimiza las interferencias.

Tabla 23. Anchos de banda típicos para filtros IF. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Señal	Ancho de Banda
RTTY	300 Hz

Señal	Ancho de Banda
CW	200 a 500 Hz
SSB	1,5 a 2,7 kHz
AM	6 kHz
VHF FM	15 kHz

RANGO DINÁMICO DEL RECEPTOR

El rango dinámico constituye un parámetro crítico del receptor que describe la capacidad del sistema para funcionar adecuadamente ante la presencia de señales intensas. La conceptualización general del rango dinámico del receptor se define como el intervalo en decibelios comprendido entre la sensibilidad mínima detectable (MDS, por sus siglas en inglés) y el nivel máximo de señal de entrada que no genera productos de distorsión perceptibles. Se implementan diversos métodos de evaluación del rango dinámico para caracterizar el rendimiento del receptor, fundamentados en niveles de señal de entrada expresados en dBm (decibelios relativos a 1 mw).

RANGO DINÁMICO EN RECEPTORES SDR

El desempeño de un receptor SDR en entornos con señales intensas, típicos en bandas de radioaficionados congestionadas, está condicionado fundamentalmente por su resolución de muestreo, es decir, la cantidad de bits procesados en cada muestra de la señal de entrada durante la conversión analógico-digital. Un mayor número de bits incrementa la capacidad del SDR para procesar señales de manera lineal, lo que implica que las señales potentes no provocan la saturación del receptor.

Una vez digitalizada la señal en un SDR, se eliminan los circuitos analógicos que podrían generar distorsiones. Aunque esto proporciona un filtrado superior y mejor rechazo de señales parásitas, la tensión máxima de entrada del convertidor analógico-digital, determinada por su tensión de referencia, no debe ser excedida para prevenir la sobrecarga del receptor.

La entrada del receptor comprende la totalidad de señales presentes en los terminales de antena, exceptuando aquellas eliminadas por filtros de entrada o preselectores. Cuando el sumatorio de estas señales supera la tensión máxima de entrada, se produce distorsión y comienza la degradación del rendimiento del receptor. El rango dinámico del SDR corresponde aproximadamente al intervalo entre su nivel de ruido interno o mínima tensión codificable.

RANGO DINÁMICO DE BLOQUEO

Una señal de entrada puede ser lo suficientemente intensa como para provocar que un receptor analógico pierda su respuesta lineal, iniciando una disminución de su ganancia. (Los receptores SDR exhiben un comportamiento diferente, según lo previamente descrito). Esta reducción de ganancia originada por señales intensas genera que las señales más débiles aparenten desvanecerse. Dicha reducción de ganancia se denomina compresión de ganancia o bloqueo. El bloqueo puede manifestarse como desensibilización o desensibilización parcial: la disminución de la intensidad aparente de una señal deseada causada por una señal interferente intensa próxima.

El nivel de obstrucción de un receptor corresponde a la intensidad de una señal de entrada que provoca una reducción de ganancia de 1 dB. El intervalo dinámico de bloqueo (BDR, por sus siglas en inglés), tal como se representa en la Figura 228, constituye la diferencia entre el nivel de MDS del receptor y el nivel de obstrucción. Cuando se sobrepasa el intervalo dinámico de bloqueo, el receptor comienza a experimentar una disminución en su capacidad para amplificar señales de baja intensidad. En el supuesto de que la señal interferente se encuentre suficientemente distante de la señal objetivo, podría resultar viable mitigar la desensibilización mediante la reducción del ancho de banda de radiofrecuencia del receptor para descartar las señales de alta potencia.



Figura 228. Rango dinámico de bloqueo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

INTERMODULACIÓN (IMD)

La siguiente exposición es aplicable exclusivamente a receptores analógicos. Los receptores SDR exhiben un comportamiento distinto ante señales intensas.

Un receptor con linealidad absoluta generaría una señal de salida cuya intensidad se modifica exactamente en proporción a la señal de entrada. Si la señal de entrada experimenta una variación de 1 dB, la señal de salida también se alterará en 1 dB. Este fenómeno se denomina respuesta de primer orden y se representa mediante una línea discontinua en la figura anterior. No obstante, ningún receptor posee linealidad perfecta. Conforme se incrementa la intensidad de la señal de entrada, la respuesta del receptor se torna no lineal y se generan productos de IMD, por sus siglas en inglés o “intermodulación”.

La frecuencia y amplitud de los productos de IMD dependen del orden de la respuesta de IMD. Los productos de IMD se originan en frecuencias que representan la suma y diferencia de las señales de entrada y sus armónicos:

$$f_{\text{IMD}} = n f_1 \pm m f_2$$

donde:

- f_1 y f_2 corresponden a las frecuencias de las señales de entrada
- n y m son números enteros positivos: 1, 2, 3, etc.

Se generan productos de IMD de orden par si la suma de n y m es par, y productos de orden impar si la suma resulta impar.

Los productos de IMD de segundo orden se producen cuando $n + m = 2$ (tanto n como m son iguales a 1). Los productos de IMD de tercer orden se generan cuando $n + m = 3$.

Las frecuencias de los productos de IMD de orden par provocados por señales próximas se ubican lejos de la frecuencia de cualquiera de las señales de entrada y, por consiguiente, generalmente no representan una complicación si son originados por señales dentro de una banda de radioaficionados.

Los productos de IMD de segundo orden constituyen los más intensos de la familia de orden par y pueden ser creados en una banda de radioaficionados por señales externas potentes, como las provenientes de estaciones de radiodifusión de onda corta. Los preselectores y los filtros de paso de banda de entrada pueden mitigar o eliminar productos de IMD de segundo orden causados por dichas señales.

Existen cuatro modalidades de frecuencias de productos de IMD de tercer orden. Dos presentan naturaleza aditiva (f_{IMD1} y f_{IMD3}) y dos sustractiva (f_{IMD2} y f_{IMD4}):

$$f_{\text{IMD1}} = 2f_1 + f_2$$

$$f_{\text{IMD2}} = 2f_1 - f_2$$

$$f_{\text{IMD3}} = 2f_2 + f_1$$

$$f_{\text{IMD4}} = 2f_2 - f_1$$

donde:

- f_{IMD} representa la frecuencia del producto de IMD
- f_1 y f_2 corresponden a las señales de entrada

Cuando las frecuencias de las señales generadoras de productos de IMD se encuentran prácticamente contiguas, como ocurre en idéntica banda de radioaficionados que la señal objetivo, los productos de IMD sustractivos ($f_{\text{IMD}2}$ y $f_{\text{IMD}4}$) podrían ubicarse extremadamente próximos a la frecuencia de la señal deseada. Esta condición resulta válida para todos los productos de IMD de orden impar, si bien los de tercer orden ostentan mayor intensidad.

Consecuentemente, el desempeño de IMD de tercer orden de un receptor constituye una especificación técnica fundamental.

A continuación, un ejemplo ilustrativo de la relevancia del rendimiento ante IMD de tercer orden:

Considérese un receptor sintonizado a 146,70 MHz.

Cada ocasión que una estación próxima transmite en 146,52 MHz, el operador recibe ráfagas intermitentes de voz distorsionada.

Probablemente se trate de un producto de intermodulación de tercer orden generado internamente en el receptor, cuya sensibilidad se torna no lineal ante señales de entrada significativamente intensas.

¿Cuáles serían las potenciales frecuencias de una segunda señal robusta susceptible de combinarse con la de 146,52 MHz para producir el producto de IMD percibido? Se infiere que los productos sustractivos constituyen la fuente probable de la señal interferente porque una de las señales se localiza cerca de la frecuencia objetivo. Si la frecuencia del producto de IMD es 146,70 MHz y se conoce una de las frecuencias intensas, $f_1 = 146,52$ MHz, puede determinarse f_2 mediante la Ecuación:

$$f_{\text{IMD}2} = 2f_1 - f_2$$
$$f_2 = 2f_1 - f_{\text{IMD}2} = 2 \times 146,52 \text{ MHz} - 146,70 \text{ MHz} = 146,34 \text{ MHz}$$

¡Se trata de una frecuencia de entrada de repetidora habitual!

Resolviendo para f_2 utilizando $f_{\text{IMD}4}$ y la frecuencia intensa como f_1 , se determinará que la otra frecuencia potencial es:

$$(146,70 + 146,52) / 2 = 146,61 \text{ MHz.}$$

No resultaría eficiente eliminar estas potentes señales de entrada debido a que son señales dentro del espectro, próximas a su frecuencia operativa.

Sería más conveniente emplear un receptor con un intervalo dinámico suficientemente amplio para acomodar estas señales de manera lineal sin generar productos de IMD. (Si las señales de entrada resultan excesivamente intensas, un atenuador en el acceso del receptor podría disminuir los niveles de señal hasta un punto donde no se produzcan productos de IMD).

Otro ejemplo en las bandas de HF permite ilustrar la problemática: Si el producto interferente de IMD acontece en 14,020 MHz cada ocasión que una estación potente transmite en 14,035 MHz, cabría esperar encontrar la otra señal intensa en:

$$f_2 = 2 \times 14,035 - 14,020 = 14,050 \text{ MHz}$$
$$\text{ó } f_2 = (14,035 + 14,020) / 2 = 14,0275 \text{ MHz}$$

Con numerosas señales intensas próximas entre sí en una banda de radioaficionados típica, los productos de IMD pueden constituir un auténtico desafío.

Minimizar la intermodulación representa otra motivación para implementar filtros de techo (roofing filters). Un filtro de techo de 6 kHz de ancho reduciría significativamente el nivel de cualquier señal en las tres frecuencias donde podría generarse el producto de IMD. Otras alternativas incluyen añadir atenuación según lo previamente mencionado o disminuir la ganancia de RF.

Al suprimir (o al menos reducir) señales intensas dentro de banda cercanas a la señal deseada, se optimiza el rango dinámico del receptor y se disminuye la IMD.

PUNTOS DE INTERCEPCIÓN

Los productos de IMD de segundo orden ocurren en la suma y diferencia de las frecuencias de las señales de entrada, y su amplitud varía 2 dB por cada modificación de 1 dB en la señal de entrada. Los productos de IMD de tercer orden modifican su amplitud 3 dB por cada cambio de 1 dB en la señal de entrada. (Esto asume que las señales de entrada poseen amplitudes equivalentes). La Figura 229 exhibe la potencia de salida de la señal deseada frente a la potencia de salida de los productos de distorsión de tercer orden a diferentes niveles de potencia de señal de entrada. (El gráfico de la intensidad del producto de segundo orden sería análogo, pero con una pendiente de 2 en lugar de 3).

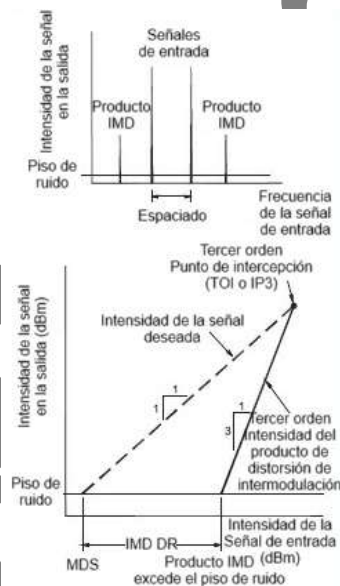


Figura 229. Potencia de salida de la señal deseada frente a los productos de distorsión de tercer orden. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La potencia de señal de entrada en la que el nivel de los productos de distorsión equipara el nivel de salida de la señal objetivo (punto de cruce de líneas) representa el punto de intercepción del receptor.

Existe un punto de intercepción individualizado para cada orden de producto IMD:

- Punto de intercepción de segundo orden (SOI o IP2),
- Punto de intercepción de tercer orden (TOI o IP3),
- Y consecutivamente.

Mediante la medición de las amplitudes de la señal y los productos IMD, es posible calcular o estimar gráficamente los puntos de intercepción.

Específicamente, el nivel de potencia de salida en el punto de intersección de las curvas constituye el punto de intercepción de salida.

De manera análoga, el nivel de potencia de entrada correspondiente al punto de intersección se denomina punto de intercepción de entrada.

Por ejemplo, un punto de intercepción de tercer orden de 40 dBm implica que un par de señales de 40 dBm teóricamente generarían un producto IMD de tercer orden con idéntico nivel de 40 dBm.

Un nivel de 40 dBm equivale a 10 W, por consiguiente, determinar el nivel del punto de intercepción representa únicamente un método para evaluar el rendimiento del receptor y no una especificación de la capacidad real de señal que puede admitir el receptor.

Aunque las señales atmosféricas no poseen suficiente intensidad para alcanzar los niveles de punto de intercepción, los valores de punto de intercepción resultan útiles para valorar la linealidad del receptor.

Cuanto más elevado sea el punto de intercepción, menor será la amplitud de los productos IMD generados por el receptor debido a no linealidades en los niveles reales de señal recibida.

El rendimiento del punto de intercepción de tercer orden de un receptor generalmente se deteriora cuando las frecuencias de las señales intensas (f_1 y f_2 en las ecuaciones precedentes) se aproximan entre sí. Por esta razón, habitualmente se especifica el rendimiento de IMD de un receptor para diversos espaciamientos entre las señales de entrada.

El rango dinámico de distorsión por intermodulación cuantifica la capacidad del receptor para evitar generar productos IMD.

Cuando los niveles de señal de entrada superan el rango dinámico de IMD, los productos de IMD comenzarán a manifestarse junto con la señal deseada.

También es factible calcular el rango dinámico de IMD de tercer orden utilizando el punto de intercepción de tercer orden y el piso de ruido del receptor o el valor de MDS:

$$\text{IMD DR}_3 = (2/3) \times (\text{IP3} - \text{MDS})$$

donde:

- IMD DR_3 representa el rango dinámico de distorsión por intermodulación de tercer orden en dB.
- IP3 constituye el punto de intercepción de entrada de tercer orden en dBm.
- MDS es el piso de ruido o MDS del receptor en dBm.

La Figura 230 ilustra la relación entre los niveles de señal de entrada, el piso de ruido, el rango dinámico de bloqueo y el rango dinámico de IMD.

Los receptores de alta calidad presentan rangos dinámicos de bloqueo superiores a 100 dB, por lo que el receptor utilizado en este ejemplo podría corresponder a cualquier receptor moderno típico. Si un receptor exhibe un rango dinámico deficiente, se generarán productos de intermodulación o se producirá intermodulación cruzada, provocando desensibilización (bloqueo) debido a señales adyacentes intensas.

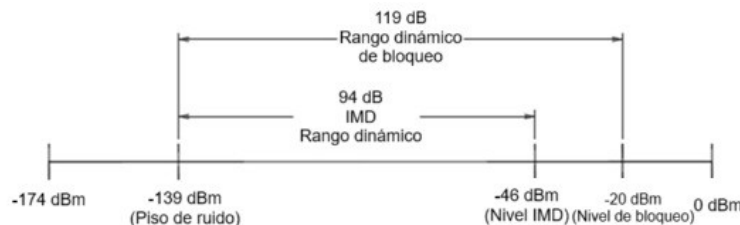


Figura 230. Relación entre los niveles de entrada, piso de ruido, rango dinámico de bloqueo.
(Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

RUIDO DE FASE

El ruido de fase constituye una problemática que se ha tornado más perceptible conforme los avances tecnológicos en receptores, donde se ha logrado disminuir el umbral de ruido y expandir el intervalo dinámico.

Los transceptores comerciales contemporáneos emplean fundamentalmente síntesis digital directa (DDS, por sus siglas en inglés) en sintetizadores de frecuencia para generar osciladores de frecuencia variable (VFO, por sus siglas en inglés) y otras fuentes señales dentro del dispositivo.

Los sintetizadores DDS exhiben ligeras oscilaciones en frecuencia fundamentadas en la señal de reloj y en artefactos generados al construir la forma de onda de salida mediante incrementos discretos diminutos. Esto provoca que la fase de la señal de salida experimente desplazamientos continuos y aleatorios en ambas direcciones, originando ruido de fase.

El ruido de fase genera un conjunto aleatorio de bandas laterales de baja intensidad que se tornan progresivamente más intensas cuanto más próximas se encuentran a la frecuencia de la señal primaria.

En una señal transmitida, el ruido de fase se percibe como un silbido intenso que frecuentemente puede detectarse a través de toda una banda en un receptor cercano, incluso en bandas alternativas. Esto puede representar una complicación significativa para otras estaciones en la banda si la señal transmitida posee considerable intensidad.

Durante la recepción, el ruido de fase del oscilador local del receptor se fusiona con las señales captadas de manera similar a la señal deseada, pero el resultado consiste en ruido aleatorio, no en el producto de mezcla esperado.

Consecuentemente, al sintonizar hacia una señal intensa, el umbral de ruido del receptor parece incrementarse. En otros términos, se experimenta un aumento en la interferencia en un receptor que previamente permanecía silencioso al aproximarse a una señal potente.

Este fenómeno se denomina mezcla recíproca.

Un exceso de ruido de fase en el oscilador local de un receptor permite que señales intensas en frecuencias adyacentes interfieran con la recepción de una señal débil objetivo. Este ruido adicional del receptor puede enmascarar una señal débil deseada, o al menos obstaculizar significativamente su recepción. La Figura 231 ilustra cómo el ruido de fase puede encubrir una señal débil.

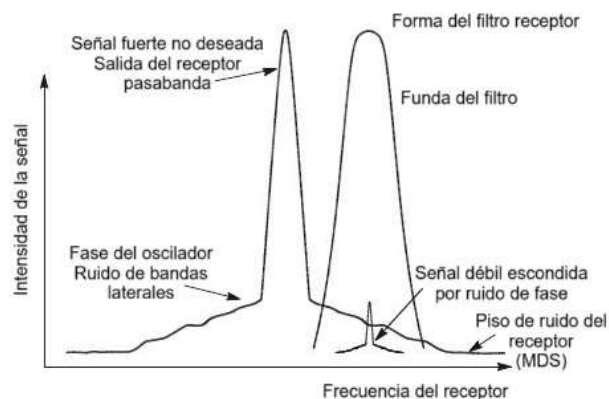


Figura 231. Ruido de fase. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un emisor con excesiva perturbación de fase en su señal de transmisión también genera interferencia que se propaga por encima y por debajo de la banda en un determinado intervalo

alrededor de la frecuencia de emisión prevista. Esta interferencia adicional podría ubicarse dentro del ancho de banda de un receptor sintonizado a una señal de baja intensidad. Por consiguiente, incluso si se dispone de un receptor con mínima perturbación de fase, podría verse impactado por este tipo de interferencia.

La perturbación de fase de un transmisor puede provocar interferencia severa a receptores próximos, incluso si operan en una banda diferente. En tal situación, se requiere un filtro de paso de banda en el transmisor para eliminar la interferencia a los receptores en otras bandas.

EFFECTO DE CAPTURA

Una de las diferencias más significativas entre un receptor de modulación de amplitud (AM) y un receptor de modulación de frecuencia (FM) es cómo el ruido y la interferencia afectan una señal entrante.

Las etapas de limitador y discriminador en un receptor FM pueden suprimir la mayoría del ruido atmosférico o de tipo impulsivo, a menos que la interferencia posea características de modulación en frecuencia.

Los receptores FM se comportan de manera sustancialmente diferente a los de AM, SSB y CW cuando existe interferencia (QRM), exhibiendo una característica denominada efecto de captura.

La señal de mayor intensidad recibida, incluso si supera apenas unos pocos dB a otras señales en idéntica frecuencia, será la única señal demodulada, suprimiendo todas las señales de menor intensidad.

Es habitual que, cuando dos estaciones transmiten una señal FM en la misma frecuencia, la estación receptora perciba únicamente la señal de mayor intensidad, quedando solo zumbidos o clics de la señal más débil. Esto puede constituir un problema en repetidores muy concurridos, particularmente durante redes (nets) con múltiples estaciones intentando registrarse o transmitir mensajes.

6.4 Amplificadores

6.4.1 Amplificadores de Potencia RF VHF/UHF

Los transceptores portátiles, o handhelds, gozan de una extraordinaria popularidad y brindan una diversidad de prestaciones útiles. No obstante, únicamente pueden transmitir unos cuantos watts. Si el operador experimenta dificultades para acceder a repetidores distantes o establecer comunicaciones simplex, se puede emplear un amplificador de potencia RF para incrementar la potencia de salida por un factor de cinco o superior. Para utilizar un amplificador con un transceptor portátil, será necesario un cable de conexión entre el conector de antena del transceptor y el conector de entrada del amplificador de potencia.

Los amplificadores también pueden implementarse con equipos de radio SSB y CW para competiciones y comunicaciones con estaciones remotas. Numerosos amplificadores de potencia VHF/UHF resultan utilizables en todos los modos, aunque requieren configuración específica para un funcionamiento apropiado. En la mayoría de los amplificadores, este proceso se controla mediante un interruptor CW/SSB en el panel frontal. El operador puede emplear el amplificador en posición CW para operar en FM. Se recomienda garantizar que la antena pueda soportar la potencia incrementada, como una antena látigo de montaje magnético o una antena vertical o direccional instalada en mástil.

Un circuito o etapa amplificadora se diseña para operar en diferentes clases. Cada clase resulta más adecuada para diversos usos radioeléctricos y presenta distinta eficiencia. La eficiencia de un amplificador se define como la potencia de salida RF dividida entre la potencia de entrada de corriente directa (CD). Los radioaficionados utilizan comúnmente cuatro clases de amplificadores:

- Clase A — La más lineal (menor distorsión de señal) de todas las clases y también la menos eficiente.
- Clase B — También denominada push-pull con un par de dispositivos amplificadores, cada uno activo durante mitades complementarias del ciclo de la señal.
- Clase AB — Intermedia entre las clases A y B, la linealidad no resulta óptima como en Clase A, pero la eficiencia mejora.
- Clase C — Esta clase de amplificador presenta la mayor eficiencia, pero solo resulta apropiada para CW y FM debido a su reducida linealidad.

Algunos amplificadores lineales pueden operar tanto en Clase AB para comunicación SSB como en Clase C para CW.

Adicionalmente a la entrada de RF proveniente del transceptor, este debe proporcionar un circuito de activación que indique al amplificador cuándo activarse. Cuando el circuito de activación permanece inactivo, las señales de la antena eluden el circuito del amplificador a través de un relé de conmutación transmisión-recepción (TR relay) para permitir su recepción. Los transceptores frecuentemente incorporan un retardo temporal en el circuito de activación para garantizar que el relé de conmutación complete su proceso antes de que el transceptor inicie la transmisión de cualquier señal de RF. Este procedimiento previene el hot-switching, situación en la cual el amplificador ya suministra RF en el momento que el relé está conmutando, lo que podría destruir el relé u otros dispositivos externos.

SINTONIZACIÓN Y EXCITACIÓN DE UN AMPLIFICADOR DE TUBO DE VACÍO

Los amplificadores de tubos de vacío presentan tres configuraciones fundamentales para el operador: BANDA, SINTONIZADOR y CARGA (o COUPLING). Los controles SINTONIZADOR y CARGA permiten ajustar componentes en el circuito de adaptación de salida, frecuentemente una red pi como se describió previamente. (Los amplificadores que carecen de necesidad de sintonización o poseen sintonización automática no requieren manipulación de los controles SINTONIZADOR y CARGA debido a su diseño del circuito o porque un microprocesador efectúa los ajustes de manera autónoma). El conmutador BANDA, presente tanto en amplificadores de tubo como en la mayoría de los dispositivos de estado sólido, configura los circuitos de adaptación de impedancia de entrada y salida o filtros para la banda de frecuencias donde se aplicarán señales al amplificador.

Con el conmutador BANDA correctamente posicionado, se suministra una cantidad reducida de potencia de excitación al amplificador mientras se monitorea el medidor de corriente de placa y se manipula el control SINTONIZADOR para obtener una lectura mínima (o "dip"). Este procedimiento indica que el circuito de adaptación de salida está resonando en la frecuencia operativa. El control CARGA se ajusta para maximizar (o "picar") la potencia de salida y posteriormente se reajusta TUNE para conseguir la disminución en la corriente de placa de modo que se obtenga la máxima potencia de salida sin sobrepasar la corriente de placa máxima. La potencia de entrada al amplificador también puede modularse durante este proceso.

La potencia de excitación resulta crucial, especialmente para circuitos de amplificador con rejilla excitada (grid-driven) donde la potencia de entrada se aplica a la rejilla de control del tubo. Es sencillo destruir un tubo costoso al aplicar excesiva excitación, situación detectable mediante una corriente de rejilla desmesurada en los circuitos de medición del amplificador. La mayoría de los amplificadores contemporáneos incorporan circuitos de protección para prevenir una excitación excesiva de la rejilla. Una potencia de excitación desproporcionada o una sintonización incorrecta también pueden provocar una corriente de placa excesiva. Esto sobrecalienta el tubo y puede ocasionar su falla. Es fundamental operar el amplificador conforme a las especificaciones y procedimientos del fabricante para maximizar la vida útil de los tubos de transmisión. Precauciones análogas se aplican a los amplificadores de estado sólido con transistores de potencia susceptibles de dañarse o destruirse mediante una potencia de excitación excesiva.

Muchos amplificadores generan adicionalmente una señal de control de nivel automático (ALC) que puede conectarse al transmisor para limitar la excitación excesiva que producen señales de salida distorsionadas e interferencias espurias.

NEUTRALIZACIÓN

La autooscilación provocada por retroalimentación positiva en un tubo amplificador o circuito genera señales espurias de salida e incluso puede dañar el tubo o los componentes del amplificador. La técnica para prevenir la autooscilación se denomina neutralización. Esta se ejecuta creando retroalimentación negativa, consistente en conectar una porción de la señal de salida de vuelta a la entrada, pero desfasada con respecto a la señal de entrada para cancelar la retroalimentación positiva no deseada. Para un amplificador de HF, esto se logra conectando un pequeño capacitor variable entre los circuitos de salida y entrada del amplificador.

El manual de operación del amplificador detallará el procedimiento apropiado para realizar los ajustes. Una vez neutralizado un amplificador, no se requieren ajustes adicionales a menos que se reemplacen los tubos del amplificador o se efectúen modificaciones en el circuito.

6.4.2 Transversores

Mediante el empleo de dispositivos mezcladores, resulta factible transformar completamente un transceptor para que funcione en una banda de frecuencia alternativa. Los mezcladores constituyen componentes fundamentales del equipamiento denominado transverso. Las señales generadas por el transmisor de baja potencia se reposicionan hacia una nueva frecuencia de emisión donde posteriormente se potencian para su transmisión. Un mezclador conversor receptor desplaza las señales receptivas hacia la banda de interés, donde son procesadas como señales convencionales por el transceptor. Los transversores posibilitan que un transceptor principal se adapte y opere en una o múltiples bandas emergentes. A modo de ilustración, cuando existen limitados transceptores disponibles para operación CW y SSB en 222 MHz, se implementa un transverso para redireccionar señales de 222 MHz hacia y desde la banda de 28 MHz en un equipo de radio HF.

6.5 Conectores

Los conectores representan una modalidad práctica de establecer conexiones eléctricas mediante contactos eléctricos de acoplamiento. Existen diversos estilos de conectores, pero se aplican términos comunes a todos. Los pines son contactos que sobresalen del cuerpo del conector, y los conectores en los que los pines establecen el contacto eléctrico se denominan conectores "macho". Los conectores con contactos huecos y empotrados se denominan "hembra". Los conectores diseñados para acoplarse entre sí se denominan conectores de acoplamiento. Los conectores de llave poseen cuerpos o insertos con formas especiales que requieren una forma complementaria en el conector de acoplamiento para evitar daños por conexiones incorrectas.

Los enchufes son conectores que se instalan en los extremos de los cables, mientras que los conectores o receptáculos se instalan en los equipos. Los adaptadores establecen conexiones entre dos tipos de conectores diferentes, como entre dos familias distintas de conectores RF. Otros adaptadores unen conectores de la misma familia, como los de doble macho, doble hembra y los conversores de género. Los divisores dividen la señal entre dos conectores.

CONECTORES DE POTENCIA

Los sistemas de equipamiento de radioaficionado incorporan diversos tipos de conectores para suministro energético. Generalmente, los dispositivos de radioaficionado de potencia reducida emplean conectores coaxiales. Estos corresponden a idénticas tipologías presentes en dispositivos electrónicos de consumo general, los cuales reciben alimentación mediante transformadores murales o fuentes de energía del tipo "adaptador de pared". Por otra parte, los transceptores y equipamientos que demandan un flujo de corriente superior a unos cuantos amperios suelen implementar conectores Molex, caracterizados por poseer un cuerpo fabricado en nailon blanco, con terminales y conectores prensados en los extremos de los conductores.

Otro estándar, entre varios grupos de comunicaciones de emergencia, es la utilización de conectores Anderson Powerpole. Estos dispositivos de conexión carecen de diferenciación

sexual, lo que implica que es posible acoplar dos conectores cualesquiera pertenecientes a la misma serie; no existen conectores con designación masculina o femenina. Al establecer un único tipo de conector, los equipos pueden compartirse e intercambiarse con facilidad en entornos operativos.

Los conectores Molex y Powerpole emplean terminales de engarce que se implementan en el extremo de los cables. Se requiere una herramienta de crimpado especializada para vincular el cable al terminal, el cual posteriormente se introduce en el cuerpo del conector. Para garantizar una conexión robusta, es fundamental contar con un instrumento apropiado; se desaconseja enfáticamente el uso de alicates o cualquier otra herramienta alternativa para ejecutar una conexión de crimpado.

Ciertos dispositivos implementan bloques de conexión terminal para el enlace directo con conductores o terminales prensados, típicamente empleando elementos de fijación roscados. Alternativamente, otros equipos recurren a conectores de tensión por resorte o bornes para establecer la vinculación con los extremos desprotegidos de los cables.

CONECTORES DE AUDIO Y CONTROL

Los equipos de audio de consumo y los equipos de radioaficionados comparten muchos de los mismos conectores para los mismos usos. Los conectores telefónicos se utilizan para circuitos de audio mono y estéreo. Estos conectores vienen en versiones de 1/4 de pulgada, 1/8 de pulgada (miniatura) y subminiatura. El contacto en el extremo del conector se denomina punta y el conector en la base se denomina manguito. Si hay un tercer contacto entre la punta y el manguito, como en un conector de audio estéreo, se denomina anillo. Estos se suelen denominar "TRS" (punta-anillo-manguito). También existen las versiones TS y TRRS.

Los conectores phono (en ocasiones denominados "conectores RCA", debido a su origen inicial en equipos de la marca RCA) se emplean para transmisión de audio, video y otras señales de radiofrecuencia de bajo nivel. Igualmente, se utilizan extensivamente para señales de control.

El conector de micrófono más frecuente en equipos móviles y estaciones base corresponde a un dispositivo circular de 8 pines, también identificado como "conector Foster". En transceptores de generaciones anteriores, podrían encontrarse conectores circulares de 4 pines destinados a micrófonos. Los conectores modulares RJ-45 de ocho pines se implementan habitualmente en radios móviles y de dimensiones reducidas.

CONECTORES RF

Las líneas de alimentación empleadas para señales radioeléctricas demandan conectores especializados para frecuencias de radiofrecuencia. Estos dispositivos deben presentar una impedancia característica prácticamente idéntica a la línea de alimentación a la cual se vinculan; de lo contrario, una porción de la señal de RF experimentará un fenómeno de reflexión. Los conectores económicos para audio y control no satisfacen este requerimiento ni toleran los elevados niveles de potencia típicamente presentes en equipamiento de radiofrecuencia. Ocasionalmente, se implementan conectores tipo phono en equipos de recepción de HF y transmisión de baja potencia.

Sin dudar, el conector más común para RF en equipamiento de radioaficionados es el UHF (La denominación UHF no hace referencia a la frecuencia en este contexto). El PL-259 constituye el conector que se acopla al término de las líneas de alimentación, mientras que el SO-239 es el conector hembra instalado en el equipo. Un barril (PL-258) funciona como un adaptador doble hembra que permite la conexión de dos líneas de alimentación. Los conectores UHF se utilizan normalmente hasta 150 MHz y admiten la potencia de transmisión legal en HF.

Los conectores UHF exhiben múltiples inconvenientes, tales como la carencia de hermeticidad, un desempeño irregular por encima de 150 MHz y una capacidad de potencia restringida en frecuencias superiores. La línea de conectores RF Tipo N resuelve completamente estos requerimientos. Los conectores Tipo N resultan ligeramente más costosos que los conectores UHF, sin embargo, demandan menor soldadura y proporcionan un rendimiento superior en

ambientes externos gracias a su impermeabilidad. Los conectores Tipo N pueden implementarse hasta 10 GHz.

Para aplicaciones de baja potencia, generalmente se emplean conectores BNC. Los conectores BNC representan el estándar para equipamiento de laboratorio y se utilizan frecuentemente para conexiones de CD y audio. Los conectores BNC son habituales en radios portátiles para vinculaciones de antena.

Los conectores SMA constituyen pequeños conectores roscados diseñados para cables coaxiales miniaturizados y están clasificados para utilizarse hasta 18 GHz. Los transceptores portátiles comúnmente utilizan conectores SMA para establecer conexiones de antena.

CONECTORES DE DATOS

En las estaciones de radioaficionados, el intercambio de datos digitales entre computadoras y equipos de radio se ha incrementado significativamente. Los estilos de conector resultan similares a los de los equipos informáticos.

Los conectores tipo D se implementan para interfaces RS-232 (puerto COM). El número de modelo de un conector tipo D típico especifica la cantidad de circuitos individuales y una "P" o "S" según si el conector emplea pines o conectores hembra. Por ejemplo, los conectores tipo D de 9 pines, frecuentemente denominados "DB-9" o "DE-9", se utilizan para puertos COM en PC.

Los conectores USB experimentan una creciente popularidad en equipos de radioaficionados conforme la industria informática avanza para eliminar la interfaz RS-232, más voluminosa y lenta. Diversos fabricantes desarrollan dispositivos para convertir puertos USB a interfaces RS-232.

6.6 Comunicaciones Digitales

Antes de abordar esta sección, resulta fundamental señalar el dispositivo tecnológico que se aplica prácticamente a la totalidad de los aspectos de la radioafición: la computadora. Virtualmente cualquier función o capacidad inherente a la experiencia radioaficionada posee el potencial de involucrar un sistema computacional: actividades de registro como la documentación de contactos, operación en modalidades digitales e incluso la transmisión y recepción de CW. Sin la computadora como elemento nuclear de la estación, las comunicaciones digitales continuarían siendo un ámbito especializado y no generalizado.

La comunicación vocal y el CW resultan bastante eficaces, pero carecen de la capacidad de los sistemas digitales para corregir automáticamente errores provocados por ruido e interferencia. Códigos y caracteres especiales integrados en la secuencia de datos permiten al módem receptor identificar, y en ocasiones corregir, alteraciones. El resultado consiste en que ciertos modos digitales ofrecen comunicaciones sin errores a velocidades que se ajustan automáticamente a la propagación y al ruido. El diseño de protocolos representa un área donde la experimentación aficionada está indudablemente impulsando el estado del arte radiofónico.

Los radioaficionados han desarrollado o adaptado técnicas para intercambiar datos digitales transformando los unos y ceros de la información en tonos ubicados en el mismo rango de frecuencia que la voz humana. Los equipos radiofónicos diseñados para transmisión vocal pueden entonces transmitir y receptar los tonos como señales de AM o FM. Los modos digitales o de datos combinan modulación (la incorporación de información a una señal radiofónica) con un protocolo, las normas mediante las cuales los datos son empaquetados e intercambiados.

El protocolo también regula cómo el transmisor y el receptor coordinan el intercambio de información. El método utilizado para representar cada carácter como unos y ceros digitales se denomina código, y efectivamente, el Morse constituye un código digital.

6.6.1 Modos digitales de radioaficionados

Diversas combinaciones de protocolos, códigos y modulación, como SSB o FM, se emplean para crear modos digitales. Cada modo presenta sus propias ventajas y desventajas en términos de velocidad, tasa de error y modalidad de uso. También existen recomendaciones de buenas prácticas relacionadas a los límites de velocidad de transmisión de datos digitales en las distintas bandas. Esto implica que los diferentes modos resultan más populares en bandas específicas.

WI-FI Y BROADBAND HAMNET

Los radioaficionados han realizado modificaciones en el firmware de determinados enrutadores Wi-Fi comerciales para lograr una conexión automática entre dispositivos, constituyendo redes de transmisión de datos. Este sistema denominado Broadband Hamnet o Multimedia de Alta Velocidad (HSMV) ha evidenciado una notable utilidad en comunicaciones de servicio público y situaciones de emergencia.

LOS MODOS WSJT-X

Numerosos modos digitales contemporáneos integran el paquete WSJT, un conjunto de software de código abierto accesible en wsjt.sourceforge.io. La aplicación fue concebida originalmente por Joe Taylor, K1JT, aprovechando técnicas desarrolladas durante su trayectoria como astrofísico galardonado con el Premio Nobel.

Un equipo de especialistas continúa manteniendo y expandiendo el software, incorporando modalidades diseñadas para comunicaciones especializadas como JT65 para rebote lunar (Tierra-Luna-Tierra, EME), balizas de propagación de señales débiles (WSPR, por sus siglas en inglés), y dispersión meteórica (MSK144). La innovación más reciente, FT8, presenta la capacidad de operar en condiciones de baja relación señal-ruido mediante la transmisión de secuencias codificadas en intervalos de 15 segundos. Las capacidades avanzadas de estos modos permiten a los radioaficionados y afines establecer comunicaciones previamente inimaginables.

En HF, donde predominan la modulación SSB y la propagación ionosférica o "salto", los modos digitales populares comprenden:

- Radioteletipo (RTTY) utilizando el código Baudot de 5 bits
- Modos de teclado a teclado como PSK31
- Modos de señal débil como FT8 y WSPR
- Modos PACTOR o WINMOR para mensajería del sistema Winlink

En VHF/UHF, los modos digitales populares incluyen:

- Radio por paquetes basado en el protocolo AX.25
- Protocolo B2F para mensajería del sistema Winlink
- JT65 para rebote lunar y MSK144 para trayectorias de dispersión
- IEEE 802.11 (Wi-Fi) adaptado para uso aficionado en bandas de microondas

Los radioaficionados también implementan protocolos digitales para comunicación vocal, denominados modos de voz digital. En HF, los modos AOR y FreeDV resultan más frecuentes. En VHF/UHF existen diversas alternativas: D-STAR, System Fusion (C4FM), DMR (Radio Móvil Digital), y P25 son los más utilizados a principios de 2018.

RADIO POR PAQUETES Y REDES DE PAQUETES

En las bandas de frecuencias muy altas (VHF) y frecuencias ultra altas (UHF), la modalidad digital predominante es la transmisión por paquetes. Las señales de paquetes se localizan frecuentemente en canales simplex que oscilan entre 145,01 MHz y 145,09 MHz.

Los elementos de datos se transmiten en agrupaciones denominadas paquetes. Se emplea la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) para transferir los caracteres individuales mediante una secuencia de tonos acústicos que mutan rápidamente. Un módem receptor y un controlador de nodo terminal (TNC, por sus siglas en inglés) posteriormente recomponen la información a partir de los paquetes interceptados. En VHF y UHF, el paquete se transmite a

1200 o 9600 baudios, de manera que el rendimiento total de un sistema de paquetes alcanza aproximadamente 400 o 3000 bits por segundo.

Cada paquete comprende un encabezamiento y datos. El encabezamiento contiene información sobre el paquete y el indicativo de llamada de la estación destinataria. El encabezamiento también integra una suma de verificación que posibilita al receptor identificar posibles errores. Si se detecta alguna anomalía, el receptor solicita automáticamente la retransmisión del paquete hasta lograr una recepción correcta. Este proceso se denomina ARQ por solicitud de repetición automática. Las normativas del protocolo de radio por paquetes, AX.25, garantizan que los datos aceptados por el receptor estén exentos de errores.

DE TECLADO A TECLADO

Las modalidades digitales concebidas para la comunicación instantánea entre personas se denominan modos de teclado a teclado. Resultan más frecuentes en las bandas de Alta Frecuencia (HF). La mayoría se generan mediante aplicaciones informáticas utilizando una tarjeta de sonido y una interfaz con las entradas y salidas acústicas de un transceptor. Radioteletipo (RTTY) constituye el modo de teclado a teclado más antiguo, desarrollado durante los años 30. Utiliza el código Baudot (se pronuncia baw-DOH), origen del término baudio.

El modo de teclado a teclado más popular en la actualidad es PSK31, que significa modulación por desplazamiento de fase, 31 baudios. PSK31 emplea una sincronización precisa de señales para recuperar la señal del ruido y la interferencia. Aunque transmite datos a baja velocidad, funciona eficientemente en condiciones ruidosas.

APRS

El Protocolo Automático de Reseña por Segmentos (APRS, por sus siglas en inglés) emplea radiocomunicación por paquetes para transferir datos de localización desde una estación móvil o transportable. Un nodo APRS constituye esencialmente una estación de radioenlace por segmentos fusionada con un receptor del Sistema de Navegación Satelital (GPS). El dispositivo receptor GPS genera una secuencia de coordenadas geográficas que posteriormente se transmite en formato de segmento.

Adicionalmente a la información georreferencial, es posible transmitir datos meteorológicos y comunicaciones textuales breves.

Repetidores digitales e interfaces de conexión retransmiten los segmentos APRS, información posicional e indicativo de llamada a una infraestructura de servidores mediante conectividad internet. Una vez almacenada la información en los sistemas de registro, diversas plataformas web acceden a los datos y despliegan la ubicación de la estación en representaciones cartográficas mediante múltiples modalidades. Una aplicación frecuente del APRS en servicios públicos consiste en proporcionar representaciones geográficas de ubicaciones de estaciones mientras se facilitan comunicaciones tácticas en tiempo real.

6.6.2 Configuración para modos digitales

La Figura 232 muestra un ejemplo de cómo se configura una estación para utilizar modos digitales. Si se utiliza un TNC independiente, se conecta a uno de los puertos de datos digitales de la computadora a través de un puerto COM o una interfaz USB. El TNC se conecta entonces a la entrada de micrófono de la radio (para el audio de transmisión) y a la salida de altavoz o auriculares (para el audio de recepción). Si en su lugar se usa una tarjeta de sonido, su salida se conecta a la entrada de micrófono de la radio y la salida de altavoz o auriculares se conecta a la entrada de la tarjeta de sonido. Si utilizas una tarjeta de sonido, puede que necesites una interfaz de comunicaciones digitales para suministrar la señal de PTT (presionar para hablar) para accionar el transmisor.

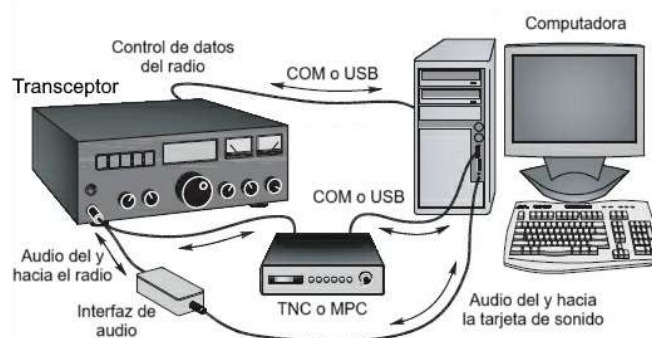


Figura 232. Configuración de una estación para utilizar modos digitales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

PASARELAS (GATEWAYS)

La infraestructura de enlace digital ilustrada en la Figura 233 representa un dispositivo especializado de comunicación que establece una conexión a Internet mediante tecnología de radioaficionados. Generalmente, estas infraestructuras de comunicación están programadas para retransmitir comunicaciones. Entre los ejemplos más representativos se encuentran las pasarelas APRS y las estaciones RMS de Winlink previamente mencionadas.

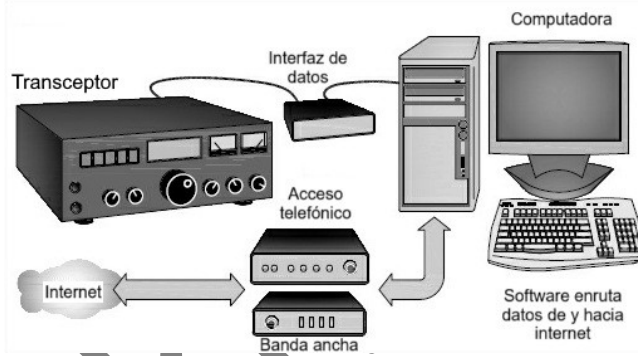


Figura 233. Estación digital con salida a Internet. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

6.7 Fuentes de Energía y Baterías

Una fuente energética estable resulta fundamental para garantizar una transmisión señal nítida y exenta de interferencias, así como para optimizar la recepción. Los radioaficionados emplean una amplia diversidad de recursos energéticos, que comprenden desde el suministro eléctrico convencional de uso doméstico hasta paneles solares y baterías destinadas a aplicaciones portátiles o móviles.

6.7.1 Fuentes de energía

Las fuentes de energía que funcionan mediante corriente alterna (CA) representan el recurso más habitual para los equipos de radio. Estos dispositivos transforman la energía de entrada proveniente de corriente alterna en corriente directa (CD) para los sistemas de comunicación radioeléctrica.

TAMAÑO DE LOS CABLES

Una fuente de energía presenta dos especificaciones fundamentales: su tensión de salida y la capacidad de corriente que puede proporcionar de manera ininterrumpida. A modo de ejemplo, una fuente de energía para un radio móvil convencional podría estar categorizada como una fuente de "12 V, 20 amperios". Los radios que operan con una fuente de "12 V" pueden, en

realidad, funcionar de manera óptima con una tensión ligeramente superior de 13.8 V, característico de los sistemas energéticos vehiculares cuando el motor está en funcionamiento.

La tensión de salida de una fuente experimenta variaciones según la cantidad de corriente generada. Una fuente regulada emplea un circuito estabilizador para minimizar las oscilaciones de tensión. El porcentaje de variación entre corriente cero (sin carga) y corriente máxima (carga total) determina la regulación de la fuente.

La clasificación de corriente de una fuente debe ser cuando menos equivalente a la sumatoria de los requerimientos máximos de corriente de todos los dispositivos conectados. Para determinar la clasificación máxima de corriente necesaria para un transceptor, se deben considerar aspectos como la eficiencia del transmisor a potencia total, la demanda de corriente de los circuitos receptores y de control, la regulación de la fuente energética y su capacidad de disipar calor bajo carga completa. Los manuales del equipo especificarán la cantidad máxima de corriente requerida. Una única fuente de energía puede ser compartida entre dos o más piezas de equipamiento si logra suministrar corriente suficiente.

CABLEADO DE ENERGÍA EN MÓVILES

Las instalaciones móviles presentan requisitos especiales para obtener energía de manera segura. Tome en cuenta que una batería vehicular almacena una cantidad significativa de energía. Los cortocircuitos accidentales no solo pueden provocar daños al equipo de radio, sino también generar incendios y ocasionar perjuicios costosos al automóvil. Las pautas generales incluyen:

- Debe existir un fusible tanto en el conductor positivo como en el negativo del radio, próximo a la conexión energética.
- Conectar el conductor negativo del radio al terminal negativo de la batería o al punto donde el conductor de conexión a tierra de la batería esté vinculado al chasis del vehículo. Se recomienda consultar con un concesionario el punto preciso para conectar el conductor negativo en vehículos que utilizan un sistema de monitoreo de batería.
- Utilizar ojales o fundas para proteger el cableado contra desgaste o rozamiento con metal expuesto, especialmente en zonas de atravesamiento por mamparos o cortafuegos.
- No presumir que toda superficie metálica está conectada al terminal negativo de la batería: las carrocerías vehiculares suelen ser una combinación de plástico y metal.

El cableado energético vehicular frecuentemente transporta una cantidad considerable de ruido que puede interferir en el funcionamiento del radio. El zumbido del alternador es producido por interferencias en el sistema energético de CD dentro del propio vehículo. Puede ser perceptible en el audio recibido, pero es más probable que otros lo experimenten como un zumbido agudo en la transmisión de audio que varía según la velocidad del motor.

6.7.2 Baterías

Las baterías están conformadas por uno o más elementos electroquímicos. Un elemento representa un componente unitario que contiene sustancias químicas destinadas a generar corriente mediante una transformación electroquímica. (El término genérico "batería" frecuentemente se emplea para denominar elementos individuales.) Los formatos y dimensiones más representativos de baterías desechables y recargables empleadas por radioaficionados se presentan en la Tabla 24. La columna denominada "Química" detalla los compuestos químicos integrados en la batería, mientras la columna "Voltaje Totalmente Cargado" refleja la producción de una batería nueva o recientemente energizada. La "Clasificación Energética" de la batería, expresada en amperios-hora (Ah) o miliamperios-hora (mAh), determina su capacidad para suministrar corriente manteniendo una tensión de salida constante.

Tabla 24. Tipos de baterías y características. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Estilo de Batería	Química	Tipo	Voltaje Totalmente Cargado	Capacidad de Energía (promedio)
AAA	Alcalina	Desechable	1.5 V	1100 mAh

Estilo de Batería	Química	Tipo	Voltaje Totalmente Cargado	Capacidad de Energía (promedio)
AA	Alcalina	Desechable	1.5 V	2600 – 3200 mAh
AA	Carbón-Zinc	Desechable	1.5 V	600 mAh
AA	Níquel-Cadmio (NiCd)	Recargable	1.2 V	700 mAh
AA	Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)	Recargable	1.2 V	1500 – 2200 mAh
C	Alcalina	Desechable	1.5 V	7500 mAh
D	Alcalina	Desechable	1.5 V	14000 mAh
D	Alcalina	Desechable	9 V	580 mAh
9V	Níquel-Cadmio (NiCd)	Recargable	9 V	110 mAh
9V	Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)	Recargable	9 V	150 mAh
Celdas tipo moneda	Litio	Desechable	3 – 3.3 V	25 – 1000 mAh
Paquetes	Ion de litio (Li-ion)	Recargable	3.3 – 3.6 V por celda	Varía
Almacenamiento	Plomo-ácido	Recargable	2 V por celda	Varía

Las baterías secundarias de mayor dimensión también son denominadas baterías de almacenamiento, como las baterías de plomo-ácido de ciclo profundo para uso marítimo o en vehículos recreativos, frecuentemente se emplean como fuente energética de emergencia en lugar de un sistema que opera desde corriente alterna. Estas unidades pueden acumular centenares de veces la capacidad energética de una batería convencional.

Estos acumuladores están disponibles con electrolito líquido para uso vehicular o con electrolito en formato gel (celdas de gel). Dichas baterías se clasifican como baterías de “12V”, pero en realidad requieren mantenerse a una tensión de 13,8V. Las baterías de plomo-ácido pueden generar energía útil hasta que su tensión de salida desciende aproximadamente a 10,5V, momento en el cual la tensión disminuye abruptamente y el acumulador precisa recargarse. Descargar estos dispositivos por debajo de su tensión mínima reducirá su esperanza de vida.

Las baterías de almacenamiento generalmente permanecen conectadas a un dispositivo de carga que puede mantenerlas totalmente energizadas mediante una corriente mínima, denominada carga de mantenimiento o flotación. Es fundamental garantizar que el cargador cambie automáticamente a esta corriente reducida, ya que de lo contrario podría sobrecargarse y deteriorar estas costosas unidades de almacenamiento.

Las baterías de almacenamiento contienen una significativa cantidad de energía y requieren un manejo cauteloso. Internamente poseen ácidos altamente corrosivos que representan un riesgo potencial si se producen derrames o filtraciones. Adicionalmente, estas baterías pueden liberar o ventilar gas hidrógeno inflamable, cuya acumulación podría provocar una explosión. Se recomienda almacenar y cargar estos dispositivos en espacios con ventilación adecuada. Un cortocircuito accidental provocado por herramientas defectuosas o cableado inadecuado puede desencadenar fácilmente un incendio y causar daños irreparables a la batería.

6.7.3 Energías alternativas

Lo que comúnmente se interpreta como “energía solar” corresponde, en esencia, a la transformación fotovoltaica de la radiación solar directamente en electricidad. Los módulos y elementos solares se componen de uniones PN de silicio expuestas a la irradiación solar. A diferencia de los transistores y diodos, caracterizados por su reducido tamaño, las células solares pueden alcanzar dimensiones de varios centímetros de diámetro, con la unión PN intercalada entre estratos de material tipo P y N.

Los fotones de la luz solar son captados por electrones con suficiente potencial energético para atravesar la unión PN y generar un flujo de corriente directa (CD). La tensión directa que se produce al cruzar el electrón la unión es aproximadamente de 0,5 V, cuantificable como la tensión de circuito abierto de la célula solar.

Los sistemas de generación eólica y solar requieren un componente adicional que incrementa su costo operativo: un sistema de almacenamiento de energía significativo. Cuando desaparece el sol o cesa el viento, no existe disponibilidad eléctrica. Si se ha acumulado el excedente energético durante los períodos de máxima generación, puede existir suficiente energía para cubrir las necesidades operativas hasta que reaparezcan las condiciones de viento o radiación solar.

Las baterías de almacenamiento constituyen el medio habitual de reserva energética, y la mayoría de los sistemas de energía alternativa se diseñan con baterías de respaldo. En los sistemas solares, la conexión de la batería se efectúa mediante un diodo conectado en serie para impedir que la batería se descargue a través del panel o paneles durante periodos de baja iluminación, momento en el cual se reduce la tensión de las celdas solares.

6.8 Fenómenos adversos sobre las señales

6.8.1 Armónicos y Espurias

Los armónicos y las parásitas constituyen manifestaciones de emisiones espurias. Los armónicos emergen prácticamente en todos los circuitos debido a pequeñas irregularidades no lineales en su funcionamiento. Los transmisores implementan filtros para suprimir armónicos de sus señales de salida. No obstante, es fundamental tener presente que un transmisor deficientemente calibrado, sobrecargado o un dispositivo externo defectuoso puede generar armónicos.

Las parásitas (ocasionalmente denominadas espurias) representan salidas indeseadas que carecen de relación armónica con la señal de salida prevista. Incluso pueden constituir réplicas de bajo nivel de la señal de salida deseada. Generalmente se originan por niveles de excitación excesivos o desajustes en la etapa de salida de un transmisor o amplificador.

La estrategia para mitigar o eliminar armónicos y parásitas suele consistir simplemente en reducir el nivel de potencia general de la señal transmitida y garantizar que las etapas de potencia estén correctamente ajustadas.

6.8.2 Sobremodulación

La modulación excesiva provoca la deformación acústica de la señal transmitida y genera emisiones parásitas o no intencionadas en frecuencias contiguas, produciendo interferencias. Estas emisiones no deseadas del transmisor poseen diversas denominaciones, siendo "splatter" el término más utilizado.

Una señal FM con sobremodulación presenta una desviación excesiva, denominándose técnicamente "overdeviating". La sobremodulación normalmente acontece por emitir con demasiada intensidad vocal mediante el micrófono, pudiendo generar perturbaciones en canales adyacentes. Frecuentemente produce ruido o distorsión en los máximos de la señal vocal, fenómeno conocido como "ruptura". Para mitigar la sobremodulación, se recomienda modular con menor intensidad o distanciar el micrófono de la cavidad bucal.

La sobremodulación en señales AM o SSB se origina al proyectar la voz con excesiva potencia o configurar niveles elevados de ganancia microfonía o compresión vocal, lo cual puede derivar en la alteración de la señal transmitida. Para eliminar la sobremodulación, se sugiere emitir con menor intensidad o reducir la ganancia microfonía o compresión vocal.

En la Figura 234 se representan ejemplos de señales correctamente moduladas y sobremoduladas. La ilustración muestra la envolvente de modulación de una señal AM, correspondiente a la morfología de onda generada al conectar los picos de la señal modulada. (La envolvente de modulación de una señal SSB presenta características similares).

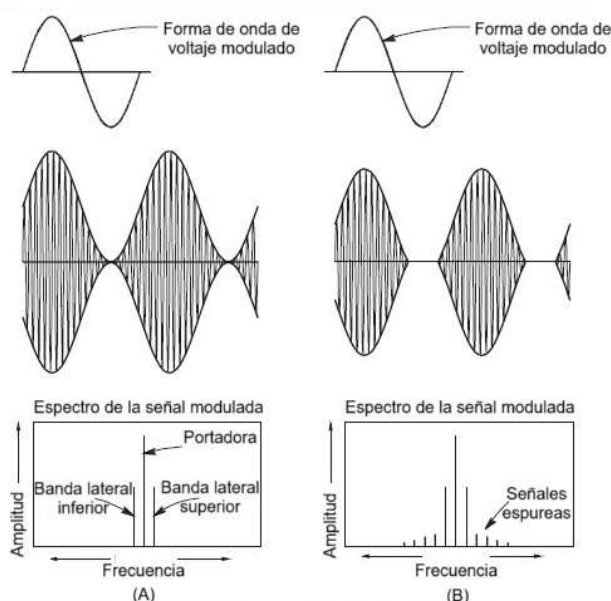


Figura 234. Señales moduladas y sobremoduladas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

En (B) ilustra un caso de cercenamiento, donde la emisión del transmisor se desconecta en lugar de seguir la señal moduladora. El aplanamiento superior acontece cuando la salida del transmisor alcanza un umbral máximo y no puede incrementarse más, aun cuando la señal moduladora continúe en ascenso. Si la señal de salida se apaga completamente entre crestas, el resultado es la interrupción de la onda portadora.

Ambas modalidades de sobremodulación provocan interferencia en canales adyacentes, generando señales parásitas más allá del ancho de banda convencional de la señal. Estas señales parásitas constituyen productos de distorsión.

Los dispositivos de control automático de nivel (ALC, por sus siglas en inglés) del transmisor también coadyuvan a prevenir la sobremodulación. El ALC disminuye la potencia de emisión durante los picos vocales. El manual de la radio proporcionará algunas directrices sobre cómo emplear el ALC para ajustar apropiadamente el audio de transmisión o la ganancia del micrófono. En términos generales, la ganancia del micrófono debe configurarse de modo que el ALC se active únicamente en los momentos de máxima intensidad vocal.

En AM o SSB, puede implementarse una prueba de doble tono para evaluar la linealidad del transmisor. Este procedimiento consiste en modular el transmisor con un par de tonos acústicos no relacionados armónicamente (700 y 1900 Hz son frecuencias representativas), mientras se observa la señal transmitida en un osciloscopio de monitoreo. Posteriormente, se calibra el transmisor y cualquier amplificador externo para lograr una salida libre de distorsión. Esta evaluación solo requiere ejecutarse ocasionalmente para documentar los ajustes apropiados de ganancia y nivel.

CONTROL DE LA FRECUENCIA DE BANDA LATERAL

Durante la operación en SSB, resulta fundamental comprender la ubicación precisa de la señal transmitida en el espectro de frecuencias. Prácticamente todos los equipos de comunicación radioeléctrica presentan la frecuencia portadora de una señal SSB. Este dato implica que la señal real se posiciona completamente por encima (USB) o por debajo (LSB) de la frecuencia desplegada.

Si las bandas laterales abarcan 3 kHz del espectro radioeléctrico, será necesario mantener una distancia prudencial respecto al límite de los privilegios de frecuencia para prevenir transmisiones fuera de los márgenes permitidos. A modo de ilustración, los operadores con licencia Intermedio pueden utilizar hasta 14,350 MHz, por lo que la frecuencia portadora mostrada de una señal USB

debe ubicarse al menos 3 kHz por debajo del borde de la banda — 14,347 MHz — garantizando que la señal ocupe el rango comprendido entre 14,347 MHz y 14,350 MHz. Si la frecuencia portadora supera este punto, las bandas laterales comenzarán a extenderse hacia frecuencias no autorizadas por encima de 14,350 MHz.

De manera análoga, al emplear LSB en la banda de 40 metros, los operadores con licencia General deben operar con la frecuencia portadora al menos 3 kHz por encima del borde de su segmento de banda — 7,178 MHz — ocupando consecuentemente el intervalo de 7,175 MHz a 7,178 MHz.

PROCESAMIENTO DE VOZ

En comparación con modalidades como CW, la potencia media de una señal AM o SSB resulta considerablemente reducida. El discurso humano dispersa su energía a través de un extenso espectro de frecuencias, con intervalos breves de niveles sonoros elevados. Cuando se transmite en HF mediante una señal modulada en amplitud en presencia de ruido, interferencia o desvanecimiento, la señal captada puede tornarse compleja de comprender. El procesamiento vocal aborda esta problemática incrementando la potencia promedio de la señal sin generar distorsiones significativas. El resultado consiste en una mejora sustancial de la inteligibilidad de la señal recibida bajo condiciones adversas. El procesamiento vocal demanda un ajuste meticuloso de la modulación transmisora para prevenir la propagación de señales en canales contiguos. Los procesadores vocales potencialmente pueden amplificar el ruido ambiental de baja intensidad, disminuyendo la comprensibilidad. El empleo apropiado del procesamiento vocal equilibra el incremento de potencia promedio con cualquier reducción potencial de inteligibilidad.

6.8.3 Sobre desviación

Las señales FM y PM también pueden experimentar sobremodulación, pero en lugar de distorsionar la envolvente señal, el resultado es una desviación excesiva. Esto incrementa la intensidad de las bandas laterales adicionales de la señal FM que normalmente son demasiado pequeñas para provocar interferencia. La consecuencia de una sobredeviación radica en la distorsión de la señal recibida e interferencia en canales adyacentes, similar a lo que ocurre con la sobremodulación de señales AM.

La mayoría de los equipos FM incorporan circuitos limitadores que previenen la sobredeviación provocada por una fonación demasiado intensa. La voz puede resultar distorsionada, pero no generará interferencia. No obstante, equipos multimodo con ganancia de micrófono ajustable podrían permitir la sobremodulación.

6.8.4 Clicks de Llave

Los clicks de llave son sonidos transitorios agudos que se escuchan en frecuencias adyacentes cuando un transmisor se enciende y apaga demasiado rápido durante transmisiones en CW. También pueden generarse si el transmisor se enciende y apaga de manera errática. Estos pueden ser bastante disruptivos para contactos cercanos. Los clicks de llave a menudo pueden reducirse ajustando una configuración del transmisor o modificando los circuitos de control de la llave del transmisor. Un osciloscopio puede usarse para monitorear la forma de onda CW como se muestra en la Figura 235. Tiempos de subida y bajada de 4 ms o más usualmente previenen que se generen clicks.

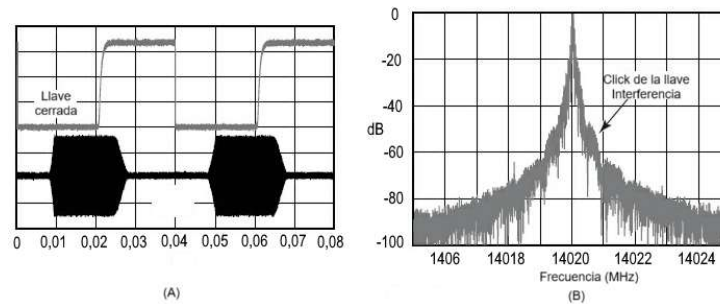


Figura 235. Ejemplo de click de llave. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

6.8.5 Interferencia y Ruido

La interferencia y el ruido representan una perturbación constante para los receptores en diversos contextos. La interferencia, denominada técnicamente QRM, describe señales no deseadas que presentan características similares a señales transmitidas, independientemente de su origen real como salida de un transmisor. El ruido, identificado como QRN, surge de manera aleatoria mediante procesos naturales o constituye una emisión no intencional de equipos que no transmiten. Cuando se confronta una combinación de ambos fenómenos durante la recepción de una señal tenue, la diferenciación puede percibirse como artificialmente forzada. Se pueden implementar distintas metodologías para mitigar, filtrar o suprimir cada tipología. Esta sección explora diversos tipos de interferencia y ruido, junto con estrategias para su gestión.

La intermodulación (IMD) se examina en múltiples secciones de este manual. La IMD configura un problema significativo porque genera señales interferentes tanto internamente como externamente en los equipos. Para un receptor, estas señales no difieren de las captadas por el aire y, consecuentemente, no pueden ser filtradas. Resulta fundamental reducir o eliminar la IMD en la mayor medida posible. Los circuitos o dispositivos con comportamiento no lineal pueden provocar distorsión por intermodulación prácticamente en cualquier circuito electrónico. La IMD (también denominada modulación cruzada) acontece cuando señales procedentes de diversos transmisores, cada uno operando en frecuencias diferentes, se entrelazan de manera no lineal, ya sea mediante un dispositivo electrónico activo o un conductor pasivo que, circunstancialmente, exhibe características no lineales. La mezcla, similar a un circuito mezclador, produce productos que pueden generar interferencias severas en un receptor próximo.

Los armónicos pueden generarse adicionalmente, y tales frecuencias se incorporarán a las posibles combinaciones de mezcla. La intermodulación, como se le denomina, se irradia y recibe de manera equivalente a la señal transmitida.

Por ejemplo, consideremos un repetidor de radioaficionado que recibe en 144,85 MHz. En sus proximidades, existen transmisores no aficionados relativamente potentes que operan en 181,25 MHz y 36,4 MHz. (Véase la Figura 236). Ninguna de estas frecuencias mantiene una relación armónica con 144,85 MHz. No obstante, la diferencia entre las frecuencias de los transmisores no aficionados corresponde a 144,85 MHz. Si las señales de estos transmisores se entrelazan de alguna manera, un producto de mezcla de intermodulación en la frecuencia de diferencia podría ser captado por el repetidor de radioaficionado, demodulado como si fuera una señal deseada y retransmitido en su frecuencia de salida. Una estación receptora escucharía una señal que incorpora la modulación de ambos transmisores no aficionados.

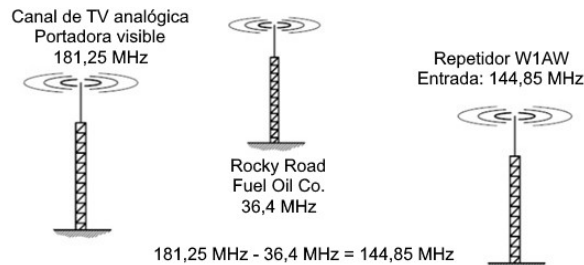


Figura 236. Situación potencial de intermodulación. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La interferencia por intermodulación puede acontecer cuando dos señales transmitidas se fusionan en los amplificadores terminales de uno o ambos transmisores, generándose señales indeseadas en las frecuencias resultantes de la suma y diferencia de las señales primigenias.

En esta situación específica, las dos señales podrían ser completamente nítidas, pero si se entrelazan en alguno de los transmisores, la señal de intermodulación podría ser emitida juntamente con la señal intencionada de ese transmisor.

Dos elementos que resultan altamente eficaces para suprimir este tipo de intermodulación son los aisladores y circuladores. Los circuladores y aisladores son componentes de ferrita que operan como una válvula unidireccional para señales radioeléctricas. Se experimenta una pérdida mínima de potencia del transmisor cuando la RF se desplaza hacia la antena, pero se impone una pérdida significativa a cualquier potencia que retorne por la línea de alimentación hacia el transmisor. Los circuladores también pueden emplearse para permitir que dos o más transmisores utilicen una única antena.

De este modo, los circuladores y aisladores en la salida de un transmisor reducen de manera sustancial los problemas de intermodulación. Una ventaja adicional de un circulador radica en que proporciona una carga adaptada a la salida del transmisor, independientemente del SWR del sistema de antena, al dirigir la potencia reflejada hacia una carga ficticia. La Figura 237 ilustra cómo los circuladores u osciladores pueden ser incorporados en un sistema de repetidora.

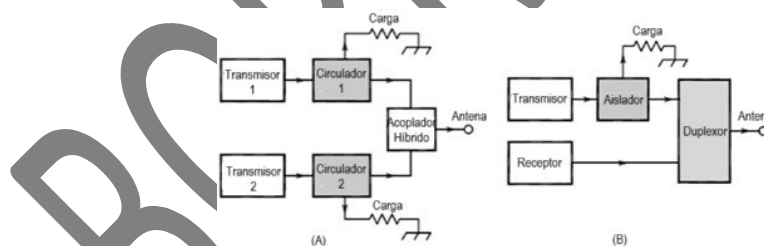


Figura 237. Osciladores en un sistema de repetidora. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los filtros de paso bajo y de banda normalmente resultan ineficientes para mitigar los problemas de intermodulación, debido a que en VHF y UHF difícilmente logran ser lo suficientemente selectivos para eliminar la señal interferente sin debilitar simultáneamente la señal objetivo.

Naturalmente, la intermodulación no se circunscribe únicamente a los repetidores. Un conflicto de intermodulación puede manifestarse en cualquier escenario donde dos transmisores relativamente potentes y próximos combinen sus frecuencias fundamentales o armónicos para generar una señal resultante o diferencial en la frecuencia donde opera otro transmisor o receptor. Cualquier dispositivo o conductor no lineal donde la energía de dos transmisores pueda fusionarse producirá tanto armónicos como productos de IMD derivados de ambas señales.

A modo de ilustración, las conexiones metálicas deterioradas presentan una alta característica no lineal. Si dos estaciones de radiodifusión AM intensas se encuentran próximas, sus señales podrían mezclarse en la unión y producir productos de intermodulación en un amplio espectro de frecuencias, algunas comprendidas dentro de las bandas de radioaficionados.

Identificar este tipo de anomalía puede constituir un proceso dispendioso, si bien afortunadamente los armónicos y otros productos tienden a ser relativamente tenues y no se reciben en una zona extensa.

Otro aspecto vinculado con la IMD previamente mencionado concierne a la pureza espectral de la emisión del transmisor. Cuando múltiples señales de audio se integran con la señal portadora para generar la señal modulada, inevitablemente surgirán señales parásitas. Estas generalmente se reducen mediante filtrado posterior al mezclador, pero su intensidad dependerá del nivel de las señales que se estén integrando, entre otros factores, y permanecerán presentes en la salida del transmisor hasta cierto punto.

Es posible evaluar la pureza de la señal de salida del transmisor ejecutando una prueba de dos tonos. Esto resulta crucial porque una distorsión por intermodulación excesiva en la señal de salida de un transmisor SSB genera interferencias transmitidas en un ancho de banda amplio. La señal transmitida aparecerá distorsionada, con señales parásitas (no deseadas) en frecuencias adyacentes.

RUIDO EN LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS

La interferencia eléctrica en los sistemas de alimentación puede resultar especialmente disruptiva para los profesionales que operan desde una localización fija. El intenso zumbido o sonido crepitante de la perturbación en el circuito eléctrico puede enmascarar prácticamente todas las señales, con excepción de las más potentes. La mayor parte de esta interferencia antropogénica es originada por alguna modalidad de descarga eléctrica.

Una descarga eléctrica genera cantidades variables de energía de radiofrecuencia a través del espectro radioeléctrico. (Durante los primeros períodos de la radio, los radioaficionados empleaban transmisores de chispa para generar sus señales de radio). Otra tipología de interferencia presente en la línea de corriente alterna son los transitorios, impulsos momentáneos provocados por una chispa o una descarga energética que se acopla o libera en el circuito de CA debido a descargas atmosféricas, la activación y desactivación de motores, o incluso conexiones precarias.

Cuando una corriente eléctrica atraviesa un espacio entre dos conductores, como se ilustra en la Figura 238, se produce una descarga mientras la corriente transita por el aire. Para generar semejante arco, la tensión debe ser suficientemente elevada para ionizar el medio aéreo entre los conductores.

Una vez establecida una ruta ionizada, se genera una corriente a través del espacio. El desplazamiento electrónico a través de este intervalo resulta altamente errático en comparación con el flujo estable a través de un conductor. La resistencia del aire ionizado experimenta variaciones constantes, provocando que la corriente instantánea también sea fluctuante.

Este fenómeno provoca la radiación de energía de radiofrecuencia, y la perturbación puede ser transmitida a lo largo de los cables de alimentación que funcionan como antenas altamente eficientes. Cuanto más amplio sea el espacio y mayor la tensión, más significativa será la interferencia generada por la descarga. Debido a las elevadas tensiones y potencia disponibles, las conexiones defectuosas o los aisladores deteriorados en el sistema de distribución eléctrica constituyen fuentes recurrentes de interferencia severa en las líneas de alimentación.

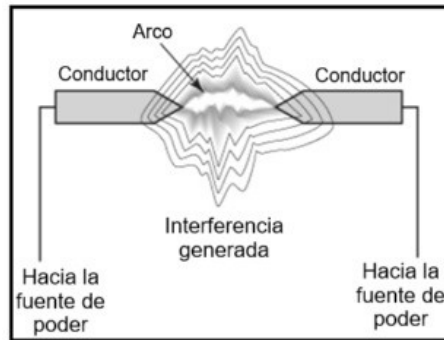


Figura 238. Arco producto del paso de la corriente por el aire. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

UBICACIÓN DE FUENTES DE RUIDO E INTERFERENCIA

Uno de los aspectos más desalentadores del ruido en las líneas eléctricas radica en su carácter impredecible. La perturbación sonora emerge y se desvanece sin advertencia previa, generalmente sin un modelo discernible (salvo, naturalmente, cuando se intenta operar). Esta característica puede convertir la localización de la fuente de interferencia en una tarea extremadamente compleja.

Existen dos mecanismos mediante los cuales la interferencia acústica puede alcanzar un receptor: Si la fuente de perturbación se encuentra dentro del mismo inmueble que el receptor, es probable que el ruido se propague a través del cableado eléctrico doméstico. Por ejemplo, si el motor del ventilador de un sistema de calefacción resulta ser el causante, la interferencia puede ser transportada mediante el cableado de CA desde la calefacción hasta la ubicación del receptor. La interferencia proveniente del exterior generalmente se capta a través de la antena y la línea de alimentación.

El procedimiento inicial para rastrear la interferencia consiste en determinar si se origina dentro del propio domicilio. Para corroborarlo, se debe desconectar el interruptor general de la vivienda, interrumpiendo completamente el suministro energético. Para esta prueba se requiere un receptor alimentado por baterías, aunque un receptor AM portátil debería resultar adecuado.

Es fundamental asegurarse de poder percibir el ruido en el receptor portátil. Se debe sintonizar una frecuencia nítida y escuchar la interferencia. Un receptor FM, con o sin antena direccional, no resultará útil para rastrear la fuente del ruido, dado que los receptores FM no se ven afectados por el ruido en la línea.

Si la perturbación desaparece al interrumpir la energía de toda la vivienda, se debe verificar si reaparece al restablecer la electricidad. Es factible que el dispositivo problemático solo produzca ruido después de un período de funcionamiento, por lo que la interferencia puede no manifestarse inmediatamente. Si no retorna, se debe continuar la investigación posteriormente.

Una vez que se tenga una certeza razonable de que el ruido se produce en el interior de la vivienda, se debe proceder a la investigación eliminando la energía de un circuito de manera secuencial. Cuando se logre reducir a un circuito específico, se deben desconectar los electrodomésticos o dispositivos eléctricos de forma individual. Es crucial mantener la persistencia. Podría ser necesario prolongar la investigación durante un período extenso hasta identificar el aparato responsable.

Si la interferencia no se origina dentro de la vivienda, la búsqueda resultará más compleja. El problema podría ser un arco en el sistema de distribución eléctrica de la compañía de servicios, un electrodoméstico de un vecino u otro elemento. Se puede utilizar el receptor AM portátil para “rastrear” a lo largo de las líneas eléctricas, buscando interferencias más intensas. En ocasiones, conducir con la radio AM del automóvil sintonizada entre estaciones resulta efectivo.

Una antena direccional puede facilitar la localización de la fuente del ruido. Al aproximarse a la fuente de interferencia, es posible que el nulo (la dirección de menor señal en el patrón de la antena) resulte más útil para precisar la ubicación.

Cuando se considere haber identificado la fuente, se debe contactar a la compañía eléctrica y explicar detalladamente el problema. Es fundamental ser lo más específico posible respecto a la ubicación de la interferencia. Se recomienda tomar nota de los números de identificación en los postes de luz. La empresa energética puede enviar un técnico con equipos más sofisticados para coadyuvar en la localización de la fuente.

El técnico podría contar con un detector de RF portátil que captará el ruido de radiofrecuencia, o utilizar un transductor ultrasónico con una antena de reflector parabólico y un amplificador para escuchar el sonido de un arco en frecuencias justo por encima del espectro de audio.

Pequeños arcos eléctricos se generan en una variedad de electrodomésticos, especialmente aquellos que utilizan motores con escobillas. Las afeitadoras eléctricas, máquinas de coser y aspiradoras son solo algunos ejemplos. Además, los dispositivos que controlan la tensión o la corriente abriendo o cerrando un circuito pueden generar arcos momentáneos que causan interferencias en forma de chasquidos o clics. Reguladores de luz, elementos de calefacción y anuncios luminosos intermitentes son ejemplos de este tipo de dispositivos.

Los aparatos electrodomésticos con desperfectos técnicos o en estado de deterioro, junto con la instalación eléctrica interna de una vivienda, pueden igualmente provocar interferencias en las líneas de suministro eléctrico. Los sistemas de timbre o sus respectivos transformadores, así como otros dispositivos que permanecen conectados de manera constante, frecuentemente generan descargas eléctricas de baja intensidad cuando comienzan a presentar fallos. La interferencia característica se manifiesta como un intenso sonido de zumbido o rugido en la línea de corriente alterna que aparece y desaparece de manera intermitente.

Un método eficaz para minimizar la contaminación acústica eléctrica generada por un motor consiste en implementar un filtro de línea de corriente alterna de tipología “fuerza bruta” conectado en serie con sus conductores de alimentación. Este dispositivo interceptará la propagación de ruido a través del cableado eléctrico, alejándolo del motor.

La Figura 239 presenta el diagrama esquemático de dicho filtro. Todos los componentes deben estar certificados para líneas de corriente alterna y poseer capacidad para gestionar la corriente demandada por el motor o electrodoméstico conectado al filtro. Se recomienda utilizar filtros comerciales con certificación UL para esta aplicación.

Es importante destacar que esta tipología de filtro no impedirá la radiación de ruido a través del cableado existente entre el filtro y el motor.

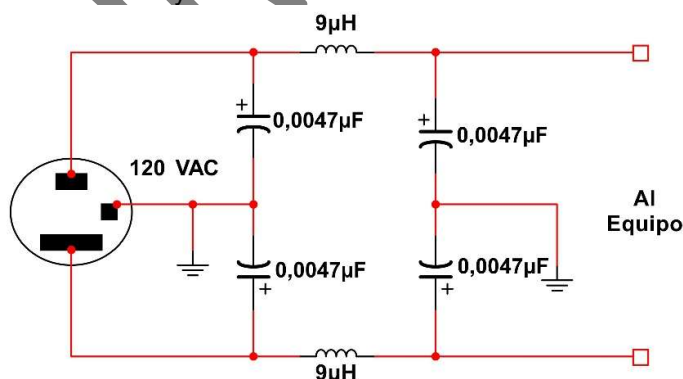


Figura 239. Filtro de línea de CA tipo brute force. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

INTERFERENCIA POR SEÑALES FUERTES

Una transmisión de señal potencialmente puede provocar perturbaciones en dispositivos electrónicos como receptores televisivos, aparatos radiofónicos, sistemas de audio o equipos telefónicos. El origen de dicha señal puede ser su propia estación o un transmisor cercano ajeno al ámbito de radioaficionados.

Habitualmente, tales interferencias son originadas por señales de modo común, captadas en los revestimientos protectores de cables y en líneas sin protección, como el cableado de corriente alterna y telefonía doméstica. El tendido eléctrico puede capturar las señales y conducirlas hacia el dispositivo o retransmitirlas, generando de este modo interrupciones.

El concepto de modo común implica que la señal circula en idéntica dirección a través de todos los conductores de un conjunto multi-conductor, como una línea eléctrica o telefónica, en contraposición al comportamiento de una línea de transmisión donde las direcciones serían opuestas.

Para resolver este tipo de perturbaciones, será necesario emplear un atenuador de modo común. Se recomienda enrollar múltiples vueltas del cable de alimentación o línea telefónica alrededor de un núcleo toroidal de ferrita. Las ferritas clasificadas como tipos 31 y 73 resultan óptimas para resolver la mayoría de los problemas en HF, mientras que el material tipo 43 demuestra mayor eficacia en las bandas superiores de HF, VHF y UHF.

INTERFERENCIA POR COMPUTADORAS

Las perturbaciones también pueden ser generadas por equipamiento informático, sistemas de red y fuentes de alimentación conmutadas. Las características del ruido producido por estos dispositivos comprenden señales inestables, moduladas o no moduladas, en frecuencias específicas. La señal experimenta variaciones conforme el dispositivo ejecuta diferentes funciones.

RUIDO EN VEHÍCULOS

Uno de los principales impedimentos para una recepción óptima de señales durante operaciones móviles o portátiles lo constituye el ruido por impulsos eléctricos originado por el sistema de ignición del motor, comprendiendo también los generadores portátiles de gasolina.

Esta interferencia puede oscurecer completamente una señal tenue. Otras fuentes de perturbación incluyen interferencias transmitidas desde el sistema de carga de la batería del vehículo, interferencia provocada por instrumentos, descargas electrostáticas y efecto corona de la antena móvil.

La norma primordial al instalar un transceptor móvil en un vehículo contemporáneo radica en seguir las recomendaciones del fabricante. Algunos fabricantes proporcionan lineamientos pormenorizados para la instalación de equipos de transmisión, mientras que otros pueden desaconsejar la instalación de cualquier transmisor o brindar información escasa.

Las perlas y núcleos de ferrita pueden coadyuvar a disminuir la interferencia de RF en vehículos contemporáneos. Tanto los cables primarios como secundarios del sistema de ignición pueden beneficiarse de la implementación de perlas. Instálalas en cantidad suficiente y verifica el motor bajo carga para garantizar que el sistema de ignición funcione correctamente.

El ruido conducido y el ruido irradiado del sistema de carga de batería del vehículo pueden minimizarse conectando directamente los cables de alimentación de la radio a la batería, ya que este punto presenta la mejor regulación de tensión en el sistema.

Conecta tanto el cable positivo como el negativo directamente a la batería, con un fusible en cada cable capaz de manejar la corriente de transmisión. Adicionalmente, pueden resultar útiles capacitores coaxiales en serie con los cables del alternador.

REDUCCIÓN DE RUIDO

Una vez dentro del receptor, el ruido resulta extremadamente complejo de eliminar. Se utilizan ampliamente dos tipos básicos de técnicas de reducción de ruido.

1. Supresión de ruido (noise blanking): opera detectando impulsos de ruido, denominados ruido por impulsos, y silenciando el receptor cuando estos están presentes.
2. Reducción de ruido DSP (digital signal processing): emplea técnicas DSP especiales para separar el ruido de la señal deseada.

SUPRESORES DE RUIDO

Los circuitos especializados de FI identifican la presencia de una señal de interferencia y bloquean o interrumpen el trayecto de recepción únicamente durante el lapso necesario para impedir que el impulso alcance las etapas finales de procesamiento de audio, donde se manifestaría como un sonido de “chasquido” o “tictac”.

Esta metodología, conocida como “gating”, resulta particularmente eficaz contra las perturbaciones provenientes de líneas eléctricas y sistemas de ignición vehicular. Se emplea un diodo o transistor como mecanismo de conmutación para regular el recorrido de la señal.

Un elemento fundamental consiste en que la señal de FI debe experimentar un ligero desplazamiento temporal previo al interruptor, de manera que este se active precisamente cuando la interferencia arribe al punto de conmutación. El sistema electrónico que detecta el impulso y opera el interruptor posee un intervalo de latencia inherente, por lo cual también se requiere un retraso de la señal en la trayectoria principal de FI.

Para identificar pulsos de interferencia agudos, el supresor debe monitorear señales en un espectro de frecuencia amplio, lo que implica que no puede protegerse mediante filtros de recepción estrechos. Como consecuencia, el dispositivo puede ser engañado por señales intensas que provocan el cierre del receptor simulando impulsos de ruido. Esto podría generar distorsiones significativas en las señales deseadas, incluso en ausencia de interferencias.

Es posible que una señal intensa parezca “excesivamente extendida”, con múltiples componentes espurias. Antes de atribuir la anomalía a la estación con señal potente, conviene verificar que el supresor de ruido esté desactivado. Adicionalmente, un preamplificador puede facilitar la saturación del receptor y provocar problemas similares.

REDUCCIÓN DE RUIDO DSP

Los filtros de reducción de ruido DSP operan mediante técnicas de filtros adaptativos, donde programas informáticos buscan señales con características específicas de voz, CW o datos y eliminan todo lo adicional, como ruido por impulsos y estática.

Estas técnicas resultan especialmente eficientes para suprimir ruido de audio de banda ancha tipo “blanco”. También demuestran efectividad contra interferencias por impulsos, como las generadas por sistemas de ignición vehicular y líneas eléctricas.

Los filtros de muesca automáticos representan una característica particularmente útil de estos sistemas. Las funcionalidades contemporáneas de DSP pueden rastrear y eliminar múltiples tonos interferentes en un canal de audio. Esto resulta muy beneficioso en bandas congestionadas o asignaciones compartidas, donde las portadoras de estaciones de radiodifusión de onda corta pueden ser extremadamente intensas. Una limitación de estos sistemas radica en su potencial confusión entre señales CW o digitales de baja velocidad con tonos interferentes, intentando su eliminación.

6.9 Instalación de estaciones de HF

Más allá de la comprensión del equipamiento, su integración en una estación operativa doméstica o vehicular implica un conjunto adicional de consideraciones. La operación en HF, caracterizada por ondas de mayor longitud y niveles de campo típicamente elevados, hace que la conexión a tierra y el control de interferencias adquieran una relevancia sustancialmente superior.

6.9.1 Instalaciones móviles

CONEXIONES DE ENERGÍA

Una radio móvil capaz de transmitir 100 watts demanda una conexión energética robusta que pueda proporcionar 20 A o superior, con una mínima caída de tensión. Los dispositivos de estado

sólido presentan un comportamiento impredecible cuando la tensión de entrada desciende por debajo del umbral mínimo especificado por la fuente de alimentación.

No se recomienda extender ni reemplazar el cable de alimentación original del fabricante por uno de menor sección. La conexión óptima es directa a la batería, utilizando cable de sección gruesa con fusible tanto en el conductor positivo como en el negativo. No se aconseja emplear el conector del encendedor de cigarrillos, dado que dicho circuito generalmente está dimensionado para pocos amperios, resultando insuficiente para alimentar una radio HF de 100 watts.

No se debe presumir que la estructura metálica vehicular constituye una conexión a tierra de CD adecuada. Múltiples carrocerías se construyen con secciones independientes, provocando conexiones a tierra irregulares con el transcurso del tiempo. Algunas piezas pueden estar fabricadas con materiales plásticos o no metálicos. Se recomienda conectar la tierra energética de la radio directamente a la batería o a la correa de tierra donde se une al bloque motor o a la estructura vehicular.

CONEXIONES DE ANTENA

La limitación más significativa de la operación móvil radica en que las antenas eléctricamente reducidas resultan menos eficientes comparadas con antenas de dimensión completa en una estación doméstica. Esta característica es particularmente evidente en bandas de frecuencia inferiores. [G4E05] Durante la operación móvil, el vehículo completo se transforma en componente del sistema de antena, y la atención a cada detalle puede generar beneficios sustanciales en la intensidad de señal. Por ejemplo:

- Emplear la antena más eficiente disponible.
- Garantizar conexiones de tierra de RF al vehículo sólidamente establecidas.
- Instalar la antena en ubicaciones con mínima interferencia de superficies metálicas.

DOMINA ESE ZUMBIDO AGUDO

Una conexión energética apropiada contribuye a mitigar el ruido eléctrico del sistema energético vehicular. El zumbido del alternador, tono agudo que fluctúa según la velocidad del motor, se origina por pulsos de corriente durante la carga de la batería. Conectar directamente el cable de alimentación del equipo a la batería utiliza ésta como filtro, reduciendo significativamente el zumbido del alternador y demás ruidos eléctricos transmitidos a la radio mediante los cables de alimentación.

INTERFERENCIA MÓVIL

Durante la operación HF móvil, emergen preocupaciones por interferencias sustancialmente diferentes a las de una estación doméstica. El ruido de encendido provocado por la chispa de bujías puede resultar intenso, aunque los supresores de ruido en radios contemporáneas resultan notablemente efectivos para su reducción. Otra dificultad frecuente son las señales de interferencia generadas por accesorios y sistemas vehiculares. Las fuentes habituales incluyen computadoras de control a bordo, dispositivos motorizados eléctricos como bombas de combustible y sistemas de ventanas, además de sistemas de carga de batería. Recursos móviles en línea y boletines de servicio del fabricante pueden asistir en la gestión de problemas de interferencia y ruido durante operación móvil.

INTERFERENCIA DE RF (RFI)

Transmitir una señal de calidad implica que probablemente se detectarán oyentes no intencionados en receptores próximos y dispositivos electrónicos de consumo.

A continuación, se presentan algunas causas habituales y soluciones de interferencia de RF en dispositivos electrónicos de consumo y receptores de radio/televisión:

- Sobrecarga fundamental: típicamente se presenta en receptores de radio o TV incapaces de rechazar una señal intensa, provocando que los circuitos internos operen

incorrectamente, distorsionando o eliminando la señal deseada. La estrategia de resolución consiste en impedir la entrada de la señal no deseada al equipo mediante la implementación de filtros en la trayectoria de la señal.

- **Modo común:** cualquier equipo electrónico con componentes internos, incluyendo teléfonos, computadoras, reproductores de música, etc., puede verse afectado por señales locales potentes. La señal se captura como corriente en modo común en el exterior de los blindajes de cables o en todos los conductores de una conexión carente de blindaje. Este fenómeno puede ocurrir en conexiones eléctricas, cables de altavoces, cables telefónicos — cualquier cableado externo. La señal no deseada es posteriormente conducida al equipo, donde puede provocar un funcionamiento errático o ruido acústico.
- **Recepción directa:** acontece cuando la señal es captada directamente por el cableado interno de un dispositivo y puede resultar extremadamente compleja de eliminar sin añadir blindaje al dispositivo.
- **Armónicos:** emisiones espurias de una estación de radioaficionado pueden ser recibidas por equipos de radio o televisión. La solución radica en utilizar un filtro pasa bajos para suprimir las emisiones espurias en la estación de radioaficionado. Es fundamental asegurar la coincidencia de la impedancia del filtro pasa bajos con la impedancia característica de la línea de alimentación donde se inserta.
- **Intermodulación:** contactos defectuosos entre conductores que captan señales de RF pueden generar una conexión o circuito no lineal que actúa como mezclador, produciendo productos de mezcla a partir de las señales. Un diodo o transistor expuesto a señales de RF puede comportarse de manera similar. Si los productos de mezcla se encuentran en la frecuencia sintonizada por los receptores, provocarán interferencia en la señal deseada. La solución consiste en localizar y reparar el contacto defectuoso o bloquear el paso de señales de RF a los componentes.
- **Arqueo:** cualquier chispa o arco sostenido genera ruido radioeléctrico en un amplio espectro de frecuencias, afectando tanto la recepción en bandas aficionadas como concesionadas. Cuando es generado por el cableado eléctrico de CA, el resultado será un crujido similar a un zumbido. Si el arco proviene de un motor o equipo de soldadura, el zumbido aparecerá o desaparecerá según la activación del equipo. En general, un mal contacto entre conductores que transportan corriente causará interferencia. La solución para el ruido en las líneas eléctricas implica aislarlo en una instalación específica y posteriormente solicitar a la compañía eléctrica la realización de las reparaciones necesarias. El ruido proveniente de equipos específicos puede requerir la utilización de filtros en dicho equipo.

SÍNTOMAS COMUNES DE RFI

La interferencia de radiofrecuencia presenta una notable diversidad, pero estos síntomas provocados por una señal intensa en equipos de audio son probablemente algunos de los más frecuentes:

- **CW, FM o datos:** la interferencia se manifestará mediante zumbidos periódicos, zumbidos persistentes, chasquidos o impactos sonoros cuando se transmita la señal perturbadora.
- **Telefonía en AM:** el dispositivo que experimenta saturación o detección directa frecuentemente emitirá una reproducción de la voz del interlocutor.
- **Voz en SSB:** similar a la telefonía en AM, pero la voz aparecerá distorsionada o incomprensible.

SUPRESIÓN DE RFI

La solución óptima para diversos tipos de interferencia causada por proximidad a una estación de radioaficionado consiste en impedir que las señales de radiofrecuencia penetren en el equipo inicialmente. Si pueden implementarse filtros, generalmente representan la solución más eficaz y menos compleja de instalar. El siguiente procedimiento implica bloquear el flujo de corriente de radiofrecuencia insertando una impedancia en su trayectoria. Esto se logra configurando el conductor que transporta la corriente de radiofrecuencia en una bobina de RF enrollándola alrededor o a través de un núcleo de ferrita.

Los núcleos y perlas de ferrita también pueden ubicarse en los cables para prevenir que la corriente en modo común de radiofrecuencia fluya por el exterior de los trenzados o blindajes de los cables ("interferencia en modo común"). Estos mismos elementos pueden utilizarse para evitar que señales provenientes de computadoras y accesorios computacionales generen interferencia en las comunicaciones de radioaficionado. La interferencia en equipos de audio y conexiones de sensores o interruptores de electrodomésticos ocasionalmente puede eliminarse colocando un pequeño capacitor de paso (de 100 pF a 1 nF) entre conexiones balanceadas o desde cada conexión a tierra del chasis.

6.10 Mediciones de Radio y Rendimiento

6.10.1 Equipos de Prueba

Los siguientes tipos de equipos de prueba son solo algunos de los muchos instrumentos diferentes utilizados en el desarrollo de la radioafición.

MULTÍMETROS

El multímetro es un equipo básico de prueba que realiza una variedad de mediciones. El multímetro digital (DMM, por sus siglas en inglés) está controlado por microprocesador y la mayoría son autorango, por lo que eligen automáticamente el rango adecuado para mostrar valores de voltaje, resistencia y corriente. Aunque la mayoría de los multímetros son digitales, los medidores analógicos de aguja móvil aún son comunes. Independientemente de si el medidor es digital o analógico, sus especificaciones básicas son similares.

La precisión de la mayoría de los medidores se especifica como un porcentaje de la escala completa. Si la especificación indica que la precisión del medidor está dentro del 2 % de la escala completa, el error posible en cualquier punto de una escala de 0 a 10 V es del 2 % de 10 V, o 0.2 V. La resolución de casi cualquier multímetro vendido hoy en día es suficiente para mediciones generales en equipos de radio. La mayoría ofrece pantallas de "3½ dígitos", lo que significa que el dígito más a la izquierda de cuatro puede ser 1 o estar en blanco. Un medidor así tiene una resolución del 0.05 % a escala completa, más que suficiente para uso aficionado.

PRECISIÓN, EXACTITUD Y RESOLUCIÓN

Los términos exactitud, precisión y resolución a menudo se confunden y se usan indistintamente, cuando en realidad tienen significados muy diferentes. Al tratar con mediciones e instrumentos de prueba, es importante diferenciarlos.

- Exactitud es la capacidad de un instrumento para realizar una medición que refleje el valor real del parámetro que se está midiendo. La exactitud de un instrumento generalmente se especifica en porcentaje o decibelios, referidos a algún estándar conocido.
- Precisión se refiere a la división más pequeña de medición que un instrumento puede realizar repetidamente. Por ejemplo, una regla métrica dividida en milímetros es más precisa que una dividida en centímetros.
- Resolución es la capacidad de un instrumento para distinguir entre dos cantidades diferentes. Si la menor diferencia que un medidor puede distinguir entre dos corrientes es 0.1 mA, esa es la resolución del medidor.

Es relevante destacar que estas tres características no están inherentemente interconectadas de manera recíproca. En otras palabras, un instrumento de medición preciso podría carecer de exactitud, o la resolución de un dispositivo exacto podría no ser particularmente elevada, o bien la precisión de un medidor puede superar su resolución.

Es crucial comprender la distinción entre estos tres conceptos al seleccionar e implementar instrumentos de evaluación.

Una especificación adicional de interés corresponde a la sensibilidad del instrumento de medición. Un medidor sensible extrae una cantidad mínima de corriente del circuito sometido a prueba. La sensibilidad frecuentemente se expresa en ohmios por voltio (Ω/V), que representa la impedancia de entrada en ohmios dividida por la lectura de escala completa en voltios. La impedancia de entrada también puede determinarse multiplicando la lectura de escala completa del medidor por su sensibilidad en Ω/V .

Los medidores digitales pueden especificar directamente su impedancia de entrada.

MEDICIONES RMS

Ciertos medidores están diseñados para medir valores "RMS verdaderos" de tensión o corriente. Cuando se aplica una tensión de CA a una resistencia, esta disipa calor, similar a como lo haría con una tensión de CD. La tensión de CD que generaría idéntica cantidad de calentamiento que la tensión de CA se denomina valor cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés) o valor efectivo de la tensión de CA. (RMS hace referencia al método matemático para calcular valores RMS.) El valor RMS de cualquier forma de onda, tensión o corriente puede determinarse realizando múltiples mediciones punto por punto y posteriormente calculando el valor RMS. (También puede establecerse midiendo el efecto térmico de la forma de onda sobre una resistencia.) Por esta razón, los medidores que calculan "RMS verdadero" resultan los más precisos para determinar el valor RMS de cualquier forma de onda, independientemente de su complejidad.

Los medidores que no ejecutan todos los cálculos generalmente presuponen que la forma de onda es senoidal y convierten la medición a un valor RMS equivalente. Estos instrumentos carecen de precisión para formas de onda no senoidales, pulsos o formas de onda con desplazamiento de CD.

Afortunadamente, para formas de onda simétricas comunes de CA, las conversiones entre pico, pico a pico, promedio y RMS son sencillas. La Tabla 25 ilustra cómo convertir entre las formas de onda pico, pico a pico, promedio y RMS de ondas senoidales y cuadradas. Se hará uso frecuente de las conversiones de ondas senoidales.

Tabla 25. Mediciones CA para señales senoidales y cuadradas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Medición	Onda Senoidal	Onda Cuadrada
Pico a Pico	$2 \times \text{Pico}$	$2 \times \text{Pico}$
Pico	$0.5 \times \text{Pico a Pico}$	$0.5 \times \text{Pico a Pico}$
RMS	$0.707 \times \text{Pico}$	Pico
Pico (alternativo)	$1.414 \times \text{RMS}$	RMS
Promedio (ciclo completo)	0	0
Promedio (medio ciclo)	$0.637 \times \text{Pico}$	$0.5 \times \text{Pico}$

VATÍMETROS DE RF

Prácticamente la totalidad de los equipos de radiodifusión comercial incorporan algún mecanismo para cuantificar y exhibir la potencia de emisión de radiofrecuencia. Los instrumentos de medición independientes se implementan en el trayecto de alimentación entre el transceptor y el sistema radiante. Generalmente, estos dispositivos poseen la capacidad de evaluar tanto la potencia directa como la reflejada, permitiendo la determinación de la relación de ondas estacionarias (ROE).

La mayoría de los vatímetros realizan una evaluación del promedio de potencia de radiofrecuencia a través de múltiples ciclos del sobre de modulación. Cuando los radioaficionados hacen referencia a la potencia de salida promedio en este contexto, se están refiriendo específicamente a este promedio de potencia a largo plazo.

Cuando se emplea un modo de voz AM como SSB, resulta fundamental conocer la potencia pico de envolvente (PEP, por sus siglas en inglés) de la señal transmitida, debido a que las normativas especifican los niveles de potencia bajo este parámetro. No obstante, los picos de la envolvente acontecen con tal rapidez que las lecturas del medidor no pueden representar con precisión sus

valores. Los vatímetros de lectura pico o con retención de pico disponen de circuitos especializados que permiten medir y mostrar el valor pico de una señal.

La PEP de una señal AM o SSB será considerablemente superior a la potencia promedio. La relación entre la potencia pico y la promedio en señales de voz SSB presenta una variabilidad significativa según las características vocales. La Figura 240 ilustra dos patrones típicos de envoltura. En el caso representado en (A), la potencia promedio (estimada gráficamente) determina que la relación pico-promedio es aproximadamente de 3:1. Dependiendo de la tipología vocal y el estilo de locución, esta relación puede superar ampliamente la proporción 10:1. Mediante la implementación de un circuito compresor para elevar los niveles mínimos de señal modulada, la potencia promedio de salida puede incrementarse, como se observa en (B). Las relaciones típicas de PEP a potencia promedio se sitúan en torno a 2.5:1. Es importante recordar que FM y PM constituyen modos de potencia constante donde la envoltura mantiene una amplitud uniforme durante la transmisión.

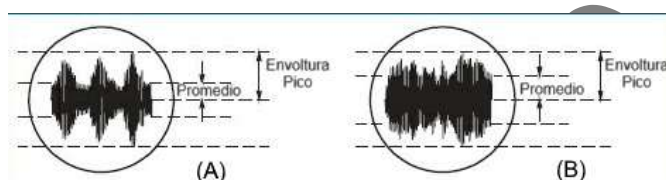


Figura 240. Dos patrones típicos de envoltura. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

CONTADORES DE FRECUENCIA Y REFERENCIAS

Un método altamente preciso para determinar la frecuencia lo constituye el contador de frecuencia. Este dispositivo registra sistemáticamente los ciclos de la señal de entrada durante un intervalo temporal determinado y despliega el valor de frecuencia en una pantalla digital.

A modo de ilustración, cuando un oscilador que opera a 14,230 MHz se conecta al puerto de entrada del contador, el instrumento mostrará exactamente 14,230 MHz. Ciertos contadores pueden operar eficientemente en rangos que alcanzan los gigahercios.

Los contadores de frecuencia de última generación poseen capacidades adicionales como la medición de ancho de pulso, periodo de señal, contar pulsos y medir intervalos de tiempos. Los dispositivos de precisión profesional se encuentran ampliamente disponibles en el mercado: como equipamiento de segunda mano, excedentes, nuevas unidades e incluso conjuntos de ensamblaje económicos.

La mayoría de los contadores que operan a frecuencias extremadamente elevadas implementan un preescalador previo al contador de frecuencia más reducida. Un dispositivo especialmente diseñado como divisor de frecuencia, el preescalador disminuye la frecuencia de una señal mediante un factor determinado como 10, 100, 1000 u otro divisor numérico entero, permitiendo que un contador de baja frecuencia pueda representar la frecuencia de entrada.

Los componentes internos de un contador convencional se representan en el diagrama de bloques de la Figura 241. La precisión del contador de frecuencia depende fundamentalmente de un oscilador de referencia interno estabilizado por cristal, denominado también base de tiempo, visualizado en la figura como el estándar cristalino de 1 MHz.

Cualquier fluctuación en la frecuencia del oscilador de la base de tiempo impacta directamente la precisión y exactitud del contador. Cuanto más riguroso sea el cristal de referencia, más fidedignas resultarán las lecturas del contador.

Una frecuencia cristalina de 1 MHz se ha consolidado prácticamente como estándar para su implementación en el oscilador de referencia. El cristal debe exhibir una extraordinaria estabilidad térmica para garantizar que la frecuencia del oscilador no experimente modificaciones significativas ante variaciones de temperatura.

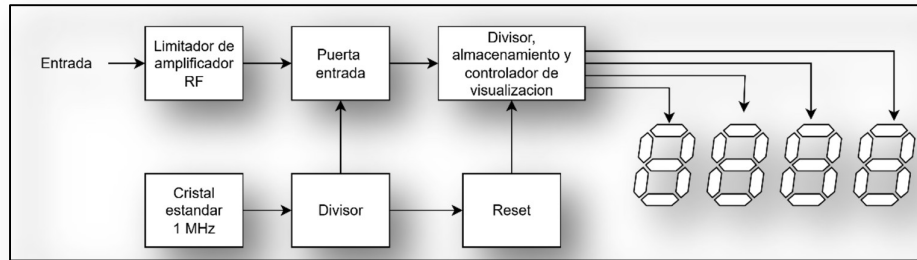


Figura 241. Diagrama de bloques de un contador de frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un dispositivo de medición de frecuencia determinará la intensidad de la señal predominante en su elemento receptor o punto de entrada. Los instrumentos de medición pueden capturar su señal de entrada a través de un elemento captador situado en proximidad a un emisor, en lugar de establecer una conexión directa. Para señales con niveles reducidos, no obstante, se podrá emplear un dispositivo de sondeo u otro método alternativo de ingreso.

Aunque generalmente exhiben una notable precisión, un instrumento de medición de frecuencia requiere una verificación periódica confrontándolo con WWV, WWVH u otro patrón de referencia frecuencial. La exactitud de estos dispositivos frecuentemente se expresa mediante unidades de partes por millón (ppm).

Incluso después de contrastar el dispositivo con WWV, es fundamental considerar el potencial margen de desviación. El error del instrumento podría alcanzar:

$$\text{Error en Hz} = \frac{f(\text{Hz}) * \text{error del contador en ppm}}{1000000}$$

EL OSCILOSCOPIO

La percepción inmediata de señales y configuraciones de ondas de alta velocidad resulta imposible mediante cualquier dispositivo de medición o instrumento numérico. La cantidad de información supera la capacidad de transmisión a velocidades extremadamente rápidas. En este contexto, surge el osciloscopio, denominado también los ojos electrónicos del radioaficionado.

Un osciloscopio se emplea para representar la amplitud de una señal en relación con el tiempo, permitiendo visualizar y cuantificar la morfología y características de la onda, incluso cuando la señal experimenta transformaciones sumamente veloces.

Mientras los osciloscopios digitales proyectan la señal de entrada digitalizada en una pantalla similar a un dispositivo computacional, la terminología fue originalmente concebida para osciloscopios analógicos.

Por ejemplo, la calibración temporal del eje horizontal frecuentemente se conoce como "velocidad de barrido" debido a que un haz electrónico era "desplazado" a través de la superficie de un tubo de rayos catódicos (CRT, por sus siglas en inglés). En un osciloscopio digital no se "barre" elemento alguno, no obstante, tales términos permanecen vigentes.

Considerando que numerosos osciloscopios basados en CRT continúan en funcionamiento (siendo incluso competentes y preferidos en ciertas aplicaciones), esta sección preservará la terminología analógica original, señalando las divergencias con los instrumentos digitales más recientes según resulte pertinente.

CONCEPTOS BÁSICOS DEL OSCILOSCOPIO

Una configuración de onda tipo rampa dentada, caracterizada por un ascenso gradual y un descenso abrupto, provoca que un punto generado por el haz electrónico se desplace de

izquierda a derecha, generando una línea luminosa estrecha (denominada traza) en la superficie del CRT, tal como se ilustra en la Figura 242. En un osciloscopio digital, la traza aparece como una secuencia de píxeles en una pantalla digital.

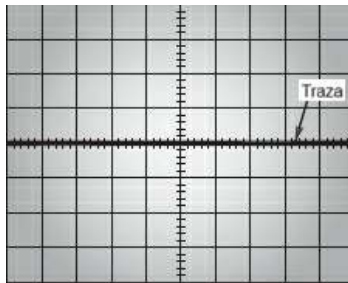


Figura 242. Cara del CRT. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La rapidez con la que el haz se desplaza a través del CRT es denominada velocidad de barrido, misma que es seleccionada por el operador.

Para osciloscopios digitales, un valor de velocidad de barrido o base de tiempo determina el intervalo temporal por división horizontal. Los mecanismos de oscilador o reloj que regulan el tiempo de visualización se conocen como base de tiempo del osciloscopio.

La señal de entrada para analizar se conecta al puerto de ingreso del canal vertical del osciloscopio. La tensión positiva desplaza la traza en dirección ascendente. Si se introduce una señal de onda sinusoidal en la entrada vertical y se selecciona la velocidad de barrido adecuada, la traza configurará una onda sinusoidal mientras se mueve verticalmente de manera simultánea con su desplazamiento a través del tubo.

Una restricción significativa para la precisión, respuesta en frecuencia y estabilidad de un osciloscopio es el ancho de banda (respuesta en frecuencia) de los amplificadores del canal vertical del osciloscopio.

Los osciloscopios frecuentemente se caracterizan en función de este ancho de banda. Los osciloscopios también se describen por la cantidad de canales verticales que poseen (circuitos especializados pueden generar la impresión de trazas independientes para cada canal), por lo que se podría encontrar un modelo específico listado como un "osciloscopio de 20 MHz de dos canales".

Otra limitación de rendimiento relevante es la precisión y linealidad de la base de tiempo del osciloscopio. Si la base de tiempo carece de estabilidad, las mediciones de frecuencia y tiempo efectuadas con el osciloscopio carecerán de exactitud.

La cuadrícula de marcas en la superficie del tubo se denomina retícula y cada línea se identifica como división. El eje vertical de la retícula está calibrado en voltios/división o V/div, y el operador puede seleccionar diversas escalas.

El eje horizontal está calibrado en tiempo/división o segundos por división (s/div). Las escalas verticales generalmente están disponibles desde milivoltios/división hasta decenas de V/div.

La mayoría de los osciloscopios ofrecen calibraciones del eje horizontal desde unos pocos s/div hasta nanosegundos/div.

Esto permite visualizar señales con frecuencias inferiores a 1 Hz hasta cientos de MHz y amplitudes que oscilan desde milivoltios hasta decenas de voltios.

Mediante el empleo de un control de posicionamiento, es posible comparar la amplitud y el período de una señal con las divisiones precisas de los ejes centrales de la retícula.

La medición de amplitud más sencilla de realizar con un osciloscopio analógico corresponde al voltaje pico a pico de una señal de CA, utilizando las líneas de la retícula como se ilustra en la

siguiente figura. Un osciloscopio digital normalmente puede ejecutar estas mediciones de forma automática y presentar los resultados en pantalla.

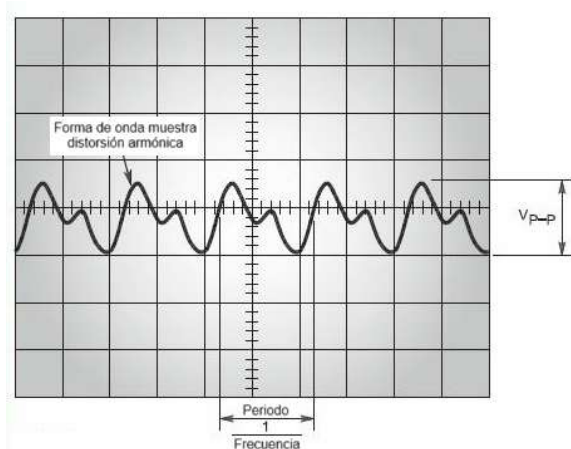


Figura 243. Medición de tensión pico a pico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Usos de un Osciloscopio en una Estación de Radioaficionado. En una estación de radioaficionado, el osciloscopio presenta múltiples aplicaciones instrumentales. Frecuentemente, este dispositivo se emplea para representar gráficamente la morfología de la señal emitida por un transmisor. Dicha evaluación permite al operador verificar la funcionalidad correcta de las etapas amplificadoras del equipo transmisor.

Adicionalmente, el osciloscopio resulta útil para representar las características de las ondas señales durante procedimientos de diagnóstico técnico.

A modo de ilustración, obsérvese la representación de la figura anterior. Se aprecia claramente que la onda sinusoidal experimenta una distorsión considerable originada por la superposición de armónicos sobre la onda fundamental.

SONDAS PARA OSCILOSCOPIO

Los instrumentos de medición se conectan a los circuitos bajo análisis mediante sondas especializadas denominadas sondas de "scope".

Tales implementos están diseñados con precisión para intervenir mínimamente en las propiedades temporales y espectrales de la señal investigada. Cada sonda incorpora un conductor de referencia que se vincula al circuito en evaluación. Para garantizar mediciones de alta precisión en frecuencias elevadas, resulta fundamental minimizar la extensión de la conexión de tierra.

La sonda integra un divisor de tensión de elevada impedancia que genera una perturbación mínima en el circuito. Típicamente, la amplitud de la señal en la salida de la sonda se reduce por un factor de diez —denominándose sonda multiplicativa diez ($\times 10$). (Existen variantes de $\times 1$ y $\times 100$, aunque su utilización es significativamente menor). La mayoría de los osciloscopios presuponen la utilización de una sonda $\times 10$ al representar la escala vertical en V/div.

Considerando que la respuesta frecuencial de la sonda puede influir en la representación espectral de la señal, es crucial asegurar un ajuste preciso. Este proceso se conoce como compensación de sonda.

Habitualmente, los osciloscopios proporcionan una señal de calibración de onda cuadrada con una frecuencia cercana a varios kilohertz y una amplitud entre 0.1 y 1 voltio. El procedimiento implica conectar la sonda a esta señal y ajustar el control de compensación hasta lograr que los segmentos horizontales sean completamente planos y los vértices nítidamente definidos.

OSCILOSCOPIOS DIGITALES

Un osciloscopio digital captura muestras de la señal de entrada, transformándola en información digital mediante un convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés). Posteriormente, todas las operaciones de representación y procesamiento se ejecutan utilizando dichos datos. Considerando que los osciloscopios digitales realizan un muestreo de la señal de entrada, presentan idénticas consideraciones respecto al ancho de banda y la respuesta de frecuencia que los sistemas DSP.

De manera análoga a un osciloscopio analógico, un osciloscopio digital posee un ancho de banda específico para representar señales con exactitud. El límite superior del ancho de banda está condicionado por la frecuencia de muestreo del convertidor analógico a digital.

El fenómeno de *aliasing*, particularmente, puede constituir un desafío significativo para los osciloscopios digitales. Si la base temporal y la tasa de muestreo resultan insuficientes para una señal específica o si una señal presenta una frecuencia excesiva para el ADC del osciloscopio, aparecerá una imagen distorsionada de baja frecuencia de la señal de entrada en la pantalla del dispositivo, siendo interpretada como una señal real. Para prevenir el *aliasing*, es fundamental impedir que las señales con frecuencias elevadas alcancen la entrada del ADC.

Los osciloscopios implementan filtros pasa bajos *anti-aliasing* para eliminar estas señales. Esto restringe el ancho de banda práctico libre de *aliasing* de un osciloscopio digital a un valor ligeramente inferior a la mitad de la tasa de muestreo.

El osciloscopio digital puede ejecutar múltiples funciones de forma automática que un usuario de osciloscopio analógico debe realizar manualmente. Por ejemplo, tras capturar una traza, la base temporal puede expandirse para "acercarse" a una característica de la señal o contraerse para visualizar una porción más amplia. Otras funciones realizadas digitalmente comprenden mediciones automáticas de amplitud y frecuencia, etiquetado de trazas, almacenamiento y recuperación de trazas, y una operación de disparo significativamente mejorada.

Las modalidades habituales de disparadores incluyen los disparadores por flanco, donde el barrido se reinicia cada vez que detecta un nivel de tensión y pendiente especificados (ascendente o descendente), y los disparadores por pulso o por ancho que reinician el barrido fundamentándose en tensión y tiempo, permitiendo observar ondas extremadamente breves o prolongadas. Un disparador de línea se activa a partir de la tensión que alimenta al osciloscopio, lo cual debería proporcionar una forma de onda estable, facilitando la visualización del rizado y el ruido.

6.10.2 Analizador de espectro

DOMINIOS DE TIEMPO Y FRECUENCIA

Un osciloscopio representa gráficamente las señales en el plano temporal, donde la amplitud se despliega en el eje vertical y la dimensión temporal en el eje horizontal. Un analizador de espectro presenta una configuración muy semejante a un osciloscopio, pero exhibe la frecuencia de la señal en el eje horizontal en lugar del tiempo.

Representar la amplitud en relación con la frecuencia corresponde al dominio frecuencial. Este tipo de medición resulta particularmente útil cuando se evalúa el contenido de frecuencia de señales procedentes de amplificadores, osciladores, detectores, moduladores, mezcladores y dispositivos de filtrado.

Para comprender con mayor profundidad los conceptos de los dominios temporales y frecuenciales, se recomienda consultar la Figura 244. En (A), las coordenadas tridimensionales representan el tiempo (como línea inclinada hacia el sector inferior derecho), la frecuencia (como línea inclinada hacia el sector superior derecho) y la amplitud (como eje vertical). Las frecuencias de señal mostradas presentan una relación armónica (f_1 y $2f_1$).

El dominio temporal se ilustra en la (B), donde ambas señales se presentan simultáneamente. Si las dos señales se aplicaran al punto de entrada de un osciloscopio, se observaría la línea gruesa que representa las amplitudes de las señales combinadas.

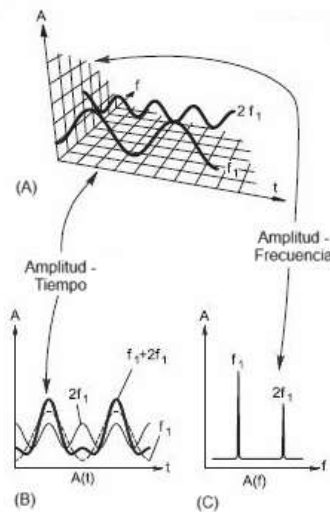


Figura 244. Dominio de tiempo y frecuencia. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La representación en (C) es característica de una exhibición de un analizador de espectro correspondiente a una señal de onda compleja. En este contexto, las señales se descomponen en sus componentes frecuenciales individuales, efectuándose una medición de la amplitud de cada señal. La amplitud de una señal puede representarse en el eje vertical del analizador de espectro mediante su tensión o su potencia.

El dominio de la frecuencia contiene información que no se encuentra en el dominio temporal, y recíprocamente. Por consiguiente, el analizador de espectro proporciona ventajas respecto al osciloscopio para determinadas mediciones, aunque para mediciones en el dominio temporal, el osciloscopio resulta un instrumento irremplazable.

ESPECTROS DE FORMAS DE ONDA

El análisis de Fourier constituye un procedimiento matemático para examinar formas de onda de corriente alterna. Descompone o fragmenta una forma de onda en ondas seno y coseno de una frecuencia fundamental y frecuencias armónicas. A modo de ejemplo, analizar una onda seno distorsionada podría revelar que está conformada por una onda seno en cierta frecuencia fundamental más una segunda armónica con una amplitud ligeramente inferior. Dicha información facilitaría al diseñador del circuito modificar o ajustar su funcionamiento para minimizar la armónica no deseada.

Un analizador de espectro ejecuta análisis de Fourier ya sea mediante electrónica analógica según se describe en las siguientes secciones o digitalizando la señal de entrada y realizando el análisis en los datos digitales resultantes.

ONDAS CUADRADAS

Una onda cuadrada se caracteriza por su transición abrupta y alternante entre dos niveles de tensión, permaneciendo un período de tiempo idéntico en cada uno de estos estados, tal como se ilustra en la Figura 245. (Si la onda permanece durante intervalos desiguales en cada nivel, se denomina onda rectangular). El análisis de Fourier revela que la onda cuadrada está conformada por una onda sinusoidal en la frecuencia fundamental de la onda cuadrada, junto con todos sus armónicos impares, como se representa en dicha Figura. Este fenómeno puede ser observado de manera directa mediante la utilización de un analizador de espectro.

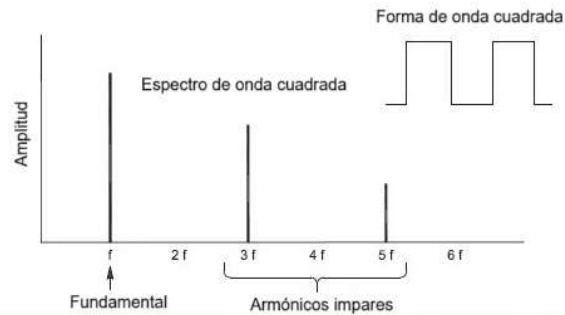


Figura 245. Onda cuadrada vista en un analizador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

ONDAS DIENTE DE SIERRA

Una morfología de onda dentada, tal como se ilustra en la Figura 246, presenta un intervalo de ascenso notablemente más acelerado (el período que transcurre hasta alcanzar su valor máximo) en comparación con su intervalo de descenso (el lapso que tarda en alcanzar su valor mínimo). La configuración de onda dentada está integrada por una onda sinusoidal en su frecuencia primaria y la totalidad de sus componentes armónicas, según se representa. La tipología de onda rampa resulta análoga a la de diente de sierra, aunque con un tiempo de elevación pausado (la rampa) y un tiempo de descenso súbito.

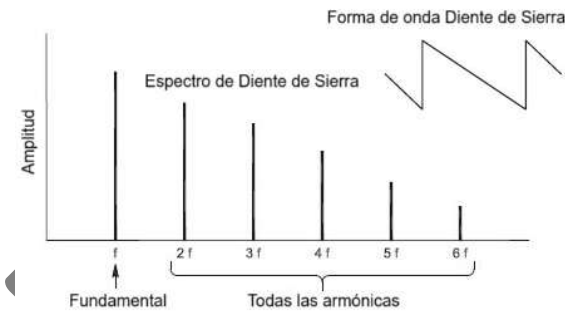


Figura 246. Onda diente de sierra vista en un analizador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

FUNDAMENTOS DEL ANALIZADOR DE ESPECTRO

De manera similar a los osciloscopios, la tecnología digital está progresivamente desplazando los diseños analógicos, si bien numerosos analizadores de espectro analógicos continúan siendo empleados por radioaficionados. Los analizadores digitales y analógicos comparten conceptualizaciones y terminología equivalentes. Un esquema de bloques simplificado de un analizador barrido superheterodino fundamentado en CRT (tubo de rayos catódicos) se presenta en la Figura 247. Los analizadores digitales se estructuran de manera análoga a un SDR. El espectro de la señal digitalizada se examina y despliega en una pantalla de tipo computacional. Al igual que con los osciloscopios, se utilizará la terminología analógica, destacando cualquier divergencia con los analizadores digitales.

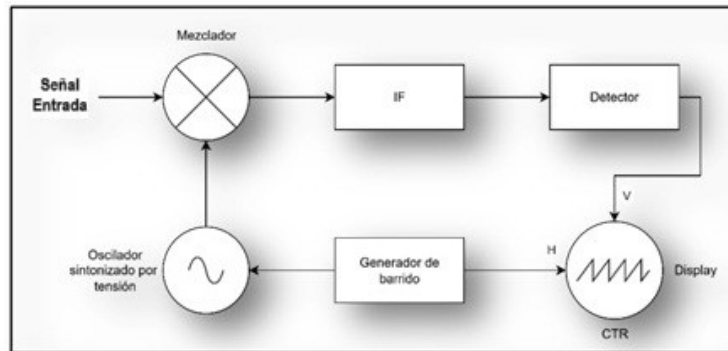


Figura 247. Diagrama de bloques del analizador. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

El analizador constituye esencialmente un receptor de estrecho ancho de banda con una frecuencia que se sintoniza electrónicamente. La sintonización se consigue mediante la aplicación de una tensión de rampa lineal a un oscilador gobernado por tensión (VCO, por sus siglas en inglés) o utilizando un microprocesador para dirigir un oscilador controlado numéricamente (NCO, por sus siglas en inglés). La misma tensión de rampa o función regula simultáneamente la posición horizontal en la pantalla. Esto implica que el eje horizontal del analizador de espectro representa la frecuencia mientras que el eje vertical exhibe la amplitud de la señal.

La representación resultante del analizador de espectro despliega la amplitud en relación con la frecuencia.

Los analizadores de espectro se encuentran calibrados tanto en frecuencia como en amplitud para mediciones relativas y absolutas. El control de frecuencia central ajusta el punto medio del rango explorado por el receptor. El control de anchura de barrido está graduado en hercios, kilohercios o megahercios por división en la retícula y determina cuánto se sintoniza el receptor en cada lado de la frecuencia central. Por ejemplo, si la frecuencia central se establece en 146 MHz y la anchura de barrido del eje horizontal de 10 divisiones se fija en 100 kHz por división, el receptor se sintonizará a través de un intervalo de 1 MHz, desde 145,500 MHz hasta 146,500 MHz. El eje vertical de la pantalla comúnmente está calibrado como 1 dB, 2 dB o 10 dB por división. (También existen escalas lineales en V/división, aunque se utilizan con menor frecuencia). Para evaluaciones de transmisores, se emplea habitualmente 10 dB/div porque permite visualizar una amplia gama de niveles de señal, como los correspondientes a la señal fundamental, armónicos y señales espurias.

PRUEBAS DE TRANSMISORES CON UN ANALIZADOR DE ESPECTRO

Entre otros usos prácticos, el analizador de espectro resulta idóneo para verificar la salida de un transmisor o amplificador en términos de calidad espectral. Dentro de los límites del receptor, es posible someter a prueba un transmisor en cualquier rango de frecuencia.

Ya sea que se esté evaluando un transmisor de HF o de VHF, el analizador de espectro revela todos los componentes de frecuencia de la señal transmitida. Se pueden identificar fácilmente cualesquiera señales espurias del transmisor en la visualización del analizador de espectro.

La Figura 248 ilustra dos configuraciones de prueba comúnmente utilizadas para evaluaciones de transmisores. La configuración en (B) representa el enfoque más preciso para mediciones de banda ancha debido a que la mayoría de los dispositivos de muestreo de potencia de línea de transmisión carecen de una salida de amplitud constante a través de un espectro de frecuencia extenso.

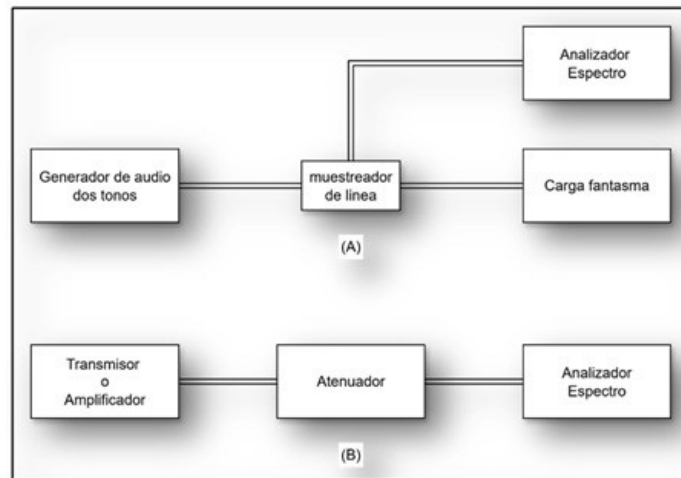


Figura 248. Configuraciones de pruebas de transmisores. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Otra zona de inquietud respecto a la pureza espectral del transmisor se relaciona con los niveles de distorsión por intermodulación (IMD) de transmisores y amplificadores SSB. La disposición experimental en la Figura 249 ilustra el procedimiento para evaluar la IMD de transmisores SSB mediante un analizador de espectro.

Inicialmente, se calibra el transmisor para generar la salida PEP total utilizando una única señal tonal de audio. Posteriormente, se introducen dos tonos auditivos de amplitud equivalente, pero sin relación armónica, en el transmisor y se examina la señal de radiofrecuencia resultante a través del analizador de espectro.

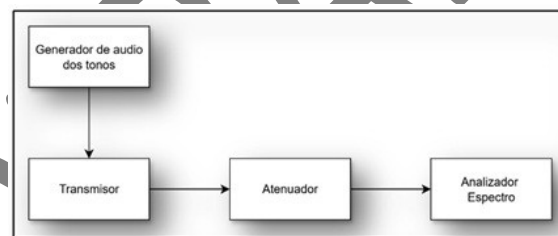


Figura 249. Analizador de espectro para pruebas IMD. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La Figura 250 presenta una representación gráfica característica durante una evaluación de IMD del transmisor. Los componentes espectrales que no derivan de los dos tonos individuales (los máximos prominentes en el centro de la pantalla) constituyen productos de distorsión.

En esta ilustración, los productos de IMD se detectan aproximadamente a 28, 47 y 52 decibelios por debajo del nivel de salida PEP de un único tono del transmisor, el cual se ubica en la línea superior de la pantalla. Las bandas laterales de los dos tonos de entrada se sitúan 6 decibelios por debajo de la salida PEP.

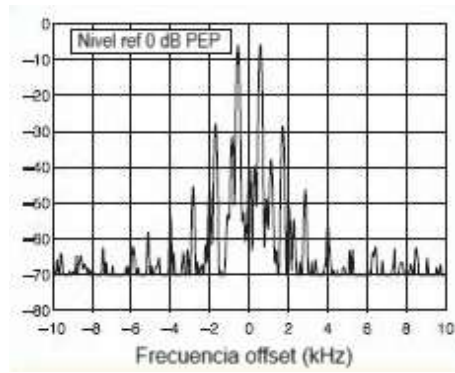


Figura 250. Visualización típica durante las pruebas de IMD. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

BORRADOR

Capítulo 7 Métodos de comunicación entre radioaficionados

COMUNICARSE CON OTROS RADIOAFICIONADOS

Tras haber adquirido conocimientos sustanciales sobre plataformas, electrónica y propagación radioeléctrica, se ha consolidado un amplio dominio tecnológico en el ámbito radial. En esta sección se abordará la operación práctica: los mecanismos de establecimiento de contactos y su naturaleza.

Este segmento del documento se enfoca en las "prácticas óptimas de radioaficionados". Dado que las administraciones presentan pocas normativas sobre procedimientos operativos, los propios aficionados han desarrollado un código de conducta propio. Dichas prácticas han demostrado ser eficaces, por lo que resulta fundamental aprenderlas y aplicarlas para convertirse en un comunicador competente. La comunidad de radioaficionados espera que se adhieran rigurosamente a estos protocolos, de manera similar a las convenciones sociales cotidianas.

Se iniciará el estudio examinando la práctica de radioafición mediante repetidores y actividades estructuradas denominadas "redes", con especial énfasis en situaciones de emergencia. El capítulo concluirá explorando algunas de las múltiples actividades especializadas en este campo.

7.1 Hacer contactos

Previamente a transmitir, es imperativo verificar la autorización para utilizar la frecuencia y modalidad específicas. Como titular de licencia, se dispondrá de privilegios completos en 50 MHz y superiores, si bien existen segmentos de banda con restricciones modales.

Esta sección detalla los procedimientos fundamentales para establecer contactos de radioaficionados. Aunque estos "protocolos radiales" son aplicables casi universalmente, la operación mediante repetidores presenta características particulares que serán abordadas posteriormente.

CONTACTOS REPETIDOS

Los repetidores funcionan frecuentemente como espacios de interacción social; cuentan con usuarios habituales y protocolos que facilitan el uso compartido. La observación constituye el método óptimo para su comprensión. Se presentan algunos principios generales:

- Mantener una escucha activa para conocer la actividad en curso
- Minimizar la duración de las transmisiones
- Identificar legalmente la estación; se recomienda identificación al inicio del contacto
- Introducir pausas breves entre transmisiones para permitir intervenciones

Al operar un repetidor, el operador asume la responsabilidad legal total. Como estación de control de origen, la responsabilidad recae íntegramente en el operador, no en el propietario del repetidor.

Dado que los repetidores generan señales potentes en frecuencias predeterminadas, no resulta necesario realizar transmisiones extensas para captar la atención. El método más simple consiste en emitir el indicativo de llamada seguido de "monitoring". Esta acción comunica disponibilidad para establecer contacto. Múltiples estaciones complementan esta práctica con frases adicionales: "W1AW está escuchando" o "W1AW disponible para contacto".

Las costumbres varían según la región e incluso entre repetidores, por lo que se recomienda observar inicialmente las prácticas locales. (Consejo fundamental: la escucha constituye el camino más seguro hacia la excelencia en radioafición)

Si se desea responder a una estación o comunicarse con un contacto conocido, aprovechése la potencia de señal del repetidor manteniendo la comunicación concisa. Basta con mencionar el

indicativo de llamada del interlocutor, seguido de “esto es” o “desde”, y proporcionar el propio indicativo.

¿Qué sucede si otro usuario está utilizando el repetidor y accidentalmente interrumpe su comunicación? No debe alarmarse, simplemente exprese “Lo siento, W1Aw Clear” y aguarde hasta que su interlocutor finalice o sintonice un repetidor alternativo.

¿Qué ocurre si recibe un informe indicando que la señal de audio es potente, pero presenta distorsión? Una estación ligeramente desalineada de la frecuencia será intensa, aunque distorsionada. Este fenómeno puede producirse cuando se manipula inadvertidamente una perilla o tecla de control de radio, modificando mínimamente la frecuencia. Si pulsar accidentalmente controles de radio es un problema recurrente (los equipos más compactos son especialmente susceptibles), se recomienda emplear la función de bloqueo para inhabilitar pulsaciones involuntarias.

Adicionalmente, podría estar generando una desviación excesiva al vociferar en el micrófono. Se sugiere modular con menor intensidad o mantener el dispositivo más distante de la boca. Eventualmente, podría estar transmitiendo desde una ubicación donde la señal experimenta distorsión al ingresar al repetidor. Las baterías con carga reducida también pueden provocar audio distorsionado.

CANALES SIMPLEX

Los repetidores ofrecen una cobertura tan extensa, ¿por qué un usuario no los utilizaría sistemáticamente? La amplia cobertura y potencia de señal son precisamente las razones por las cuales no siempre resulta apropiado emplearlos. Considerando que únicamente varios repetidores pueden compartir una banda en determinada región, los radioaficionados deben utilizarlos con prudencia.

Es sencillo acostumbrarse tanto al uso de repetidores que se omite considerar la comunicación directa o simple. De hecho, frecuentemente resulta bastante factible establecer contacto directo. Múltiples equipos poseen una función de inversión que altera las frecuencias de transmisión y recepción. Esto permite escuchar a la otra estación en la frecuencia de entrada del repetidor. Esta función habitualmente se etiqueta con revisores en transceptores FM.

Si usted y la estación contactada se encuentran mutuamente al alcance, ¿por qué no intentar comunicación simplex? Esto evita ocupar o “inmovilizar” un repetidor. Monitorear la frecuencia de entrada del repetidor resulta útil cuando una estación débil intenta acceder, pero carece de intensidad suficiente para activar el silenciador del repetidor. Si la estación débil está próxima, probablemente su señal sea más nítida que la del repetidor.

A continuación, se ilustra cómo transferir un contacto a frecuencia simplex:

- W1AW: “NK7U Este es W1AW, ¿estás en el repetidor esta mañana?”
- NK7U: “W1AW esto es NK7U. Sí, y eres fuerte en la entrada. Vamos a pasar a 146.55 simplex”.
- W1AW: “Ok, te encontraré en 146.55. W1AW Clear”.
- NK7U: “NK7U clear”

Los canales simplex están estratégicamente ubicados entre las bandas de canales de entrada y salida de repetidores. Por ejemplo, la frecuencia nacional de llamada simplex en 2 metros es 146,52 MHz y en 70 cm es 446,00 MHz. La antena utilizada para contactos con repetidor funcionará perfectamente también para simplex.

SSB, CW Y CONTACTOS DIGITALES

Establecer comunicaciones difiere en estos modos respecto a los repetidores con canales predeterminados. Para captar la atención de otras estaciones, es necesario realizar una convocatoria con suficiente duración para que otros operadores sintonicen la frecuencia y reconozcan el indicativo de llamada. Este procedimiento se efectúa mediante el llamado “CQ”.

CQ constituye una señal de procedimiento que literalmente significa "Convocando a cualquier estación".

La estación que inicia la llamada transmite o pronuncia "CQ" en múltiples ocasiones, seguido de su indicativo de llamada. La estructura sonora es la siguiente:

W1AW: "CQ CQ CQ, este es W1AW Whisky One Alfa Whisky convocando CQ y a la espera".

En CW o en modalidades digitales, la representación es:

W1AW: "CQ CQ CQ DE W1AW W1AW W1AW K"

DE significa "de" y la señal de procedimiento K indica que la transmisión ha concluido y el operador está preparado para recibir. K se emplea al finalizar cualquier tipo de transmisión, de manera similar a como "Over" se utiliza en comunicaciones telefónicas.

Previamente a realizar una convocatoria CQ, es imperativo cumplir tres condiciones fundamentales:

- Verificar que la frecuencia corresponda a los privilegios autorizados por su licencia.
- Realizar una escucha exhaustiva para confirmar que la frecuencia no esté siendo utilizada. Si no se detectan señales en un intervalo de cinco a diez segundos, probablemente la frecuencia esté disponible.
- Efectuar una transmisión breve consultando si la frecuencia está ocupada: una comunicación o actividad previa pudo haberse interrumpido o podría existir una estación transmisora no perceptible. Basta con preguntar: "¿La frecuencia está en uso?" seguido del propio indicativo de llamada.

Al igual que en contactos por repetidor, si accidentalmente se interfiere o se interrumpe otra comunicación, corresponde disculparse, proporcionar el indicativo de llamada y buscar una frecuencia alternativa o aguardar hasta que el canal quede libre.

Cuando se detecta una estación realizando una convocatoria CQ, responder resulta sencillo. Se menciona una vez el indicativo de la estación que convoca, seguido del propio indicativo (una o dos veces si la señal es nítida). Es crucial transmitir el indicativo con precisión para garantizar su comprensión ante posibles interferencias. Una respuesta típica podría estructurarse así:

N6ZFO: "W1AW, aquí November Six Zulu Foxtrot Oscar, November Six Zulu Foxtrot Oscar, cambio."

Se recomienda emplear fonética durante transmisiones por voz para asegurar la correcta interpretación del indicativo de llamada.

CÓDIGO Q

Las señales Q son un sistema de abreviaturas radiales tan antiguo como la comunicación inalámbrica y se desarrollaron a partir de códigos telegráficos aún más antiguos. Las señales Q son un conjunto de abreviaciones para información común que ahorran tiempo y permiten la comunicación entre operadores que no hablan un idioma común. La radioafición moderna las usa ampliamente. La

Tabla 26 enumera las señales Q más comunes utilizadas por los radioaficionados. Aunque las señales Q se desarrollaron para ser utilizadas por operadores de Morse, su uso también es común en comunicaciones por voz. A menudo escucharás: "¿QRZed?" cuando alguien pregunta "¿Quién me está llamando?" o "Estoy recibiendo un poco de QRM" de un operador que está experimentando interferencia, o "Vamos a QSY a 146.55" cuando dos operadores cambian de una frecuencia de repetidor a una frecuencia simplex cercana para comunicarse.

Tabla 26. Señales Q más comunes. (Adaptado de UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), 1995))

Código Q	Significado (pregunta)	Significado (afirmación)
QRA	¿Cuál es el nombre de su estación?	El nombre de mi estación es ____.
QRB	¿A qué distancia está de mi estación?	La distancia entre nuestras estaciones es ____ km.
QRD	¿Adónde va usted y de dónde viene?	Voy a ____ y vengo de ____.
QRE	¿A qué hora piensa llegar a ____ (o estar sobre ____) (sitio)?	Pienso llegar a ____ (o estar sobre ____) (sitio) a las ____ horas.
QRF	¿Vuelve a ____ (sitio)?	Sí; vuelvo a ____ (sitio). o Vuelva a ____ (sitio).
QRG	¿Puede indicarme mi frecuencia exacta (o la frecuencia exacta de ____)?	Su frecuencia exacta (o la frecuencia exacta de ____) es ____ kHz (o MHz).
QRH	¿Varía mi frecuencia?	Su frecuencia varía.
QRI	¿Cómo es el tono de mi emisión?	El tono de su emisión es ____. 1. bueno 2. variable 3. malo.
QRJ	¿Cuántas peticiones de conferencias radiotelefónicas tiene pendientes?	Tengo pendientes ____ peticiones de conferencias radiotelefónicas.
QRK	¿Cuál es la inteligibilidad de mi transmisión (o de la de ...) (nombre o distintivo de llamada o los dos)?	La inteligibilidad de su transmisión (o de la de ...) (nombre o distintivo de llamada o los dos) es ____. 1. mala 2. escasa 3. pasable 4. buena 5. excelente.
QRL	¿Está usted ocupado? (Usualmente se usa para preguntar si una frecuencia está ocupada)	Estoy ocupado (o estoy ocupado con ____) (nombre o distintivo de llamada o los dos). Le ruego no perturbe.
QRM	¿Está siendo interferida mi transmisión?	La interferencia de su transmisión es: ____. 1. nula 2. ligera 3. moderada 4. considerable 5. extremada.
QRN	¿Le perturban los atmosféricos?	Me perturban los atmosféricos: ____ 1. nada 2. ligeramente 3. moderadamente 4. considerablemente 5. extremadamente.
QRO	¿Debo aumentar la potencia de transmisión?	Aumenta la potencia de transmisión.
QRP	¿Debo disminuir la potencia de transmisión?	Disminuye la potencia de transmisión.
QRQ	¿Debo transmitir más de prisa?	Transmita más de prisa (____ palabras por minuto).
QRR	¿Está usted preparado para operar automáticamente?	Estoy preparado para operar automáticamente. Transmita a ____ palabras por minuto.
QRS	¿Debo transmitir más despacio?	Transmita más despacio (____ palabras por minuto).
QRT	¿Debo cesar de transmitir?	Cese de transmitir.
QRU	¿Tiene algo para mí?	No tengo nada para usted.
QRV	¿Está usted preparado?	Estoy preparado.
QRW	¿Debo avisar a ____ que le llama usted en ____ kHz (o MHz)?	Le ruego avise a ____ que le llamo en ____ kHz (o MHz).

Código Q	Significado (pregunta)	Significado (afirmación)
QRX	¿Cuándo volverá a llamarme?	Le volveré a llamar a las __ horas en __ kHz (o MHz).
QRY	¿Qué turno tengo? (En relación con las comunicaciones.)	Su turno es el número __ (o cualquier otra indicación). (En relación con las comunicaciones.)
QRZ	¿Quién me llama?	Le llama __ (en kHz (o MHz)).
QSA	¿Cuál es la intensidad de mis señales (o de las señales de __) (nombre o distintivo de llamada o los dos)?	La intensidad de sus señales (o de las señales de __) (nombre o distintivo de llamada o los dos) es: __ 1. apenas perceptible 2. débil 3. bastante buena 4. buena 5. muy buena.
QSB	¿Varía la intensidad de mis señales?	La intensidad de sus señales varía.
QSD	¿Están mis señales mutiladas?	Sus señales están mutiladas.
QSK	¿Puede usted oírme entre sus señales y, en caso afirmativo, puedo interrumpirle en su transmisión?	Puedo oírle entre mis señales; puede interrumpirme en mi transmisión.
QSL	¿Puede acusarme recibo?	Le acuso recibo.
QSN	¿Me ha oído usted (o ha oído usted a __ (nombre o distintivo de llamada o los dos)) en __ kHz (o MHz)?	Le he oído (o he oído a ... (nombre o distintivo de llamada o los dos)) en ... kHz (o MHz).
QSO	¿Puede usted comunicar directamente (o por relevador) con __ (nombre o distintivo de llamada o los dos)?	Puedo comunicar directamente (o por medio de __) con __ (nombre o distintivo de llamada o los dos).
QSP	¿Quiere retransmitir gratuitamente a __ (nombre o distintivo de llamada o los dos)?	Retransmitiré gratuitamente a __ (nombre o distintivo de llamada o los dos).
QSR	¿Tengo que repetir la llamada en la frecuencia de llamada?	Repita la llamada en frecuencia de llamada; no le oí (o hay interferencia).
QSS	¿Qué frecuencia de trabajo utilizará usted?	Utilizaré la frecuencia de trabajo de __ kHz (o MHz). (En ondas decamétricas normalmente sólo es necesario indicar las tres últimas cifras de la frecuencia.)
QSU	¿Debo transmitir o responder en esta frecuencia (o en __ kHz (o MHz)) (en emisión de clase __)?	Transmita o responda en esta frecuencia (o en __ kHz (o MHz)) (en emisión de clase __).
QSW	¿Quiere transmitir en esta frecuencia (o en __ kHz (o MHz)) (en emisión de clase __)?	Voy a transmitir en esta frecuencia (o en __ kHz (o MHz)) (en emisión de clase __).
QSX	¿Quiere escuchar a __ (nombre o distintivo de llamada o los dos) en __ kHz (o MHz) o en las bandas __/canales __?	Escucho a __ (nombre o distintivo de llamada o los dos) en __ kHz (o MHz) o en las bandas __/canales __.
QSY	¿Tengo que pasar a transmitir en otra frecuencia?	Transmita en otra frecuencia (o en __ kHz (o MHz)).
QSZ	¿Tengo que transmitir cada palabra o grupo varias veces?	Transmita cada palabra o grupo dos veces (o __ veces).

Código Q	Significado (pregunta)	Significado (afirmación)
QTH	¿Cuál es su situación en latitud y en longitud (o según cualquier otra indicación)?	Mi situación es ____ de latitud, ____ de longitud (o según cualquier otra indicación).
QTR	¿Qué hora es, exactamente?	La hora exacta es ____.
QTU	¿A qué horas está abierta su estación?	Mi estación está abierta de ____ a ____ horas.
QTX	¿Quiere usted mantener su estación dispuesta para comunicar conmigo de nuevo, hasta que yo le avise (o hasta ____ horas)?	Mi estación permanecerá dispuesta para comunicar con usted, hasta que me avise (o hasta ____ horas).
QUA	¿Tiene noticias de ... (nombre o distintivo de llamada o los dos)?	Le envío noticias de ... (nombre o distintivo de llamada o los dos).
QUC	¿Cuál es el número (u otra indicación) del último mensaje mío (o de ____ (nombre o distintivo de llamada o los dos)) que ha recibido usted?	El número (u otra indicación) del último mensaje que recibí de usted (o de ____ (nombre o distintivo de llamada o los dos)) es ____.
QUD	¿Ha recibido la señal de urgencia transmitida por ____ (nombre o distintivo de llamada o los dos)?	He recibido la señal de urgencia transmitida por ____ (nombre o distintivo de llamada o los dos) a las ____ horas.
QUE	¿Puede hablar en ____ (idioma), por medio de un intérprete en caso necesario? Si así fuese, ¿en qué frecuencias?	Puedo hablar en ____ (idioma) en ____ kHz (o MHz).
QUF	¿Ha recibido la señal de socorro transmitida por ____ (nombre o distintivo de llamada o los dos)?	He recibido la señal de socorro transmitida por ____ (nombre o distintivo de llamada o los dos) a las ____ horas.

DXING Y COMPETENCIAS

Desde los albores de la radiodifusión, incluso antes de la aparición de los entusiastas, los operadores se dedicaron a establecer comunicaciones a distancias progresivamente más extensas. Resulta estimulante comprobar si las estaciones logran percibir tu señal y captar transmisiones procedentes de todo el panorama circundante.

Esta práctica se denomina DXing, donde DX representa “estación lejana”. La distancia posee un carácter relativo. DX implica miles de millas en HF y ocasionalmente 6 metros. En VHF/UHF, cualquier comunicación que trascienda el horizonte radioeléctrico se considera DX. Los operadores de microondas exploran emplazamientos con perspectivas despejadas para concretar contactos de considerable extensión. La realización de contactos DX se optimiza mediante SSB o CW debido a la eficiencia de dichos modos.

VIDEO

Los radioaficionados disponen de dos medios primordiales para intercambiar imágenes o videos en tiempo real, además de transferir archivos de datos gráficos. Estos son modos de imagen que se utilizan en idénticos segmentos de banda que las señales de voz. Es posible localizar entusiastas de la televisión amateur (ATV) en bandas UHF a 430 MHz y superiores. Debido a la amplitud del ancho de banda de la señal (6 MHz), el modo queda restringido a bandas UHF extensas. Los aficionados transmiten señales de TV analógicas y digitales. Las señales de televisión en color de escaneo rápido NTSC (Comité Nacional del Sistema de Televisión) son equivalentes a las señales de televisión de transmisión analógica. (Las señales analógicas NTSC

han dejado de emplearse en televisión de transmisión, que actualmente es completamente digital).

7.2 Uso de repetidores

Como técnico autorizado, es probable que establezca comunicaciones mediante un repetidor. Dado que múltiples aficionados pueden interceptar las señales de repetición, los contactos a través de estos dispositivos presentan procedimientos operativos específicos que difieren de las comunicaciones SSB, CW y digitales.

LOCALIZACIÓN DE REPETIDORES

Para identificar todos los repetidores en su zona, será necesario contar con un listado organizado geográficamente, o alguna fuente informativa como un boletín de club. Las frecuencias de los repetidores se distribuyen uniformemente en canales, lo que permite conocer con precisión la frecuencia correspondiente al seleccionar o detectar un repetidor. Adicionalmente, puede utilizar la función de exploración de su equipo de radio para detectar actividad en canales Repeater o Simplex.

Si se percibe un repetidor, ¿cómo determinar su identidad? Mediante una escucha prolongada, es posible percibir una voz automatizada que anuncia un indicativo de llamada y potencialmente información adicional, como ubicación o timestamp. Esta identificación permite realizar una búsqueda en línea del indicativo con absoluta certeza sobre su localización. El repetidor también podría transmitir su identificación mediante código Morse, práctica muy común que constituye una excelente razón para conocer este sistema de comunicación, independientemente de su uso directo para establecer contactos.

Una vez localizado un repetidor activo, para acceder será fundamental conocer tres aspectos: la frecuencia de salida del transmisor del repetidor, la frecuencia de entrada de su receptor y la frecuencia de cualquier tono de control de acceso.

DESPLAZAMIENTO O CAMBIO DE REPETIDOR

Inicialmente, consideremos la frecuencia de salida del repetidor. Esta corresponde a la frecuencia donde se recibe la señal transmitida. Los radioaficionados suelen expresarlo como: “Nos encontramos en la máquina 443,50” o “pasamos al repetidor 94”. (El término máquina constituye una expresión coloquial para referirse al repetidor). “94” significa 146,94 MHz, una frecuencia de canal de salida de repetidor estándar. Para receptar el repetidor, debe sintonizarse su frecuencia de salida.

Para transmitir una señal a través del repetidor, será necesario utilizar la frecuencia de entrada donde se ubica su receptor. Para evitar el caos derivado de separaciones arbitrarias entre frecuencias, los radioaficionados han establecido separaciones estándar. La diferencia entre frecuencias de entrada y salida se denomina desplazamiento o cambio del repetidor. Este cambio resulta prácticamente uniforme para casi todos los repetidores en una banda, según se muestra en la Tabla 27. Cuando la frecuencia de entrada supera la frecuencia de salida, se denomina desplazamiento positivo. Los desplazamientos negativos sitúan la frecuencia de entrada por debajo de la frecuencia de salida.

Tabla 27. Desplazamiento estándar de repetidores. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Banda	Desplazamiento estándar del repetidor
10 metros	−100 kHz
6 metros	Varía por región: −500 kHz, −1 MHz, −1.7 MHz
2 metros	+ o −600 kHz
1,25 metros	−1.6 MHz
70 cm	+ o −5 MHz
902 MHz	12 MHz
1296 MHz	12 MHz

En lugar de tener que memorizar dos frecuencias, emplear un desplazamiento estándar permite al usuario recordar únicamente la frecuencia de salida del repetidor. La configuración de cambio o compensación, o bien la parametrización del menú en el equipo de radio, posibilita alternar entre desplazamientos positivos y negativos, o bien ningún desplazamiento para implementar comunicaciones simplex. Es altamente probable que el dispositivo de radio ya esté preconfigurado para utilizar el desplazamiento estándar en cada banda, comúnmente denominado desplazamiento de repetidor automático, compensación de repetidor automático o una denominación similar. El manual de instrucciones proporcionará directrices exhaustivas para modificar la dirección y la magnitud del desplazamiento.

SISTEMAS DE REPETIDORES VINCULADOS

Para ampliar su alcance y captar señales obstruidas por accidentes geográficos, los repetidores ocasionalmente incorporan receptores remotos. Las señales de estos receptores son transmitidas por una estación auxiliar hacia el sitio del transmisor del repetidor para su retransmisión.

Los repetidores pueden igualmente estar interconectados entre sí. Es decir, comparten recíprocamente las señales que cada uno recepta y las retransmite. Esto expande la cobertura de cualquier repetidor individual. Resulta habitual que los repetidores retransmitan señales en bandas alternativas. Por ejemplo, un repetidor de 2 metros vinculado a un repetidor de 70 cm permite que las estaciones de cualquiera de las bandas establezcan comunicación. Si los repetidores están emplazados, significando ubicados en idéntica localización, pueden conectarse físicamente mediante cables. En caso contrario, se requiere un enlace de control.

TONOS DE ACCESO AL REPETIDOR

La mayoría de los repetidores no transmitirán una señal del receptor al transmisor para su retransmisión a menos que contenga un tono específico. El tono corresponde a una de 38 frecuencias diferentes, todas inferiores a 300 Hz. Cada repetidor puede poseer un tono diferenciado. El tono indica al repetidor que su señal está destinada específicamente a él y debe ser retransmitida.

Motorola desarrolló los tonos de acceso al repetidor para permitir que distintos usuarios comerciales compartan un repetidor sin necesidad de escuchar las conversaciones ajenas. Estos tonos son conocidos mediante diversas denominaciones: sistema de silenciamiento codificado por tono continuo (CTCSS), PL (para línea privada, denominación comercial de Motorola) o sub-audible. Los usuarios de radio FRS/GMRS reconocen estos tonos como códigos de privacidad o tonos de privacidad.

Si se logra escuchar la señal de un repetidor y se está seguro de que utiliza el desplazamiento correcto, pero no se puede acceder al repetidor, probablemente el equipo de radio no esté configurado para emplear el tipo o la frecuencia correcta del tono de acceso.

SISTEMAS DE REPETIDOR DIGITAL

La radioafición y la red telemática presentan beneficios que se complementan mutuamente. Los radioaficionados pueden moverse con total libertad, empleando repetidores desde un automotor, en su domicilio o de manera peatonal. La plataforma web ofrece una conexión de elevada velocidad entre dos puntos — prácticamente en cualquier ubicación del planeta. Resulta completamente natural integrar ambas tecnologías, y diversos sistemas ejecutan precisamente esa función:

- IRLP (Internet Radio Linking Project)
- EchoLink
- WIRES II — un sistema exclusivo de la corporación Yaesu
- D-STAR — un sistema fundamentado en el estándar público D-STAR
- DMR — Radio Móvil Digital (Digital Mobile Radio)

Los dos sistemas más antiguos interconectados digitalmente son IRLP y Echolink. Ambos implementan la tecnología VoIP (Voice Over Internet Protocol) para enlazar los repetidores según se representa en la Figura 251. Los proveedores de servicios telefónicos en línea, como Skype, utilizan VoIP para transmitir comunicaciones vocales a través de la red mundial mediante técnicas digitales.

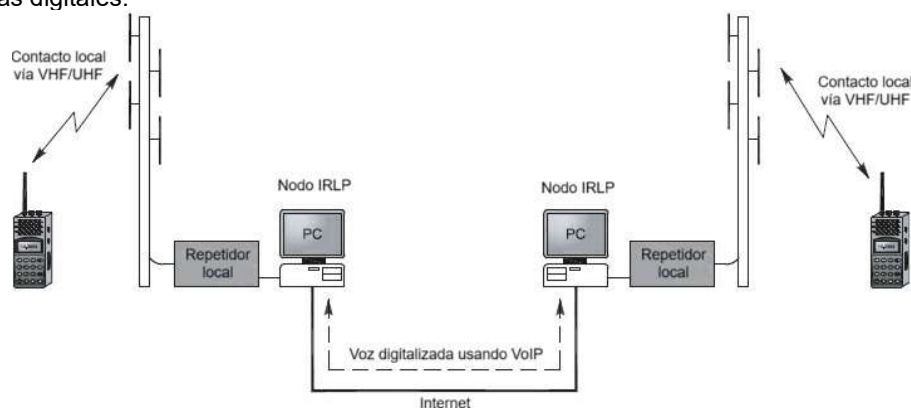


Figura 251. IRLP y Echolink vinculados usando VoIP. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Cada elemento de transmisión en una infraestructura de repetición VoIP recibe la denominación de nodo. Tales componentes se registran en catálogos de repetidores, formalizando su inscripción mediante servicios de listado en línea o directorios administrados por coordinadores especializados.

La distinción fundamental entre IRLP y Echolink radica en que IRLP exige que toda la señal acústica se transmita al sistema exclusivamente a través de un enlace radioeléctrico. (IRLP posibilita que un usuario de computadora personal pueda escuchar las comunicaciones). Esto implica que únicamente los radioaficionados con licencia vigente pueden utilizar repetidores vinculados por IRLP. Echolink, por su parte, permite que la señal de audio provenga directamente de una computadora personal y un micrófono, eliminando la necesidad de equipamiento radioeléctrico, aunque requiere que los radioaficionados remitan una copia de su licencia a los administradores del sistema Echolink para obtener la correspondiente autorización.

Wires II implementa un protocolo de voz propietario desarrollado por el fabricante de equipos radioeléctricos Yaesu. El sistema D-Star integra comunicaciones digitales de voz y datos. El estándar D-Star fue concebido por Japan Amateur Radio League (JARL) y actualmente se encuentra implementado en equipamiento producido por ICOM y Kenwood.

El sistema DMR fue concebido originalmente para servicios de radiocomunicación móvil terrestre. En su transmisión, DMR representa una técnica de multiplexación temporal de dos señales vocales digitales en un único canal repetidor de 12.5 kHz. La señal vocal digitalizada es enrutada mediante un controlador de red central hacia otros repetidores DMR a través de infraestructura internet. El controlador estructura a los usuarios de la red DMR en agrupaciones conversacionales. Cada grupo de comunicación posee una identificación o código específico. Mediante la programación del equipo radioeléctrico con tales identificadores, el usuario puede integrarse al grupo, permitiendo que su audio sea compartido con el resto de los integrantes.

Un transceptor DMR requiere una configuración exhaustiva que incluya frecuencias, identificadores y códigos para su operatividad. Dicha información se concentra en un archivo informático denominado code plug, término heredado de épocas donde se requería la conexión física de componentes especializados. En la actualidad, existe software especializado para la transferencia digital de archivos code plug a equipos radioeléctricos. No resulta indispensable adquirir equipamiento independiente para cada sistema de voz digital. Múltiples radioaficionados utilizan un hot spot que interconecta su transceptor personal digitalmente a internet. Una conexión telemática se establece mediante software del hot spot con el sistema de voz digital de interés.

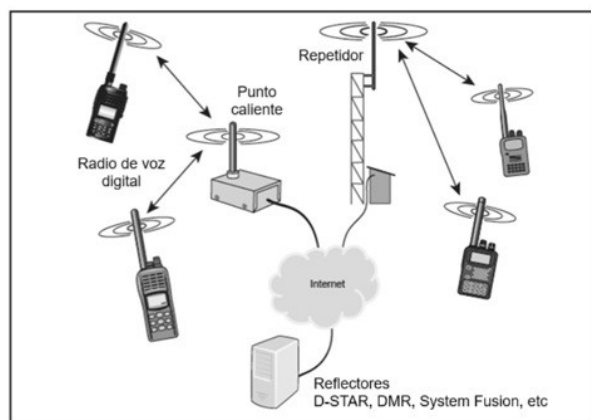


Figura 252. Conectar un transceptor de modo digital a internet. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Los sistemas de repetidores digitales como WIRES II/System Fusion, D-STAR, DMR, P25 y NXDN implementan todos mecanismos de agrupaciones conversacionales (talk groups) de diversas maneras. Para incorporarse a una agrupación conversacional, será necesario conocer el código o número identificador del colectivo. Al ingresar o seleccionar dicho código en el transceptor, el sistema de repetidor establecerá la conexión con cualquier comunicación en desarrollo dentro de ese grupo.

Adicionalmente al grupo conversacional, será preciso registrar el propio código de identificación en el transceptor para que el sistema pueda reconocer al usuario. Como ejemplo ilustrativo, en el sistema D-STAR, el distintivo de llamada debe estar previamente programado en el transceptor para poder realizar transmisiones.

7.3 Redes

Se encontrarán referencias frecuentes a las redes en la radioaficionado. Originadas en los primeros períodos de la radio, estas redes facilitaron que las estaciones se congregaran en el aire para intercambiar información y comunicaciones. La red contemporánea, actualmente vinculada con sistemas computacionales, representa un descendiente directo de la red radiofónica y emplea numerosos términos y conceptos similares. Existen múltiples redes disponibles para el licenciatario técnico. Esta sección se concentrará en aquellas redes que respaldan comunicaciones de emergencia y actividades de servicio público.

Los radioaficionados coordinan sus estrategias de respuesta ante emergencias mediante redes que se activan cuando resulta necesario. En zonas donde fenómenos meteorológicos extremos son habituales, por ejemplo, las redes monitorean condiciones climáticas previas a tormentas y colaboran en la recuperación tras los daños provocados.

Estas redes generalmente persiguen dos objetivos fundamentales: transmitir mensajes de emergencia y coordinar actividades de informes y respuesta. Los mensajes posteriores a una estructura formal se denominan tráfico. Dichos mensajes incorporan información de enrutamiento para garantizar su destino correcto. Procedimientos adicionales aseguran la transferencia precisa del contenido. El proceso de intercambio de estos mensajes se conoce como manejo del tráfico.

Entre activaciones, las redes de emergencia se movilizan para práctica y realización de ejercicios de entrenamiento. Ese es el momento ideal para aprender procedimientos, no después de producirse desastres. Su equipo de servicio público proporcionará toda la información necesaria para comprender cómo participar.

Como método para perfeccionar habilidades y prestar servicio simultáneamente, los radioaficionados también facilitan comunicaciones en eventos públicos, como festivales, desfiles o competencias deportivas. Estas actividades de servicio público se organizan tanto en terreno

como en transmisiones, tal como se requeriría en una respuesta ante desastres. Existe la posibilidad de ofrecerse como voluntario en estos eventos. De esta manera es como muchos radioaficionados se han convertido en operadores especializados en respuesta a emergencias.

ESTRUCTURA Y PARTICIPACIÓN EN REDES

Para lograr una participación efectiva, resulta fundamental comprender la organización de una red de comunicaciones. Es primordial conocer los procedimientos y señales habituales. Conviene tener presente que independientemente del propósito o condición de la red, una estación con tráfico de emergencia debe poder ingresar en cualquier momento. Si la red opera telefónicamente y se requiere informar una emergencia, el ingreso debe realizarse expresando prioridad o emergencia, seguido del indicativo de llamada. La estación de control neta (NCS, por sus siglas en inglés) que administra la red y sus miembros deberán suspender inmediatamente cualquier operación de menor prioridad y responder a la emergencia.

Una vez registrada formalmente una red bajo la dirección de un NCS, es crucial no interrumpir su funcionamiento. No se debe transmitir a menos que se solicite o autorice específicamente o se requiera una petición de capacidades o información que se pueda proporcionar.

INTERCAMBIO DE MENSAJES

Es habitual que los mensajes se estructuren como radiogramas. Otro formato de mensaje ampliamente utilizado es el ICS-213, que forma parte de los procedimientos operativos estándar del sistema de comando de incidentes. La evaluación se enfoca en el radiograma, aunque reglas y definiciones similares aplican al ICS-213.

Un radiograma contiene tres componentes: el preámbulo (que incluye la dirección), el cuerpo y la firma.

El preámbulo está constituido por diversos elementos informativos relacionados con el mensaje. Estos componentes establecen una identificación singular para cada comunicación, permitiendo su gestión y seguimiento adecuado mientras transita por el sistema de administración del tráfico de radio aficionado.

- Número: identificador numérico único asignado por la estación que genera el radiograma
- Precedencia: descripción que caracteriza la naturaleza del radiograma: rutina, prioridad, emergencia y bienestar
- Instrucciones de manejo (HX): directrices especiales para el procesamiento del radiograma
- Estación de origen: indicativo de llamada de la estación de radio desde donde se transmitió originalmente el radiograma por radioaficionados. (Esto facilita la devolución de información al punto de emisión inicial).
- Verifique: conteo de palabras y equivalentes presentes en el texto del radiograma
- Lugar de origen: denominación de la localidad donde se originó el radiograma
- Hora y fecha: momento temporal y data de recepción del radiograma en la estación transmisora original
- Dirección: información completa del destinatario, incluyendo nombre completo, dirección postal, ciudad y estado

Posteriormente al preámbulo se ubica el texto del radiograma. Es fundamental garantizar que la estación receptora reproduzca el mensaje con absoluta precisión. Por ejemplo, los nombres propios (como "Miguel Vargas") y términos poco comunes (como denominaciones de materiales o identificadores de modelo) se explican mediante fonética estándar.

7.4 Comunicaciones para el servicio público

Afortunadamente, los siniestros y situaciones críticas de gran magnitud son infrecuentes. Con mayor regularidad, los radioaficionados prestan servicios de comunicación en respaldo de acontecimientos públicos como marchas o competencias atléticas. Todas estas actividades se clasifican dentro de comunicaciones de servicio público.

No aguarde a que acontezca una contingencia real para involucrarse en servicio público. Representa un magnífico ejercicio de los privilegios de su licencia y brinda una extraordinaria oportunidad de entrenamiento para perfeccionar diversas habilidades comunicacionales.

Esta sección comprende abundante material de apoyo no vinculado directamente con los cuestionamientos del examen, considerando que muchos radioaficionados noveles manifiestan interés en el servicio público y las comunicaciones de emergencia. Resulta provechoso examinar detenidamente la sección si esta constituye su principal área de interés.

AMENAZAS A LA VIDA Y LA PROPIEDAD

Se reconoce la necesidad de flexibilidad durante una emergencia. Por ejemplo, ninguna disposición de las regulaciones impide la utilización de una estación aficionada mediante cualquier medio de radiocomunicación disponible para proporcionar comunicaciones esenciales relacionadas con la salvaguarda inmediata de la vida humana y la protección inmediata de bienes cuando los sistemas de comunicación convencionales no están operativos.

Si los servicios de comunicación se encuentran interrumpidos y usted está en medio de un huracán, tornado o tormenta invernal, y ofrece sus servicios comunicacionales a las autoridades, podrá ejecutar cualquier acción necesaria para coadyuvar en el manejo de la contingencia. Personal de seguridad pública o profesionales médicos pueden utilizar su equipo de radio. En una situación de emergencia donde exista un riesgo inmediato para la vida o la propiedad y los canales normales de comunicación no estén disponibles, podrá emplear cualquier medio posible para abordar ese riesgo, incluyendo la operación fuera de los privilegios de frecuencia de su licencia. Únicamente se le prohíbe transmitir información en representación de su empleador o datos personales confidenciales de un tercero, como un damnificado, sin su consentimiento. De manera similar, en una situación crítica, puede utilizar los medios comunicacionales que estén a su alcance para responder, cualquier recurso en cualquier frecuencia. Si un transmisor del cuerpo de bomberos o un transceptor SSB marino son los únicos disponibles, utilícelos para establecer contacto con cualquier estación que considere pudiera escucharle.

Esta exención de las regulaciones ordinarias permanecerá vigente mientras la amenaza contra la vida y la propiedad continúe inminente y no existan otros medios de comunicación distintos a la radioafición. Una vez que el peligro haya disminuido o las comunicaciones convencionales estén restablecidas, deberá retornar a las reglas habituales, incluso cuando brinde apoyo a organismos de seguridad pública. Permanece obligado por los reglamentos en todo momento, incluso si utiliza su radio en respaldo de una agencia de seguridad pública. Por ejemplo, mientras proporciona comunicaciones posteriores al evento en un puesto de mando del departamento de bomberos, no le está permitido utilizar un radio para aficionados modificado en frecuencias del departamento de bomberos.

COMUNICACIONES TÁCTICAS

Las comunicaciones tácticas pueden emplearse para sincronizar actividades (“Diríjase al estacionamiento sur”), informar el estado (“El último vehículo está abandonando el área de preparación”) o solicitar recursos (“Se requiere atención médica en la intersección de la 2.^a y la autopista”). Este tipo de mensaje generalmente no se documenta ni se transmite bajo el formato de radiograma.

Las necesidades de comunicación táctica normalmente se resuelven mediante el empleo de canales VHF/UHF simplex o repetidor. Los equipos de radio móviles, portátiles y transportables resultan particularmente efectivos cuando se interactúa con organismos de seguridad pública y entidades gubernamentales.

Para optimizar la eficacia y facilitar la coordinación, las estaciones involucradas en comunicaciones tácticas deben utilizar distintivos tácticos, como “Puesto de Mando Tres”, “Cocina Escolar” o “Tribuna de los Jueces”. Estos describen una función, ubicación u organización. Esto permite que los operadores cambien sin necesidad de modificar el distintivo de llamada de las estaciones y libera al personal ajeno de emplear distintivos de llamada de

radioaficionados. No obstante, los distintivos tácticos no satisfacen los requisitos sobre la identificación de estaciones, los cuales aún deben cumplirse. Es necesario identificarse con el distintivo de llamada cada 10 minutos y al concluir la comunicación.

EMERGENCIAS Y ALIVIO DE DESASTRES

Proporcionar asistencia comunicacional durante una emergencia o en respuesta a un desastre natural constituye una de las razones fundamentales de la existencia del Servicio Aficionado. Se considerará de máxima prioridad las comunicaciones de emergencia, las cuales prevalecen sobre cualquier otro tipo de comunicaciones de radioaficionados en cualquier frecuencia.

La única excepción a la regla de “nadie posee una frecuencia” ocurre durante un desastre natural u otra emergencia comunicacional cuando se debe evitar operar en o cerca de las frecuencias utilizadas para proporcionar alivio de desastres.

LLAMADAS DE SOCORRO

En caso de encontrarse ante un peligro inminente o requerir asistencia de emergencia urgente, es posible emitir una señal de auxilio en cualquier frecuencia disponible. Bajo estas circunstancias críticas, se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- En comunicación vocal, pronunciar “Mayday Mayday Mayday” o mediante CW transmitir “SOS SOS SOS” (advirtiendo que Mayday no debe confundirse con la señal de urgencia pan-pan), seguido de “cualquier estación, por favor”.
- Identificar la transmisión mediante el indicativo de llamada
- Proporcionar la ubicación con suficiente precisión para su localización
- Explicar la naturaleza específica de la situación
- Detallar el tipo de asistencia requerida
- Comunicar cualquier información adicional relevante

Posteriormente, realizar una pausa para permitir la respuesta de alguna estación. Se recomienda repetir el procedimiento durante el máximo tiempo posible hasta obtener una respuesta. La finalidad de proporcionar información detallada en cada comunicación es garantizar que, incluso si no se pueden escuchar las estaciones de respuesta, estas comprendan la ubicación y el tipo de ayuda necesaria.

Bajo ninguna circunstancia se debe realizar una llamada de socorro falsa o permitir que terceros utilicen el equipo para tal fin. Las consecuencias pueden incluir la revocación de la licencia de radioaficionado, significativas sanciones económicas o incluso procesamiento judicial.

Si se detecta una llamada de socorro en cualquier frecuencia, es posible responder. Fuera de las bandas de radioaficionados, como en la frecuencia internacional marina de 2182 kHz, se debe verificar previamente que ninguna otra estación o embarcación esté respondiendo.

En las bandas de radioaficionados, se interrumpirán inmediatamente las comunicaciones en curso. Se registrará toda la información transmitida por la estación y posteriormente se responderá. Si se logra establecer contacto, se confirmará la recepción de la información, se solicitarán aclaraciones si fuese necesario y se contactará de inmediato a las autoridades correspondientes. Se mantendrá la comunicación con la estación en apuros hasta que las autoridades intervengan o lleguen al lugar.

7.5 Operación por satélite

Los entusiastas de la radioafición han desarrollado más de 50 artefactos espaciales desde 1961, aprovechando espacios adicionales en cargas útiles de vehículos de lanzamiento. Los ingenios orbitales de los aficionados reciben el sobrenombre de Oscar por orbitar como satélite portador de comunicaciones radiales amateur.

Establecer comunicación mediante un satélite de radioaficionados podría percibirse como una tarea tecnológicamente compleja, sin embargo, resulta bastante accesible. El requerimiento principal consiste en disponer de un equipo de radio capaz de transmitir en una banda y receptar en otra (característica presente incluso en dispositivos portátiles). Los contactos satelitales,

comprendiendo las comunicaciones con la estación de aficionados en la Estación Espacial Internacional, pueden ser ejecutados por cualquier profesional con licencia habilitada para transmitir en la frecuencia del enlace ascendente. A modo de ilustración, un licenciario técnico podría establecer comunicación a través de un satélite que recepta señales de enlace ascendente en 2 metros y transmite en una frecuencia de enlace descendente de 10 metros, aun cuando un técnico no tenga autorización para transmitir en 10 metros.

Las frecuencias de enlace ascendente satelital y enlace descendente se encuentran restringidas a sub-bandas satelitales especiales detalladas en la Tabla 28, segmentos de frecuencias reservados para comunicaciones terrestres hacia el espacio.

Tabla 28. Sub-bandas de satélites seleccionadas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Sub-bandas
29.300 – 29.510 MHz
145.80 – 146.00 MHz
435.00 – 438.00 MHz
1260 – 1270 MHz
2400 -2410 MHz y 2430 – 2438 MHz

Los dispositivos de comunicación satelitales amateur realizan retransmisiones entre bandas, típicamente en rangos de frecuencias muy altas (VHF) y frecuencias ultra altas (UHF), o funcionan como repetidores de FM a los cuales se puede acceder mediante transceptores FM convencionales. El estrato ionosférico resulta generalmente diáfano para las ondas en estas frecuencias, permitiendo que las señales transiten fluidamente entre el ambiente terrestre y el espacio extraterrestre. Cuando dos estaciones logran visualizar simultáneamente el satélite, tal como se ilustra en la Figura 253. Comunicación utilizando el satélite., pueden establecer comunicación mediante la propagación en línea recta hacia y desde el artefacto espacial.

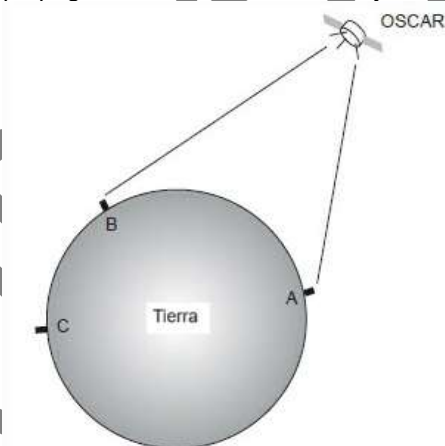


Figura 253. Comunicación utilizando el satélite. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

DEFINICIONES SATELITALES

- **Apogeo:** la distancia máxima que un satélite alcanza respecto a la superficie terrestre durante su trayectoria orbital
- **Beacon:** una transmisión informativa emitida por un artefacto espacial que contiene datos específicos sobre su funcionamiento
- **Cambio Doppler:** modificación en la frecuencia de una señal provocada por el movimiento relativo entre el ingenio espacial y la estación terrestre
- **Órbita elíptica:** trayectoria orbital caracterizada por una significativa diferencia entre sus puntos más cercanos y lejanos de la Tierra
- **LEO:** satélite posicionado en una órbita terrestre de baja altitud
- **Perigeo:** el punto más próximo de un satélite a la superficie planetaria durante su recorrido orbital
- **Estación espacial:** infraestructura de comunicaciones situada a una altitud superior a 50 km sobre la superficie terrestre

- **Fading de giro:** alteración de la señal provocada por la rotación del artefacto espacial y sus sistemas de antena

RASTREAR UN SATÉLITE

Para determinar el momento y la trayectoria de un satélite sobre el horizonte en una ubicación específica, se requiere un programa especializado de seguimiento satelital. Dicho programa necesitará la introducción de elementos orbitales denominados Elementos Kepplerianos o “KEPS”, habitualmente disponibles en plataformas digitales con capacidad de descarga automática. Mediante estos valores, el software puede generar mapas temporales precisos sobre la ubicación, trayectoria celeste e incluso el grado de variación Doppler de las señales. Se recomienda como práctica óptima incorporar los elementos de la Estación Espacial Internacional (ISS, por sus siglas en inglés) y posteriormente localizarlo visualmente durante el ocaso o el amanecer.

OPERANDO A TRAVÉS DE SATÉLITES

Se deberá identificar el protocolo operativo del artefacto espacial: las frecuencias de transmisión y recepción. Generalmente, los satélites poseen un único modo, aunque algunos disponen de múltiples configuraciones que pueden ser gestionadas por estaciones de control terrestre. El modo se representa mediante dos caracteres separados por una barra. El primer carácter determina la banda de enlace ascendente, mientras que el segundo indica la banda de enlace descendente. A modo de ejemplo, un satélite en modo U/V ejecuta su enlace ascendente en la banda UHF (70 cm) y su enlace descendente en la banda VHF (2 metros). Los satélites pueden implementar cualquier modalidad aficionada. Las configuraciones más frecuentes comprenden SSB, FM, CW y transmisión de datos.

Cuando el operador esté preparado para intentar un contacto satelital, denominado “Squirting the Bird”, obtendrá resultados óptimos utilizando una antena direccional capaz de orientarse hacia el satélite según las indicaciones del programa de seguimiento. Un haz reducido resulta más adecuado para principiantes, ya que no requerirá una puntería excesivamente precisa. Algunos satélites pueden contactarse mediante antenas verticales simples cuando se encuentran directamente sobre el punto de observación y a corta distancia. A medida que el operador perfeccione su técnica de apuntamiento, podrá emplear haces más potentes y establecer comunicación con el satélite incluso cuando se aproxime al horizonte, incrementando el número de estaciones terrestres simultáneamente visibles.

El operador podrá determinar la proximidad del satélite mediante la escucha de la baliza. Las balizas satelitales pueden transmitir telemetría utilizando CW (método más habitual), así como radio RTTY y de paquetes. Los datos telemétricos proporcionan información sobre el estado y condición del satélite. Salvo necesidad específica de registrar la telemetría, su función principal es indicar la proximidad para un potencial contacto. Incluso sin una licencia de aficionados, es posible sintonizar el flujo de datos telemétricos desde una estación espacial. La recepción de telemetría satelital está abierta a cualquier persona.

Se recomienda emplear la mínima potencia de transmisión posible, considerando que la capacidad del satélite está limitada por sus paneles solares y baterías. Si la señal en el enlace descendente presenta una intensidad similar a la baliza del satélite, significa que se está utilizando la potencia adecuada.

Para profundizar en información sobre satélites aficionados, se sugiere consultar el sitio web de AMSAT. Esta organización coordina la construcción y lanzamiento de la mayoría de los satélites amateur. El sitio ofrece amplia información sobre el funcionamiento satelital y métodos de localización. Adicionalmente, proporciona boletines informativos sobre el estado de los satélites y novedades del sector. ¡Seleccione uno de los satélites activos listados y comience su búsqueda de un QSO satelital!

7.6 Modos Digitales

Las transmisiones se conceptualizan como modalidades digitales cuando la información se transfiere mediante caracteres individuales codificados como dígitos binarios. A modo de ilustración, el carácter "A" puede transmitirse como "didah" en el código Morse o mediante la secuencia binaria 01000001 en el estándar ASCII. Existen numerosas modalidades digitales en el ámbito de la radioafición. Algunas poseen una considerable antigüedad, como el radioteletipo desarrollado durante la década de 1930. Otras representan adaptaciones de sistemas comerciales, mientras que algunas, como PSK31 y FT8, constituyen creaciones exclusivamente desarrolladas por aficionados. Constantemente se incorporan nuevas modalidades digitales, un campo donde la creatividad de los radioaficionados resplandece intensamente.

DONDE ENCONTRAR ACTIVIDAD DIGITAL

Las señales de modalidad digital se circunscriben a los segmentos de datos CW/datos de cada banda HF. La mayor parte de la operación digital se localiza próxima al sector superior del segmento CW. Las frecuencias de convocatoria para las modalidades digitales más populares se integran en los planes de banda y generalmente corresponden a la frecuencia más baja de operación, con los operadores incrementando su frecuencia conforme aumenta la actividad. Por ejemplo, en 20 metros, la mayoría de las señales PSK31 se ubican cerca de 14,070 MHz. RTTY y otras señales de modalidad digital se distribuyen entre 14,070 y 14,112 MHz. Durante la operación en 20 metros, es fundamental mantener la señal transmitida en 14,100 MHz, frecuencia del sistema de balizas internacionales NCDXF.

Para facilitar la identificación de la modalidad que se está recibiendo, existen grabaciones digitales de múltiples modalidades disponibles en www.sigidwiki.com/wiki/category:amateur_radio.

Definiciones

Previamente a profundizar en los pormenores de las diversas modalidades digitales amateur, resulta conveniente definir algunos términos relevantes.

- **Enlace de aire:** componente del sistema comunicacional que involucra la transmisión y recepción de señales radioeléctricas.
- **Bit:** unidad fundamental de datos; un 0 o 1 que representa la totalidad o una fracción de un número binario.
- **Tasa de bits:** cantidad de dígitos binarios por segundo transmitidos entre sistemas informáticos.
- **Baud o baudios:** número de símbolos por segundo transferidos entre sistemas informáticos, también denominado tasa de símbolos.
- **Ciclo de trabajo:** proporción temporal entre el periodo de transmisión y el tiempo total de inactividad del transmisor.
- **Protocolo:** normativas que regulan el método de intercambio de información entre dos sistemas.
- **Modo:** combinación de un protocolo con un método de modulación.

MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA (FSK)

La técnica de conmutación de frecuencia constituye un procedimiento de comunicaciones digitales donde los elementos binarios individuales se representan mediante tonos específicos. Durante la transmisión de la secuencia de bits, se implementan frecuencias tonales diferenciadas. Al escuchar una señal de módem o RTTY de baja velocidad, es posible percibir los bits intercambiados como un patrón que alterna rápidamente entre dos tonos distintos que transitan entre frecuencias. Las frecuencias en una señal FSK de doble tono se denominan Mark y Space. El espacio simboliza 0 y Mark representa 1.

En FSK genuino o "directo", la frecuencia del VFO del transmisor se regula directamente mediante una señal digital procedente del dispositivo computacional que representa los 1s y 0s del código. La modulación de cambio de frecuencia de audio (AFSK) también se emplea, donde los tonos acústicos modulan un transmisor SSB o FM a través del puerto de micrófono. AFSK resulta un método conveniente, aunque el operador debe gestionar meticulosamente el nivel sonoro para prevenir ruidos y distorsiones que pudieran impactar negativamente la calidad de la

señal o generar interferencias en estaciones próximas. Tanto FSK como AFSK producen idéntica sonoridad en el espectro.

Independientemente de la utilización de FSK o AFSK, la velocidad de transmisión de símbolos influye en la magnitud del desplazamiento frecuencial requerido. Cuanto más elevada sea la tasa de símbolos, mayor será el cambio de frecuencia necesario. Esto obedece a que entre más próximos estén los tonos, más tiempo demandará al sistema receptor discriminarlos. Los tonos deben mantener una separación frecuencial suficiente para que el receptor pueda determinar con precisión qué tono se transmite durante el intervalo temporal de su presencia.

En la modulación de cambio de frecuencia múltiple (MFSK) se implementan más de dos tonos para generar códigos adicionales. En el espectro, estos modos frecuentemente suenan como un instrumento musical ejecutando secuencias tonales aleatorias. Al emplear múltiples tonos y controlar las secuencias permitidas, los modos MFSK pueden incrementar su resistencia a errores. Un número en la denominación del modo, como 8-MFSK, indica la cantidad de tonos utilizados, ocho tonos en este ejemplo. Los modos aficionados comprenden 8 MFSK, 16 MFSK y 64 MFSK.

MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK)

El tipo más común de desplazamiento fase consiste simplemente en invertir una de las formas de onda tonales (son aquellas que poseen un tono definido, es decir, una frecuencia o un conjunto muy limitado de frecuencias, como las ondas sinusoidales, cuadradas, triangulares y de diente de sierra, con periodos constantes, frecuencia definidas y periódicas) claramente identificable por el oído o por mediciones), modificando su fase 180°. La diferencia de fase puede medirse respecto a la fase de la misma señal en un momento previo o en relación con otro tono. El oído humano interpreta los cambios rápidos de fase como un ruido o zumbido grave: la firma característica de las señales PSK en el espectro recibidas por un receptor CW o SSB.

MODOS BASADOS EN CARACTERES

La modalidad más elemental de comunicaciones digitales consiste en un sistema donde un operador introduce caracteres individuales, los cuales son posteriormente transmitidos a otra estación para su lectura. El CW representa un ejemplo paradigmático de este tipo de comunicación. La velocidad de estas modalidades resulta limitada, aunque presentan la ventaja de ser prácticas y requerir equipamiento adicional mínimo, más allá de una tarjeta de sonido o un módem. Frecuentemente, este procedimiento recibe la denominación de operación de teclado a teclado o chat. Dado que estas modalidades transmiten un flujo de caracteres sin información complementaria, comúnmente se les clasifica como modos no estructurados.

RADIOTELETYPE (RTTY)

RTTY constituye la modalidad más antigua (y aun ampliamente utilizada) de comunicación digital entre radioaficionados. Originariamente, los radioaficionados empleaban voluminosos teleimpresores militares y comerciales, junto con unidades terminales (módems) para establecer comunicaciones mediante RTTY. En la actualidad, una tarjeta de sonido y un software de módem realizan la conversión entre tonos acústicos y caracteres. RTTY se identifica como "Telegrafía de banda estrecha e impresión directa".

RTTY utiliza el código Baudot, que representa (codifica) cada carácter textual mediante una secuencia de 5 bits, según se ilustra en la Figura 254. Baudot es el origen etimológico del término baudio. Un bit inicial (bit de inicio) y una pausa entre caracteres (bit de parada) se implementan para sincronizar las estaciones transmisoras y receptoras. Con únicamente 5 bits para codificar información, solo pueden generarse 32 caracteres diferentes, cantidad insuficiente para abarcar el alfabeto completo, números y signos de puntuación en inglés. Por consiguiente, se implementan dos códigos especiales, LTR y FIGS, para alternar entre dos conjuntos de caracteres, lo que incrementa el número de caracteres disponibles hasta 62 (sin incluir los códigos LTR y FIGS).

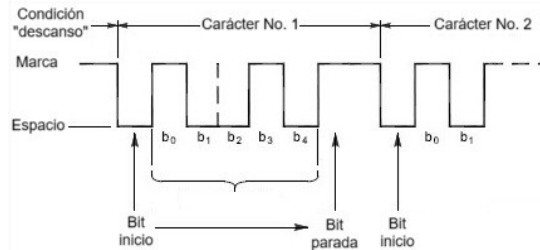


Figura 254. Representación código Baudot. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

La frecuencia de audio estándar y los intervalos de espacio para codificar una señal RTTY corresponden a 2125 Hz (tono de marca) y 2295 Hz (tono espacial). La diferencia entre ambos se denomina desplazamiento de señal. La velocidad de transición entre los tonos de marca y espaciales determina la velocidad del carácter. En HF, la velocidad más habitual es 60 palabras por minuto (45 baudios) con un desplazamiento de 170 Hz. Invariablemente, una estación RTTY debe responder a la misma velocidad y desplazamiento que está utilizando. Existen otros pares de tonos y desplazamientos, aunque no resultan frecuentes.

PSK31

El modo PSK más difundido es PSK31. El "31" indica la tasa de símbolos del protocolo, concretamente 31.25 baudios. Aunque pudiera parecer lento, resulta apropiado para comunicación de teclado a teclado. PSK31 puede soportar tasas de escritura hasta 50 palabras por minuto en condiciones óptimas. Una variante denominada QPSK31 (teclado de cambio de fase de cuadratura) transmite dos tonos de audio generando cuatro posibles combinaciones de cambio de fase. Esto permite codificar datos de una manera que proporciona cierta corrección de errores para mejorar el rendimiento en entornos ruidosos. Dado que involucra dos tonos, se debe seleccionar la banda lateral superior (USB o LSB) para decodificar los datos, lo que implica que el modo es sensible a la banda lateral. QPSK31 y PSK31 presentan aproximadamente el mismo ancho de banda.

En contraste con un código de caracteres de longitud fija de 5, 7 u 8 bits, PSK emplea un código de longitud variable llamado varicode (en [wikipedia.org/wiki/varicode](https://en.wikipedia.org/wiki/varicode)) que asigna códigos más breves a caracteres comunes (como "e") y códigos más extensos para otros, de manera similar al código Morse.

Es importante destacar que en Varicode la mayoría de las letras mayúsculas y los caracteres de puntuación requieren más bits que las minúsculas. Esto significa que tomará más tiempo transmitir "mi nombre es Hiram" que "mi nombre es hiram". Si está familiarizado con la operación RTTY que no contempla variaciones en mayúsculas, ¡asegúrese de desactivar la tecla de bloqueo de mayúsculas!

PSK31 transmite un único tono, codificando cada símbolo mediante inversiones de la fase del tono a intervalos regulares. Los símbolos se envían continuamente, donde una inversión de fase de un intervalo a otro representa un "0" y la ausencia de inversión un "1". (Se requieren dos intervalos de transmisión para enviar un símbolo). Si se escucha una señal PSK31 en el aire, se percibe un zumbido constante con variaciones breves mientras se transmiten los caracteres. Los ceros se transmiten continuamente cuando no hay otros datos presentes para mantener la sincronización entre transmisor y receptor: pueden escucharse las pausas como períodos de zumbido consistente e invariable.

MODOS Y SISTEMAS BASADOS EN PAQUETES

Los modos estructurados o basados en paquetes encuentran su origen en los protocolos iniciales de teletipo-sobre radio (TOR) y en las primitivas redes de comunicación computacional. Los protocolos desarrollados durante los primeros estadios de la informática constituyen el fundamento de los sistemas de comunicación contemporáneos empleados en Internet y en dispositivos móviles digitales. Los radioaficionados adaptaron dichos protocolos para su

implementación a través de enlaces radiofónicos, generando sistemas de comunicación como radio de paquetes, pactor, Winmor y otras modalidades conexas.

A medida que las técnicas de modulación y codificación disponibles para los radioaficionados incrementan su complejidad, también generan mayores exigencias sobre los sistemas informáticos destinados a su generación y recepción. Una de las condiciones primordiales es contar con un umbral mínimo de velocidad de procesamiento. Una mayor capacidad computacional permite la recepción de señales más tenues o la captación simultánea de múltiples señales. Los modos de paquetes como JT65 y FT8 requieren transmisiones que ocurran en intervalos temporales definidos con absoluta precisión, permitiendo que los sistemas receptores identifiquen exactamente el momento de iniciar su decodificación. Existe software especializado capaz de mantener la sincronización del equipo informático con una precisión de un segundo respecto al tiempo estándar.

CONCEPTOS BÁSICOS DE PAQUETES

El concepto de paquete hace referencia a la transmisión de datos mediante grupos estructurados denominados marcos, según se ilustra en la Figura 255. Aunque existen múltiples protocolos de paquetes, todos comparten una estructura básica fundamental.

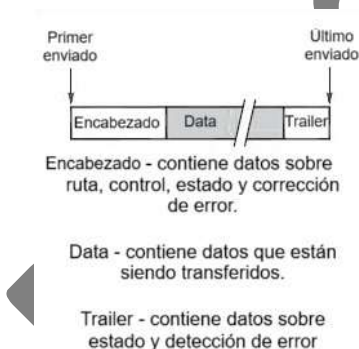


Figura 255. Transmisión por paquetes. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

- Encabezado: contiene secuencias binarias que facilitan la sincronización del receptor con la información estructural, de control y enrutamiento del paquete, e incluye, para ciertos protocolos, datos para la identificación y corrección de posibles alteraciones.
- Datos: información intercambiable entre sistemas computacionales, típicamente representada mediante caracteres ASCII. Frecuentemente, los datos contenidos en paquetes se comprimen para optimizar su transmisión.
- Trailer: información complementaria de control, estado y verificación utilizada para la detección de posibles anomalías.

El procedimiento de integración de datos dentro de una estructura de paquetes se denomina encapsulación. Los paquetes de un protocolo pueden ser procesados como datos por otro protocolo, permitiendo la encapsulación de protocolos completos. Este principio constituye precisamente la base del conocido par de protocolo TCP/IP empleado en Internet. El Protocolo de Internet (IP) encapsula los paquetes del Protocolo de Control de Transporte (TCP) y los transporta hasta su destino.

Mediante mecanismos de detección de errores, un protocolo puede garantizar un transporte fiable donde los datos alterados nunca sean aceptados. El método de detección de errores más habitual corresponde a la verificación de redundancia cíclica o CRC. Se calcula un CRC a partir del contenido del paquete y se transmite junto con los datos. (Una suma de verificación representa una modalidad más rudimentaria de detección de errores comparada con el CRC). El sistema receptor ejecuta un cálculo idéntico y si los resultados coinciden, acepta los datos transmitidos sin alteraciones y responde con un mensaje ACK (reconocido).

La corrección de errores de reenvío (FEC) supera la mera detección de anomalías. Al incorporar información redundante adicional codificada con los datos transmitidos, el receptor puede corregir determinados tipos de errores.

Cuando se identifica una discrepancia, el sistema receptor emite un mensaje NAK (no reconocido) y el protocolo solicita la retransmisión del paquete. El sistema de transmisión continuará enviando un paquete hasta que se reciba sin errores o se alcance el límite de retransmisiones. Esta modalidad de protocolo se denomina ARQ para solicitud de repetición automática. Modos como Pactor, Packet Radio y Winmor utilizan ARQ.

Originalmente desarrollados para conexiones mediante redes cableadas y no radiales, los protocolos ARQ como Pactor están diseñados para transferir datos entre dos estaciones: un transmisor y un único receptor. Una transmisión ACK o NAK solo puede recibirse de una estación receptora durante la conexión. Esto implica la imposibilidad de “intervenir” en un contacto continuo entre dos estaciones mediante un modo ARQ.

Para permitir que una estación anuncie su presencia, los protocolos ARQ proporcionan un modo de “transmisión” para enviar sin que otra estación haya establecido conexión. Adicionalmente, se ofrece un modo de monitoreo o “mon” que permite a otras estaciones escuchar la conversación e incluso recibir datos sin corrección de errores. Utilizar un modo de monitoreo facilita determinar si una frecuencia está ocupada por dos estaciones con un contacto en modo ARQ.

RADIO POR PAQUETES

La radiocomunicación mediante paquetes de datos, empleada prácticamente de forma exclusiva en las frecuencias de muy alta y ultra alta frecuencia, fundamenta su funcionamiento en el Protocolo X.25 para redes informáticas. Los entusiastas de las comunicaciones radiales adaptaron este protocolo para transmisiones radioeléctricas, renombrándolo como Axe del Protocolo X.25. La transferencia de paquetes se realiza mediante transceptores de audio en frecuencia modulada en bandas VHF, con velocidades de transmisión de 1200 o 9600 baudios. La comunicación por paquetes implementando AX.25 presenta limitaciones significativas en HF, debido a que las señales se interrumpen con facilidad por interferencias acústicas y desvanecimiento, incluso a tasas de señalización máximas de 300 baudios permitidas en ese espectro.

PACTOR Y WINMOR

El protocolo de radiotelecomunicación de texto (RTTY) carece de mecanismos para gestionar errores de transmisión. Consecuentemente, el contenido textual se distorsiona frecuentemente, en especial en canales de comunicación con señales ruidosas y fluctuantes en alta frecuencia. Para incrementar la confiabilidad comunicacional, se desarrollaron sistemas de transmisión sobre radio (TOR), como AMTOR, G-TOR y alternativas similares. Estos sistemas transmiten breves secuencias de caracteres incorporando datos para detección y corrección de errores. Las modalidades TOR resultan indiscutiblemente más fiables, aunque sus versiones originales presentaban velocidades considerablemente reducidas, particularmente bajo condiciones de interferencia o ruido. Posteriormente se concibieron Pactor (TOR basado en paquetes) y Winmor (TOR para entorno Windows) para expandir las capacidades de los modos TOR.

Pactor 1 implementa modulación por desplazamiento de frecuencia, mientras que Pactor 2, Pactor 3 y Pactor 4 utilizan modulación por desplazamiento de fase más sofisticada. (Pactor-4 no está autorizado para transmisión por radioaficionados estadounidenses, aunque esta restricción podría modificarse si la autoridad reguladora ajusta normativas de ancho de banda y tasa de símbolos). Winmor puede operar con modulación por desplazamiento de frecuencia o de fase. Ambos incorporan métodos de verificación de errores y un protocolo de solicitud de retransmisión automática para garantizar la integridad de los datos transferidos. Estas modalidades constituyen actualmente los métodos más populares en comunicaciones de alta frecuencia para intercambiar volúmenes significativos de información. Los modos Pactor y Winmor representan el método preferencial de transmisión de datos en alta frecuencia para el sistema Winlink, ampliamente utilizado por la comunidad de radioaficionados.

EL SISTEMA WINLINK

La transmisión de comunicaciones electrónicas y archivos digitales mediante técnicas digitales en frecuencias de alta frecuencia se ha transformado en un procedimiento de comunicación altamente recurrente para propósitos personales y públicos. La plataforma Winlink (www.winlink.org) ha evolucionado hasta convertirse en un sistema robusto y global. Winlink emplea la infraestructura de Internet para interconectar su red de servidores de correo electrónico con estaciones de enlace y buzones distribuidos globalmente en rangos de frecuencia HF, VHF y UHF.

Las estaciones de Winlink no establecen una conexión directa de un radioaficionado con Internet, sino que proporcionan un mecanismo eficiente de acceso al correo electrónico para estaciones ubicadas fuera del alcance de conectividad local y en escenarios donde Internet resulta indisponible por contingencias o interrupciones. Incluso sin conectividad web, las estaciones que utilizan Winlink Express pueden operar como estaciones de buzón independientes o comunicarse directamente para transferir mensajes. Un registro de estaciones que facilitan acceso al sistema Winlink se publica en la página oficial del sistema.

Winlink no constituye un modo: representa un sistema integral de comunicaciones. Se implementan diversos modos para acceder a la plataforma. Al conectarse a una estación de buzón Winlink en VHF, es posible utilizar radio de paquetes convencional. En HF, se emplean los modos Pactor y Winmor.

Numerosos radioaficionados realizan un ascenso de categoría de licencia para aprovechar estas y otras capacidades de mensajería. Si esta propuesta resulta atractiva, es fundamental recordar la necesidad de compartir las bandas de radioaficionados con otros usuarios del espectro que operan en diferentes modalidades. Todos deben comportarse como buenos vecinos siguiendo prácticas tradicionales: escuchar previamente, mantener señales limpias y reconocer que ningún individuo o sistema posee derechos exclusivos sobre alguna frecuencia.

FT8 Y WSPR

FT8 y WSPR son modos compatibles con el conjunto de software WSJT junto con JT65, MSK144 y otros modos digitales. (El software WSJT y su extensa documentación están disponibles en wsjt.sourceforge.io.) Ambos utilizan secuencias cronometradas con precisión para transmisión y recepción, modulación FSK de 8 tonos y técnicas sofisticadas de decodificación y corrección de errores para permitir una decodificación exitosa con relaciones señal/ruido extremadamente bajas. WSPR puede decodificar señales en niveles que se aproximan a -30 dB, ¡representando una señal 1000 veces más débil que el ruido! FT8 ha ganado considerable popularidad debido a su excelente rendimiento con estaciones modestas y altos niveles de interferencia.

FT8 intercambia mensajes de 75 bits (más 12 bits para códigos de detección de errores) en un ancho de banda de 50 Hz. En su uso actual, FT8 permite un intercambio limitado de información, como indicativos de llamada, localizadores de cuadrícula e informes de señal. Al ser WSJT un proyecto de código abierto, es previsible que surjan variaciones de FT8 con comportamientos diferentes.

WSPR (Whisper) está diseñado para experimentar y evaluar rutas de propagación de HF a relaciones señal/ruido extremadamente bajas. WSPR no soporta comunicaciones bidireccionales y funciona como una baliza de ancho de banda muy estrecho. Los transmisores WSPR de baja potencia generan paquetes que estaciones codificadas reciben y decodifican, informando el éxito en plataformas web como wsprnet.org.

REDES INALÁMBRICAS DE RADIOAFICIONADOS

La Tabla 29 detalla las frecuencias de redes inalámbricas que se interceptan con bandas de radioaficionados. Considerando que en estas frecuencias se autorizan señales de espectro amplio, los radioaficionados pueden emplearlas para propósitos similares a los usuarios no licenciados. Concretamente, actividades como intercambio de mensajes entre terminales,

comunicaciones telefónicas mediante Voz sobre IP, transmisión de contenido visual, actividades lúdicas, interconexión de repetidores, alojamiento de sitios web, comunicación electrónica, y procesamiento y administración de documentos resultan completamente viables. De hecho, los radioaficionados pueden utilizar canales que forman parte del espectro de uso libre. No obstante, tales canales podrían encontrarse saturados con otro tipo de tráfico. Si se opera una red inalámbrica en frecuencias de uso libre, es imperativo cumplir con las restricciones establecidas en el Plan Nacional de Frecuencias es los segmentos de uso libre.

Tabla 29. Frecuencias de redes inalámbricas. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

airMAX	Ubiquiti	ISM	Radioaficionados
M900 900MHz	902 – 928	902 – 928	902 – 928
M2 2.4 GHz	2402 – 2462	2400 – 2500	2390 – 2459
M3 GHz	3300 – 3500		3300 – 3500
M5 GHz	5725 – 5850	5725 – 5875 ²	5650 – 5925

Existen dos configuraciones fundamentales de red empleadas por radioaficionados: la topología de malla (denominada también conexión punto a punto o punto a multipunto) y las estructuras en estrella. La plataforma AREDN (Red de Datos de Emergencia de Radioaficionados), implementa una arquitectura de red mallada, mientras que HamWAN, HamNet y Mi6WAN utilizan la disposición en estrella. Una característica distintiva de la topología de red mallada radica en su capacidad para que un paquete pueda encontrar su destino reencaminándose a través de un nodo alternativo en caso de que un nodo primario experimente una falla.

RECIBIR Y TRANSMITIR MODOS DIGITALES

La mayoría de los modos digitales en HF se emiten como señales LSB, con excepción de JT65 y JT9 que utilizan USB. De manera análoga a la recepción de una señal vocal USB en un receptor LSB, resulta inviable receptor una señal digital en la banda lateral incorrecta debido a que la correlación entre tonos y datos digitales se invertirá. Consecuentemente, será necesario configurar el módem o software receptor con las tasas de baudios y frecuencias tonales precisas. Imprecisiones en cualquiera de estas configuraciones fundamentales imposibilitarán la recepción de datos, incluso cuando la señal sea intensa y aparentemente sintonizada correctamente. Dado que PSK31 emplea un único tono, USB o LSB funcionarán, aunque la mayoría de los aficionados prefieren USB.

ANCHO DE BANDA DE LOS MODOS DIGITALES

El ancho de banda de una señal varía según la velocidad de símbolos implementada. A medida que incrementa la velocidad del símbolo, aumenta proporcionalmente el ancho de banda requerido para transmitirlos. La Tabla 30 presenta los anchos de banda aproximados para diversos modos digitales populares utilizados en HF.

Tabla 30. Anchos de banda para varios modos digitales. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

Modo	Ancho de Banda (Hz)
PSK31	50
FT8	50
RTTY	200
MFSK16	300
JT65	350
DominoEX	524
Olivia	1000
MT63	2000
PACTOR-III	2300
PACTOR-4	2300

El procedimiento más frecuente para generar y propagar estos formatos consiste en establecer una conexión entre la salida sonora de un dispositivo informático y el puerto de entrada microfónica de un transceptor SSB. Esto implica que todos los formatos deben poder transmitirse

dentro de un ancho de banda estándar del canal vocal SSB, aproximadamente 2,8 kilohercios. Conforme el equipamiento SDR se torne más habitual, los formatos de mayor anchura espectral podrían desarrollarse siempre que cumplan con los límites de velocidad simbólica establecidos en recomendaciones internacionales.

PERMANECER EN LA BANDA

Como se aborda en el presente manual, se recomienda extremar la precaución cuando se opera cerca del límite de un segmento de banda de señales de datos. Al emplear LSB para un modo FSK, las bandas laterales se ubicarán por debajo de la frecuencia portadora mostrada en el equipo de radio. Por ejemplo, si la frecuencia portadora exhibida es 18103 kilohercios, al transmitir el tono de 2295 hercios de una señal RTTY, la frecuencia de radiofrecuencia será $18103 - 2295 = 18100,705$ kilohercios. Deben aplicarse cálculos análogos al utilizar un modo digital en USB.

CICLO DE TRABAJO TRANSMISOR

Resulta fundamental conocer el ciclo de trabajo típico para un modo digital, dado que la mayoría de los transmisores para radioaficionados no están diseñados para operar a potencia máxima de salida durante periodos prolongados. Cuando se opera en CW, por ejemplo, el transmisor alterna entre estados de activación y desactivación, funcionando a plena potencia aproximadamente entre el 40 y 50% del tiempo. Durante una comunicación SSB, el transmisor produce potencia completa únicamente cuando la voz alcanza su máxima amplitud. En una conversación SSB típica, el transmisor opera a potencia total solo entre el 20 y 25% del tiempo.

No obstante, similar a FM, en algunos modos de datos, el transmisor puede estar operando a potencia máxima durante toda la transmisión. En Baudot Radioteletype, el transmisor conmuta continuamente entre tonos de marca y espaciado del código, resultando en un ciclo de trabajo del 100%. Para PSK31 y modos similares, el transmisor genera potencia plena prácticamente durante todo el periodo de transmisión, con un ciclo de trabajo cercano al 100%. Modos como JT65 y FT8 se transmiten durante varios segundos a potencia total, seguidos de periodos de escucha para posibles respuestas. Los modos ARQ como Pactor presentan ciclos de trabajo ligeramente reducidos porque el transmisor envía datos y posteriormente espera un reconocimiento.

Las transmisiones prolongadas pueden ser suficientes para sobrepasar la clasificación de potencia promedio de un transmisor. Si existe incertidumbre sobre la calificación de un transceptor para modos de alto ciclo de trabajo, se recomienda reducir la potencia de transmisión para prevenir sobrecalentamientos. Se sugiere disminuir la potencia del transmisor aproximadamente al 50% de su potencia máxima de salida para la mayoría de los modos digitales.

CALIDAD DE SEÑAL DE MODO DIGITAL

La operación en el ámbito digital conlleva idénticas consideraciones respecto a la calidad de la señal que se presentan en telefonía y CW. Las señales digitales poseen la capacidad de generar interferencias en canales adyacentes, así como en las señales de audio que circulan entre el equipo computacional y el dispositivo de radiocomunicación.

Adicionalmente, puede constituirse en una potencial fuente de complicaciones.

Para los modos digitales que emplean un transmisor SSB para transmitir AFSK, la dificultad más recurrente radica en proporcionar un volumen de audio computacional inadecuado hacia el puerto de micrófono del equipo de radio. El puerto de micrófono resulta fácilmente sobrecargable, provocando como consecuencia dispersiones y emisiones parásitas. Algunos equipos de radiocomunicación incorporan entradas específicas para datos digitales, permitiendo una conexión directa con interfaces computacionales. Esta característica elimina completamente los inconvenientes asociados con interfaces de audio y configuraciones de niveles.

Cuando se utiliza una pantalla de cascada (tema que se profundizará posteriormente en este capítulo), resultará evidentemente perceptible una señal distorsionada mediante la presencia de líneas adicionales adyacentes a la señal principal, que pueden aparecer inusualmente expandidas. Cada una de esas líneas verticales representa una emisión espuria, generalmente originada por sobremodulación del transmisor derivada de niveles de audio excesivamente elevados en la entrada de micrófono. Una forma de onda distorsionada dificulta significativamente los procesos de decodificación, mientras que las emisiones espurias ocupan el ancho de banda potencialmente utilizable por otras estaciones. Tras realizar el ajuste personal de los niveles de audio de transmisión, se recomienda solicitar a un colega la verificación de la calidad de la señal para confirmar una configuración apropiada.

ALC Y MODOS DIGITALES

El control de nivel automático (ALC) se emplea para prevenir un impulso excesivo en las entradas del amplificador. En el interior de un transceptor, ALC impide la sobrecarga de la etapa del amplificador de salida. La señal ALC de un amplificador externo evita que un transceptor emita demasiada potencia para la entrada del amplificador. Aunque pareciera ser beneficioso, las señales ALC y digitales no interactúan adecuadamente.

Los circuitos ALC reducen la ganancia cuando los niveles de potencia se tornan demasiado elevados, provocando que las señales de entrada de mayor amplitud se amplifiquen en menor medida que las de baja intensidad. Efectivamente, esto comprime la señal de manera análoga al funcionamiento de un procesador de voz. En una señal de voz, la distorsión resultante representa un compromiso aceptable para obtener una potencia promedio superior, ya que el sistema auditivo puede compensar la diferencia. No obstante, para una señal digital, la distorsión generada por ALC dificulta la decodificación y produce emisiones espurias, similar a la sobremodulación.

Cuando se implementa un modo digital, es imperativo que el sistema ALC se encuentre desactivado o que el nivel de entrada de micrófono y la ganancia se reduzcan hasta el punto donde el sistema ALC no se active. Generalmente, es posible monitorear la acción ALC en el mismo medidor del transceptor que supervisa la potencia de salida y la ROE. Se recomienda resistir la tentación de incrementar la ganancia, dado que únicamente provocará que la señal sea más compleja de comprender y generará interferencia para otros usuarios.

7.7 Modulación, Protocolos y Modos

Fundamentándose en su comprensión progresiva de la terminología radioeléctrica, de circuitos y de señalización, este capítulo aborda las técnicas de modulación FM y digital. Estos constituyen el fundamento de los protocolos y modos digitales, el segmento de mayor expansión en la radioafición. Posteriormente, se examinarán los dos métodos de representación imagenológica más frecuentes: televisión aficionada de exploración rápida (fast-scan) y de exploración lenta (slow-scan).

7.7.1 Sistemas de modulación

El proceso de incorporar y extraer información de las señales constituye la esencia de la radio. En esta sección, se explorarán definiciones cruciales de señalización para FM, el modo analógico más preponderante. Adicionalmente, se examinará la multiplexación (procedimiento para integrar más de un flujo informativo en una señal única).

DESIGNACIONES Y TIPOS DE EMISIONES

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha desarrollado un sistema especializado de identificadores para especificar los tipos de señales (emisiones) autorizadas para aficionados y otros usuarios del espectro radioeléctrico. Este sistema clasifica las emisiones según su ancho de banda necesario y su categorización.

Si bien un designador de emisión completo puede comprender hasta cinco caracteres, generalmente se utilizan solo tres.

Los designadores se inician con una letra que indica el tipo de modulación empleada. El segundo carácter es un número que describe la señal utilizada para modular el portador. El tercer carácter especifica la naturaleza de la información transmitida. La Tabla 31 enumera los designadores de emisiones para los modos más habituales en la radioafición.

Tabla 31. Designación de la emisión para los modos habituales de radioaficionados. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Designador	Descripción
NON	Portadora no modulada
A1A	Telegrafía en código Morse usando modulación de amplitud
A3E	Telefonía AM de doble banda lateral con portadora completa
J3E	Telefonía AM de banda lateral única con portadora suprimida
J3F	Televisión AM de banda lateral única con portadora suprimida
F3E	Telefonía modulada en frecuencia (FM)
G3E	Telefonía modulada en fase (PM)
F1B	Telegrafía por desplazamiento de frecuencia sin tono de audio modulador (FSK RTTY)
F2B	Telegrafía producida por modulación FM con tonos de audio (AFSK RTTY)
F1D	Transmisión de datos FM, como radio por paquetes

- (1) primer símbolo – Tipo de modulación.
- (2) Segundo símbolo – Naturaleza de la señal modulada.
- (3) Tercer símbolo – tipo de información de transmisión.

Las normativas para radioaficionados hacen referencia a las categorías de emisiones en lugar de los identificadores de emisiones. Las categorías de emisiones comprenden CW, telefonía, RTTY, datos, imagen, MCW (onda continua modulada), SS (espectro de propagación), pulso y prueba. Cualquier señal puede ser caracterizada mediante un identificador de emisiones o una categoría de emisión. Las categorías de emisiones son lo que los aficionados denominan comúnmente "modos".

Aunque las categorías de emisiones resultan menos numerosas y más sencillas de memorizar, constituyen un medio algo menos preciso para identificar una señal. Persiste la necesidad de identificadores de emisiones en la radioafición.

MODULACIÓN Y MODULADORES DE FM/PM

En la modulación FM, la frecuencia de la señal experimenta variaciones por encima y por debajo de la frecuencia portadora a una velocidad equivalente a la frecuencia de la señal moduladora. (La frecuencia del portador se refiere a la frecuencia de la señal FM sin modulación aplicada). A modo de ilustración, si se utiliza un tono de 1000 Hz para modular un transmisor, la frecuencia de la señal modulada oscilará por encima y por debajo de la frecuencia portadora 1000 veces por segundo.

No obstante, la magnitud de la variación de frecuencia resulta proporcional a la amplitud de la señal moduladora. Esta variación de frecuencia se denomina desviación. Supongamos que una determinada señal moduladora genera una desviación de 5 kHz. Si se empleara otra señal con la mitad de amplitud para modular el mismo transmisor, produciría una desviación de 2.5 kHz.

Para describir de manera más exhaustiva una señal FM, será necesario comprender dos conceptos inherentes a los sistemas y operaciones FM: relación de desviación e índice de modulación. Aunque pueden parecer casi idénticos, de hecho, están estrechamente vinculados.

RELACIÓN DE DESVIACIÓN

En un sistema FM, la proporción entre la desviación de frecuencia máxima y la frecuencia de modulación de audio más elevada se denomina relación de desviación. Representa un valor constante para un modulador y transmisor específico, y se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Relación de desviación} = \frac{D_{MAX}}{M}$$

dónde:

- D_{MAX} = desviación máxima en hertz
- M = frecuencia de modulación máxima en Hertz.

La desviación máxima se conceptualiza como el valor intermedio resultante de la diferencia entre las frecuencias de señal extremas. En otras palabras, una señal moduladora de onda sinusoidal provocará que la frecuencia de la señal oscile simétricamente en sentidos opuestos alrededor de la frecuencia portadora. Cuando la desviación máxima se establece como ± 5 kHz, representando una variación total de 10 kHz entre las frecuencias máxima y mínima, la desviación máxima corresponderá a la mitad de dicho valor, es decir, 5 kHz.

La regulación de la desviación máxima se realiza habitualmente mediante el ajuste del control de ganancia de audio en el circuito modulador FM. Dado que este parámetro permanece constante para cada transmisor específico, no se contempla un control de ganancia de micrófono en el panel frontal de un transmisor FM.

ÍNDICE DE MODULACIÓN

La proporción existente entre la variación de frecuencia de la señal máxima y la frecuencia de modulación instantánea se denomina índice de modulación. El índice de modulación constituye una medida que representa la relación entre la desviación y la frecuencia de la señal moduladora. Esto significa que:

$$\text{Índice de modulación} = \frac{D_{MAX}}{m}$$

dónde:

- D_{MAX} = desviación máxima en Hertz.
- m = frecuencia moduladora en hertz al mismo tiempo.

Como evidencia, si la desviación máxima permanece constante, el índice de modulación experimenta una variación inversamente proporcional a la frecuencia de modulación. Una frecuencia de modulación elevada genera un índice de modulación reducido. En un modulador de frecuencia, la desviación efectiva depende exclusivamente de la amplitud de la señal moduladora y resulta independiente de su frecuencia. Consecuentemente, un tono de 2 kHz generará idéntica desviación que un tono de 1 kHz cuando sus amplitudes sean equivalentes. El índice de modulación correspondiente al tono de 2 kHz representa la mitad del valor del tono de 1 kHz.

En contraste, dentro de un modulador de fase, la desviación experimenta un incremento proporcional a la frecuencia de modulación. Cuando la amplitud de la señal moduladora se mantiene estable, el índice de modulación permanecerá igualmente constante. Dicho de otro modo, un tono de 2 kHz producirá el doble de desviación que un tono de 1 kHz si sus amplitudes son semejantes.

Mediante un sistema FM o PM, la relación de desviación y el índice de modulación resultan independientes de la frecuencia del portador de RF modulado. No representa una variable significativa si el transmisor opera en una radio FM de 10 metros o 2 metros.

¿Cuál es la finalidad de la relación de desviación y el índice de modulación? Dado que la relación de desviación se establece previamente, se emplea para caracterizar y definir un modulador FM o PM. La relación de desviación del transmisor se determina durante el proceso de fabricación y no experimenta ajustes durante su operación.

El índice de modulación, por su parte, fluctúa según la amplitud de la señal de entrada (debido a modificaciones en D_{MAX}) y su frecuencia. El espectro real de una señal FM presenta una

complejidad significativa, y el índice de modulación proporciona un mecanismo para describir la distribución energética dentro de dicha señal.

De manera similar a una señal AM, el índice de modulación constituye un método para caracterizar el ancho de banda de una señal modulada. El incremento del índice de modulación genera componentes de señal cada vez más distantes de la frecuencia portadora, potencialmente causando interferencias en canales adyacentes. La solución radica en reducir la amplitud de la señal moduladora, especialmente en frecuencias bajas. El control del índice de modulación representa otro fundamento para la implementación de pre-énfasis y des-énfasis en moduladores y demoduladores FM. Para limitar el ancho de banda de señales FM en bandas de amateur HF restringidas, el índice de modulación máximo recomendado para frecuencias por debajo de 29,5 MHz es de 1,0.

MULTIPLEXACIÓN

La multiplexación consiste en integrar múltiples flujos informativos en una señal modulada. Este procedimiento permite que un transmisor de radiofrecuencia y una señal transmitida transporten diversos canales de información.

Existen dos metodologías habituales de multiplexación, multiplexación por división de frecuencia (FDM) y multiplexación por división de tiempo (TDM).

FDM emplea más de una subportadora, cada una modulada por una señal de mensaje independiente. Las subportadoras se fusionan en una única señal de banda base que posteriormente modula el portador de RF. Los aficionados utilizan una variante de FDM con modos digitales de múltiples carreras que se explicarán posteriormente en este capítulo.

TDM representa la transmisión de dos o más señales sobre un canal compartido mediante intercalación, de modo que las señales acontecen en distintas ranuras temporales discretas de una transmisión digital. En radioafición, el modo TDM más difundido es DMR (radio móvil digital). Los sistemas de repetidores de DMR implementan un mecanismo controlado computacionalmente que segmenta un canal en dos ranuras temporales alternativas. TDM también se implementa para telemetría, como en satélites aficionados y repetidores remotos.

7.7.2 Protocolos y modos digitales

Antes de profundizar en los detalles (y son numerosos) de las transmisiones digitales que se tornan cada vez más populares entre los aficionados, se definirá con precisión cierta terminología digital. Es sumamente sencillo aplicar incorrectamente un término o confundir el significado de una expresión con otra, lo que genera cierta confusión.

TASA DE SÍMBOLOS, VELOCIDAD DE DATOS Y ANCHO DE BANDA

Dos características fundamentales y relevantes de un sistema de comunicaciones digitales conciernen a la rapidez en la transferencia informativa. La “velocidad” esencialmente representa la tasa de transmisión de información, cuantificándose mediante unidades de datos por segundo, según se detallará a continuación. Su magnitud depende igualmente del punto de medición dentro del sistema comunicacional completo, abarcando desde la generación hasta la entrega de datos.

Existen dos modalidades para conceptualizar la velocidad de la señal digital, dependiendo si se hace referencia al enlace aéreo —concerniente a la señal transmitida propiamente— o al flujo de datos que acontece en el equipamiento informático que procesa información digital. Ilustrativamente, cuando se percibe el característico sonido modulado de una señal RTTY por vía auditiva, se está experimentando el enlace aéreo del sistema comunicacional. En contraste, si se examinan los caracteres recibidos mediante un decodificador o programa informático, se está observando el flujo de datos. Frecuentemente, la velocidad del flujo de datos se denomina rendimiento, significando la velocidad global de transferencia del sistema comunicacional.

Al abordar la velocidad del enlace aéreo, la unidad de medición es Baud (BD) o baudios. Baud, similar a Hertz, cuantifica eventos por segundo. Mientras la frecuencia contabiliza ciclos de una onda de corriente alterna, BAUD contabiliza eventos de señalización relacionados con modificaciones en la señal transmisora de información. Cada evento de señalización transfiere un símbolo a través del enlace hacia la estación receptora. Consecuentemente, la tasa de símbolos se refiere a la velocidad de transformación de la forma de onda transmitida para comunicar información. Baud y velocidad de símbolos son conceptualmente equivalentes, de modo que una velocidad de un baudio implica la transmisión de un símbolo por segundo. (El término “tasa de baudios” resulta redundante, por lo que se recomienda simplemente utilizar “baudios”).

En el enlace aéreo de una señal RTTY, por ejemplo, (ver Figura 254) las marcas de símbolos y espacios constituyen pulsos tonales transmitidos mediante frecuencias diferenciadas. La frecuencia tonal durante el pulso representa el evento de señalización. En ocasiones, el tono varía entre símbolos (como de b_0 a b_1 en la representación) y en otras permanece constante (como de b_1 a b_2). El baudio de la señal corresponde al número de estos eventos —símbolos transmitidos— por unidad temporal.

TASA DE DATOS VERSUS TASA DE SÍMBOLOS

La Figura 254 cumple una doble finalidad. Ilustra acústicamente cómo se percibiría una señal RTTY y, simultáneamente, representa una potencial configuración de onda del flujo informático. La representación gráfica detalla cómo los cinco bits (b_0 a b_4) se codifican secuencialmente como símbolos de marca o espacio. Cada símbolo en el medio de transmisión mantiene una correspondencia unitaria con un bit en el flujo de datos. En numerosos sistemas de transmisión elementales, como RTTY y 1200-Baud, la velocidad de datos del sistema, cuantificada en bits por segundo o bps, resulta idéntica a la velocidad de símbolos en baudios. Sin embargo, esta equivalencia no es universal.

En determinados sistemas de transmisión, como el paquete 9600-Baud o los sistemas de datos digitales de D-Star, cada símbolo de datos puede codificar múltiples bits simultáneamente. Este proceso se logra mediante la transmisión paralela de señales o modulando diversos atributos de la señal en el medio de propagación. Cuando cada símbolo transmitido encapsula más de un bit informativo, la velocidad de datos supera la tasa de símbolos, incrementándose consecuentemente la eficiencia del sistema de codificación. Tal optimización implica la posibilidad de transmitir mayor volumen informativo en un ancho de banda equivalente, comparado con esquemas de codificación menos eficientes.

PROTOCOLOS Y CÓDIGOS

Previo al análisis de las características comunicacionales en modo digital, resulta pertinente establecer algunas definiciones conceptuales. Un protocolo constituye el conjunto normativo que regula la codificación, empaquetado, intercambio y decodificación de datos digitales. A modo de ejemplo, Packet Radio implementa el protocolo AX.25. El estándar AX.25 especifica detalladamente la construcción de paquetes, mecanismos de intercambio, caracteres permitidos y otros aspectos procedimentales.

El estándar de protocolo puede contemplar diversas modalidades de modulación, como paquete SSB (en HF) o paquete FM (en VHF y frecuencias superiores). Las características específicas de la señal transmitida quedan definitivamente determinadas por las prácticas operativas convencionales y la regulación vigente.

RESPONSABILIDADES DEL OPERADOR DE CONTROL

Los protocolos digitales prácticos exigen que la estación receptora y transmisora opere bajo la supervisión de microprocesadores para efectuar toda la codificación, decodificación, corrección de errores, entre otros procesos. Cuando existen señales adicionales en el canal, el sistema que implementa el protocolo generalmente interpreta que otras comunicaciones constituyen interferencias y continúa intentándolo hasta que la señal se desvanezca o fracase. Por ejemplo, las estaciones que emplean el protocolo de establecimiento de enlaces automáticos (ALE)

exploran permanentemente un conjunto de frecuencias buscando su indicativo de llamada y se activan o responden de manera automática al recibirlo, independientemente de la presencia de señales adicionales.

Debido a este potencial de interferencia, se designan segmentos específicos en cada banda de radioaficionados para estaciones que operan bajo un control completamente automático. Como en cualquier sector de las bandas de radioaficionados, resulta fundamental que el operador de control que inicia el contacto garantice que las transmisiones no generen interferencias a otras estaciones. Escuche previamente: ¡no presuma que por estar apagada la luz ocupada del módem no existen otras estaciones utilizando el canal!

CÓDIGOS

Un código representa el método mediante el cual la información se transforma hacia y desde datos digitales. Los elementos individuales que conforman un código específico son sus componentes. Estos elementos pueden ser números, bits, tonos o incluso representaciones visuales (considérese el código “uno si por tierra y dos si por mar” empleado por Paul Revere).

Un código digital no determina cómo se transmiten los datos, ni establece las reglas para su transmisión o el método de modulación. El código no controla esos aspectos: simplemente constituye un conjunto de normas para transformar información de una forma a otra. Ciertos tipos de códigos resultan más apropiados para diferentes aplicaciones, lo cual depende de la preferencia del diseñador del sistema de comunicaciones.

La radioafición utiliza tres tipos comunes de códigos: varicodos (Varicode de Morse y PSK31), Baudot y ASCII.

MORSE Y VARICODE

Mientras la mayoría de los sistemas de codificación digital emplean una cantidad constante de bits de longitud uniforme para representar cada carácter, los códigos de longitud variable pueden modificar tanto la extensión de los bits como la cantidad de bits por cada símbolo. La extensión de los códigos para un carácter fluctúa según su frecuencia de utilización con el propósito de optimizar el tiempo de transmisión. Varicode constituye un método de codificación más eficiente que los códigos de longitud fija, maximizando la eficiencia espectral y del ancho de banda.

Morse se considera un varicode debido a que sus elementos y caracteres presentan longitudes heterogéneas. La construcción del código Morse se fundamenta en el punto y su ausencia, el espacio entre elementos. Los tableros y espacios más extensos se componen de múltiples puntos e inter-espacios de elementos. Esta configuración genera los elementos de Morse: Punto, Trazo y tres longitudes de espacios entre elementos, caracteres y palabras.

PSK31 implementa una modalidad de varicode denominada igualmente Varicode, desarrollado por Peter Martínez, G3PLX. Los componentes del varicode PSK31 mantienen una longitud constante, pero sus caracteres exhiben extensiones variables, siendo el carácter textual más común “E” el más breve, con una estructura similar al código Morse.

BAUDOT

El código Baudot se emplea en sistemas RTTY y comprende dos elementos, marca y espacio, cada uno con idéntica longitud. La estructura del código se conforma mediante diversas combinaciones de cinco elementos de marca y espaciales, según se ilustra en la Figura 254. (El tono de marca puede transmitirse continuamente durante periodos de inactividad, sin que se transfiera información en dichos intervalos). Cada combinación de elementos mantiene una longitud uniforme, representando cada elemento un bit de datos.

La Figura 254 también exhibe elementos adicionales denominados bits de inicio y parada, ubicados al principio y final del grupo de cinco que representa el carácter. Estos se identifican como bits de encuadre y facilitan la sincronización del sistema receptor con los códigos

transmitidos. Un carácter recibido completo, incluyendo los bits de encuadre, se denomina marco.

ASCII

ASCII representa el Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información, siendo el código más empleado en sistemas computacionales. El código ASCII fundamental emplea siete bits informativos, lo que posibilita 128 caracteres (2⁷). Esta configuración permite que el conjunto de caracteres ASCII incorpore alfabetos, guarismos, signos de puntuación y caracteres de control especializados. A diferencia del código Baudot, el estándar ASCII no requiere un carácter de modificación para transitar entre representaciones literales y figurativas. Ciertos sistemas informáticos utilizan un octavo bit para datos adicionales, lo que expande las posibilidades a 256 caracteres, cada uno representando un byte completo de información.

El octavo bit puede funcionar como bit de paridad, destinado a la detección de anomalías en la transmisión. Este bit se configura en 1 o 0 para mantener una cantidad uniforme de unidades (paridad par) o una cantidad impar de unidades (paridad impar). Los bits de paridad permiten que el sistema receptor identifique errores de bit único. El mecanismo de recepción examina la cantidad de unidades en el carácter recibido. Si el total, incluyendo el bit de paridad, no concuerda con la convención establecida de paridad par o impar, el sistema receptor infiere la ocurrencia de una alteración durante la transmisión y puede desestimar el carácter.

Los códigos ASCII incorporan adicionalmente bits de encuadre: un bit de inicio al principio del código y uno o dos bits de conclusión. Un carácter ASCII completo comprende entre 10 y 11 bits: 7 bits de datos, un bit de paridad (o bit de datos complementario), un bit de inicio y uno o dos bits de conclusión. Es fundamental preconfigurar los sistemas de transmisión y recepción para garantizar la concordancia en estas convenciones; de lo contrario, los datos recuperados resultarán incomprensibles.

Durante la transferencia de datos ASCII, es crucial considerar la distinción entre bits por segundo y bytes por segundo. Si cada carácter ASCII incluye dos bits de encuadre, la velocidad de transferencia de bytes será aproximadamente una décima parte de la velocidad de bits.

CÓDIGO GRAY

En una matriz de patrones binarios correspondiente a caracteres ASCII o Baudot, se observará que, al contabilizar desde cero hasta el valor máximo, existen secuencias consecutivas donde múltiples bits experimentan modificaciones simultáneas. Si un sistema de comunicaciones intenta transmitir valores consecutivos, la significativa variación de bits complica su decodificación precisa, incrementando la probabilidad de errores. Los códigos Gray se estructuran para que únicamente un bit varíe entre valores consecutivos, como se ilustra en la Tabla 32. Por ejemplo, entre los valores decimales 3 y 4, en ASCII, tres bits binarios modifican su estado de 0 a 1 o viceversa, mientras que en el código Gray solo un bit experimenta transformación.

Tabla 32. Código Gray 3 bits. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Decimal	Binario	Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

MODOS DIGITALES

Un modo digital se caracteriza por un protocolo y una técnica de modulación. Puesto que los protocolos digitales permiten la transmisión de archivos de audio, video o información, cada

aplicación específica constituye una emisión o modo diferenciado, según lo establecido en la radioafición.

Los modos digitales han experimentado una expansión significativa en diversos sistemas de comunicación. Las siguientes secciones explorarán los modos digitales amateur más representativos, estableciendo comparativas entre sus características fundamentales. El desarrollo del protocolo digital representa un campo fértil para la innovación en la comunidad aficionada, donde constantemente emergen nuevos modos y variaciones de los existentes. Para quienes manifiesten interés en la tecnología de modo digital en la radioafición, el grupo TAPR (www.tapr.org) constituye el punto de referencia inicial en Internet.

ANCHO DE BANDA DE SEÑAL DIGITAL

Resulta fundamental comprender el ancho de banda de una señal digital durante su transmisión por enlace aéreo. Los teoremas informativos de Shannon, principios esenciales en la transmisión de información, establecen una correlación entre la tasa de símbolos de una señal y su ancho de banda. Cuanto más amplia sea la señal, más extenso será su espectro de transmisión. Esta relación determina el ancho de banda necesario, que representa el ancho de banda mínimo requerido para transmitir determinado número de símbolos por segundo mediante una modulación específica.

El cálculo del ancho de banda puede resultar considerablemente complejo, por lo que la ITU ha simplificado este proceso publicando un conjunto de tablas y fórmulas que relacionan el ancho de banda con diversos parámetros, incluyendo factores como desvanecimiento o modificación de teclado. (El documento ITU-R SM.1138-2 contiene dicha información). Las fórmulas de ancho de banda en las siguientes secciones se derivan de esta referencia.

CW

Una señal de CW generada mediante la activación y desactivación de un transmisor de AM se caracteriza por el designador de emisión A1A. El espectro de frecuencia de una señal de CW está condicionado por dos elementos fundamentales: la velocidad de transmisión del código y la configuración del perfil de modulación. La fórmula de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para determinar el ancho de banda requerido de CW es:

$$BW = B \times K$$

donde:

- BW representa el ancho de banda necesario de la señal
- B corresponde a la velocidad de transmisión en baudios
- K es un coeficiente relacionado con la morfología de la envolvente de modulación.

Las referencias de ancho de banda de la UIT emplean un coeficiente de 0.8 para la conversión entre BAUD y WPM. El segundo parámetro, K, refleja la abruptez de la forma de onda con valores característicos entre 3 y 5 para señales aficionadas. Conforme los intervalos de ascenso y descenso de CW se tornan más reducidos (más pronunciados y rigurosos), el valor de K se incrementa. Este fenómeno obedece a que las señales con breves periodos de transición contienen mayor cantidad de armónicos que aquellas con envolventes más prolongadas y suaves. (Es pertinente recordar que una onda cuadrada comprende un número infinito de armónicos impares). Cuantos más armónicos sean necesarios para construir la envolvente, mayor será la extensión del ancho de banda de la señal CW resultante. El estándar de la UIT sugiere un valor típico de K de 5 en un canal HF donde la señal está expuesta a desvanecimiento. Así, para las señales CW:

$$BW = (WPM \times 0.8) \times 5$$

Consideremos una transmisión en código Morse desarrollada a una velocidad de 13 WPM. Aplicando la ecuación anterior, el ancho de banda requerido para la señal transmitida resulta ser:

$$BW = WPM \times 0.8 \times 5 = 10.4 \times 5 = 52 \text{ Hz}$$

Este fenómeno explica por qué las formas de onda con transiciones “duras” y tiempos de ascenso/descenso extremadamente breves (inferior a 1 milisegundo) generan interferencias acústicas. La proliferación de armónicos que modula la señal (siendo CW fundamentalmente una señal AM) emerge como perturbaciones en frecuencias adyacentes. Dichas interrupciones con pendientes suaves descendentes pueden percibirse como distorsiones o anomalías. Para garantizar una señal limpia, se recomienda incrementar los tiempos de transición, habitualmente configurable mediante menús en los transceptores contemporáneos, asegurando una morfología de onda uniforme durante todo el ciclo de conmutación.

FSK/AFSK

Predominantemente, las transmisiones de datos aficionados en HF implementan la técnica de conmutación de frecuencia (FSK). En sistemas FSK, el transmisor emplea frecuencias diferenciadas para representar los estados 0 y 1. En RTTY se utilizan dos frecuencias, configurando un sistema binario FSK o 2-FSK. Mediante alternancia entre frecuencias de marca y espaciado, el transmisor genera símbolos de datos. La distancia entre frecuencias de marca y espaciado se denomina desplazamiento.

Las señales binarias FSK pueden generarse mediante dos metodologías. FSK directo se produce modificando la frecuencia de un oscilador transmisor con señal digital. FSK audio o AFSK se crea introduciendo dos tonos auditivos, separados por el desplazamiento apropiado, en la entrada de micrófono de un transmisor monobanda. El ancho de banda necesario está determinado por el desplazamiento frecuencial y la velocidad de transmisión de datos. El ancho de banda permanece invariable independientemente del tipo de datos o su codificación. La ecuación que correlaciona el ancho de banda requerido con el desplazamiento y velocidad de datos es:

$$BW = (K \times \text{Shift}) + B$$

donde:

- BW representa el ancho de banda requerido en Hercios.
- K constituye una constante que varía según la tolerancia de distorsión de la señal y la ruta de transmisión. En las comunicaciones FSK de aficionados más habituales, K equivale a 1.2.
- El desplazamiento corresponde al cambio de frecuencia expresado en Hercios.
- B determina la velocidad de símbolos medida en baudios.

RTTY y otros modos FSK/AFSK demandan un ajuste meticuloso del transceptor SSB para garantizar que los tonos de las señales se ubiquen lo más próximos posible a su posicionamiento preciso. Las imprecisiones en la sintonización provocarán una recepción deficiente y caracteres confusos, especialmente cuando se implementa RTTY. Para coadyuvar en el ajuste, se han diseñado diversos indicadores de “estilo cruzado”. Uno de los más difundidos es el indicador de elipse cruzado mostrado en la Figura 256. La señal debe calibrarse de manera que las elipses (que representan los dos tonos FSK) sean simétricas y se intercepten perpendicularmente. Esta pantalla exhibe con meridiana claridad el desvanecimiento selectivo, donde uno o ambos tonos se atenúan drásticamente durante un breve intervalo mientras la elipse se contrae dramáticamente.

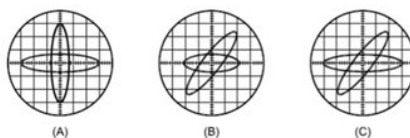


Figura 256. Indicador de elipse cruzado. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

PSK

Peter Martínez, G3PLX, concibió PSK31 para establecer comunicaciones de teclado a teclado en tiempo real. La denominación proviene de la técnica de modulación (cambio de fase (PSK)) y la velocidad de transmisión de datos, que efectivamente es de 31,25 baudios. PSK31 incorpora el conjunto de caracteres ASCII de 128 caracteres y los conjuntos de caracteres ANSI 256 completos. (ANSI representa el Instituto Nacional de Normas Americanas). Adicionalmente, existen variantes de PSK31, como el PSK63 de mayor rapidez.

PSK31 emplea Varicode para la codificación de caracteres y, al igual que con los códigos Baudot y ASCII, resulta necesario señalar los espacios entre caracteres. Varicode logra esto utilizando "00" para representar un intervalo.

Mediante Varicode, una velocidad de escritura aproximada de 50 palabras por minuto requiere una tasa de transmisión de 32 bits/s. Martínez seleccionó una frecuencia de 31,25 pb debido a que se deriva fácilmente de la frecuencia de muestreo de 8 kHz utilizada en numerosos sistemas DSP en el momento del desarrollo de PSK31.

El ancho de banda de las señales PSK31 se minimiza mediante una conformación sinusoidal especial de los símbolos de datos transmitidos y efectuando el cambio de fase de la modulación únicamente cuando la señal portadora de RF cruza la tensión cero. Esta acción reduce el contenido armónico de cada símbolo. Aplicando la ecuación 8,1 y $k = 1,2$, el ancho de banda de una señal PSK31 es aproximadamente $BW = 31,25 \text{ Hz} \times 1,2 \text{ Hz} = 37,5 \text{ Hz}$, más estrecho que todos los modos digitales HF bidireccionales empleados por aficionados, incluyendo CW. El modo

El reducido ancho de banda y la modulación de cambio de fase exigen un ajuste estable y una configuración meticulosa del transmisor.

RADIO DE PAQUETES Y APRS

La radio por paquetes en VHF y UHF utiliza modulación AFSK para transmitir datos a 1200 baudios a través de un enlace FM. Los datos se intercambian en paquetes denominados frames (tramas) utilizando los métodos definidos por el estándar de protocolo AX.25. La información detallada sobre radio por paquetes y el protocolo AX.25 está disponible en el sitio web de Tucson Amateur Packet Radio (TAPR), tapr.org.

El empleo más frecuente de la radio por paquetes consiste en establecer conexiones con sistemas de almacenamiento y reenvío. Esto hace referencia a un sistema informático que recibe mensajes, los almacena y los hace accesibles para otros usuarios o los retransmite a sistemas informáticos adicionales. El método más común para crear estos sistemas en VHF y UHF es mediante radio por paquetes.

El Automatic Packet Reporting System (APRS) es un sistema de mensajería que aprovecha las funcionalidades de radio por paquetes mediante el Protocolo de Radio por Paquetes Amateur AX.25. La posición y otros datos de una estación se transmiten a estaciones de la región y se reenvían a servidores de Internet.

La red de estaciones APRS se construye mediante estaciones individuales que utilizan radio por paquetes para retransmitir datos APRS entre otras estaciones de la red. Una estación APRS típicamente emplea una radio FM de 2 metros operando en la frecuencia nacional APRS de 144,39 MHz. La estación se compone de un Terminal Node Controller (TNC) de radio por paquetes y un sistema informático ejecutando software APRS.

Un receptor del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) habitualmente proporciona la información de posición. Las estaciones APRS transmiten un paquete de baliza que contiene la ubicación de la estación, condiciones meteorológicas y mensajes de texto breves. Los datos se transmiten en una trama de información no numerada (unnumbered information frame, UI).

Otras estaciones actúan como digipeaters para retransmitir los paquetes a estaciones adicionales y a gateways que reenvían la información de la estación a servidores APRS en Internet, como findu.com.

El programa informático APRS ejecutable en un ordenador personal permite visualizar el indicativo de llamada de la estación sobre un mapa geográfico, incorporando un ícono personalizado por el usuario junto con los datos transmitidos. Los paquetes APRS carecen de direccionamiento específico y las estaciones receptoras no validan formalmente la recepción correcta de los paquetes.

Esta característica simplifica la operatividad APRS, ya que no resulta imperativo que todas las estaciones permanezcan constantemente “interconectadas” para garantizar el funcionamiento y transferencia de información. Uno de los códigos de enrutamiento que pueden emplear los paquetes APRS se denomina WIDEn-N, donde n representa el número de saltos solicitados por la estación de origen y N corresponde a los saltos pendientes.

Una estación que recibe el código WIDE3-1 comprende que se requirieron tres saltos y resta uno por ejecutar.

Los datos de posicionamiento se transmiten a la red APRS mediante coordenadas de latitud y longitud. Dichas coordenadas pueden obtenerse:

- Mediante un mapa cartográfico preciso en grados, minutos y segundos, introduciendo manualmente la información en una computadora anfitriona que ejecuta software APRS, o
- Como una secuencia textual con formato NMEA-0183 proveniente de un receptor satelital del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) u otro sistema de navegación compatible.

NMEA-0183 hace referencia a un estándar de formato de datos de la National Marine Electronics Association. Diversos controladores de nodo terminal (TNC) disponibles comercialmente facilitan conexiones directas a un receptor GPS a través de una interfaz de datos serie RS-232.

Las estaciones APRS compactas y de baja potencia denominadas “trackers” integran todas las funcionalidades necesarias (TNC, transceptor y receptor GPS) en una única unidad. Los trackers simplifican la incorporación de monitoreo de ubicación en plataformas portátiles y móviles durante actividades como ciclismo, senderismo o conducción.

Al incorporar los datos de altitud proporcionados por el receptor GPS, se puede obtener un posicionamiento tridimensional. Este tipo de sistema APRS se utiliza frecuentemente para rastrear la ubicación de globos de gran altitud o cohetes en tiempo casi real, facilitando su recuperación y vinculando la posición con cualquier dato sensorial en proceso de medición.

Las redes APRS también pueden emplearse para respaldar comunicaciones de servicio público o emergencia, proporcionando a los gestores de eventos e interventores información de ubicación y datos continuamente actualizados desde una estación equipada con APRS.

PAQUETE HF

La radiocomunicación de paquetes en HF emplea idéntico protocolo AX.25 que en VHF, aunque se limita a 300 baudios por regulación para controlar el ancho de banda de la señal. La mayoría de transmisiones de paquetes HF utilizan FSK a 300 baudios en contraste con la AFSK de 1200 baudes más común en sistemas de paquetes VHF FM.

La extensión de los paquetes AX.25 (típicamente 40 bytes) y la distorsión y desvanecimiento de la propagación HF confluyen para convertirlo en un modo de nicho, aunque en condiciones de comunicación óptimas sigue siendo más veloz que RTTY de 45 baudios, PSK31 o AMTOR.

PACTOR

El protocolo Pactor inicial (identificado como Pactor-I) constituye un método digital de alta frecuencia concebido por los radioaficionados alemanes Hans-Peter Hfert, DL6MAA y Ulrich Strate, DF4KV. Su propósito fundamental fue superar las limitaciones inherentes al paquete Amtor y HF. Demuestra un rendimiento óptimo bajo condiciones de señal tenue y elevada interferencia acústica. El protocolo igualmente facilita la transmisión de archivos binarios, lo cual resulta sumamente provechoso en el entorno contemporáneo orientado a datos. El intercambio informático se realiza mediante paquetes estructurados que incorporan mecanismos de detección y corrección de errores. Esta característica lo posiciona como un sistema altamente confiable, si bien no permite la interacción directa de comunicación tipo conversación.

Los protocolos Pactor más difundidos actualmente son Pactor-III y su variante Winmor, especialmente para gestionar correo electrónico mediante HF a través del sistema Winlink.

Los sistemas Pactor evalúan automáticamente las condiciones entre estaciones receptoras y transmisoras, adaptándose a la velocidad máxima respaldada por la ruta. Consecuentemente, los sistemas Pactor-III que operan por encima de 5 kbps proporcionan la mayor velocidad de transferencia entre los modos digitales de alta frecuencia aficionada. (Es importante precisar que Winlink no constituye un modo específico, sino un sistema integral de protocolos y servicios telemáticos que posibilitan el intercambio de correo electrónico mediante espectro aficionado).

MODOS WSJT-X

Desarrollado por un equipo liderado por Joe Taylor, K1JT, el paquete de software WSJT-X respalda diversos modos concebidos específicamente para comunicaciones de señal débil, como Tierra-Luna (JT4 y JT65 para EME), dispersión meteórica (MSK144) y contactos de baja señalización en HF (FT8 y FT4).

Los protocolos WSJT-X implementan modulación AFSK múltiple avanzada y códigos sofisticados para recuperar señales con proporciones señal/ruido extremadamente reducidas. Estos protocolos emplean secuencias cronometradas de transmisión y recepción con precisión milimétrica para sincronizar estaciones. Ejemplificando, las secuencias FT4 poseen 7.5 segundos de duración mientras que las JT65 se extienden por un minuto completo. Para información adicional sobre protocolos WSJT-X, se recomienda consultar el sitio web de K1JT en Physics.princeton.edu/pulsar/K1JT.

MODULACIÓN OFDM

Una modalidad especial de modulación utilizada en modos multitono genera señales espectralmente conformadas y espaciadas para minimizar interferencias mutuas. La Figura 257 (A) ilustra el espectro de una señal modulada por un bit único. Obsérvese cómo el espectro presenta amplitud cero en intervalos regularmente distribuidos. Si múltiples señales se disponen de manera que sus espectros se superpongan precisamente en puntos cero, como muestra en (B), la demodulación de cada señal sin interferencia entre subportadoras resulta significativamente simplificada, fenómeno denominado interferencia intersimbólica. Las señales con este espaciado y tasa de modulación se consideran ortogonales entre sí. La combinación de tonos múltiples y señales ortogonales origina la multiplexación por división de frecuencia ortogonal u OFDM. OFDM demanda técnicas de modulación precisas y señales transmitidas prístinas. Es utilizado por versiones posteriores de Pactor y otros modos digitales de banda ancha avanzados.

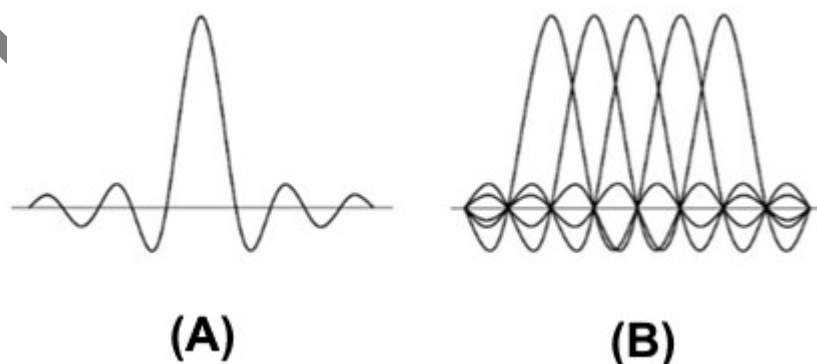


Figura 257. Modulación OFDM. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

TRANSMITIR SEÑALES DE MODO DIGITAL

Para garantizar un funcionamiento óptimo de los modos digitales, resulta fundamental prestar especial atención a la calidad de la señal transmitida. Particularmente cuando se implementan

protocolos que demandan un control de fase y amplitud altamente preciso, es crucial evitar la introducción de distorsiones en cualquier segmento de la ruta de transmisión.

Los sistemas ALC transmisores están concebidos originalmente para comunicación vocal y generarán deformación de la señal modulada al modificar el nivel de potencia. Este proceso genera distorsión de intermodulación (IMD) y otras señales parásitas en la salida del transmisor. Dichas señales no solo provocan interferencias, sino que también complican significativamente la recuperación de datos por parte del receptor. Cuando el medidor ALC del transceptor permanece activo durante la transmisión digital, el transmisor altera excesivamente la señal, por lo que el nivel de audio debe reducirse.

Para asegurar una señal digital prístina, es imperativo seguir las recomendaciones del fabricante respecto al establecimiento de los controles transmisores, con especial énfasis en la ganancia de ALC y micrófono. El software receptor de señales digitales AFSK frecuentemente cuantifica el nivel de distorsión de las señales, informándolo como un parámetro denominado "nivel IMD".

Por ejemplo, para una señal PSK inmaculada en estado de reposo (sin envío de caracteres), el nivel IMD recibido debe situarse en -30 dB con relación a la señal principal. La sobremodulación se visualiza en una pantalla de estilo cascada mediante barras o "señales fantasmas" adyacentes a la señal transmitida principal, extendiéndose hacia frecuencias superiores e inferiores.

Una vez configurados correctamente el transmisor, la computadora o TNC, se recomienda realizar una verificación "en el aire" personalmente o con una estación cercana. La medición de la señal digital propia puede efectuarse transmitiendo a una carga ficticia, recibiendo la señal en un segundo receptor y canalizando el audio recibido hacia la tarjeta de sonido de un equipo informático que ejecute un programa de demodulación específico para ese modo. Este procedimiento permitirá evaluar rápidamente la configuración correcta de los niveles de audio y radiofrecuencia en el sistema de transmisión.

Adicionalmente, la imposibilidad de establecer un contacto digital puede no estar relacionada directamente con el transmisor. Este fenómeno se denomina problema de "transmisor oculto". En las bandas de HF, es habitual que una estación resulte inaudible en un punto geográfico, pero significativamente intensa en otro debido a las condiciones de propagación. Cuando acontece esta situación, una estación que recibe señales de dos estaciones mutuamente inaudibles a menudo podrá decodificar correctamente cualquier señal. Este escenario puede obstaculizar el establecimiento de contacto con otra estación incluso en un canal aparentemente despejado. Cuando ocurre, podría ser necesario intentarlo nuevamente en un momento posterior cuando varíen las condiciones.

TÉCNICAS DE ESPECTRO ENSANCHADO

El criterio convencional para evaluar la eficacia de un esquema de modulación consiste en analizar la capacidad de concentración de la señal para una tasa informativa determinada: una menor ocupación espectral para una velocidad de transmisión equivalente se considera óptima. Mientras que la concentración de la señal resulta atractiva según el pensamiento tradicional, las metodologías de modulación de espectro propagado presentan un enfoque diametralmente opuesto. Estas técnicas provocan la expansión de la señal sobre un espectro extremadamente amplio mediante la alteración dinámica de la frecuencia portadora siguiendo una secuencia previamente establecida.

El ancho de banda de la señal comunicacional experimenta una dilatación (denominada dispersión) que oscila entre factores de 10 a 10,000 mediante la implementación de una secuencia binaria (el código de propagación) destinada a modificar la frecuencia de la señal. Los procedimientos específicos serán examinados posteriormente.

La propagación genera dos consecuencias ventajosas. El primer efecto radica en la diseminación energética de la señal en una frecuencia específica, de manera que, al ocupar un espectro considerablemente extenso, la densidad de potencia en cualquier punto dentro de la señal propagada resulta significativamente reducida, como se muestra en la Figura 258.

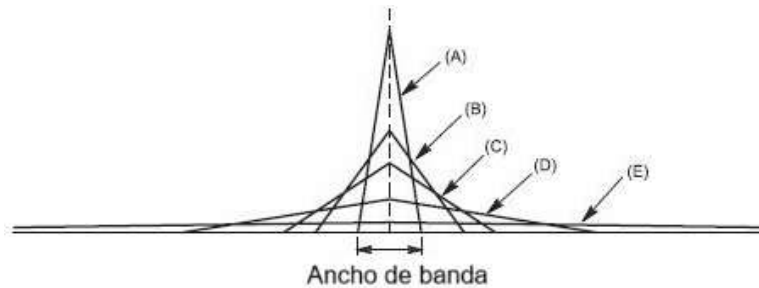


Figura 258. Señal de espectro ensanchado. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

La dispersión de la señal en múltiples frecuencias provoca que las señales de espectro de propagación se manifiesten como ruido de amplio ancho a un receptor tradicional. La propagación del espectro puede originar que la señal digital se sitúe por debajo del umbral de ruido de un receptor convencional y, consecuentemente, resulte imperceptible para este, mientras que la señal aún puede ser captada mediante un receptor de espectro de extensión.

El segundo efecto ventajoso de la propagación del espectro radica en que un receptor de espectro de propagación puede descartar señales indeseadas intensas, incluso aquellas significativamente más potentes que la densidad de potencia de la señal de espectro de extensión deseada. Esto se fundamenta en que el receptor emplea el código de propagación para “eliminar” la señal, mediante un proceso similar al seguimiento de la señal conforme varía su frecuencia. Las señales ajenas se suprimen durante el procesamiento debido a su inconsistencia con el código de propagación. La eficacia de esta propiedad de rechazo de interferencia ha transformado al espectro de propagación en una técnica de seguridad comunicacional ampliamente reconocida.

Las señales convencionales como FM de banda estrecha, SSB y CW son rechazadas por un receptor de espectro de extensión, al igual que otras señales de espectro de propagación que no se ajustan a la secuencia de codificación requerida. El resultado es un tipo de canal privativo, donde únicamente se reciben señales de espectro de extensión que utilizan el código de propagación correcto. Es posible establecer una conversación bilateral, o si el código de difusión es conocido por múltiples participantes, se pueden realizar operaciones de tipo red.

La implementación de diversos códigos de propagación permite que varios sistemas de espectro de propagación operen de manera independiente mientras comparten idénticas frecuencias. Este es un método de intercambio de frecuencia denominado Acceso múltiple de división de código o CDMA. Si los parámetros de propagación se seleccionan prudentemente para las condiciones de propagación existentes en las frecuencias elegidas, los usuarios convencionales en la misma banda de aficionados experimentarán una interferencia mínima proveniente de los usuarios de espectro de propagación. Esto facilita la concentración de más señales en una banda, aunque cada señal adicional (espectro convencional o de dispersión) introducirá cierta interferencia para todos los usuarios al incrementar el nivel de ruido recibido.

TIPOS DE PROPAGACIÓN DE ESPECTRO

Existen diversas metodologías para transmitir una señal, no obstante, todos los sistemas de espectro de propagación pueden interpretarse como una combinación de dos procesos de modulación. Inicialmente, se emplea una modalidad convencional de modulación, sea esta analógica o digital, para incorporar información al portador. Posteriormente, el operador modulado experimenta una segunda modulación mediante el código de propagación, provocando su expansión sobre un amplio espectro de ancho de banda. Cuatro técnicas de propagación se implementan habitualmente en comunicaciones militares y espaciales, aunque los aficionados actualmente solo tienen autorización para utilizar salto de frecuencia y secuencia directa.

SALTO DE FRECUENCIA

El salto de frecuencia (FH) constituye una modalidad de dispersión donde la frecuencia central de un portador convencional se modifica múltiples veces por segundo, siguiendo una lista de canales pseudoaleatorios. (Pseudoaleatorio significa que la lista no es verdaderamente aleatoria, sino una secuencia extensa de números que parecen aleatorios antes de su repetición). La misma lista de canales debe ser empleada simultáneamente por la estación receptora. El período durante el cual la señal permanece en cualquier canal se denomina tiempo de permanencia. Para prevenir interferencias tanto hacia como desde usuarios de frecuencia convencionales, el tiempo de permanencia debe ser extremadamente breve, generalmente inferior a 10 milisegundos.

SECUENCIA DIRECTA

En el ámbito de propagación de secuencia directa (DS), se emplea una corriente de bits binaria extremadamente veloz para alterar la fase del portador modulado. El espectro de propagación de DS se utiliza comúnmente para transmitir información digital.

De manera similar a los sistemas de lista de frecuencia pseudo-aleatorio FH, la secuencia de bits generada por un circuito digital está concebida para aparentar aleatoriedad. Esta secuencia binaria puede ser replicada y sincronizada tanto en el transmisor como en el receptor. Tales secuencias reciben la denominación de pseudo-ruido o PN.

Cada bit del código PN se denomina chip, y la velocidad a la que los chips modifican la fase de la portadora se conoce como tasa de chip (chip rate). Si la fase de la portadora de RF experimenta un desplazamiento de 0 o 180 grados, se denomina modulación por desplazamiento de fase binaria (binary phase-shift keying, BPSK). Adicionalmente, se emplean otros tipos de modulación por desplazamiento de fase, incluyendo la modulación en cuadratura, que codifica señales digitales mediante una combinación de modulación de amplitud y fase.

Con dos modalidades de modulación disponibles, resulta factible empaquetar una mayor cantidad de bits de datos en cada símbolo de modulación, lo que posibilita una superior velocidad de transmisión (throughput) para un ancho de banda determinado. Los formatos de modulación contemporáneos incorporan hasta 8 o más bits por símbolo, lo cual resultaría impracticable para la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), por desplazamiento de frecuencia (FSK) o por desplazamiento de fase (PSK) de manera individual.

Los estados de modulación de los diversos formatos digitales se asignan a posiciones en el diagrama fasorial, denominado diagrama de constelación (constellation diagram). El transmisor genera los estados de modulación apropiados aplicando valores específicos a las entradas I y Q del modulador I/Q. En el receptor, los valores I y Q filtrados se muestrean en los momentos de decisión del símbolo para determinar con qué estado de modulación coinciden más cercanamente.

Dado que los símbolos modulados en cuadratura se definen tanto por su amplitud como por su fase, la representación más habitual de los estados del símbolo es mediante el diagrama de constelación. La Figura 259. Diagrama de constelación. (Adaptado de ARRL) ilustra una señal de modulación por amplitud en cuadratura de cuatro niveles (4-QAM), frecuentemente denominada simplemente QAM. La distancia de cada estado desde el origen representa la amplitud. El ángulo de fase con respecto al eje +I representa la fase. Los cuatro estados exhibidos presentan ángulos de fase de $+45^\circ$, $+135^\circ$, -45° y -135° .

Típicamente, el receptor carece de información de fase absoluta y solo puede detectar diferencias de fase entre los estados. Por tal razón, podría haberse representado fácilmente los cuatro estados directamente sobre los ejes I y Q, en 0° , $+90^\circ$, 180° y -90° . Obsérvese que cada uno de los cuatro estados posee idéntica amplitud, diferenciándose únicamente en fase. Consecuentemente, el 4-QAM se conoce frecuentemente como modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (quadrature phase-shift keying, QPSK), de manera análoga a cómo la modulación ASK de dos niveles se denomina normalmente BPSK.

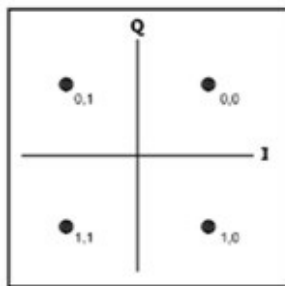


Figura 259. Diagrama de constelación. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

APLICACIONES DE ESPECTRO ENSANCHADO EN RADIOAFICIONADOS

Los radioaficionados implementan metodologías de propagación de señal mediante espectro ensanchado para configurar infraestructuras de red interconectadas, como Broadband-Hamnet (BBHN), Amateur Radio Emergency Data Network (AREDN) y HamWAN. Los componentes individuales de la red se desarrollan transformando routers Wi-Fi comerciales mediante software especializado que garantiza el cumplimiento de las normativas de radioaficionados.

Los componentes de red operan en frecuencias compartidas con diversos sistemas inalámbricos de transmisión de datos no regulados, tales como Wi-Fi. Cuando se inicializa un nodo, emplea protocolos de identificación y establecimiento de conexiones, análogos a los utilizados por sistemas comerciales de comunicación inalámbrica.

Estas redes de radioaficionados funcionan en las bandas de 2,4 GHz y 5,6 GHz y representan una utilización emergente y expansiva de las frecuencias de microondas para comunicaciones de datos personales y de servicio público.

Al implementar una red mallada de radioaficionados, se aplican todas las regulaciones estándar correspondientes a otras modalidades de transmisión de radioaficionados, incluyendo la restricción absoluta de cifrado (encryption). Esto implica que ciertos protocolos de Internet, como https, no pueden transmitirse a pesar de la implementación de direcciones de Protocolo de Internet (IP) por parte de los nodos.

DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES

Incluso los sistemas de transmisión más avanzados no pueden asegurar una transmisión perfecta del 100% de los datos a través de un enlace inalámbrico. Existen numerosas formas en las que los fenómenos naturales pueden interrumpir la señal; el ruido ambiental, la interferencia múltiple y la degradación de la señal representan solo algunas de las posibles causas de distorsión. Para comprender la complejidad de las señales de datos, basta con intentar capturar transmisiones RTTY débiles o afectadas por variaciones ionosféricas.

Conscientes de las complejidades de la propagación radioeléctrica, los especialistas en comunicaciones de datos han desarrollado diversas estrategias. El primer desafío fundamental consiste en identificar la ocurrencia de un error. Este proceso se denomina detección de errores. Sin información complementaria sobre la configuración original de los datos, resulta imposible detectar alteraciones. Para poder discernir las modificaciones en la transmisión, se envía información descriptiva junto con los datos primigenios.

Los mecanismos de detección de errores pueden ser tan elementales como el bit de paridad en datos ASCII previamente mencionados. Otra técnica ampliamente utilizada de detección de errores, implementada en protocolos como AX.25 de Packet Radio, sistemas de red TCP/IP y Ethernet, es la verificación de redundancia cíclica o CRC. Cuando el CRC de un paquete recibido coincide con el CRC transmitido originalmente, se considera que el paquete está exento de alteraciones. La aplicación de CRC permite detectar la mayoría de las inconsistencias.

Una vez identificado un error, el sistema debe determinar su estrategia de resolución, lo que traslada el proceso desde la detección hacia la corrección. El método más básico de corrección

es ARQ (solicitud de retransmisión automática). Si el sistema receptor detecta una anomalía, solicita la retransmisión del paquete o mensaje comprometido mediante el envío de un mensaje NAK (no reconocimiento) a la estación transmisora. La información se retransmite hasta que el receptor responde con un mensaje ACK (reconocimiento). Ante errores persistentes, el sistema eventualmente interrumpe la conexión.

Otra técnica relevante de corrección de errores implica el envío de información adicional junto con el mensaje original, permitiendo que la estación receptora corrija determinados tipos de alteraciones. Esta metodología se denomina corrección de error hacia adelante o FEC. El término “reenvío” evita la transmisión de datos correctivos “adelante” con la información primaria. La combinación de datos FEC y el algoritmo para detectar y corregir errores se conoce como código FEC.

Existen múltiples variantes de códigos FEC: los códigos de Reed-Solomon, Hamming, BCH y Golay se implementan frecuentemente en electrónica de consumo. Los datos FEC ocasionalmente se distribuyen en múltiples paquetes para compensar desvanecimientos. FEC se utiliza en voz digitalizada para preservar la calidad del discurso recibido. Este es el motivo por el cual los sistemas de voz digital (como teléfonos móviles) mantienen una calidad óptima hasta cierto umbral de error, tras el cual se vuelven completamente ininteligibles: su código FEC falla en ese punto.

7.7.3 Televisión de aficionados

Muchos radioaficionados nuevos se sorprenden al descubrir que pueden comunicarse mediante señales de televisión de video “similar a las estaciones de transmisión”. La televisión de escaneo lento mantiene una presencia significativa en las bandas de aficionados, aprovechando la tarjeta de sonido de la computadora y tecnologías de procesamiento de señales. Los radioaficionados más jóvenes podrían asimismo sorprenderse al constatar que parte del equipo necesario ya podría estar a su disposición.

TELEVISIÓN DE ESCANEO RÁPIDO

El entusiasta con una licencia de categoría intermedia o superior puede emplear la televisión de escaneo rápido (FSTV, por sus siglas en inglés). FSTV o AMATEUR TV (ATV) presenta una notable similitud con la televisión de calidad de transmisión, dado que típicamente utiliza idénticos estándares técnicos. Se denomina “escaneo rápido” debido a que las imágenes se transmiten con suficiente celeridad para permitir videos de movimiento completo. Los aficionados generalmente emplean estándares de transmisión comercial para señales de TV, aunque no se circunscriben exclusivamente a dichos estándares. No obstante, por la amplia disponibilidad de equipamiento compatible con tales estándares, la mayoría de la televisión aficionada resulta interoperable con dispositivos de transmisión comercial para señales analógicas.

TV DIGITAL DE AFICIONADOS (DATV)

A pesar de que esta sección se enfoca solamente en señales de televisión analógica, es importante mencionar que la transición de la televisión aficionada hacia el modo digital estandarizado está en proceso. Equipamiento asequible se encuentra disponible con mayor frecuencia debido al incremento de diversos grupos que experimentan con televisión digital. Aunque existen numerosos equipos analógicos en uso activo, se espera que DATV alcance similar popularidad.

COMPONENTES DEL SISTEMA DE ESCANEO RÁPIDO

Una estación ATV básica se configura según se ilustra en la Figura 260. En este punto es posible identificar equipos comunes de entretenimiento doméstico. Cualquier cámara o videocámara que genere una señal de video estándar puede ser utilizada, ya sea en color o monocromática. Los moduladores de ATV más recientes pueden operar directamente con señales HDMI provenientes de cámaras. Existen convertidores destinados a transformar señales de video analógico a HDMI.

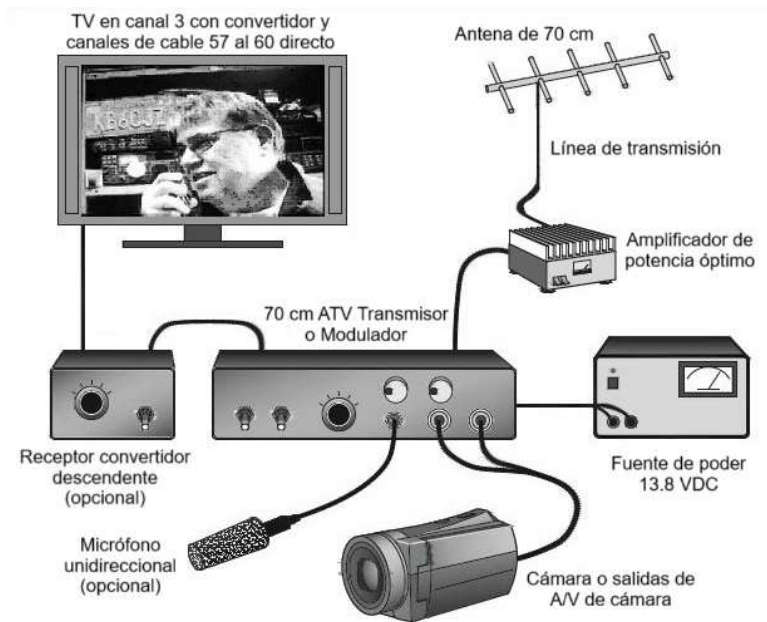


Figura 260. Estación ATV básica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Los dispositivos de visualización para aplicaciones “fuera del aire” pueden ser cualquier pantalla televisiva o informática que admita una señal de video compuesto, proveniente de una cámara o reproductor multimedia. Igualmente, resultan viables algunos equipos con compatibilidad HDMI. Los receptores televisivos convencionales preparados para señal por cable pueden emplearse mediante un dispositivo de conversión o reductor para captar señales de ATV UHF que utilizan estándares de transmisión. El convertidor traslada la señal ATV a un canal sin utilizar compartido con sistemas de televisión por cable para su presentación.

Un transmisor de ATV representa un componente poco común en la mayoría de las estaciones de radioaficionado. No obstante, existen transmisores ATV de baja potencia, moduladores y amplificadores lineales ATV con unos cuantos watts de potencia de salida. Estos dispositivos reciben una señal de video compuesto estándar como entrada y generan la señal ATV UHF preparada para amplificación o conexión directa a la antena.

Las antenas para ATV requieren una ganancia significativamente elevada (para incrementar la resistencia de señal en anchos de banda reducidos) y un patrón de radiación consistente sobre el amplio ancho de banda ocupado por una señal ATV. Los reflectores Yagis y Corner resultan populares para estaciones ATV. En frecuencias de microondas, se implementan antenas Yagi y parabólicas.

DEFINICIONES DE SEÑAL DE VIDEO

En la televisión analógica, un procedimiento denominado Scanning transforma una representación visual en una secuencia de líneas horizontales, identificadas como líneas de exploración. Dichas líneas se transmiten hacia un dispositivo receptor que reconstruye la imagen línea por línea en una pantalla de tubo de rayos catódicos o de manera continua. La integración de señales de video y control necesarias para transmitir y exhibir la imagen se denomina ráster, el cual está determinado por un estándar de video específico. En el ámbito de la televisión digital, la imagen se captura como un conjunto de píxeles y se transfiere mediante una señal digital, siendo HDMI el método de interfaz más frecuentemente utilizado.

Al difundir una imagen analógica por el aire, los aficionados estadounidenses emplean el estándar NTSC (Comité Nacional de Estándar de Televisión). Para la televisión digital, se implementan los estándares DVB-T o Cable-QAM. Las evaluaciones están limitadas a las señales analógicas de TV y video.

La Tabla 33 detalla los componentes principales del estándar NTSC aplicado para ATV. En este estándar, un total de 525 líneas de exploración horizontales conforman un marco para generar una imagen completa. Se producen treinta cuadros cada segundo. Cada cuadro está compuesto por dos campos, con cada campo conteniendo 262 1/2 líneas, generándose así 60 campos por segundo. La Figura 261 representa gráficamente el concepto de líneas de exploración y entrelazado. Las cámaras CCD y las pantallas de estado sólido no exploran ni reproducen la imagen de manera idéntica, pero la señal de video compuesta mantiene su estructura original. HDMI y otras interfaces de video digital utilizan un conjunto diferente de señales que no serán abordadas en este texto.

Tabla 33. Elementos principales del estándar NTSC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Parámetro	Valor
Tasa de líneas	15,750 Hz
Tasa de campos	60 Hz
Tasa de cuadros	30 Hz
Líneas horizontales por campo	262 ½ por campo
Líneas horizontales por cuadro	525 por cuadro
Subportadora de sonido	4.5 MHz
Ancho de banda del canal (VSB-C3F)	6 MHz

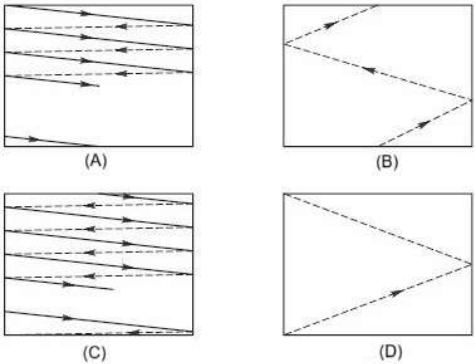
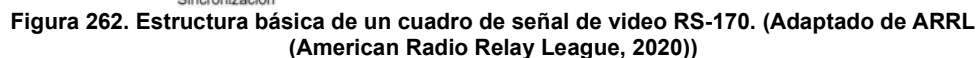


Figura 261. Concepto de líneas de escaneo y entrelazos. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Explorar líneas de un campo se intercala entre líneas del campo contiguo. Esta técnica denominada entrelazamiento se implementa para disminuir la intermitencia, optimizar la fluidez del desplazamiento entre marcos y reducir el ancho de banda mientras preserva una calidad visual apropiada. Si la totalidad de 525 líneas de exploración se encuentran enumeradas de manera descendente, un campo contendrá las líneas pares y el campo alternativo albergará las líneas de numeración impar. Este procedimiento de segmentación de imagen se invierte para generar la representación visual línea por línea que se despliega en un receptor televisivo o pantalla computacional.

La señal electrónica que transporta toda la información de coordinación visual y despliegue se denomina video de banda base o video compuesto, especificado en el estándar ANSI RS-170. La Figura 262 ilustra la estructura fundamental de un marco de señal de video RS-170. Las señales de sincronización presentan una tensión negativa mientras que la porción de video de la señal exhibe una tensión positiva. El nivel de tensión estándar entre el video blanco y el punto de sincronización corresponde a 1 V pico a pico. Los profesionales en ingeniería televisiva cuantifican los niveles de video en unidades IRE o IEEE.



El *blanking* hace referencia al intervalo temporal existente entre líneas de video y marcos. Aunque las pantallas modernas ya no requieren este proceso, las señales continúan utilizándose para propósitos de temporización y sincronización. Dichos períodos temporales reciben la denominación de intervalos de *blanking* horizontales y verticales.

VIDEO COMPUESTO Y RGB

En una señal de video de color compuesto, toda la información de la imagen se concentra en una única forma de onda. La información cromática (denominada croma) se combina con la información de luminancia mediante el empleo de una señal de subportadora de crominancia.

En cada línea de exploración, entre el término del pulso de sincronización horizontal y el inicio del video, existe un breve intervalo con una señal de 3,5789 MHz. Esta corresponde a la frecuencia de la subportadora de croma. La breve ráfaga de croma facilita la sincronización de la subportadora de imagen y crominancia. Una imprecisión en este bloqueo provocaría una reproducción incorrecta de los tonos cromáticos.

Una transmisión de video ATV cromático con barrido acelerado presenta un espectro de frecuencia aproximadamente de 4 megahercios, según se ilustra en la Figura 263. (Las señales monocromáticas satisfactorias demandan un ancho de banda ligeramente inferior). El amplio espectro resulta fundamental para transmitir la información necesaria para imágenes con renderización instantánea y procesamiento en tiempo real. Por consiguiente, el ATV únicamente se autoriza en el intervalo de frecuencia comprendido entre 420 y 450 megahercios, así como en rangos espectrales superiores.



La mayor parte de la actividad de ATV se desarrolla en el intervalo de frecuencia comprendido entre 420 y 450 MHz. La frecuencia específica empleada depende de los planes de banda personalizados locales. Ciertas zonas pobladas cuentan con repetidores de ATV. Los practicantes de ATV deben procurar no interferir con operaciones de señal débil (como observaciones lunares) cercanas a 432 MHz, ni con operaciones de repetidor por encima de 442 MHz.

La mayoría de los aficionados emplean modulación de banda lateral vestigial (VSB) para transmisión. VSB se asemeja a SSB con portador completo, con la particularidad de que se preserva una porción (vestigio) de la banda lateral no deseada. En el contexto de televisión VSB, aproximadamente 1 MHz de la banda lateral inferior, la totalidad de la banda lateral superior y el portador completo conforman la señal de imagen transmitida. La Figura 263 ilustra el espectro de una señal televisiva en color. VSB requiere menor ancho de banda que una señal AM de doble banda completa, manteniendo la posibilidad de demodulación satisfactoria mediante circuitos detectores de video simples.

Existen al menos tres métodos para transmitir información vocal mediante una señal televisiva. El procedimiento más común consiste en utilizar una banda alternativa, frecuentemente FM de 2 metros. Esta estrategia permite que otros radioaficionados locales sean testigos de la actividad. Se recomienda emplear una frecuencia simplex en lugar de vincular un repetidor.

Los televisores comerciales incorporan una subportadora de audio FM a 4,5 MHz sobre el portador de imágenes de TV. Si el transmisor ATV proporciona audio FM mediante una subportadora 4,5 MHz por encima del portador de video, la recepción de audio resulta sencilla en un televisor analógico convencional.

TELEVISIÓN DE ESCANEO LENTO

Dado que los sistemas de televisión de escaneo rápido requieren varios megahercios de ancho de banda, podría parecer que las bandas de HF quedan excluidas para transmisión de imágenes. Sin embargo, existen dos modalidades de imagen viables en HF: facsímil y televisión de escaneo lento. Probablemente se esté familiarizado con el facsímil o fax, y los aficionados pueden efectivamente utilizar idénticos protocolos sobre ondas radioeléctricas. El facsímil entre aficionados ha caído en desuso, siendo la televisión de escaneo lento (SSTV) la modalidad predominante, a pesar de ofrecer una resolución ligeramente inferior.

Como modalidad de representación visual, SSTV se encuentra limitado a los segmentos telefónicos de todas las bandas de frecuencia (excluyendo la banda de 30 metros, donde la operación telefónica no está autorizada). El ancho de banda de la señal SSTV debe mantenerse equivalente al de una señal telefónica que emplee idéntica modulación. SSTV se transmite predominantemente en frecuencias de alta frecuencia (HF) debido a que la exploración lenta resulta viable en bandas de ultra alta frecuencia (UHF) y frecuencias superiores. Las frecuencias estándar de llamada para SSTV en HF comprenden 3,845 MHz, 7,171 MHz, 14,230 MHz, 21,340 MHz y 28,680 MHz. Las bandas de 20 y 75 metros resultan ser las más utilizadas para SSTV.

Un sistema SSTV convencional, ilustrado en la Figura 264, incorpora una computadora y un programa informático destinado a generar los tonos acústicos necesarios para representar una imagen con fines de transmisión, así como para decodificar los tonos recibidos y desplegar la imagen en el monitor computacional. Los gráficos por computadora expanden significativamente las posibilidades de creación de imágenes SSTV propias. El software permite capturar imágenes provenientes de videos, cámaras estáticas o escáneres documentales para su transmisión mediante exploración lenta. Adicionalmente, posibilita el almacenamiento de imágenes recibidas en el disco para retransmisiones posteriores.

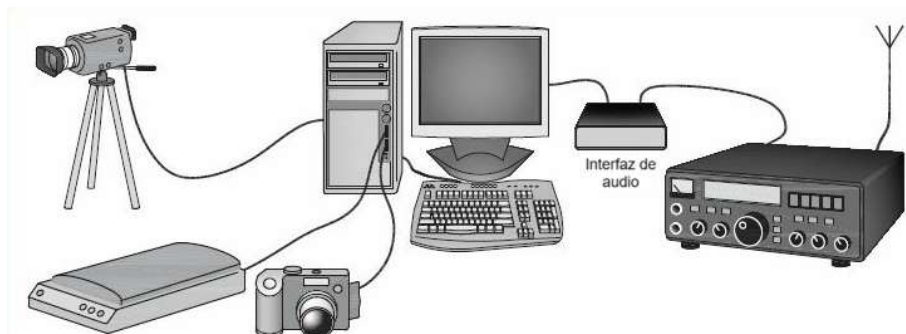


Figura 264. Sistema SSTV típico. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Un aspecto fundamental del transceptor radica en que SSTV representa un método de transmisión con ciclo operativo de 100% de duración. Este principio implica que su transmisor generará potencia máxima durante la totalidad del período de transmisión de imágenes. La mayoría de los transmisores y amplificadores necesitarán operar con una potencia de salida reducida para prevenir el sobrecalentamiento.

FUNDAMENTOS DE LA SEÑAL SSTV ANALÓGICA

De manera similar a la televisión de exploración rápida, SSTV fragmenta la imagen en líneas de barrido y marcos. (La terminología fundamental de la imagen televisiva se encuentra definida en la sección precedente sobre TV de escaneo rápido). Entre cada línea de barrido se incorpora un pulso de sincronización horizontal para determinar el inicio de cada línea. El comienzo de un marco se establece mediante el pulso de sincronización vertical.

En contraste con el uso de niveles de tensión como señales de video y sincronización, SSTV emplea frecuencias con valores específicos que codifican funciones determinadas. Esta característica permite que las señales SSTV se transmitan utilizando modulación SSB. A modo de ejemplo, los pulsos de sincronización que representan nuevas líneas se transmiten como ráfagas de tonos de 1200 Hz. La luminancia o intensidad de la imagen se comunica a través de un tono de frecuencia variable. Para señales SSTV monocromáticas en blanco y negro, una señal de 1500 Hz genera una representación negra, mientras que una señal de 2300 Hz produce una imagen blanca. Las frecuencias intermedias representan tonalidades de gris. Los 1200 Hz correspondientes a los pulsos de sincronización son, por consiguiente, más oscuros que los negros en sus equivalentes de exploración rápida y no aparecerán en la pantalla.

La Tabla 34 compila los parámetros estándar para una señal SSTV analógica en blanco y negro. El pulso de sincronización horizontal se integra en el tiempo requerido para transmitir una línea, aunque el pulso de sincronización vertical añade 30 ms de "sobrecarga". Consecuentemente, la transmisión de un marco de imagen en blanco y negro demanda algo más de 8 segundos.

Tabla 34. Parámetros estándar de una señal SSTV analógica. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

Parámetro	Valor
Tiempo de cuadro	8 segundos
Líneas por cuadro	120
Tiempo para enviar una línea	67 ms
Duración del pulso de sincronización horizontal	5 ms
Duración del pulso de sincronización vertical	30 ms
Frecuencia de sincronización horizontal y vertical	1200 Hz
Frecuencia para negro	1500 Hz
Frecuencia para blanco	2300 Hz

Una representación visual SSTV monocromática en escala de grises requiere 8 segundos para completar un fotograma, con una configuración de 120 líneas de exploración. El sistema opera hasta 15 líneas por segundo. La anchura espectral de una señal SSTV monocromática alcanza aproximadamente 2 kilohercios. A diferencia de las imágenes de barrido acelerado, las líneas de

exploración SSTV no presentan entrelazado, por lo que cada marco se compone de un único campo. Actualmente, la mayoría de los operadores transmiten representaciones policromáticas.

Existen diversos formatos para imágenes cromáticas, que pueden contener 120, 128, 240 o 256 líneas de exploración. La transmisión cromática se efectúa mediante líneas secuenciales que despliegan idéntica imagen en tonalidades rojo, verde y azul. El sistema receptor recompone las tres líneas en una única línea policromática.

Para que los equipos receptores y programas informáticos identifiquen el modo de imagen SSTV, se transmite un código específico con cada fotograma. Este código se emite durante el pulso de sincronización vertical, denominado señalización de intervalo vertical o VIS. El software receptor interpreta el código y ajusta su configuración para capturar y visualizar correctamente la imagen. Análogamente, el operador puede seleccionar el modo de transmisión, incorporándose automáticamente el código correspondiente.

Los diversos modos SSTV permiten al operador seleccionar diferentes resoluciones y gestionar los tiempos de transmisión. Las representaciones de baja a moderada resolución resultan idóneas en condiciones de saturación espectral, favoreciendo transmisiones breves. Las imágenes de mayor definición se transmiten cuando se admiten duraciones más prolongadas.

SSTV DIGITAL

Para transmitir contenido digital codificado de alta fidelidad, los radiodifusores de onda corta desarrollaron e implementaron el protocolo de radio digital Mondiale (DRM), que significa "radio mundial digital". Los aficionados adaptaron las capacidades de transferencia de archivos de DRM para transmitir imágenes SSTV digitalizadas. Dado que las señales DRM pueden generarse y decodificarse mediante software en un ordenador personal, no se requiere equipamiento adicional más allá de un receptor para utilizar DRM en comunicaciones SSTV. Aunque las señales DRM de transmisión presentan anchos de banda de 4 kilohercios o superiores, las señales DRM amateur en HF se encuentran restringidas al ancho de banda de una señal SSB convencional de 3 kilohercios.

Capítulo 8 Seguridad de la estación

8.1 Seguridad Eléctrica

No existe ninguna amenaza significativa inherente al manejo de electricidad, aun cuando sea imperceptible visualmente. En comparación con diversas actividades, el radioaficionado constituye uno de los pasatiempos más seguros para individuos de cualquier rango etario. La mayoría de los radioaficionados transcurren su existencia profesional sin experimentar incidentes de seguridad relevantes. Esta situación deriva del conocimiento exhaustivo sobre protocolos de seguridad y la adhesión estricta a normas elementales.

La seguridad resulta igualmente crucial para la radio que, para la instalación eléctrica domiciliaria, la intervención mecánica o la manipulación de herramientas eléctricas. El fundamento de la protección radica en comprender los riesgos potenciales, implementar estrategias para su mitigación (prevención o eliminación) y desarrollar capacidad de respuesta ante eventuales lesiones en el improbable escenario de su ocurrencia. Mediante una preparación informada, la exposición a peligros eléctricos se reduce de manera sustancial.

Operar eléctricamente con seguridad implica primordialmente evitar cualquier contacto directo. La mayoría de los equipos de radioaficionado contemporáneos son de tecnología de estado sólido y operan con corriente directa de baja tensión, aunque la línea de corriente alterna que alimenta la mayoría de los dispositivos representa un riesgo significativo. Adicionalmente, pueden encontrarse tubos de vacío que utilizan elevadas tensiones. Es fundamental tratar la electricidad con el máximo respeto.

LESIONES ELÉCTRICAS

La corriente eléctrica que transita por el organismo puede alterar la funcionalidad eléctrica celular. Corrientes superiores a unos cuantos miliamperios pueden provocar contracciones musculares involuntarias, generando sacudidas y movimientos abruptos característicos de representaciones cinematográficas. No se trata de una situación trivial: los espasmos musculares pueden originar caídas y movimientos intempestivos. El retiro súbito de una extremidad que contacta con un conductor energizado resulta consecuencia directa de la contracción muscular. Las corrientes intensas pueden producir quemaduras cutáneas y calentamiento tisular. La Tabla 35 detalla diversos efectos de la corriente sobre el organismo.

Tabla 35. Efectos de la corriente en el cuerpo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Corriente	Reacción
Menos de 1 miliamperio	Generalmente no perceptible
1 miliamperio	Leve cosquilleo
5 miliamperios	Se siente una leve descarga; no dolorosa pero molesta. La persona promedio puede soltarla. Las reacciones involuntarias fuertes pueden llevar a otras lesiones.
6-25 miliamperios (mujeres)	Descarga dolorosa, pérdida del control muscular*; rango de corriente congelante o 'no se puede soltar'.
9-30 miliamperios (hombres)	Descarga dolorosa, pérdida del control muscular*; rango de corriente congelante o 'no se puede soltar'.
50-150 miliamperios	Dolor extremo, paro respiratorio, contracciones musculares severas. La muerte es posible.
1000-4300 miliamperios	La acción rítmica del bombeo del corazón cesa. Ocurren contracciones musculares y daño nervioso; la muerte es probable.
10,000 miliamperios	Paro cardíaco, quemaduras severas; la muerte es probable

*Si el musculo extensor es excitado por la descarga, la persona puede ser arrojada desde la fuente de energía.

EVITANDO RIESGOS ELÉCTRICOS

Si se requiere laborar con equipos energizados (en ocasiones resulta ineludible), es fundamental seguir estas elementales medidas preventivas:

- Mantenga una extremidad superior dentro de la prenda inferior mientras realiza pruebas en dispositivos con corriente activa y emplee calzado con propiedades aislantes. Esta acción previene la circulación de la corriente a través del organismo.
- Resulta sencillo incurrir en prácticas inadecuadas después de interactuar con sistemas de baja tensión o alimentados mediante baterías que representan escasos riesgos. Es imperativo mantener extrema precaución al transitar hacia tensiones superiores.
- Bajo ninguna circunstancia se debe neutralizar un mecanismo de protección durante las verificaciones, salvo instrucción específica. Los sistemas de enclavamiento interrumpen la alimentación cuando se accede a paneles, cubiertas o accesos que exponen zonas potencialmente peligrosas del equipo. Su propósito fundamental consiste en impedir la apertura accidental de gabinetes o contenedores donde potencialmente existan tensiones críticas o radiofrecuencia intensa.
- Los capacitores en fuentes de alimentación pueden retener carga tras desconectar un circuito, generando una tensión peligrosa durante periodos prolongados. Esto comprende capacitores de reducido valor cargados a elevada tensión. Es fundamental verificar su descarga mediante un multímetro o utilizar una varilla de conexión a tierra para derivar su acumulación.
- Las baterías de almacenamiento liberan considerable energía ante un cortocircuito, pudiendo provocar lesiones dérmicas, combustión o detonaciones. Es crucial mantener elementos metálicos, como herramientas y láminas, distanciados de los terminales de la batería y evitar intervenciones con baterías conectadas.
- Retire elementos metálicos prescindibles de sus extremidades, dado que el metal constituye un conductor excepcional. Los anillos pueden absorber energía de radiofrecuencia (RF) y experimentar calentamiento significativo en campos RF intensos, como en el interior de amplificadores, filtros o sintonizadores de antena.
- Evite realizar labores en solitario próximo a equipos energizados.
- ¡Tenga presente que la electricidad se desplaza significativamente más rápido que el ser humano! Incluso un contacto momentáneo resulta suficiente para permitir el flujo eléctrico.

Los riesgos eléctricos pueden originar dos categorías de lesiones: descargas eléctricas y quemaduras. Cuando la electricidad puede circular por cualquier segmento corporal, ambas tipologías de daño resultan posibles. Las descargas eléctricas y quemaduras pueden ser generadas por corrientes de CA o CD circulando a través del organismo.

Dependiendo de la tensión presente, las descargas eléctricas y las lesiones térmicas pueden oscilar desde efectos prácticamente imperceptibles hasta consecuencias potencialmente letales. La tensión es el factor que impulsa el flujo de corriente, aunque por sí misma no genera una descarga eléctrica. De manera análoga a una resistencia convencional, la corriente experimenta variaciones proporcionales a las modificaciones en la tensión aplicada a través del organismo. Aunque ciertas estructuras corporales como el cabello y las uñas presentan una conductividad limitada, el interior del cuerpo humano resulta ser un conductor relativamente eficiente, debido a su composición predominantemente acuosa con contenido salino.

Aunque cualquier descarga eléctrica puede resultar dolorosa, las corrientes más críticas son aquellas que atraviesan el sistema cardíaco, específicamente las que discurren de una extremidad a otra o entre manos y pies. Las corrientes eléctricas superiores a 100 mA pueden alterar significativamente el ritmo cardíaco normal. Según la resistencia del trayecto recorrido, tensiones tan reducidas como 30 voltios pueden generar un flujo de corriente con potencial lesivo.

Las lesiones térmicas provocadas por corriente directa (CD) o corriente alterna (CA) de baja frecuencia se originan por la resistencia que experimenta la corriente al atravesar la epidermis, ya sea de manera transversal hacia el interior corporal o longitudinalmente entre puntos específicos. La corriente genera calor, provocando la consecuente lesión térmica.

Las descargas eléctricas y las quemaduras son completamente prevenibles al eliminar cualquier posibilidad de contacto con conductores energizados; fundamentalmente, se trata de impedir el tránsito de corriente a través del organismo. Como principio básico, nunca se debe operar equipos bajo tensión, salvo estricta necesidad para diagnóstico o verificación. Es imperativo retirar, aislar o asegurar los cables expuestos previamente a cualquier prueba o reparación. Jamás se debe presumir que el equipo está desconectado antes de iniciar cualquier intervención. Resulta fundamental realizar una verificación preliminar mediante instrumentos de medición.

PUESTA A TIERRA DE SEGURIDAD DE CA

Una parte sustancial de la seguridad eléctrica consiste en prevenir riesgos desde su origen. Por esta razón se establecieron el Código Eléctrico Nacional y los códigos de construcción locales: para prevenir riesgos eléctricos habituales. Una vivienda con cableado reglamentario dispone de tomas de corriente y canalizaciones dimensionadas apropiadamente, además de una conexión de tierra de seguridad destinada a prevenir descargas eléctricas.

La conexión de puesta a tierra de seguridad (igualmente denominada conexión a tierra del dispositivo o conexión del cable verde) constituye un enlace hacia el punto de referencia terrestre del sistema eléctrico ubicado en el panel principal de servicio eléctrico. Su función primordial es proporcionar un trayecto seguro para la corriente eléctrica durante un cortocircuito accidental entre conductores de fase o neutro y la envolvente o estructura metálica de un aparato. Esta vinculación a tierra provoca que un fusible o disyuntor interrumpa el suministro energético del equipo.

La mayoría de las estaciones de radioaficionados no precisan modificaciones en el cableado y pueden operar con absoluta seguridad cuando se alimentan del circuito de corriente alterna doméstico. Esto es viable siempre que se observen las siguientes instrucciones elementales:

- Emplear cables y conectores de triple conductor para todos los equipos alimentados por corriente alterna.
- Garantizar que todos los dispositivos estén conectados al sistema de puesta a tierra de seguridad de corriente alterna.
- Utilizar dispositivos de protección con interruptores diferenciales (GFCI) o tomas con protección de sobrecarga.
- Corroborar que el cableado de corriente alterna esté correctamente implementado mediante un verificador de circuitos.
- Jamás sustituir fusibles o disyuntores por elementos de mayor capacidad.
- No sobrecargar los puntos de conexión eléctrica individuales.

En caso de proyectar la instalación de nuevo cableado para su estación conforme ésta se desarrolle, se recomienda contratar a un profesional electricista autorizado para su ejecución o supervisión. Es fundamental seguir el Código Eléctrico de Costa Rica, basado en el NEC (NFPA 70), el cual establece que la codificación de conductores: fase = cable negro (rojo segunda fase sistema 240 V); neutro = cable blanco; tierra de seguridad o del equipo = cable verde o desnudo, según se ilustra en la Figura 265. Se deben seleccionar conductores con capacidad nominal apropiada para la carga de corriente proyectada, como se detalla en la Tabla 36. Es imperativo utilizar fusibles e interruptores con dimensionamiento adecuado. Si se construye equipamiento propio alimentado con líneas de 120 V o 240 VCA, debe asegurarse que los fusibles o disyuntores se instalen en serie con el conductor o conductores de fase.

Tabla 36. Capacidad nominal de algunos tipos de cable. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Calibre del Cable de Cobre (AWG)	Corriente Permitida (A)	Fusible o Interruptor Máximo (A)
6	55	50
8	40	40
10	30	30
12	25 (20)	20
14	20 (15)	15

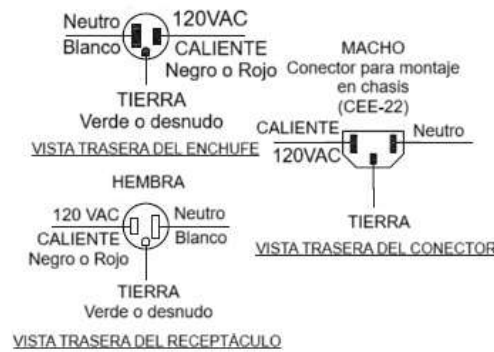


Figura 265. Técnica correcta de cableado para 120 VAC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Si bien las antenas y torres de radioaficionados no presentan una probabilidad superior de ser impactadas por descargas eléctricas atmosféricas en comparación con árboles elevados u otras estructuras próximas, se aconseja implementar medidas preventivas. Esta recomendación cobra especial relevancia en estaciones situadas en regiones con fenómenos meteorológicos extremos y alta incidencia de descargas atmosféricas. El propósito fundamental de la protección contra descargas atmosféricas radica en salvaguardar la vivienda contra siniestros de origen ígnea, dado que la mayoría de los daños estructurales provocados por un rayo se originan en incendios. Comenzando por los elementos de recepción, toda infraestructura de soporte, mástiles y soportes de antena deben establecer una conexión a tierra conforme a los reglamentos locales de construcción y normativa eléctrica.

Dichas conexiones se efectuarán en la base de la torre o, tratándose de soportes de cubierta, mediante un conductor de considerable sección transversal hasta una varilla de puesta a tierra. Las conexiones terrestres deben ser lo más breves y directas posible; se desaconseja la presencia de curvaturas pronunciadas. En los puntos donde los conductores y líneas de alimentación ingresen a la edificación, empléense dispositivos de protección conectados a una placa común que, a su vez, se vincule con una toma de tierra externa próxima, como una varilla de puesta a tierra. Todos los electrodos de tierra y conexiones correspondientes deberán interconectarse mediante cable de sección significativa.

Cuando se prevea la inminencia de una tormenta eléctrica, la estrategia de protección más efectiva consiste en interrumpir todos los conductores externos de la vivienda y desconectar los cables de alimentación de los dispositivos internos. Esta acción obstruye la trayectoria de la descarga hacia el punto de referencia terrestre. De hecho, se recomienda desacoplar los conductores de alimentación y telefónicos de los electrodomésticos, así como los cables extensos de red y señalización de equipos informáticos. Si se contempla una desconexión frecuente, resultaría conveniente utilizar o fabricar regletas de conexión que permitan desconectar múltiples dispositivos mediante un único conductor. No basta con apagar los interruptores: las descargas eléctricas pueden atravesarlos con relativa facilidad. Es imperativo desconectar el cable de alimentación.

Con independencia de los sistemas de protección implementados en la infraestructura de antenas, operar durante una tormenta eléctrica constituye una práctica altamente desaconsejable. ¡Incluso una descarga atmosférica próxima puede generar un incremento de tensión de miles de voltios en una línea eléctrica o telefónica, provocando daños en el equipamiento o iniciando un incendio en la vivienda!

POTENCIAL DE REFERENCIA COMÚN

La conexión de seguridad a tierra de corriente alterna resulta fundamental en la estación. Es imperativo garantizar que todos los receptáculos de CA estén apropiadamente conectados a tierra en el panel de servicio correspondiente. Cualquier dispositivo con envolvente metálica expuesta debe establecer una conexión a tierra. Este procedimiento previene la aparición de

tensiones potencialmente peligrosas en la estructura del equipo, lo cual generaría un riesgo eléctrico significativo.

Para gestionar la radiofrecuencia de la señal transmitida, es necesario interconectar las envolturas del equipamiento según se ilustra en la Figura 266. La puesta a igual potencial (bonding) consiste en establecer una conexión entre dos puntos con el propósito de minimizar las diferencias de tensión existentes entre ellos. En el contexto de radiofrecuencia, la puesta a igual potencial mantiene todo el equipamiento con una tensión de RF lo más uniforme posible. Una instalación de radioaficionado convencional comprende múltiples circuitos susceptibles a perturbaciones electromagnéticas en rangos de milivoltios, particularmente en las señales acústicas que transitan por las interfaces de audio. Para prevenir la contaminación de estas diminutas señales con radiofrecuencia, resulta imperativo no emplear las envolturas de los dispositivos ni los conductores de apantallamiento como componentes del circuito de RF. En consecuencia, los profesionales diseñan sus estaciones para establecer un potencial de referencia unificado, denominado "plano de referencia" o "conexión RF", procurando mantener los equipos vinculados a dicho plano en un potencial homogéneo. Este procedimiento minimiza la circulación de corrientes de radiofrecuencia entre los diferentes componentes.

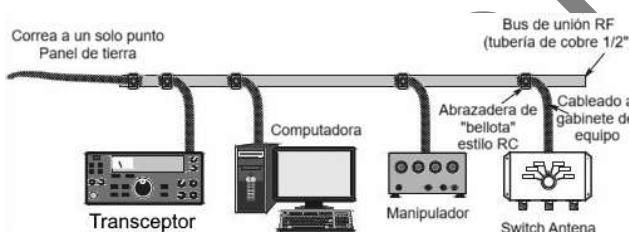


Figura 266. Potencial de referencia común. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Mantener todo el equipamiento en idéntica tensión de RF también minimiza los "puntos críticos", donde se registra una elevada tensión de RF susceptible de provocar una "quemadura por RF". Igualmente reduce la corriente de radiofrecuencia que circula entre componentes del sistema a través del cableado de alimentación y señalización, lo cual puede generar un funcionamiento deficiente. A modo de ilustración, durante operaciones digitales, las corrientes parásitas de RF pueden ocasionar distorsión acústica o comportamiento errático de las interfaces computacionales, activar inadecuadamente el transmisor (como sucede en configuraciones VOX), y alterar protocolos digitales, provocando pérdida de información o interrupciones de conexión.

Los fundamentos para la puesta a igual potencial en tu estación son:

- Conectar directamente entre sí todas las carcasas metálicas del equipo o a un bus común de puesta a igual potencial de RF.
- Mantener todas las conexiones, correas y cables lo más breves posible.
- Utilizar conductores cortos y robustos, como cable pesado (#12 o #14 AWG) o cinta de cobre.
- Donde existan señales de RF intensas, puede instalarse una lámina ancha o malla metálica debajo del equipamiento y conectarse al bus de puesta a igual potencial de RF.

Si tu estación incorpora una varilla de puesta a tierra externa para protección contra descargas atmosféricas, efectuar la conexión de la manera más directa posible. Si la conexión a tierra se aproxima a la resonancia en un número impar de $1/4$ de longitud de onda en cualquier frecuencia, presentará una impedancia elevada, permitiendo la existencia de tensiones de RF en las carcasas del equipo y los cables de conexión. Prevenir una alta impedancia en la conexión a tierra puede resultar complejo, especialmente en instalaciones en pisos superiores o apartamentos. En tales escenarios, mantener el equipamiento a idéntica tensión de RF constituye la estrategia más eficaz.

Los bucles de tierra se generan mediante un trayecto de corriente continuo (el bucle) alrededor de una serie de conexiones del equipamiento. Este bucle funciona como un inductor de una sola vuelta que capta tensiones de campos magnéticos producidos por transformadores de energía,

cableado de CA y otras corrientes de baja frecuencia. El resultado es un "zumbido" en las señales transmitidas o que interfiere con señales de control o datos.

Los bucles de tierra pueden prevenirse conectando todos los conductores de tierra al bus de puesta a igual potencial de RF. Esto minimiza el área del bucle y mantiene las diferencias de tensión entre equipos en su mínima expresión.

Todas las conexiones de puesta a tierra, abarcando las destinadas a seguridad, radiofrecuencia, protección contra descargas eléctricas atmosféricas y comunicaciones comerciales, tales como los cables de televisión por cable y telefonía, deben establecer una interconexión para prevenir diferencias de potencial significativas entre ellas. El NEC establece como obligatorio que las conexiones a tierra de los sistemas de antenas se encuentren vinculadas con las restantes conexiones a tierra del sistema. La Figura 267 presenta un esquema general de este tipo de sistema de conexión a tierra para la totalidad del inmueble.

Es fundamental comprender que el requisito de interconexión contemplado en el código eléctrico se enfoca primordialmente en garantizar la seguridad ante eventuales fallos o fenómenos transitorios en la distribución eléctrica, como la incidencia de una descarga atmosférica directa o próxima.

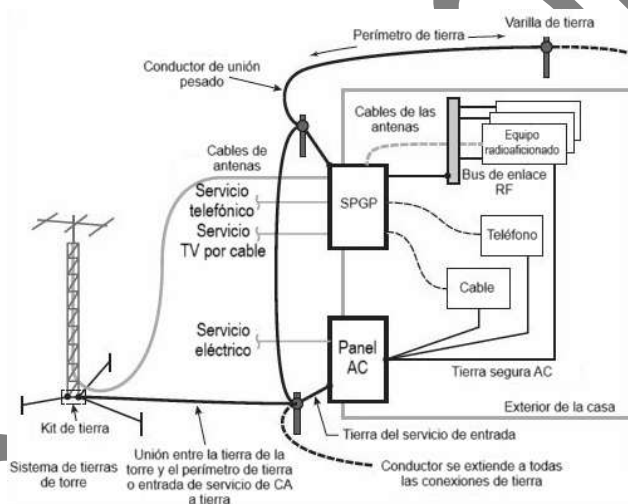


Figura 267. Sistema de conexión a tierra completo. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2020))

8.2 Gestión de RF en su estación

La instalación de radioaficionados se ubica en proximidad a la torre emisora. Consecuentemente, el cableado de la estación, los conductores de alimentación, las conexiones eléctricas y otros cables interceptan la radiofrecuencia (RF) de la señal transmitida. Los conductores de alimentación y cables, de manera subsiguiente, se encuentran vinculados a los gabinetes de equipamiento y sus interconexiones. La corriente resultante se denomina corriente de modo común debido a que circula por todos los cables y gabinetes.

No resulta viable aterrizar esta corriente de RF de manera idéntica a como se realiza con la alimentación de CA y la protección contra descargas atmosféricas. En lugar de intentar generar un punto de "cero tensión", la estrategia más efectiva para radioaficionados consiste en interconectar todos los equipos. Esta acción mantiene todos los dispositivos a idéntica tensión para prevenir la circulación de corriente de RF entre distintos componentes.

La corriente de RF en cables y gabinetes puede provocar distorsión acústica, funcionamiento anómalo de sistemas informáticos y, en ocasiones, quemaduras de RF donde la tensión de RF es elevada. (Las quemaduras por RF raramente generan lesiones). Es significativamente más probable que la corriente de RF que circula por cables de audio o datos sensibles interfiera con el funcionamiento estándar de la estación, tal como la potente señal transmisora podría ser

captada y detectada por el sistema telefónico o acústico de un vecino. La retroalimentación de RF a través del cable de un micrófono puede originar distorsión del audio transmitido, por ejemplo.

Cada estación presenta particularidades específicas, por lo que será necesario encontrar una solución adaptada a requerimientos individuales. Las estaciones VHF/UHF de baja potencia generalmente experimentan mínimas complicaciones de RF. A continuación, algunas directrices para gestionar la RF:

- Conecte todas las cajas metálicas de los equipos a una barra de tierra de RF común, como un segmento de conducto de cobre, un cable de gran sección o una plancha metálica de conexión a tierra.
- Emplee conductores de reducida longitud y amplia superficie, tales como láminas de revestimiento o correas de material conductor, o cable macizo de considerable calibre (#8 AWG o superior). La correa sólida representa la alternativa óptima, debido a que ofrece la mínima impedancia para señales de radiofrecuencia.
- Procure que todas las conexiones, correas y cables sean lo más breves y rectilíneos posible.
- Vincule la barra de tierra con la conexión de seguridad eléctrica de CA y cualquier sistema de puesta a tierra destinado a protección contra descargas atmosféricas.

8.3 Interferencia RF (RFI)

A medida que proliferan los dispositivos electrónicos y artefactos eléctricos, la interferencia entre estos y la radioafición, conocida como interferencia de radiofrecuencia (RFI), se torna cada vez más recurrente. La RFI puede manifestarse en cualquier sentido, tanto hacia como desde el equipo de radioaficionado. La magnitud de la interferencia se incrementa proporcionalmente con la potencia y se intensifica cuando la distancia a la fuente emisora es menor.

FILTROS

Los filtros constituyen un elemento esencial en el ámbito radioeléctrico, y su relevancia resulta particularmente crítica en la prevención y mitigación de la RFI. Se emplean tanto para suprimir la emisión de señales espurias como para impedir su captación. Para determinar la tipología de filtro más adecuada, resulta imprescindible comprender la naturaleza de las señales interferentes. La Figura 268 ilustra la aplicación de filtros en diversas modalidades habituales de RFI.

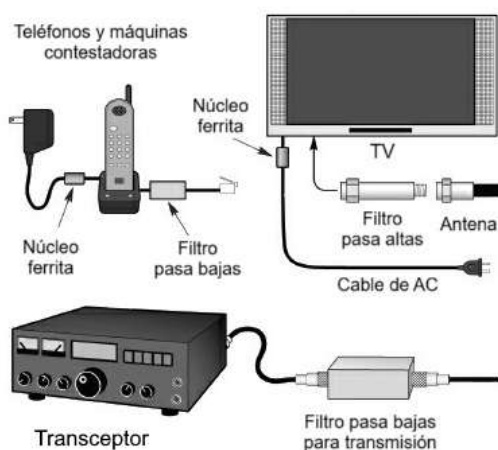


Figura 268. Aplicación de filtros a varios RFI. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Los filtros de alimentación eléctrica para corriente alterna bloquean la propagación de señales de radiofrecuencia (RF) a través de los conductores de fase y neutro en la conexión de energía. Estos dispositivos eliminan completamente las señales con frecuencias superiores a varios

kilohercios. En las líneas de antena, se implementan filtros de paso bajo y paso alto para rechazar señales de RF interferentes. Los filtros de RF de paso bajo conectados al conector modular representan el método más eficaz para minimizar la interferencia de radiofrecuencia (RFI) en sistemas telefónicos.

Los inductores de RF o filtros de modo común fabricados con núcleos de ferrita se emplean para reducir las corrientes de radiofrecuencia que circulan por cables no blindados, como cables de altavoces, conductores de alimentación de corriente alterna y cables modulares telefónicos. Adicionalmente, estos inductores de ferrita mitigan la corriente de RF en la superficie exterior de cables blindados de audio, micrófonos y equipos computacionales.

8.4 Interferencias de transmisiones de aficionados

Las causas más frecuentes de RFI en transmisiones son la sobrecarga fundamental, armónicos y emisiones espurias.

SOBRECARGA FUNDAMENTAL

Las señales de elevada intensidad pueden superar la capacidad de rechazo del receptor. Este fenómeno se denomina sobrecarga fundamental. Típicamente, la sobrecarga provoca interferencias significativas en todos los canales de receptores de televisión, radiodifusión AM o FM.

Los dispositivos electrónicos de consumo generalmente presentan limitaciones para rechazar señales intensas fuera de sus bandas de recepción designadas. De manera similar, un radioaficionado puede experimentar ruido en una banda completa cuando la señal posee considerable potencia. Si añadir atenuación (mediante activación del atenuador del receptor o remoción de antena) elimina la interferencia, probablemente se trate de una sobrecarga.

Se puede incorporar un filtro paso alto en la entrada de antena de los receptores de FM y TV, según se ilustra en la Figura 268, con el propósito de bloquear las intensas señales de baja frecuencia provenientes de las señales de HF de radioaficionado. (Se desaconseja emplear filtros de línea de alimentación en una línea de alimentación de TV por cable). Es factible utilizar un filtro de rechazo de banda o un filtro de supresión de banda para mitigar la interferencia generada por las señales de VHF o UHF de radioaficionado. Un filtro instalado en el transmisor del radioaficionado no resolverá los problemas de sobrecarga; la dificultad se localiza en el receptor.

Tanto los receptores de uso doméstico como los de radioaficionados pueden sufrir saturación por parte de las estaciones de radiodifusión próximas. Los filtros de rechazo de transmisión atenúan las señales de estaciones de AM, FM o TV cercanas. En el momento de adquirir el filtro, resulta fundamental especificar el tipo de señal que se pretende rechazar, dado que estas estaciones transmiten en frecuencias diferentes.

ARMÓNICOS, EMISIONES ESPURIAS Y FUGAS

Debido a pequeñas imperfecciones, la señal de RF de salida de cada transmisor contiene armónicos sutiles de la señal de salida deseada y otras emisiones espurias susceptibles de provocar interferencias en equipos próximos. En situaciones extremas, un transmisor desajustado o defectuoso puede generar potentes señales de interferencia. Para impedir que la estación irradie armónicos, se debe instalar un filtro paso bajo o paso banda en la conexión del transmisor a la línea de alimentación de la antena, como se representa en la Figura 268.

Otra potencial fuente de interferencia, tanto para radioaficionados como para clientes de televisión por cable, son las fugas. Las fugas hacen referencia a las señales que se escapan del interior de la línea de alimentación de televisión por cable. Esto puede originar interferencias en las señales de radioaficionado, generalmente en la banda de 2 metros. También se refieren a las señales externas que penetran en la línea de alimentación de televisión por cable. Una transmisión de radioaficionado en una frecuencia utilizada por el sistema de cable puede provocar interferencias si ingresa en la línea de alimentación. La causa más frecuente de fugas en cualquier dirección son los conectores coaxiales defectuosos en la línea de alimentación del

cable. Pueden estar incorrectamente instalados o simplemente sueltos. Es fundamental garantizar que los conectores estén instalados correcta y firmemente asegurados.

8.5 Buenas prácticas en tu estación

Con independencia del origen, es posible minimizar o suprimir una proporción significativa de interferencias garantizando que la estación observe los principios fundamentales de radioaficionados relativos a la conexión a tierra y el filtrado.

- Es primordial verificar que la estación opere de manera óptima, con una conexión a tierra, un filtrado y enlaces de elevada calidad, particularmente para las señales de RF.
- Emplee conductores con malla protectora para prevenir interferencias con señales y radiaciones parásitas. Resulta crucial establecer una conexión adecuada del blindaje, por ejemplo, en la superficie externa de los contenedores metálicos de los equipos.
- Inicialmente, identifique y neutralice las perturbaciones provenientes de aparatos domésticos y dispositivos televisivos. Demostrar la ausencia de interferencias en los propios dispositivos constituye un punto de partida fundamental. ¡Erradicar las interferencias en el entorno doméstico se considera una práctica profesional!
- Suprima las fuentes generadoras de interferencias en su domicilio, tales como motores desgastados, fuentes de alimentación con sistemas de filtrado deficientes, entre otros. Esta acción no solamente optimizará la operatividad, sino que facilitará significativamente la determinación del origen de posibles ruidos externos.

INTERFERENCIAS RADIOELÉCTRICAS Y PERTURBACIONES A VECINOS

Es factible que en algún momento se encuentre ante una circunstancia donde sus señales provoquen perturbaciones a un vecino, o donde un dispositivo de este le genere interferencias a usted. Frecuentemente se requiere tacto, incluso si sus transmisiones no son las causantes directas.

Tenga presente estas sencillas recomendaciones:

- Comience por cerciorarse de que efectivamente sean sus transmisiones las que originan el inconveniente. Es habitual que la simple presencia de una antena genere un informe de interferencia, justificado o no.
- Brinde colaboración para identificar la naturaleza de la interferencia: detección, sobrecarga o armónicos. Comprender la causa conduce a soluciones.

En determinadas ocasiones, podría estar recibiendo interferencias perjudiciales provenientes de equipos en la vivienda del vecino. Inicie con los siguientes procedimientos:

- Asegúrese de que su estación cumple con los estándares de buenas prácticas de radioaficionado.
- Puede ofrecer asistencia para determinar el origen de la interferencia. Un ruido intenso generalmente indica un equipo defectuoso que potencialmente representaría un riesgo de seguridad o de incendio.
- Quizás deba explicarle cortésmente al vecino que la normativa nacional le prohíbe utilizar un dispositivo que provoque interferencias perjudiciales.

Sea diplomático al interactuar con sus vecinos, aun cuando sea su responsabilidad gestionar las interferencias que se producen o generan en sus dispositivos. En caso de que esto no funcione, proceda a interponer la denuncia por interferencias perjudiciales, tal y como se describió en el apartado Realización de contactos.

8.6 Exposición RF

Para esto es importante recordar lo mencionado sobre radiaciones no ionizantes en la sección Radiaciones no ionizantes (RNI). En el transcurso de los años recientes, se ha generado una amplia discusión académica concerniente a los potenciales riesgos sanitarios y de seguridad

asociados con la exposición a radiación electromagnética (REM). Se han desarrollado múltiples investigaciones científicas tanto en frecuencias correspondientes a líneas eléctricas (50 y 60 Hz) como en radiofrecuencia (onda corta y frecuencias de telefonía móvil). Hasta el momento, no se ha establecido una correlación entre la exposición a REM de bajo nivel y posibles amenazas para la salud, incluyendo las frecuencias empleadas por radioaficionados.

La radiación de radiofrecuencia (RF) presenta características fundamentalmente distintas a la radiación ionizante proveniente de la radiactividad, debido a que la energía de las señales en radiofrecuencias resulta insuficiente para provocar la ionización electrónica y, consecuentemente, no puede generar alteraciones genéticas. Considerando su frecuencia relativamente reducida, la energía de RF se clasifica como radiación no ionizante.

No obstante, niveles elevados de RF pueden provocar un incremento térmico corporal. Se recomienda prudencia para evitar exposiciones innecesarias a intensidades altas de RF. Diferentes recomendaciones internacionales establecen límites de Exposición Máxima Permisible (MPE) para cualquier tipo de transmisores radioeléctricos. Se espera que los radioaficionados realicen una valoración de sus estaciones para determinar el potencial de sobrepasar los niveles de MPE. El procedimiento de evaluación se detallará posteriormente en esta sección.

Los únicos riesgos fehacientemente demostrados de la exposición a energía de radiofrecuencia son los efectos térmicos (calentamiento). No se han comprobado efectos biológicos (térmicos) en frecuencias de radioaficionado ni en niveles de potencia específicos. La energía de radiofrecuencia únicamente puede provocar lesiones corporales si la combinación de frecuencia y potencia genera una absorción energética excesiva. El calentamiento mensurable únicamente ocurre en campos de alta intensidad o en aquellos originados en proximidad inmediata al cuerpo.

Las técnicas de seguridad en radiofrecuencia contemplan dos estrategias fundamentales:

- Restringir el acceso a zonas con campos intensos, particularmente en las proximidades de antenas.
- Garantizar que no se generen campos intensos en áreas potencialmente ocupadas ni se dirijan hacia personas.

El incremento térmico resultante de la exposición a campos de radiofrecuencia se produce por la absorción de energía de RF por parte del organismo. Este fenómeno ocurre porque la energía de radiofrecuencia induce vibraciones moleculares a frecuencias específicas. La energía generada por estas vibraciones se disipa internamente en forma de calor. Cuanto más intenso sea el campo, mayor será la vibración molecular y, consecuentemente, el calentamiento de los tejidos corporales. La absorción presenta variaciones según la frecuencia, dado que el cuerpo absorbe diferentes cantidades de energía de radiofrecuencia. La cantidad total de calentamiento depende tanto de la intensidad como de la frecuencia del campo de radiofrecuencia, denominándose tasa de absorción específica (SAR).

Las lesiones térmicas por radiofrecuencia provocadas al contactar o aproximarse a superficies conductoras con alta tensión de radiofrecuencia constituyen igualmente un resultado del calentamiento. Aunque en ocasiones resultan molestas, casi nunca representan un riesgo significativo. Las quemaduras por radiofrecuencia pueden prevenirse mediante técnicas de conexión apropiadas o restringiendo el acceso a una antena.

DENSIDAD DE POTENCIA

El incremento térmico por exposición a señales de radiofrecuencia ocurre porque el organismo absorbe energía de radiofrecuencia. La magnitud de la energía de radiofrecuencia se denomina densidad de potencia y se cuantifica en mW/cm^2 (miliwatts por centímetro cuadrado), que representa la potencia por unidad superficial. A modo de ilustración, si la densidad de potencia en un campo de radiofrecuencia alcanza $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$ y la superficie manual es de 75 cm^2 , la extremidad está sometida a un total de $10 \times 75 = 750 \text{ mW}$ de potencia de radiofrecuencia en dicho campo. La densidad de potencia resulta máxima en las proximidades de las antenas y en las direcciones donde estas presentan mayor ganancia. El incremento de la potencia del

transmisor eleva la densidad de potencia circundante a la antena. El aumento de la distancia desde la antena la disminuye.

Aunque la exposición a radiofrecuencia se mide en mW/cm^2 para la mayoría de los requerimientos de radioaficionados, la respuesta corporal a los campos E y H sugiere que la exposición a radiofrecuencia también puede cuantificarse en V/m (para el campo E) y A/m (para el campo H). Dependiendo de la fuente de RF y del entorno, cualquiera de estas mediciones puede resultar más adecuada que la densidad de potencia. Por ejemplo, en las proximidades de superficies reflectantes o materiales conductores, la intensidad de los campos E y H puede alcanzar su punto máximo en ubicaciones diferentes.

Bajo y cerca de las antenas, las reflexiones y la dispersión del terreno pueden provocar que la impedancia de campo (la relación entre la intensidad del campo E y la del campo H) varíe según la localización.

ABSORCIÓN Y LÍMITES

La tasa de absorción energética de la potencia a la que el organismo está sometido se denomina Tasa de Absorción Específica (SAR). La SAR constituye el parámetro más preciso para evaluar la exposición a radiofrecuencias para operadores aficionados. La magnitud de la SAR experimenta variaciones según la frecuencia, la densidad de potencia, la exposición promedio y el ciclo operativo de la transmisión. El desarrollo de lesiones únicamente ocurre cuando la interacción entre frecuencia y potencia genera una absorción energética desmesurada en un intervalo temporal extremadamente reducido.

La SAR presenta una dependencia directa de la frecuencia y de las dimensiones corporales o del segmento corporal afectado, alcanzando su valor máximo en aquellas zonas donde el cuerpo y sus componentes exhiben una resonancia natural. Las extremidades (brazos y piernas) y el tronco manifiestan la SAR más elevada para campos de radiofrecuencia en el espectro VHF, comprendido entre 30 y 300 MHz. El encéfalo resulta más susceptible a las frecuencias UHF, que oscilan entre 300 MHz y 3 GHz, mientras que los globos oculares experimentan la mayor afectación por señales de microondas superiores a 1 GHz. El rango de frecuencias con SAR más pronunciada se sitúa entre 30 y 1500 MHz. En frecuencias superiores o inferiores a los intervalos de máxima absorción, el organismo responde de manera progresivamente menos intensa a la energía de radiofrecuencia, comportándose de manera análoga a una antena que muestra una recepción deficiente cuando se encuentra fuera de su frecuencia de resonancia natural.

Los niveles de exposición considerados seguros experimentan una reducción significativa por encima de 30 MHz. Los límites de MPE alcanzan su valor mínimo entre 30 y 300 MHz. Esta circunstancia implica la necesidad de implementar precauciones adicionales en proximidad de fuentes de radiofrecuencia de elevada potencia en las bandas VHF, UHF y microondas para radioaficionados. Los amplificadores que operan en estos rangos de frecuencia resultan particularmente críticos. Los niveles de potencia autorizados en dichas bandas pueden representar un riesgo de consideración. Durante la fase de prueba de estos equipos, se recomienda adoptar medidas preventivas suplementarias para prevenir una exposición accidental, tanto en las inmediaciones del transmisor como en la antena. Las fugas de radiación que superen los límites de MPE procedentes de transmisores de klistrón y magnetrón, especialmente, pueden constituir un riesgo significativo debido a los niveles de potencia potencialmente generados.

PROMEDIO Y CICLO DE TRABAJO

La cuantificación de la energía de radiofrecuencia se realiza mediante promedios temporales en intervalos determinados, considerando que la respuesta corporal al calor varía según la duración de la exposición. La evaluación promedio temporal analiza la exposición acumulada de radiofrecuencia durante un periodo específico.

ENTORNOS CONTROLADOS Y NO CONTROLADOS

Considerando las fluctuaciones en la exposición individual a radiofrecuencia, se establecen dos modalidades de periodos de promediado: uno correspondiente a espacios controlados y otro para espacios no controlados. Se conceptualiza que los individuos en ambientes controlados tienen plena conciencia de su exposición y se espera que implementen medidas racionales para su minimización. Como ejemplificación de entornos controlados se encuentran las instalaciones de transmisión (comprendiendo las estaciones de radioaficionados) y las zonas adyacentes a antenas. En un ambiente controlado, el acceso se restringe exclusivamente a personal autorizado e informado. Los sujetos previstos para ocupar estos espacios incluirían trabajadores de estaciones, radioaficionados con licencia y sus núcleos familiares.

Los entornos no controlados comprenden áreas de libre acceso para la población general, tales como vías públicas, aceras, residencias, centros educativos e incluso predios privados sin delimitación. Los individuos en estos espacios no controlados carecen de conciencia sobre su exposición, aunque presentan una probabilidad significativamente menor de experimentar una exposición continua. Consecuentemente, los límites de densidad de potencia de RF resultan más elevados en entornos controlados, mientras que el periodo de promediado se extiende en espacios no controlados. El periodo de promediado se establece en 6 minutos para entornos controlados y 30 minutos para entornos no controlados.

CICLO DE TRABAJO

El ciclo de trabajo representa la proporción existente entre el periodo de activación del transmisor y la duración total de exposición. Este parámetro posee un límite máximo del 100%. (El factor de trabajo equivale al ciclo de trabajo expresado como fracción decimal, por ejemplo, 0,25 en lugar de 25%). Cuanto más reducido sea el ciclo de trabajo de transmisión (menor tiempo de activación del transmisor), menor resultará la exposición promedio. Un ciclo de trabajo de transmisión más bajo permite niveles de exposición momentáneos más elevados para un promedio de exposición determinado. Este constituye el ciclo de trabajo operativo. En la mayoría de las operaciones de radioaficionado, el tiempo de recepción y transmisión resulta aproximadamente equivalente, por lo que el ciclo de trabajo operativo difícilmente supera el 50%.

Adicionalmente al ciclo de trabajo operativo, diversos modos presentan diferentes ciclos de trabajo de emisión, según se ilustra en la Tabla 37. A modo de ejemplo, una señal SSB convencional sin procesamiento vocal para incrementar la potencia promedio posee un ciclo de trabajo de emisión del 20%. En contraste, FM representa un modo de potencia constante, por consiguiente, su ciclo de trabajo de emisión alcanza el 100%. La potencia de salida promedio del transmisor se obtiene multiplicando la PEP por el ciclo de trabajo de emisión y, subsecuentemente, por el ciclo de trabajo operativo.

Tabla 37. Ciclos de trabajo operativo usados por radioaficionados. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

Modo	Ciclo de trabajo	Notas
SSB conversacional	20%	1
SSB conversacional	40%	2
SSB AFSK datos	100%	
SSB SSTV	100%	
Voz AM, 50% modulación	50%	3
Voz AM, 100% modulación	25%	
Voz AM, sin modulación	100%	
Voz FM	100%	
FM digital	100%	
ATV, porción de video, imagen	60%	
ATV, porción de video, pantalla negra	80%	
CW conversacional	40%	
Portadora	100%	4

Notas

1) Incluye características de voz y factor de trabajo silábico. Sin procesamiento de voz.

- 2) Incluye características de voz y factor de trabajo silábico. Procesamiento de voz intensivo.
- 3) Modulación de doble banda lateral con portadora completa, referida a PEP. Típico para voz. Puede variar entre 25% y 100% dependiendo de la modulación.
- 4) Una portadora completa se usa comúnmente para propósitos de ajuste.

SISTEMA DE ANTENA

Es fundamental considerar la ganancia proporcionada por el sistema de antena, junto con cualquier pérdida relevante en la línea de transmisión. Las antenas de elevada ganancia incrementan de manera significativa la potencia media de la señal.

MEDIDAS DE SEGURIDAD DE EXPOSICIÓN

Las estrategias que pueden implementarse cuando los resultados de la evaluación sobrepasan los límites de MPE se encuentran sintetizadas en la Figura 269. Tales recomendaciones representan prácticas óptimas que pueden generar una optimización de recursos temporales y económicos si se implementan previamente a la evaluación.

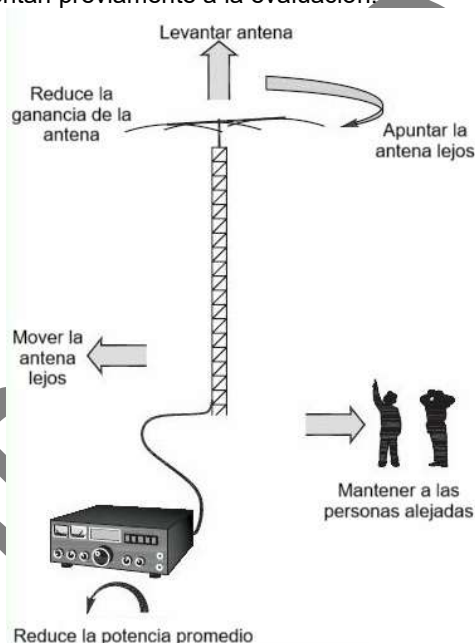


Figura 269. Medidas de seguridad. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2022))

- Posicione o reubique los elementos radiantes alejados de zonas donde las personas puedan aproximarse y quedar expuestas a campos de radiofrecuencia excesivos. Eleve el dispositivo radiante o sitúelo distante de los individuos. Mantenga los terminales de alta tensión y la zona central de alta corriente de los elementos radiantes apartados de las personas, impidiendo su contacto directo. Sitúe el elemento radiante más allá de los límites de propiedad y establezca un perímetro vallado alrededor de la base de las antenas instaladas en superficie terrestre. Esta acción previene que los individuos queden expuestos a radiofrecuencias que superen los límites de MPE.
- No oriente los elementos radiantes de elevada ganancia hacia espacios con probabilidad de presencia humana. Emplee antenas direccionales para desviar la energía de radiofrecuencia lejos de las personas. Considere que los elementos radiantes de alta ganancia presentan un haz más concentrado, incrementando la intensidad de exposición. Preste especial atención a las antenas VHF/UHF/microondas de alta ganancia (como Yagi y parabólicas utilizadas para EME) y transmisores: evite transmitir cuando existan personas cercanas al elemento radiante o cuando éste apunte próximo al horizonte.
- En caso de requerir elementos radiantes ocultos o de instalación interior, evalúe meticulosamente si se exceden los límites de MPE en su espacio habitable.

- Para VHF y UHF, ubique los elementos radiantes móviles en la parte superior o compartimento posterior del vehículo para maximizar la protección de ocupantes. Utilice un micrófono remoto para mantener el transceptor portátil distanciado de la cabeza durante la transmisión.
- Al operar señales de microondas, extreme precauciones con elementos radiantes de elevada ganancia en estas frecuencias. Incluso potencias de transmisión moderadas pueden generar niveles significativos de RF cuando son concentrados mediante antena parabólica con ganancia superior a 20 dB. Esta situación resulta especialmente crítica en configuraciones portátiles o móviles, donde los elementos radiantes pueden ubicarse próximos a la superficie terrestre.
- Desde la perspectiva del transmisor, emplee una carga o antena simulada durante pruebas. Adicionalmente, puede reducir la potencia y el ciclo operativo de sus transmisiones. Este procedimiento resulta generalmente efectivo con mínima alteración de la señal.

EFFECTO DE LA GANANCIA DE LA ANTENA

Existe un factor adicional que requiere consideración. Como se ha establecido previamente, las antenas direccionales concentran la energía radiada en una trayectoria específica, generando un incremento de potencia. La ganancia amplifica la potencia promedio en la dirección preferencial. (Simultáneamente reduce la potencia promedio en direcciones alternativas). Esto implica que cuatro elementos influyen en la exposición a RF: potencia y frecuencia del transmisor, distancia al elemento radiante y el patrón de radiación de la antena.

Si se emplea una antena con ganancia, será necesario incorporar el impacto de este parámetro en las evaluaciones de exposición. Por ejemplo, si el dispositivo radiante presenta 6 dBi de ganancia, lo cual representa un incremento cuadruplicado de la potencia radiada en la dirección principal, deberá multiplicarse la potencia promedio por cuatro al calcular la exposición a RF en el eje frontal de la antena.

EVALUACIÓN DE EXPOSICIÓN RF

El procedimiento general comprende varios pasos:

- Iniciar con la potencia promedio de cada transmisor en cada banda. Seguir el proceso previamente descrito, comenzando con la potencia promedio máxima (PEP) y aplicando posteriormente las diversas correcciones según el modo y patrones de utilización.
- En caso de poseer líneas de alimentación coaxial extensas, es posible sustraer las pérdidas de transmisión, especialmente en el intervalo de frecuencia comprendido entre 30 y 1500 MHz.
- Posteriormente, emplear tablas para integrar los efectos de ganancia y altura de la antena.
- Finalmente, utilizar las tablas para determinar la distancia requerida desde el elemento radiante para cumplir con los límites de MPE.

El proceso permanece idéntico tanto en su ejecución manual mediante tablas como en línea mediante calculadora web. Ambos métodos requieren idéntica información sobre la estación y utilizan las mismas tablas.

Es fundamental realizar la evaluación para cada banda de frecuencia y antena empleada en dicha banda. Puede optimizarse el trabajo efectuando la evaluación para la potencia promedio máxima, modo y uso en cada antena. Esto revelará los requisitos de separación mínimos o más críticos en todas las circunstancias para esa frecuencia y antena. Una vez concluida la evaluación, contrastar la separación mínima con la instalación real. Lo más probable es que no exista riesgo alguno; la mayoría de las estaciones simplemente carecen de capacidad para generar un peligro para la salud.

8.7 Seguridad Mecánica

Así como la seguridad en el taller resulta fundamental, existen numerosos aspectos mecánicos en la radioafición que generan sus propios desafíos de protección. Los radioaficionados acumulan más de un siglo construyendo e implementando sistemas de radio y estructuras de transmisión, desarrollando un extenso conocimiento sobre las metodologías seguras de ejecución. Las siguientes secciones proporcionarán algunas directrices para el ensamblaje y conservación de su equipamiento radioeléctrico.

Lo más crucial es adherirse estrictamente a las instrucciones y sugerencias proporcionadas por el fabricante. A modo de ilustración, ¿cuál debe ser la tensión adecuada de los cables de soporte? El fabricante de la torre le indicará específicamente: observe rigurosamente sus orientaciones. Este principio es aplicable a todo tipo de instalación, dispositivo de transmisión y labor en estructuras elevadas.

COLOCANDO ANTENAS Y SOPORTES

Previamente a iniciar la instalación, es fundamental verificar que los planos cumplan con las normativas de zonificación locales, así como las cláusulas o restricciones establecidas en los documentos de propiedad o contrato de arrendamiento. En caso de proyectar la instalación de una estructura elevada (superior a 60 metros) o si la antena se ubicará próxima a un aeropuerto, resulta imperativo consultar las regulaciones concernientes a la altura máxima de estructuras en dichas proximidades.

Fundamentalmente, es primordial seguir de manera rigurosa las instrucciones proporcionadas por el fabricante; su objetivo principal es garantizar una experiencia satisfactoria con el producto, por lo que generalmente ofrecen información relevante en sus manuales y plataformas web. Para quienes carezcan de experiencia previa en instalación de antenas, se recomienda solicitar la colaboración de un radioaficionado con mayor conocimiento técnico.

En el momento de proceder a la instalación de la antena, se deberá realizar una inspección meticulosa del área circundante y las estructuras de soporte requeridas. Es crucial asegurar que ninguna persona pueda entrar en contacto accidental con la antena. Si la instalación se efectúa a nivel del terreno, se sugiere rodear la estructura con un cercado de materiales como madera o plástico. En el caso de antenas de alambre, es indispensable garantizar que el cable de alimentación se mantenga por encima de la altura de la cabeza para prevenir enganches con transeúntes desprevenidos. En zonas rurales, se debe verificar que especímenes como ciervos u otros animales con astas no puedan quedar atrapados en los cables.

Los cables eléctricos representan un riesgo significativo para los instaladores de antenas. Es fundamental posicionar todas las antenas y cables de alimentación a una distancia prudencial de los cables eléctricos, incluyendo la acometida del servicio público domiciliario. La recomendación técnica establece mantener una separación equivalente al 150% de la altura total de la torre o mástil, más la antena; siendo imprescindible un espacio libre mínimo de 3 metros en caso de caída. En ninguna circunstancia se debe fijar una antena o cable tensor a un poste de servicios públicos, dado que una falla mecánica podría provocar contacto con cables eléctricos de alta tensión.

Los árboles frecuentemente sirven como estructuras de soporte para cables. Cuando se planea lanzar un cable de soporte a través o sobre árboles, es imperativo garantizar que la trayectoria de vuelo proyectada sea completamente segura, libre de individuos y líneas eléctricas. Un cable que se rompe o se engancha puede producir latigazos o rebotes, generalmente con considerable energía, por lo cual se recomienda utilizar protección manual y ocular.

Tras la instalación de la antena, asegure el cable de alimentación mediante cinta adhesiva o sujetadores plásticos. Mantenga todos los cables de soporte por encima de la altura craneal, siempre que sea factible. En zonas donde exista riesgo de tropiezo con cables de soporte, rodee el punto de anclaje con una barrera o señalice los cables con cinta de advertencia o cinta de color.

Las normativas de conexión a tierra para antenas y soportes deben cumplirse según el código eléctrico local. Las torres requieren conexión a tierra mediante varillas separadas de 2,4 metros de longitud para cada pata de la estructura, conectadas entre sí y a la torre. Un mástil de antena más pequeño deberá conectarse a tierra mediante un cable robusto y una varilla de tierra.

Los cables de soporte deben instalarse siguiendo las especificaciones del fabricante de la torre. Coloque un cable de seguridad a través de los tensores utilizados para tensar los cables. Esta acción previene su aflojamiento debido a vibraciones y torsiones.

TRABAJO EN TORRE Y SEGURIDAD AL ESCALAR

Aunque no se decida a instalar inmediatamente una torre personalmente, es habitual que los aficionados se auxilien mutuamente en proyectos de antenas que involucren trabajo en torres. Sea que decida trabajar en la torre o como parte del equipo terrestre, la seguridad constituye un factor primordial. Las siguientes pautas de seguridad contribuirán a una participación segura en proyectos de torres, propios o ajenos.

Iniciando con la preparación personal, tanto escaladores como personal terrestre deben emplear el equipo de protección adecuado durante cualquier trabajo en torre. Cada integrante del equipo debe portar casco, protección ocular y guantes resistentes apropiados para manipulación de cuerdas. Si es el escalador, utilice un arnés anticaídas inspeccionado y homologado, junto con botas de trabajo que protejan la zona del arco del pie. Evite cinturones de cuero de liniero, dado que carecen de homologación actual para trabajos en torres. Múltiples escaladores prefieren calzado con puntera de acero que asegure la sujeción al permanecer sobre peldaños estrechos.

Antes de escalar o comenzar a trabajar, efectúe una evaluación minuciosa de todo el equipamiento y los accesorios instalados. ¡Los imprevistos durante las labores en la torre rara vez resultan placenteros!

- Examine todos los cables de tensión y elementos de soporte de la estructura. Repárelos o ajústelos según corresponda antes de ascender.
- Las torres de manivela deben estar completamente replegadas o haberse implementado dispositivos mecánicos de bloqueo de seguridad. Jamás se debe subir a una torre de manivela sostenida exclusivamente por el cable que une las secciones.
- Verifique todos los cinturones y sistemas de escalada antes de trepar. Cerciórese de que los conectores y mosquetones operen correctamente, sin aperturas o cierres inadecuados. Sustituya o descarte las correas y eslingas deshilachadas.
- Garantice que todos los cordajes y herrajes de soporte estén en condiciones óptimas antes de ponerlos en funcionamiento.
- Emplee un mástil grúa (mástil temporal utilizado para elevar materiales como antenas o secciones de la torre) para evitar izar objetos directamente.
- Consulte el informe meteorológico más reciente para prevenir quedar atrapado en la torre durante una tormenta.
- Se recomienda visitar los servicios sanitarios antes de iniciar el ascenso y ¡no olvidar la protección solar!

Es fundamental contar con un equipo de tierra; evite escalar de manera individual siempre que sea factible, pues nunca resulta completamente seguro. Si escala solo, porte una radio portátil. El equipo de tierra debe contar con suficientes integrantes para ejecutar la labor de forma segura, incluyendo prestar auxilio si fuera necesario. Mientras permanezcan en tierra, examinen el trabajo detalladamente y determinen quién dirigirá las instrucciones. Si se utilizarán señales manuales, ¡asegúrense de que todos las comprendan! También resulta útil ensayar los procedimientos para que todos conozcan la secuencia. ¿Dominan todos los nudos y la técnica correcta para manejar cuerdas? De no ser así, garanticen que quienes posean dicho conocimiento sean responsables de manipular las cuerdas.

Durante la ejecución, minimicen las conversaciones que puedan generar distracción. Un miembro del equipo siempre debe supervisar al escalador o escaladores. Manténgase apartado de la base de la torre a menos que sea estrictamente necesario, ya que es donde es más probable que caigan objetos. Nunca se retire el casco mientras trabaja en la torre: un objeto que caiga desde 18 metros viajará a poco más de 64 km/h al impactar. Al participar en equipo,

aprenderá a trabajar en torres de forma segura. Incluso si nunca ha pisado una torre, saber cómo colaborar puede contribuir a estos importantes proyectos.

INSTALACIONES MÓVILES

Implementar un equipo de radiocomunicación en un vehículo puede parecer relativamente simple, y efectivamente puede serlo. No obstante, existen diversos riesgos de seguridad que los instaladores novatos suelen desatender. La consideración primordial, incluso por encima del rendimiento óptimo de radiofrecuencia, radica en preservar la integridad física del conductor y sus acompañantes.

Cualquier elemento no asegurado dentro del habitáculo puede transformarse en un proyectil potencialmente letal durante una colisión. ¡Considérese el impacto de recibir un golpe craneal por un dispositivo de radio desplazándose a 48 km/h o superior! Es fundamental asegurar todo el equipamiento vehicular, contemplando accesorios como diplexores, conmutadores y micrófonos. Cuando sea factible, emplear cabezales de control (paneles frontales desmontables) que se conecten al equipo mediante un cable extenso. La unidad más pesada debería montarse bajo un asiento o en el compartimento de carga, donde su movimiento resulte imposible.

No se debe instalar el equipo de comunicación en ubicaciones que desvíen la atención del conductor. Es imperativo no obstruir el campo visual colocando dispositivos sobre el tablero o en zonas que interfieran con la visibilidad. (También se recomienda mantener los equipos alejados de la exposición solar directa). El posicionamiento del equipo o su panel de control debe permitir una visualización expedita de los controles sin comprometer la concentración del conductor durante periodos prolongados.

Incluso con una instalación apropiada, se requiere una conducción prudente. Obsérvense las siguientes directrices para una navegación segura:

- Evitar operar el equipo en tráfico denso. Suspender la comunicación y reanudarla en momentos más propicios.
- Detenerse para realizar ajustes complejos en el equipo. Manipular torpemente los menús o intentar presionar múltiples botones simultáneamente constituye un riesgo inminente de accidente.

Conocer exhaustivamente la normativa local que regula el uso de dispositivos de comunicación bidireccional durante la conducción. Las legislaturas estatales han venido implementando regulaciones en respuesta al uso descuidado de dispositivos móviles. Aunque las operaciones de radioaficionados suelen estar exentas, ciertos modos de operación pueden encontrarse restringidos. Podría resultar ilegal el empleo de auriculares durante la conducción o mantener un volumen que impida percibir vehículos de emergencia. Los escáneres y equipos capaces de receptar transmisiones de seguridad pública pueden estar prohibidos en vehículos, si bien los transceptores de radioaficionados generalmente quedan excluidos de tales restricciones. Se recomienda portar la licencia de radioaficionado y una copia de las regulaciones estatales que eximen a los radioaficionados durante la operación vehicular.

SEGURIDAD ELÉCTRICA Y DE RF

Las comunicaciones radioeléctricas presentan un nivel de seguridad considerable, si bien ninguna actividad humana está totalmente libre de potenciales riesgos. Conforme se vayan realizando ascensos de categoría, los radioaficionados experimentarán un espectro más amplio de equipamiento, interactuarán con infraestructuras de transmisión de mayor envergadura y desarrolarán montajes de estaciones más sofisticadas. Este conjunto expandido de prerrogativas implica una responsabilidad incrementada de comprender y anticipar los posibles peligros inherentes. Dicha comprensión le permitirá implementar las medidas preventivas necesarias para salvaguardar su integridad física y la de otros profesionales del entorno.

8.8 Seguridad Eléctrica

Con la salvedad de los dispositivos móviles y transportables, los equipos radiofónicos se alimentan mediante la red eléctrica de corriente alterna. Puesto que la tensión de CA del sistema eléctrico resulta independiente de si se conecta un transmisor de gran potencia o una pequeña señal luminosa, se implementan idénticas normas de seguridad tanto para estaciones de baja como de alta potencia.

PREVENCIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS

Es fundamental contar con un interruptor principal de conexión/desconexión para su estación y área de trabajo, similar a lo que ocurre en un taller repleto de herramientas y maquinaria eléctrica. En caso de producirse una descarga eléctrica, los equipos de rescate deberán estar capacitados para interrumpir inicialmente el suministro eléctrico, evitando así su propia exposición al riesgo. El dispositivo de corte debe estar nítidamente rotulado y distanciado del equipamiento. No ubique el interruptor de encendido/apagado en un sitio oculto, de difícil localización o acceso. Instruya a su núcleo familiar sobre cómo desconectar el suministro eléctrico desde el interruptor principal y el panel de disyuntores de su vivienda.

No se exponga personalmente a una descarga eléctrica ni genere situaciones que dificulten su eventual rescate. Evite operar equipos energizados salvo absoluta necesidad. Absténgase de trabajar individualmente con dispositivos con corriente. Nunca presuponga que el equipo está desactivado o sin alimentación; verifíquelo previamente mediante un medidor o comprobador. Si manipula líneas de alimentación o antenas, garantice que no pueda activarse un transmisor o amplificador durante su intervención. Mantenga una extremidad en el bolsillo mientras sondea o examina equipos energizados, utilice calzado con suela aislante y retire cualquier elemento metálico prescindible. Al intervenir internamente en el equipo, retire, aisle o asegure de cualquier modo los conductores sueltos. Téngase presente que la carga residual de un capacitor puede mantener tensiones peligrosas durante períodos prolongados, por lo cual se recomienda emplear resistencias de descarga para su eliminación. Debe utilizarse una varilla de puesta a tierra para disipar la carga de los capacitores y asegurar que todos los conductores expuestos queden conectados a tierra.

SEGURIDAD EN LA SOLDADURA

La práctica de soldar constituye una experiencia electrónica consolidada que se ha mantenido vigente por más de un siglo. Fundamentalmente, la técnica de soldadura se apoya en una aleación primaria de plomo, complementada con estaño para disminuir su temperatura de fusión. El plomo representa una sustancia tóxica ampliamente reconocida, por lo cual resulta imperativo minimizar cualquier exposición innecesaria. Se recomienda realizar las operaciones de soldadura en espacios con ventilación adecuada, con el propósito de prevenir la inhalación de las diminutas partículas de vapor de plomo generadas durante el proceso de fundición. La emisión de humos procedentes del fundente de colofonia, especialmente en concentraciones elevadas, podría representar un potencial riesgo para la salud del operario. Una vez concluida la actividad de soldadura, se aconseja realizar un lavado meticuloso de las manos para eliminar cualquier residuo de material de soldadura o fundente.

PRÁCTICAS DE CABLEADO

Durante la ejecución de labores de mantenimiento eléctrico en su residencia o instalación central, ¿de qué manera puede identificar cuáles procedimientos resultan seguros? El Manual del Código Eléctrico Nacional proporciona descripciones pormenorizadas respecto a cómo gestionar el cableado de CA en su vivienda y centro de operaciones de manera completamente segura. Adicionalmente, es fundamental observar los reglamentos constructivos locales para garantizar que su inmueble presente un cableado apropiado y se ajuste a las condiciones particulares de la zona. Este cumplimiento puede revestir significativa importancia para propósitos de cobertura aseguradora. En caso de experimentar cualquier duda sobre su capacidad para ejecutar la labor de manera correcta, se recomienda enfáticamente contratar los servicios de un profesional electricista debidamente autorizado.

Al proceder con el cableado o reparación de un conector de alimentación de CA, es imperativo respetar las convenciones estandarizadas de coloración de conductores, tal como se ilustra en la Figura 265 y la siguiente figura.

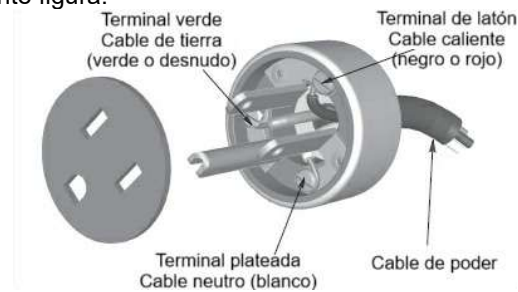


Figura 270. Forma correcta de cableado 120 VAC. (Adaptado de ARRL (American Radio Relay League, 2023))

- El cable vivo (el cable o cables que transportan tensión) presenta un aislamiento de tonalidad negra o roja; se establece su conexión al terminal o tornillo fabricado en aleación de latón.
- El neutro cuenta con un aislamiento de color blanco; se vincula al terminal o tornillo con acabado plateado.
- La tierra corresponde a un aislante de tonalidad verde o un conductor sin cubierta; se conecta al terminal o tornillo de color verde o de cobre expuesto.

Ya sea que se proceda a implementar un nuevo circuito eléctrico en el espacio doméstico o se seleccione un cable de alimentación, es fundamental emplear conductores con capacidad nominal adecuada para la carga de corriente proyectada. La capacidad nominal del conductor para transportar corriente se denomina ampacidad. En el cableado de corriente alterna doméstico, los dos calibres más frecuentes son el calibre 12 AWG para circuitos de 20 A y el calibre 14 AWG para circuitos de 15 A. Al concluir la instalación del cableado, se recomienda verificar la precisión de las conexiones mediante un comprobador de circuitos de corriente alterna.

Los dispositivos de protección contra corrientes de fuga a tierra (GFCI) se implementan en circuitos de corriente alterna para mitigar el peligro de electrocución. Un interruptor GFCI se activará cuando detecte una disparidad en las corrientes que transitan por los conductores de fase y neutro. Las discrepancias de intensidad eléctrica revelan la existencia de un riesgo potencial de descarga, puesto que la corriente desbalanceada estaría circulando por una trayectoria no prevista, como podría ser a través del cuerpo humano desde el cable de fase hacia tierra. Los interruptores GFCI pueden ser sensibles incluso a desequilibrios de apenas unos cuantos miliamperios (mA), muy por debajo del umbral que podría provocar lesiones eléctricas.

Un enclavamiento de seguridad constituye un mecanismo que impide la presencia de tensiones peligrosas o radiofrecuencia intensa al abrir un gabinete o caja. Una modalidad de enclavamiento desconecta físicamente la alta tensión (AT) o la radiofrecuencia al activarse. Una segunda tipología provoca un cortocircuito o una conexión a tierra en un circuito de alta tensión al activarse, lo cual podría provocar la fusión de un disyuntor o fusible en una fuente de alimentación. Jamás se debe anular un enclavamiento durante las pruebas a menos que se indique explícitamente, y únicamente de la manera prescrita en las instrucciones. Es fundamental restablecer el enclavamiento antes de reintegrar el equipo a servicio.

No se deben instalar líneas de alimentación de antena sobre líneas eléctricas o acometidas de servicio provenientes de un transformador hasta la vivienda. Aunque son solo líneas de 240 V CA, poseen una potencia considerable. Si se requiere colocar líneas a través o por encima de árboles para sostener una antena de alambre, es imperativo garantizar que la trayectoria de vuelo proyectada sea completamente segura y libre de personas y líneas eléctricas. Las líneas eléctricas pueden estar ocultas dentro o justo detrás de los árboles.

SEGURIDAD DEL GENERADOR

Los dispositivos de emergencia y portátiles típicamente incorporan un generador eléctrico propulsado mediante un motor que funciona con combustibles como gasolina, diésel o propano. Considerando que los generadores actuales resultan más accesibles y sencillos de manipular que en épocas anteriores, existe una tendencia a descuidar los protocolos elementales de seguridad.

Las complicaciones relacionadas con el suministro de combustible y la ventilación representan la principal causa de lesiones vinculadas a estos equipos. Categóricamente, se prohíbe la operación de un generador en espacios interiores cerrados, como sótanos o garajes, tanto si hay personas presentes como en sus proximidades. Se recomienda su instalación en áreas exteriores, distanciado de zonas habitacionales. El monóxido de carbono (CO) presente en los gases de escape puede concentrarse rápidamente hasta alcanzar niveles peligrosos. Incluso en ambientes externos, los gases pueden penetrar por conductos de ventilación o ventanas, o acumularse en zonas con deficiente circulación de aire. Para quienes prevean un uso frecuente del generador, se aconseja implementar detectores de CO en espacios habitacionales y laborales.

Los carburantes volátiles e inflamables conllevan riesgos inherentes propios. Los equipos generadores deben ser sistemáticamente desactivados durante el reabastecimiento para prevenir la potencial ignición de vapores o salpicaduras próximas al sistema de encendido. Aun cuando el motor se encuentre apagado, el bloque motor o el sistema de escape pueden mantener temperaturas suficientemente elevadas para constituir un riesgo de combustión. El repostaje debe ser ejecutado por un equipo de dos personas, donde uno de los integrantes portará un dispositivo extintor. El almacenamiento del combustible debe realizarse distante del generador, particularmente alejado de zonas de escape con alta temperatura, utilizando exclusivamente contenedores certificados. Mantener un extintor de fuego próximo al generador, pero separado del combustible.

Los armazones metálicos del gabinete generador y motor funcionan como conexión a tierra, aunque no establecen una conexión física directa con el suelo. El método más seguro para proporcionar una conexión a tierra adecuada consiste en utilizar una varilla de conexión próxima al generador, vinculada al armazón mediante un cable de sección considerable. La mayoría de los equipos generadores incorporan un terminal específico destinado a este propósito.

Si el generador será implementado en un entorno doméstico, su conexión a los circuitos eléctricos internos requiere precauciones específicas. Para vincular directamente la salida del generador al sistema de cableado residencial, será indispensable poder interrumpir el suministro eléctrico proveniente de líneas de servicios públicos. Este objetivo generalmente se consigue mediante un par de interruptores automáticos de gran capacidad, etiquetados como "Principal". Al abrir dichos interruptores, se produce una desconexión total del panel de distribución respecto al servicio eléctrico externo. Con estos interruptores abiertos, será factible utilizar el generador para alimentar el espacio doméstico de manera segura.

Al omitir la apertura de los interruptores automáticos principales, la energía suministrada al sistema doméstico permanecerá conectada a la red eléctrica. El transformador del sistema eléctrico que habitualmente abastece el hogar funcionará igualmente en sentido inverso: la tensión del generador se elevará a niveles potencialmente letales, transfiriéndose a las líneas de servicios públicos. Este fenómeno, denominado retroalimentación, representa un riesgo significativo para electricistas que laboran en el sistema y para vecinos potencialmente conectados al sistema eléctrico. Si el generador permanece conectado y operativo durante el restablecimiento energético, el conflicto resultante entre la red eléctrica y el generador probablemente provocará daños.

La alternativa más recomendable para conectar un generador al espacio doméstico consiste en un interruptor de transferencia que desplace la energía del panel de distribución desde las líneas de suministro eléctrico hacia un conector especializado para el generador. Una vez activado el interruptor de transferencia, la energía del generador se vinculará exclusivamente al cableado residencial. El tipo de interruptor de transferencia descrito conmuta determinados circuitos

domésticos entre la línea de CA y el generador. La instalación de un interruptor de transferencia deberá ser ejecutada por un profesional electricista debidamente autorizado.

ILUMINACIÓN

El propósito fundamental de la protección contra descargas eléctricas atmosféricas es evitar la generación de siniestros en la vivienda y minimizar o impedir daños eléctricos en los dispositivos. Durante la implementación de la estación, un panel de entrada metálico por donde transitan los cables de señalización y control hacia la vivienda constituye una ubicación óptima para establecer una conexión de puesta a tierra contra rayos. El panel deberá conectarse a tierra mediante una breve correa metálica resistente que lo vincule con una varilla de tierra próxima. Se recomienda la instalación de dispositivos pararrayos en el panel de entrada. La varilla de tierra debe conectarse con el electrodo de puesta a tierra de la acometida de corriente alterna mediante un conductor de alta resistencia. Las estructuras de soporte deben aterrizar utilizando varillas de tierra de 2,44 metros (8 pies) dispuestas individualmente para cada soporte de la estructura, estableciendo conexiones entre las varillas de tierra y la estructura correspondiente.

Los conductores y conexiones de puesta a tierra deben ser lo más breves y rectilíneos posible. Cada una de las estructuras elevadas, soportes verticales y elementos de soporte para antenas deberán establecer una conexión con el sistema de tierra. Las instalaciones de protección contra descargas eléctricas atmosféricas deben mantener una interconexión entre sí para garantizar una adecuada seguridad.

Se desaconseja enfáticamente emplear técnicas de soldadura para realizar las conexiones, debido a que las uniones fundidas probablemente colapsarían y se destruirían al ser sometidas a una corriente eléctrica de la magnitud correspondiente a una descarga atmosférica. Se recomienda utilizar elementos de sujeción mecánica, procedimientos de soldadura fuerte o técnicas de soldadura que aseguren una conexión a tierra suficientemente robusta y resistente.

Finalmente, resulta fundamental verificar si la cobertura de su póliza de seguro para inquilinos o propietarios contempla los posibles daños provocados por descargas atmosféricas. Es imperativo corroborar la protección referente a "estructuras externas" y otros tipos de mejoras en la propiedad que puedan ser reconocidas por las compañías aseguradoras.

8.9 Seguridad Exterior

Concentrarse en la seguridad eléctrica relacionada con el cableado y los dispositivos está definitivamente justificado, pero una estación de radioaficionados también posee numerosos componentes externos. La seguridad en espacios exteriores involucra primordialmente aspectos estructurales que pueden resultar tan cruciales como la protección eléctrica en espacios interiores.

INSTALANDO ANTENAS

La norma fundamental para la implementación de antenas se transgrede anualmente, generalmente con consecuencias fatales: ¡Ubique todos los sistemas de antena y conductos de alimentación a una distancia prudencial de los tendidos eléctricos! Postes y líneas de transmisión son habituales y requieren un amplio margen de separación. Los protocolos de seguridad establecen que ningún elemento del sistema de antena debe ubicarse a menos de 3 metros de los cables eléctricos, y un principio recomendable consiste en separar todos los componentes de la antena y su estructura de soporte de las líneas eléctricas al menos un 150% de la altura total de la torre o mástil más la antena. Por ejemplo, si la combinación de antena y mástil de soporte alcanza 12 metros de altura, deberán estar distanciados 18 metros de los tendidos eléctricos. Este procedimiento previene eficazmente que una antena colapse o sea proyectada sobre los cables eléctricos. De manera análoga, si un cable eléctrico cayera, mantendrá una amplia zona de separación respecto a la antena.

PRÁCTICAS DE BUEN MANTENIMIENTO

Independientemente del entorno laboral - sea en la copa de un árbol, sobre una cubierta o en una estructura elevada - es fundamental observar los principios elementales de seguridad para ejecutar las tareas de manera eficiente sin comprometer la integridad personal ni arriesgar la vida. Es preciso desestimar aquella tentación interior que sugiere: "Puedo ascender rápidamente en cinco minutos y concluir la labor, ¿por qué complicarme?".

En primer término, tanto los profesionales que realizan el ascenso como sus colaboradores deberán portar el equipamiento protector de manera permanente. El operario que escala necesita un arnés de seguridad apropiado. El equipo de protección adicional comprende casco, guantes, protector solar e incluso gafas de protección. Se recomienda utilizar calzado laboral robusto para resguardar los pies y prevenir molestias en la zona del arco plantar durante extensos periodos de permanencia sobre los peldaños de la estructura. Es aconsejable contemplar tiempo adicional en la planificación para gestionar eventuales contingencias imprevistas.

- Antes de subir o comenzar a trabajar, verifique meticulosamente la lista de comprobación de seguridad:
- Examine exhaustivamente todos los elementos de tensión y componentes de soporte de la torre.
- Las torres de elevación deben encontrarse completamente ajustadas y aseguradas en su posición.
- Inspeccione de manera integral todos los cinturones y sistemas de amarre.
- Evalúe minuciosamente todas las cuerdas y elementos auxiliares de soporte, incluyendo sistemas de poleas.
- Proceda al apagado y desconexión de todos los equipos de aire acondicionado, bloqueando los circuitos y etiquetándolos cuando sea factible.
- Los transmisores deben permanecer desactivados y desconectados del suministro eléctrico para prevenir posibles electrocuciones o exposición prolongada a ondas radioeléctricas.
- Verifique el pronóstico meteorológico y procure no ser sorprendido por una tormenta mientras se encuentra en la torre. Durante el ascenso o descenso, es fundamental mantener la calma y no convertirlo en una competencia de velocidad. Garantice que su equipo de escalamiento cuente con todas las medidas de seguridad:
- Los cinturones y arneses deberán encontrarse dentro del período de vigencia y poseer la capacidad de carga correspondiente.
- Los mosquetones necesitan cerrarse de manera completa y totalmente asegurada.
- Emplee invariablemente un cable de protección o cuerdas complementarias.
- Y no olvide la norma, frecuentemente pasada por alto, de acatar estrictamente las instrucciones proporcionadas por el fabricante.

Generalmente se requieren autorizaciones constructivas para estructuras de celosía, de manivela y de inclinación. Al erigir una torre próxima a un aeropuerto, es fundamental verificar el cumplimiento de las regulaciones establecidas por Aviación Civil respecto a la altura máxima permisible de la estructura en dicha zona. Es imperativo observar las normativas de conexión a tierra para elementos metálicos externos. Se recomienda consultar los reglamentos de construcción municipales.

Si el mástil o la torre precisan de cables de soporte, procure mantener todas las líneas y tensores por encima del nivel de la cabeza cuando sea factible. En caso de que los anclajes de los tensores estén próximos al suelo, es necesario señalizarlos mediante banderas o vallados en aquellas zonas donde no alcancen la altura de la cabeza.

Si el personal participa o forma parte del equipo de tierra, este constituye un componente esencial del grupo de trabajo. Es fundamental congregarse suficiente personal para ejecutar las tareas con seguridad. Ante una dotación insuficiente, se aconseja postergar la intervención. Con la totalidad de los integrantes presentes y atentos, se debe realizar una revisión pormenorizada y establecer quién dirigirá las instrucciones. Es crucial garantizar una comunicación nítida. Los radios portátiles FRS sin licencia o los radios de radioaficionado resultan significativamente más prácticas que los gritos o señalamientos. En caso de emplear señales manuales, es

indispensable que todos comprendan y utilicen un lenguaje gestual uniforme. Probablemente el consejo de seguridad más soslayado sea acatar estrictamente las instrucciones del fabricante. Se recomienda examinar meticulosamente las indicaciones antes de iniciar la labor. El fabricante pretende que se obtengan resultados óptimos con su producto y que pueda instalarse de manera segura. Es fundamental comprender cada etapa y disponer de todos los componentes. Cuando el mástil alcance la mitad de su altura o la antena se ubique en la cúspide de la torre, no es el momento apropiado para descubrir malentendidos en las instrucciones o la ausencia de algún componente crucial.

Una vez concluida la instalación de la antena, debe impedirse cualquier contacto humano con esta. En caso de existir probabilidad de interacción, se recomienda instalar un vallado perimetral alrededor de la antena ubicada en el suelo durante su transmisión.

Esta medida contribuye a minimizar la exposición a radiofrecuencias y reduce las probabilidades de desplazamiento de la antena.

8.10 Materiales Peligrosos

No resultan numerosos los materiales catalogados como peligrosos que se requieren para la comunicación por radioaficionado. Desde una perspectiva objetiva, probablemente existan más sustancias potencialmente nocivas en el garaje doméstico y entre los productos de limpieza que en cualquier estación de radioaficionado. No obstante, se presentan tres elementos cuyo conocimiento resulta fundamental.

PLACA DE CIRCUITO IMPRESO (PCB POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)

Las PCB a los que se hace referencia en esta sección no corresponden a las placas de circuito impreso, sino a los bifenilos policlorados. Posiblemente se haya escuchado sobre la contaminación por PCB en instalaciones industriales o espacios de disposición de aceites usados. Las PCB funcionaban como aditivo para los aceites aislantes que anteriormente se empleaban de manera generalizada en equipamiento eléctrico. Dichos compuestos contribuían a que el aceite mantuviera sus propiedades aislantes sin experimentar descomposición, razón por la cual su utilización se extendió hasta que se revelaron sus riesgos. Las PCB son considerados carcinógenos confirmados: la exposición, incluso en cantidades mínimas, incrementa la probabilidad de desarrollar determinadas tipologías de cáncer.

En la estación de radioaficionado, las PCB pueden localizarse en capacitores antiguos de alta tensión con contenido oleoso y, en ocasiones, en transformadores eléctricos de alta tensión denominados "raquetas de polos". Estos se implementaban en fuentes de alimentación de CD para amplificadores de RF de tubo. Dado que cualquier componente con PCB debería ser considerablemente antiguo, se recomienda su reemplazo por una unidad moderna. Si persiste la incertidumbre sobre la presencia de PCB, puede establecerse contacto con el fabricante utilizando el número de modelo (siempre que la empresa sea conocida y continúe operativa).

En caso de identificar o extraer un componente de esta naturaleza, se aconseja utilizar guantes protectores y limpiar la superficie externa de la caja con una toalla desechable. Deposite la toalla y el componente en una bolsa plástica o envuélvalo en material plástico, y proceda a su traslado a la compañía eléctrica local. Estas entidades disponen de procedimientos específicos para la eliminación segura y apropiada de PCB, potencialmente sin generar costo alguno. Algunos gobiernos municipales también ofrecen jornadas periódicas de recolección de residuos tóxicos, constituyendo otra alternativa para su disposición.

BERILIO Y ÓXIDO DE BERILIO

El cobre aleado con berilio se localiza en elementos metálicos flexibles como contactos de resorte que demandan tanto conductividad eléctrica como resistencia estructural. En su estado metálico original o combinado, el berilio no representa un riesgo intrínseco. Los componentes pulverizados y fragmentos microscópicos constituyen el verdadero peligro potencial, específicamente mediante exposición crónica prolongada. Para garantizar la seguridad, se recomienda

enfáticamente evitar procesos de esmerilado, soldadura o limado de materiales con contenido de berilio en espacios carentes de ventilación adecuada.

El óxido de berilio (BeO) configura una cerámica de extraordinaria durabilidad que exhibe la peculiar característica de combinar un aislamiento eléctrico superior con una conductividad térmica excepcional. Su aplicación se concentra principalmente en el interior de semiconductores de potencia, donde cumple la función de separar térmicamente la estructura del transistor de su envolvente externa, facilitando la disipación calórica. Adicionalmente, encuentra utilización en tubos de vacío de mayores dimensiones como barrera térmica. Generalmente, el BeO permanece confinado dentro de las envolturas de tubos y encapsulados de transistores.

La manipulación del BeO en estado sólido no implica riesgos significativos; no obstante, si un tubo o encapsulado sufre rotura, los fragmentos cerámicos podrían fragmentarse o generar particulado. El polvo resultante resulta tóxico en caso de inhalación. Dado que resulta complejo distinguir visualmente si una cerámica blanca corresponde a BeO o a una variante cerámica menos nociva, se aconseja manipular estos materiales con extrema precaución.

Para su gestión, se recomienda aspirar el polvo o partículas diminutas utilizando un equipo provisto de filtros HEPA, depositar la bolsa de la aspiradora en una bolsa plástica herméticamente sellada y contactar con los servicios locales de gestión de residuos sólidos para obtener instrucciones específicas de eliminación.

MONÓXIDO DE CARBONO

La utilización de equipos generadores y sistemas de calefacción que emplean combustibles fósiles durante situaciones de emergencia y operaciones móviles se ha incrementado progresivamente. Esta práctica conlleva diversos riesgos que el usuario debe comprender a cabalidad, abarcando amenazas eléctricas, de combustión y relacionadas con el almacenamiento de combustible. Entre estos peligros, destaca particularmente el monóxido de carbono (CO) que estos aparatos emiten.

El monóxido de carbono constituye un gas carente de olor y color, lo que implica la inexistencia de señales perceptibles por los seres humanos que adviertan sobre la presencia de concentraciones peligrosas de CO.

Consecuentemente, resulta fundamental que los generadores y dispositivos de calefacción (incluyendo estufas de combustión de madera) se empleen exclusivamente en espacios con ventilación adecuada y distantes de la proximidad humana. El único método confiable para identificar la existencia de niveles excesivos de CO consiste en la implementación de un detector específico de monóxido de carbono; es importante precisar que una alarma de humo no responde específicamente a la presencia de CO. Se recomienda instalar un detector de CO en cualquier zona susceptible de ser ocupada por personas donde potencialmente pueda acumularse monóxido de carbono proveniente de las emisiones del generador o de la ventilación del sistema de calefacción.

Capítulo 9 Bibliografía

- American Radio Relay League. (2020). *ARRL Extra Class License Manual*. Newington, USA.
- American Radio Relay League. (2022). *ARRL Ham Radio License Manual*. Newington, USA.
- American Radio Relay League. (2023). *ARRL General Class License Manual*. Newington, USA.
- Superintendencia de Telecomunicaciones (Sutel). (2017). *Manual del Radioaficionado de Costa Rica*. San José, Costa Rica.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (1995). *Abreviaturas y señales diversas que habrán de utilizarse para las radiocomunicaciones en el servicio móvil marítimo (Recomendación UIT-R M.1172)*. Ginebra, Suiza.

BORRADOR

BORRADOR