

MANUAL DE GESTIÓN NACIONAL DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

Ingeniería del espectro radioeléctrico

Título II



MinTIC

Ministerio de Tecnologías de la Información
y las Comunicaciones

ANE 
Agencia Nacional del Espectro

TABLA DE CONTENIDO

PARTE 1. FUNDAMENTOS

Capítulo 1. Ayudas de ingeniería del espectro	12
1.1 <i>Modelamiento de propagación: seleccionando el modelo correcto</i>	12
1.1.1 Modos de propagación de ondas de radio	13
1.1.1.1 Guía de onda	13
1.1.1.2 Onda de superficie	14
1.1.1.3 Onda celeste	15
1.1.1.4 Ondas espacial.....	17
1.1.1.5 Difracción.....	17
1.1.1.6 Radiodifusión en frecuencia media (MF)	18
1.1.1.7 Dispersión troposférica	20
1.1.1.8 Línea de vista (punto a punto o Tierra a satélite).....	21
1.1.2 Características específicas de diferentes bandas de frecuencia.....	22
1.1.3 Resumen de los modelos de pérdida en la trayectoria.....	29
1.1.4 Ejemplos prácticos de los modelos de pérdida de trayectoria	30
1.2 <i>Datos topográficos</i>	45
1.2.1 Sistemas de coordenadas.....	45
1.2.2 Dato geodésico y compatibilidad con bases de datos	48
1.2.3 Espaciamiento horizontal en una base de datos macroscópica.....	48
1.2.4 Principios generales de almacenamiento de datos para alturas de terreno...	48
1.2.5 Representación de los datos de altura del terreno.....	50

1.2.6	Bases de datos topográficos de la zona urbana	51
1.2.7	Información de cobertura del terreno macroscópico	51
1.2.8	Información de cobertura terrestre para fines especiales.....	53
1.2.9	Datos de la cantidad.....	54
1.2.10	Sistema de Información Geográfica	54
1.2.11	Ejemplos prácticos	55
1.2.12	Mapas de datos geofísicos	58
1.3	<i>Evaluación del nivel de ruido</i>	58
1.3.1	Ruido radioeléctrico externo	58
1.3.2	Ruido térmico del receptor.....	61
1.4	<i>Métricas del uso eficiente del espectro</i>	62
1.5	<i>Unidades y su conversión</i>	66
1.6	<i>Sistema automatizado de gestión del espectro</i>	69
Capítulo 2. Análisis de la interferencia		72
2.1	<i>Principios generales</i>	72
2.2	<i>Interferencia co-canal</i>	73
2.3	<i>Interferencia en el canal adyacente</i>	74
2.4	<i>Desensibilización (bloqueo)</i>	76
2.5	<i>Intermodulación</i>	77
2.6	<i>Otros tipos de interferencia</i>	79
2.6.1	Emisiones espurias	79
2.6.2	Armónicos.....	80
2.6.3	Emisiones parásitas	81
2.6.4	Modulación cruzada	81
2.7	<i>Alcance y probabilidad de interferencia</i>	82
Capítulo 3. Compartición de las bandas de frecuencia		90
3.1	<i>Principios técnicos de la compartición de bandas de frecuencias</i>	90
3.1.1	Separación de frecuencias	93
3.1.2	Separación espacial	97
3.1.3	Separación en el dominio del tiempo.....	99
3.1.4	Separación de señal	100
3.1.5	Papel de la radio definida por software y la radio cognitiva	104
3.2	<i>Compartición de frecuencias por servicios</i>	105
3.2.1	Compartición entre el servicio móvil terrestre y el servicio de radiodifusión.....	105
3.2.2	Compartición entre servicios fijos y de radiodifusión.....	107

3.2.3	Compartición de la banda por parte del mismo servicio: radiodifusión	108
3.2.4	Compartición con sistemas de radar	110
3.2.5	Compartición utilizando técnicas de espectro ensanchado	111
3.3	<i>Glosario de referencias sobre compartición de bandas de frecuencia</i>	112
Capítulo 4. Relaciones de protección		119
4.1	<i>Criterios generales</i>	119
4.2	<i>Para los diferentes servicios</i>	121
Capítulo 5. Límites de radiación		133
5.1	<i>Límites CISPR</i>	133
5.2	<i>Límites humanos de exposición a CEM</i>	138
Capítulo 6. Consideraciones sobre la ingeniería en sitio		140
6.1	<i>Compartición del sitio</i>	140
6.1.1	Consideraciones generales	140
6.1.2	Consideraciones sobre el aislamiento de la antena	142
6.1.3	Co-ubicación de antenas de radiodifusión MF	144
6.2	<i>Compartición de infraestructuras</i>	147

PARTE 2. APLICACIONES PRÁCTICAS

Capítulo 7. Asegurar la compatibilidad en la asignación de frecuencias		151
7.1	<i>Principios de la separación de frecuencia-distancia</i>	151
7.2	<i>Servicios móviles terrestres (radio móvil privado)</i>	156
7.3	<i>Servicios fijos</i>	161
7.4	<i>Servicios de radiodifusión</i>	170
7.4.1	Antecedentes de la planificación de radiodifusión	170
7.4.2	Radiodifusión en AM	173
7.4.3	Radiodifusión FM en la banda VHF	179
7.4.4	Radiodifusión de televisión en bandas VHF/UHF	180
7.4.5	Introducción de la radiodifusión digital	182
7.5	<i>FS/FSS en bandas compartidas</i>	183

Capítulo 8. Coordinación internacional: factores desencadenantes y procedimientos	186
8.1 <i>Principios generales, el papel de los acuerdos internacionales</i>	186
8.2 <i>Servicios móviles terrestres</i>	191
8.2.1 <i>Radio móvil privada (VHF/UHF)</i>	191
8.2.2 <i>Los sistemas móviles (2G/3G)</i>	194
8.3 <i>Servicios fijos</i>	197
8.3.1 <i>Punto a punto</i>	197
8.3.2 <i>Punto a multipunto</i>	199
8.4 <i>FSS</i>	202
Capítulo 9. Evaluación de la compartición de banda	203
9.1 <i>Los modelos estadísticos de la interferencia potencial</i>	203
9.2 <i>Compartición entre los servicios civiles y no civiles</i>	209
Capítulo 10. Notificación a la UIT BR IFIC	212
10.1 <i>Servicios terrestres</i>	213
10.2 <i>Servicios espaciales</i>	216
Capítulo 11. Principios y medios para hacer asignaciones neutrales de tecnología para uso flexible del espectro radioeléctrico	218
11.1 <i>Principios generales</i>	218
11.2 <i>Asignaciones flexibles de tecnología en las bandas de servicio móvil terrestre</i>	224
11.3 <i>Asignaciones flexibles de tecnología en las bandas de servicio fijo</i>	229
11.4 <i>Bandas no licenciadas para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha</i>	233
Capítulo 12. Aspectos técnicos de la “reorganización” de las bandas de frecuencia	235
12.1 <i>Principios generales</i>	235
12.2 <i>Dividendo digital</i>	239
Términos y definiciones en inglés	244
Bibliografía para lectura adicional	247
Listado de fuentes de referencia UIT-R utilizados en este título	248
Referencias	253

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	Modos de propagación y usos de diversas bandas de frecuencia.....	22
TABLA 2	Guía para la aplicación de métodos de predicción para la propagación de ondas de radio UIT-R.....	31
TABLA 3	Intensidad del campo de referencia de la estación de radio AM a 1.6 km de la antena	42
TABLA 4	Valores representativos de la conductividad del suelo	43
TABLA 5	Factores de reducción de intensidad de campo MF para diferentes frecuencias	44
TABLA 6	Valores típicos de intensidad del campo requeridos para la recepción de radiodifusión de MF	44
TABLA 7	Elección de los sistemas de coordenadas para mapas digitales.....	47
TABLA 8	Categorías que se mostrarán en una base de datos macroscópica de cobertura terrestre	52
TABLA 9	Categorías adicionales y parámetros para base de datos de estructuras especiales.....	54
TABLA 10	Mapas digitales UIT-R de parámetros geofísicos.....	59
TABLA 11	Métodos para facilitar la compartición de bandas de frecuencia.....	92
TABLA 12	TV/Servicio de radiodifusión sonora FM: valores de intensidad del campo a ser protegidos	105
TABLA 13	Servicio móvil terrestre: valores de intensidad del campo a ser protegidos	106
TABLA 14	Relaciones de protección para el servicio móvil terrestre desde el servicio de radiodifusión sonora	107
TABLA 15	Glosario de referencias sobre compartición de bandas de frecuencia	112
TABLA 16	Importancia de las recomendaciones UIT-R para ciertos escenarios de compartición	118

TABLA 17	Glosario de referencias para los criterios de protección para varios servicios	122
TABLA 18	Glosario de las referencias sobre criterios de protección relevantes en diferentes bandas.....	127
TABLA 19	Niveles medidos de intensidad del campo de los equipos ICM en varias bandas.....	137
TABLA 20	Parámetros de los sistemas PMR considerados	156
TABLA 21	Resultados del rechazo fuera de canal para la interferencia entre dos sistemas PMR	159
TABLA 22	Distancia de separación requerida entre dos sistemas PMR	160
TABLA 23	Aislamiento requerido, L_1 (dB) como función del margen de desvanecimiento N (dB).....	160
TABLA 24	Arreglos de canal de radiofrecuencia para enlaces FS.....	163
TABLA 25	Coordinación de las distancias para la asignación de frecuencias para enlaces FS	167
TABLA 26	Ejemplos de los límites de PFD para sistemas PMP con implementación coordinada.....	201
TABLA 27	Partición de banda de 3400-3600 MHz en Colombia.....	230

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	Modo de propagación “guía de onda” de ondas de radio	14
FIGURA 2	Modo de propagación “onda de superficie” de las ondas de radio	15
FIGURA 3	Modo de propagación “onda celeste” de las ondas de radio	16
FIGURA 4	Modo de propagación “onda espacial” de las ondas de radio	17
FIGURA 5	Ilustración de la difracción de las ondas de radio	18
FIGURA 6	Ejemplo de propagación de ondas MF sobre terreno irregular	19
FIGURA 7	Dispersión troposférica de las ondas de radio	20
FIGURA 8	Comunicación punto a punto	21
FIGURA 9	Trayectoria terrestre irregular para la definición de la ecuación integral del modelo de propagación MF	41
FIGURA 10	Ejemplo de validación del perfil de trayectoria para enlaces de microonda punto a punto	55
FIGURA 11	Cálculo de áreas de recepción basadas en la información del terreno	56
FIGURA 12	Intensidad de campo en área urbana (nótese la mejor propagación a lo largo de “street canyons”)	56
FIGURA 13	Vista tridimensional de la cobertura de las estaciones de radio en región montañosa	57
FIGURA 14	Ejemplo de un mapa urbano en 3D de la base de datos, que se puede lograr con resolución de edificios de 1-5 m	57
FIGURA 15	Ruido radioeléctrico externo: frecuencias de 10 kHz a 100 MHz	60
FIGURA 16	Ruido de radio externo: frecuencias de 100 MHz a 100 GHz	60
FIGURA 17	Ilustración del concepto de espacio útil/denegado en un sistema de radio ...	64
FIGURA 18	Estructura generalizada del sistema automatizado de gestión del espectro ...	71
FIGURA 19	Ejemplo de la curva de separación frecuencia-distancia	76
FIGURA 20	Ilustración de la desensibilización (bloqueo)	77

FIGURA 21	Interferencia a través de los armónicos.....	80
FIGURA 22	Principio de la evaluación de distancia de separación mínima con enfoque MCL.....	85
FIGURA 23	Secuencia aleatoria de escenarios reales de funcionamiento con enfoque Monte Carlo.....	86
FIGURA 24	Ejemplo de la interfaz gráfica de usuario Seamcat.....	88
FIGURA 25	Ejemplo adicional de la interfaz gráfica de usuario Seamcat.....	89
FIGURA 26	Ejemplo simulación de interferencia CDMA en Seamcat.....	89
FIGURA 27	Ilustración de la trama del canal y el concepto de separación de frecuencia.....	94
FIGURA 28	Ilustración de la banda de guarda en el borde de una banda GSM.....	95
FIGURA 29	Ilustración de la separación espacial.....	98
FIGURA 30	Relación de protección para planeación de estaciones de radio FM.....	109
FIGURA 31	Ilustración del concepto de relación de protección.....	120
FIGURA 32	Ilustración del concepto del criterio I/N.....	121
FIGURA 33	Aislamiento de la antena en dirección horizontal, vertical e inclinación.....	143
FIGURA 34	Tres tipos de arreglos de canales de radiofrecuencia para FS.....	162
FIGURA 35	Casos de interferencia en enlaces terrestres FS.....	168
FIGURA 36	Red de transmisores de radiodifusión teóricamente previstos.....	172
FIGURA 37	Asignación de frecuencias y puesta en marcha de estaciones de radiodifusión.....	174
FIGURA 38	Ejemplo de asignación de canales de televisión en red teórica.....	181
FIGURA 39	Concepto de canales preferenciales para la coordinación de frecuencias.....	195
FIGURA 40	Ejemplo de partición de códigos para la coordinación de sistemas CDMA 3G.....	197
FIGURA 41	El concepto de área de coordinación de ojo de cerradura para enlaces del servicio fijo.....	198
FIGURA 42	Concepto de doble desencadenante PFD para la coordinación de los sistemas PMP.....	201

FIGURA 43 Diagrama de flujo para el proceso de evaluación de compartición del espectro.....	205
FIGURA 44 Escenario de interferencia móvil a móvil	207
FIGURA 45 Ejemplo de simulación de un escenario móvil a móvil	208
FIGURA 46 Estimación de C/I para el cumplimiento de los eventos generados estadísticamente.....	208
FIGURA 47 Dimensiones de flexibilidad en la gestión del espectro radioeléctrico	219
FIGURA 48 Mecanismos para la transferencia de los derechos de uso del espectro	224
FIGURA 49 Opciones de despliegue PLMS en 2500-2690 MHz	226
FIGURA 50 Ejemplo de partición fragmentada de banda GSM con diferentes tecnologías	227
FIGURA 51 Despliegue de redes GSM y UMTS en el “modelo sándwich”	228
FIGURA 52 Dos bloques de los operadores desplegados en un "modelo sándwich" combinado	228
FIGURA 53 Posibles topologías de red frente a las aplicaciones dentro de bandas del servicio fijo	231
FIGURA 54 Máscara de borde de bloque de las estaciones base para sistemas en bandas 3.5 GHz	232
FIGURA 55 Diferentes niveles y grados de la reorganización de bandas de frecuencias	237
FIGURA 56 Reorganización como parte de un ciclo total de gestión del espectro	238
FIGURA 57 Disposición de frecuencias europea para la banda de dividendo digital 790-862 MHz.....	243
FIGURA 58 Ejemplo de BS BEM para un operador FDD en la banda de dividendo digital.....	243

PARTE 1

FUNDAMENTOS



CAPÍTULO 1

AYUDAS DE INGENIERÍA DEL ESPECTRO

El material de este capítulo describe algunos conceptos fundamentales y ayudas esenciales para ser utilizados como parte de los ejercicios de ingeniería del espectro. Esto incluye el modelamiento de propagación de las ondas, las consideraciones de los datos del terreno, la evaluación del ruido térmico y ambiental, así como indicadores que pueden utilizarse como medio para evaluar la eficiencia del uso del espectro. Otra parte del capítulo se dedica a describir las unidades de medición y sus conversiones, y la última sección presenta los principios del sistema automatizado de gestión del espectro.

1.1 Modelamiento de propagación: seleccionando el modelo correcto

Todo tipo de interacción con las ondas de radio se produce sobre cierta distancia, sea que se trate del acto principal deseable de la comunicación por radio entre dos terminales separadas o de interferencias no deseadas de un radio transmisor a un receptor no deseado. Por lo tanto, la evaluación de la pérdida que sufre la señal de radio durante la transición entre el emisor (la fuente de ondas de radio) y el receptor (el final de la trayectoria de radio) es una de las primeras tareas fundamentales en cualquier evaluación de la ingeniería del espectro.

Esta pérdida se entiende en términos físicos como la reducción de la potencia (amplitud) de la señal de radio durante su viaje. Se le conoce como “pérdida en la trayectoria de la señal de radio” y para su evaluación se han desarrollado varios modelos.

Los ejemplos más típicos de los modelos de pérdidas por trayectoria son:

- La evaluación del rango confiable de cobertura de un sistema de radio.
- La evaluación del impacto de la señal interferente procedente de cierta distancia.¹

1.1.1 Modos de propagación de ondas de radio

Antes de considerar los distintos tipos de modelos de pérdida en la trayectoria, resulta útil describir las diferentes bandas de frecuencia, con algunas características únicas que las hacen adecuadas para el uso en ciertos servicios de radiocomunicaciones. Estas bandas de frecuencia se definen por las características físicas de las ondas de radio (sobre todo la longitud de onda), que determinan el comportamiento de las ondas de radio en el espacio libre (éter), como, por ejemplo, la manera en que se propagan y qué tanto. La primera de estas características se describe como el modo de propagación [1]. El factor principal que determina el tipo de propagación de las ondas de radio es la relación entre la longitud de onda y la configuración de la superficie de la Tierra y la ionosfera (la capa superior de la atmósfera de la Tierra que es ionizada por la radiación solar formando una capa reflectante que encierra todo el planeta).

Una explicación detallada de los diferentes modos de propagación se presenta a continuación:

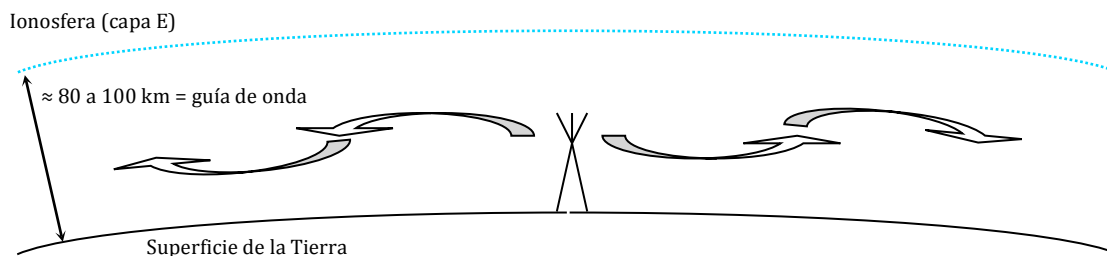
1.1.1.1 GUÍA DE ONDA

Este modo de propagación es específico para las bandas de frecuencia muy bajas (3-30 kHz), ya que su longitud de onda extrema (hasta 100 km) es proporcional a la altura de la capa de la ionosfera sobre la superficie de la Tierra. Por lo tanto, estas ondas se encuentran “atrapadas” entre la superficie de la Tierra y la capa E de la ionosfera, y se propagan como si estuvieran confinadas dentro de una guía de onda. Esto se ilustra en la Figura 1.

¹ En este capítulo solo se discuten los temas relacionados con la propagación de las ondas de radio. En el Capítulo 2 se proporciona un análisis detallado de los temas relacionados con la interferencia.

FIGURA 1

Modo de propagación “guía de onda” de ondas de radio



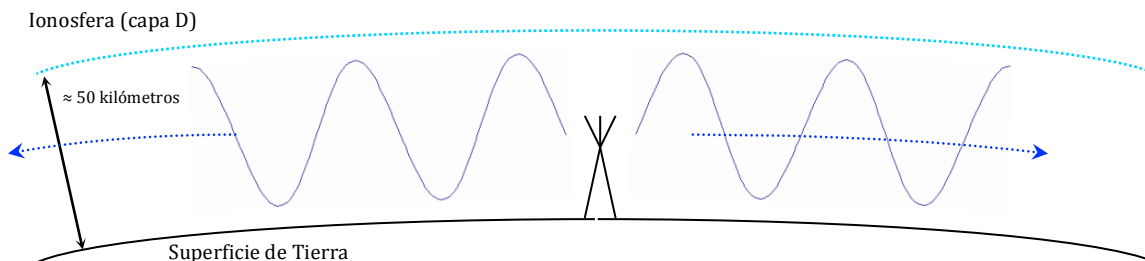
Dada esta “propagación confinada”, estas ondas de muy baja frecuencia pueden propagarse muy lejos, hasta varios miles de kilómetros. Así mismo, la capa E de la ionosfera ayuda a la propagación por el hecho de que está presente durante todo el día y la noche. Sin embargo, el rango de frecuencia de 3-30 kHz es muy estrecho y, por lo tanto, su capacidad de información es muy baja. Por otro lado, la emisión de ondas de radio en este rango requiere antenas de gran tamaño y en consecuencia el uso de este rango de frecuencia se limita, por lo general, a aplicaciones como la comunicación con flotas de submarinos o a la investigación geofísica. De otro lado, estas frecuencias podrían ser utilizadas para comunicaciones de muy corto alcance, por ejemplo, monitores inalámbricos de ritmo cardíaco, gracias a sus características de fácil escape de los tejidos humanos. Sin embargo, en este último caso, las ondas no tienen la suficiente potencia ni la escala para entrar en el modo global de propagación en guías de ondas.

1.1.1.2 ONDA DE SUPERFICIE

Este modo de propagación es característico del rango de frecuencias de 30 kHz - 3 MHz y es similar al modo en guías de ondas. En este caso, las ondas de radio también se desplazan a lo largo de la superficie de la Tierra, siguiendo de cerca su curvatura. Sin embargo, en este escenario, debido a una longitud de onda menor en este rango de frecuencia (siendo la menor longitud de 10 a 0.1 km), la capa D de la ionosfera se vuelve dominante y la propagación no sucede por el hecho de “guiar” las ondas, sino, sobre todo, a través de las reflexiones de la capa D y la superficie semiconductora de la Tierra, ver Figura 2.

FIGURA 2

*Modo de propagación “onda de superficie”
de las ondas de radio*



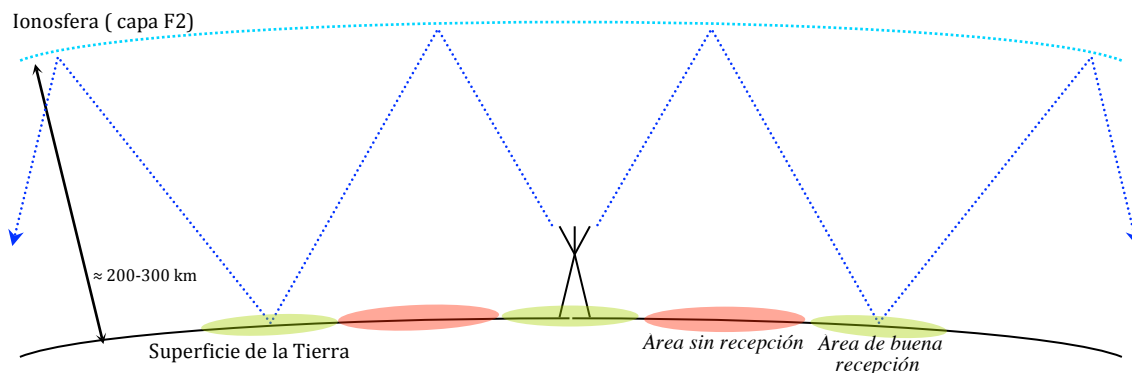
Este modo de propagación es ampliamente utilizado, incluyendo aplicaciones comerciales de ancho de banda angosta, tales como radiodifusión de onda larga y media. El rango de propagación puede ser de hasta 1000 km o más. Sin embargo, la composición y la altura la capa D fluctúan dependiendo de la hora del día, lo que afecta el rango de las comunicaciones. Para mejorar la reflectividad de la superficie de la Tierra, por lo general se utiliza la polarización vertical para las ondas de radio transmitidas y así aliviar el efecto de “corto circuito” del componente de campo eléctrico.

1.1.1.3 ONDAS CELESTE

Este modo de propagación es típico para el rango de frecuencia de 3 a 30 MHz, aunque las frecuencias más bajas pueden ser también sujetas a la propagación de ondas celestes, en determinadas condiciones (por ejemplo, en la noche, cuando la capa D de la ionosfera se degrada y las bandas de frecuencia más bajas, normalmente encerradas por la capa D en la propagación de ondas de superficie, son liberadas hacia el cielo). En el caso de la propagación de la onda, la capa más alta de la ionosfera F2 (200-300 kilómetros sobre la superficie terrestre) se convierte en el reflector dominante de las ondas de radio y estas rebotan hacia la Tierra (ver Figura 3).

Dado que en este caso las ondas de radio tienen que viajar muy alto hasta llegar al punto de reflexión, su reflexión llega a la superficie de la Tierra a gran distancia del punto de partida. Por lo tanto, a pesar de que la propagación de ondas celestes permite una comunicación efectiva alrededor de la Tierra debido a múltiples saltos de reflexión, su utilidad es limitada en gran medida debido al patrón alternante de las áreas de buena recepción (donde llega la reflexión) y las zonas sin recepción (ver Figura 3).

FIGURA 3

Modo de propagación “onda celeste” de las ondas de radio

Este patrón reflectivo cambia también durante varios momentos del día, a medida que la ionización de la ionosfera cambia de acuerdo con los ciclos solares. Por lo tanto, el uso práctico profesional de las comunicaciones de onda corta usualmente se basa en el uso de varias bandas de frecuencia para el mismo enlace, dependiendo de la hora del día y la temporada del año.

El uso más conocido de este modo de propagación es para la radiodifusión en alta frecuencia HF, también conocida como de onda corta, en la banda de 3-30 MHz (para más detalles ver la sección 7.4.2).

En virtud de la propagación de las ondas celestes, la radiodifusión en esta banda de frecuencia puede llegar fácilmente a nivel regional e incluso global, por lo que su planificación se rige por disposiciones especiales a nivel de la UIT, en particular el procedimiento establecido en el Artículo 12 del Reglamento de Radiocomunicaciones. Se prevén dos temporadas de radiodifusión en ondas decamétricas: Temporada A (marzo-octubre) y Temporada B (octubre-marzo). Con el fin de hacer más eficiente la coordinación, las administraciones y los organismos de radiodifusión a menudo se reúnen en grupos especiales de coordinación a nivel regional y mundial, como la Conferencia de Coordinación de Altas Frecuencias HFCC [129].

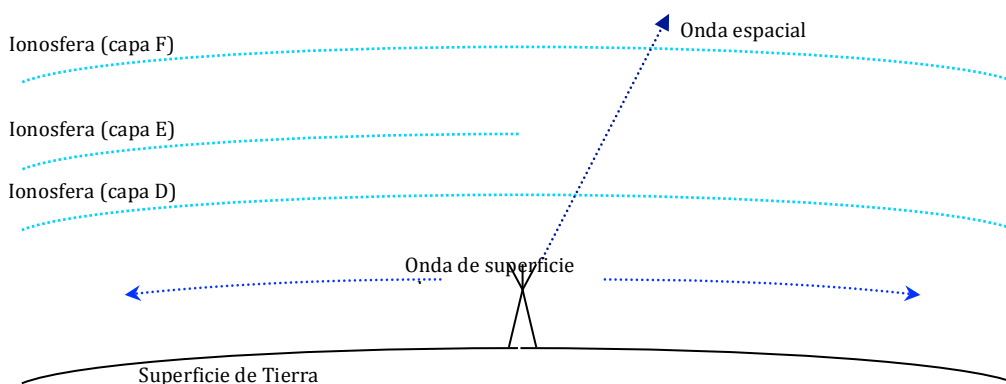
Sin embargo, esta banda de onda corta se utiliza usualmente para comunicaciones punto a punto de largo alcance (usuarios civiles y militares, los enlaces gubernamentales con las misiones diplomáticas en todo el mundo), gracias a la escala mundial que ofrece el modo de propagación de ondas celestes.

1.1.1.4 ONDA ESPACIAL

Cuando la frecuencia de la señal de radio es superior a 30 MHz (longitud de onda de menos de 10 m), las ondas de radio tienden a viajar por línea directa y pueden penetrar en la atmósfera y capas de la ionosfera sin mucha resistencia, lo que hace que escapen hacia el espacio, entrando en el modo de propagación de ondas espaciales (ver la Figura 4).

FIGURA 4

Modo de propagación “onda espacial” de las ondas de radio



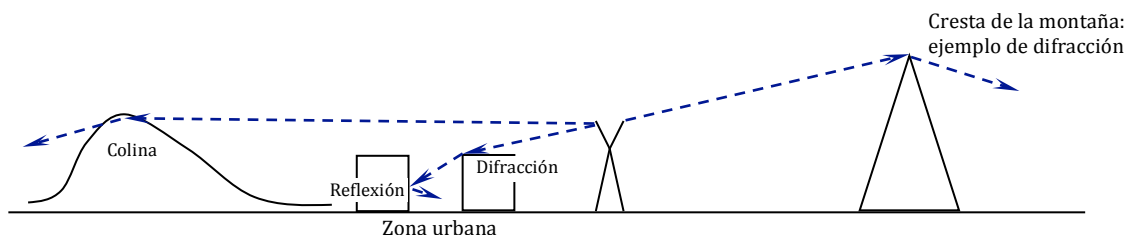
Esto significa que la propagación de las ondas espaciales podría ser utilizada para la comunicación con diferentes naves espaciales. Las reflexiones de los objetos espaciales son muy bajas, por lo tanto, el uso de reflexiones de ondas espaciales se limita a algunas aplicaciones científicas especiales que utilizan antenas muy grandes para lograr una gran directividad y ganancia.

1.1.1.5 DIFRACCIÓN

Este modo de propagación ocurre debido al efecto de las ondas de radio que se curvan alrededor de los bordes de los obstáculos en su trayectoria, lo que se conoce en ocasiones como difracción por filo de navaja, ver la Figura 5. Este efecto complementario es muy útil, ya que permite la comunicación en ausencia de línea de vista. Sin embargo, este efecto no está universalmente presente, sino que depende del ángulo de la curva requerida, el tamaño del obstáculo y su relación con la longitud de onda. Un principio general es que cuanto más baja es la frecuencia de las ondas de radio (es decir, cuanto mayor sea su longitud de onda),

FIGURA 5

Ilustración de la difracción de las ondas de radio



más grandes pueden ser los obstáculos alrededor de los cuales las ondas pueden curvarse, como, por ejemplo, grandes colinas rodeadas por las ondas de las HF más altas (como los radios de banda ciudadana de 27 MHz), o menores rangos de frecuencia VHF. Sin embargo, incluso a altas frecuencias en el rango UHF (300 MHz - 3 GHz), la difracción está presente en ángulos moderados y es, por ejemplo, muy útil para garantizar una mejor cobertura de los sistemas celulares en las zonas urbanas, donde las señales UHF se curvan alrededor de los edificios para lograr la cobertura en las calles. (Nótese, sin embargo, que aunque en estos casos los ángulos de curvatura pueden no ser altos, la cobertura continúa gracias a las reflexiones de los edificios que se encuentran más adelante, como se muestra en la Figura 5.)

Para obtener una visión más profunda de los efectos de difracción y aprender a evaluar su impacto numéricamente, favor referirse a la Recomendación UIT-R P.526 [2].

1.1.1.6 RADIODIFUSIÓN EN FRECUENCIA MEDIA (MF)

Este caso es muy importante para Colombia, ya que mucha de la cobertura de radiodifusión en zonas remotas se basa únicamente en las transmisiones de radio AM en frecuencia media (MF, por sus siglas en inglés). La banda de MF se extiende entre 0.3 a 3 MHz con porciones de radiodifusión (conocido públicamente como radiodifusión de onda media) que se encuentran aproximadamente en el centro de este rango, entre 525 - 1705 kHz [116].

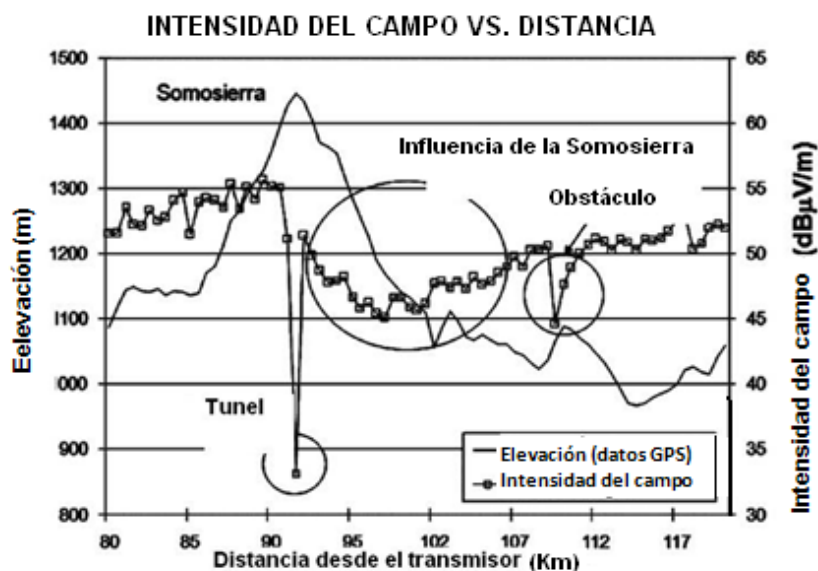
El rasgo característico de esta banda es que se encuentra en el punto donde las ondas de radio alternan entre la propagación de onda de superficie y la propagación de ondas en el cielo, por lo que, como resultado, las ondas MF pueden viajar en ambos sentidos. Durante el día, la propagación de la onda de superficie es dominante, mientras que en la noche las ondas en el cielo se convierten en dominantes, permitiendo la recepción de estaciones lejanas. Dado que la recepción durante el día es más importante para los propósitos prácticos de la radiodifusión (es decir, cuando la mayoría de la gente está activa y escucha la radio),

el tema de este apartado es analizar las circunstancias que rodean la propagación de onda de superficie en MF.

Las ondas de superficie MF se propagan a través de la curvatura de la Tierra, con un rango que, en gran medida, es determinado por los parámetros de conductividad de la Tierra. Sin embargo, dado que la longitud de onda en la banda de radiodifusión MF (175-570 m) es comparable en escala con las dimensiones de las irregularidades del terreno natural (colinas, montañas), el terreno irregular (como es el caso en las montañas en Colombia) podría tener un impacto significativo en la propagación de la onda de superficie MF. Un ejemplo de la vida real de mediciones del impacto de la cresta de la montaña en la propagación de la onda de superficie MF se presenta en la Figura 6, tomada de las mediciones que se realizaron a lo largo de la cordillera de Somosierra en España [104].

FIGURA 6

Ejemplo de propagación de ondas MF sobre terreno irregular



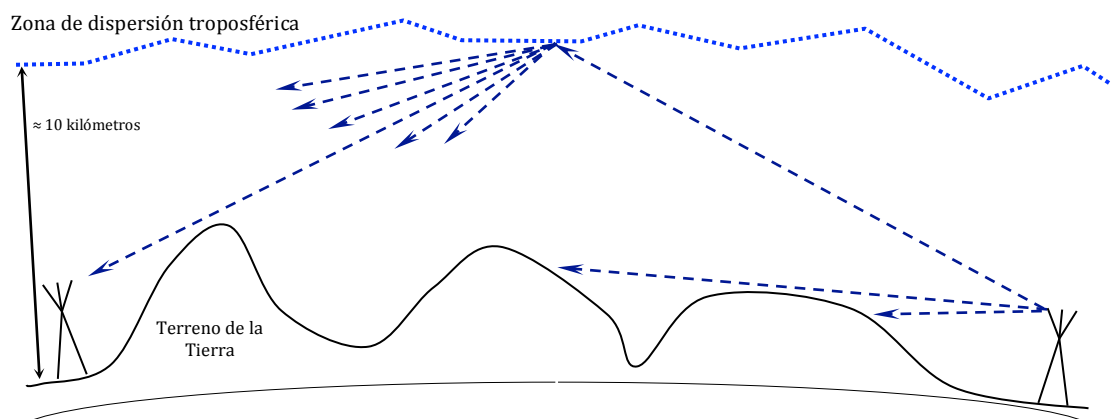
Al inspeccionar de cerca esta figura se pueden ver los complejos cambios en la intensidad del campo de las ondas de radio MF en los alrededores de la sierra: se puede ver el incremento en el lado de cara al transmisor, luego cae en unos 10 dB sobre la sierra y luego se incrementa nuevamente con la distancia. El tema de modelamiento de propagación de ondas de radio MF en terreno irregular se revisará al final de esta sección, donde se considerarán los diferentes modelos de propagación.

1.1.1.7 DISPERSIÓN TROPOSFÉRICA

Como se mencionó anteriormente, las ondas de radio de frecuencias superiores a 30 MHz normalmente viajan a través de las capas ionizadas reflejadas de la atmósfera (la ionosfera). La capa más baja de la atmósfera, la troposfera, es la capa que está inmediatamente adyacente a la superficie de la Tierra (0 a 20 km por encima del suelo) y donde se presenta el clima. Uno de los efectos secundarios es que alrededor de 10 km de altura sobre la superficie de la Tierra, las turbulencias estocásticas por la presión del aire crean zonas de irregularidad similares a las nubes (es decir, que reflejan a lo ancho en varias direcciones), donde se propagan las ondas de radio en los rangos de frecuencia VHF y UHF (30 MHz a 3 GHz). Esto permite la recepción de ondas de radio VHF/UHF mucho más allá de la distancia del horizonte de radio (ver la Figura 7).

FIGURA 7

Dispersión troposférica de las ondas de radio



Dada esta capacidad de superar las limitaciones impuestas por las irregularidades del terreno y el horizonte de radio, y dado que estos rangos de frecuencia VHF/UHF ya proporcionan suficiente ancho de banda para aplicaciones de ancho de banda medio, la dispersión troposférica fue considerada alguna vez como un importante medio para comunicaciones de largo alcance “Backhaul” (hasta 1000 km), tales como radio enlaces a lo largo del horizonte, asistidos por relevador radioeléctrico. Sin embargo, la señal reflejada por dispersión troposférica es muy débil y su recepción confiable requiere de un equipo muy sofisticado, con antenas direccionales, así como muy alta potencia del transmisor. Al mismo tiempo, los grandes avances en las comunicaciones por satélite mejoraron mucho el razonamiento comercial para obtener rangos de comunicación subglobales. Por lo tanto, el nicho de aplicación de la dispersión troposférica en las comunicaciones continúa reduciéndose.

Por otro lado, los efectos de la dispersión troposférica podrían significar que a veces las señales procedentes de estaciones lejanas VHF/UHF exceden los niveles de ruido ambiental experimentados en una estación local transmisora en particular. Esto significa que puede ser necesario tener en cuenta la dispersión troposférica al evaluar el potencial de interferencia.

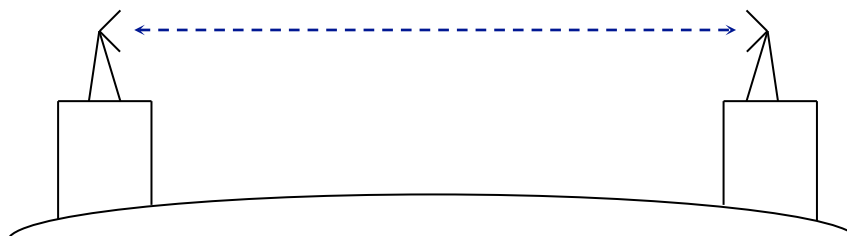
Para obtener una visión más profunda de los efectos de difracción y aprender a evaluar su impacto numéricamente, favor referirse a la Recomendación UIT-R P.617 [3].

1.1.1.8 LÍNEA DE VISTA (PUNTO A PUNTO O TIERRA A SATÉLITE)

Las ondas de radio que empiezan en frecuencias en el rango UHF (300 MHz a 3 GHz) y siendo más profundas en bandas de frecuencia más altas, son mucho más susceptibles a los efectos de grandes y pequeños obstáculos. Esto se debe a que la longitud de onda se reduce en el orden de un centímetro y menos, donde incluso simples obstáculos como las hojas de los árboles pueden obstruir o interrumpir por completo las comunicaciones. Por lo tanto, las frecuencias de alrededor de 3 GHz (longitud de onda inferior a 10 cm) generalmente se consideran adecuadas, sobre todo, para las comunicaciones con línea de vista, ya que las ondas de radio se propagan entre dos puntos, sin obstrucciones en la trayectoria (ver la Figura 8).

FIGURA 8

Comunicación punto a punto



Para lograr trayectorias sin obstáculos, por lo general ambas terminales son montadas por encima del nivel del suelo y por encima de cualquier obstáculo circundante (montañas, edificios, árboles, etc.). Como en este caso no tiene sentido la irradiación de la señal en direcciones distintas al receptor correspondiente, la comunicación a menudo implica antenas muy direccionales en ambos lados, lo que es altamente efectivo para el enlace, y, como efecto secundario positivo, reduce en gran medida la contaminación del espectro, permi-

tiendo, por ejemplo, reutilizar el mismo canal de frecuencia en el mismo lugar, siempre y cuando las respectivas antenas direccionales no estén una frente a la otra.

El mismo principio de enlace punto a punto se aplica a la comunicación con los satélites (Tierra a espacio), salvo que la parte correspondiente del enlace se sitúe en un punto alto en el espacio. Para la comunicación con satélites en órbita geoestacionaria, ambas antenas, en la Tierra y en el satélite, son fijas. Para la comunicación con satélites en órbita no geoestacionaria, las estaciones en la Tierra a menudo tienen que recurrir al seguimiento de la posición del satélite en el cielo, con el fin de mantener un enlace de comunicación punto a punto confiable.

Dadas las obstrucciones para las condiciones de propagación con línea de vista, las ondas de radio se propagan cerca de su límite teórico, el cual es descrito por el modelo de propagación de pérdida en espacio libre. Sin embargo, hay otros efectos atmosféricos a considerar, tales como el impacto de la lluvia y similares. Para el tratamiento detallado de los modelos de propagación de ondas de radio en enlaces punto a punto, favor referirse a la Recomendación UIT-R P.530 [4].

1.1.2 Características específicas de diferentes bandas de frecuencia

El resumen de las diferentes bandas de radiofrecuencia, junto con sus características de propagación, se presentan a continuación en la Tabla 1, como se adaptó de [1].

TABLA 1

Modos de propagación y usos de diversas bandas de frecuencia

Banda	Frecuencia	Modo	Rango	Ancho de banda	Volumen de interferencia	Uso
VLF	3-30 kHz	Guía de onda	Varios 1000 km	Muy limitada	Extendido	Mundial, comunicaciones de radionavegación de largo alcance y estratégicas
LF	30-300 kHz	Onda de superficie, onda celeste	Varios 1000 km	Limitada	Extendido	Comunicaciones de radionavegación de largo alcance y estratégicas

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Banda	Frecuencia	Modo	Rango	Ancho de banda	Volumen de interferencia	Uso
MF	0.3-3 MHz	Onda de superficie, de cielo, aérea	Unos pocos 1000 km	Moderada	Extendido	De alcance medio punto a punto, radiodifusión y móvil marítimo
HF	3-30 MHz	Onda celeste	Hasta varios 1000 km	Ancho	Extendido	Corto y largo alcance punto a punto, radiodifusión global, móvil
VHF	30-300 MHz	Ondas espaciales, dispersión troposférica, difracción	Hasta algunos 100 kilómetros	Muy ancho	Confinado	Punto a punto de corto medio y largo alcance, móvil, LAN, radiodifusión de audio y video, comunicaciones personales
UHF	0.3-3 GHz	Ondas espaciales, dispersión troposférica, difracción, línea de vista	Por lo general, menos de 100 km	Muy ancho	Confinado	Punto a punto de corto, mediano y largo alcance, móvil, LAN, radiodifusión de audio y vídeo, comunicación personal, comunicaciones por satélite
SHF	3-30 GHz	Línea de vista	30 km varios 1000 km por multi-salto y satélite	Muy ancho de hasta 1 GHz	Generalmente confinado	Punto a punto de medio a corto alcance, radiodifusión de audio y video, LAN, comunicación personal, móvil, comunicaciones por satélite
EHF	30-300 GHz	Línea de vista	20 km varios 1000 km por multi-salto y satélite	Muy ancho hasta 10 GHz	Generalmente confinado	De corto alcance punto a punto, micro celular, LAN y comunicaciones personales, comunicaciones por satélite

Como regla general, la fuerza de la señal de radio recibida después de la propagación a través de la trayectoria de radio, siempre dependerá de las características ambientales de ese camino en particular, por ejemplo, las características del terreno, la presencia de obstáculos (edificios, la vegetación), si hay línea de vista entre el transmisor y las antenas receptoras. En muchos casos (dependiendo de la banda de frecuencia), la pérdida en la trayectoria de propagación también depende de las características y la variabilidad de la atmósfera. La capa superior de la atmósfera (ionosfera) tendrá un gran impacto en la comunicación de largo alcance en las bandas de frecuencia más bajas, mientras que la capa más baja de la atmósfera (la troposfera, el aire que nos rodea) tendrá un impacto en la propagación a través de la variabilidad de parámetros, como el porcentaje de vapores (niebla), la presencia de precipitación (lluvia, nieve), etc. En algunos casos, también el tiempo del día y época del año tienen un impacto, dados los patrones diarios y estacionales de algunas variaciones atmosféricas.

Dada la gran variedad de todos los factores involucrados, no hay un modelo de propagación universal que pudiera ser desarrollado para abordar todas las situaciones y los factores en una fórmula. Por lo tanto, los modelos de propagación que son ampliamente utilizados hoy en día son de carácter especializado, es decir, se han desarrollado para un determinado tipo de uso (por ejemplo, el rango de frecuencia de operación, tipo de sistemas de radiocomunicaciones y el modo de aplicación particular). Entonces, es importante entender los diferentes modelos y diferencias, y usarlos adecuadamente para las tareas.

El siguiente texto resume las principales características y enfoques de modelos de propagación que pertenecen a diferentes bandas de frecuencia [1]:

VLF ($f < 30$ kHz)

En frecuencias inferiores a 30 kHz, las pérdidas de propagación se aproximan a las pérdidas de propagación en espacio libre. En VLF, un modo de guía de onda entre la ionosfera y la Tierra permite la propagación a través de distancias globales.

LF ($30 < f < 300$ kHz)

En este rango de frecuencia, dos modos de propagación distintos son importantes: el modo de onda de superficie, que a menudo determinará el límite de la señal deseada, y el modo por onda ionosférica, que a menudo propagan las señales no deseadas. La amplitud de la señal de onda celeste tiene una pronunciada variación diurna debido a los cambios en la absorción de la ionosfera. Este modo de propagación se caracteriza por regiones donde la onda celeste no llega a la Tierra (es decir, la omite) y la distancia a cada intercepción con el suelo es la distancia omitida.

La propagación de la onda celeste en estas frecuencias se trata en la Recomendación UIT-R P.1147 [5] y las curvas de propagación para el modo de onda de superficie se incluyen en la Recomendación UIT-R P.368 [6].

MF (300 kHz $<f < 3$ MHz)

En esta banda de frecuencia, los modos de propagación son también ondas de superficie y ondas celestes, por lo que muchos textos cubren las bandas LF y MF [5, 6].

La propagación de la onda de superficie para frecuencias entre 10 kHz y 30 MHz se considera en la Recomendación UIT-R P.368 [6], y hay un programa de computador llamado GRWAVE, disponible en la web de la UIT-R. Al evaluar la onda de superficie es necesario conocer las propiedades eléctricas de la Tierra, especialmente la conductividad. Los mapas están en la Recomendación UIT-R P.832 [7]. Sin embargo, estos mapas están destinados principalmente para uso en VLF y actualmente no están disponibles en forma numérica para aplicaciones informáticas.

La propagación de la onda celeste para frecuencias de 150 kHz a 1.7 MHz es discutida, junto con la presentación de un método de predicción, en la Recomendación UIT-R P.1147 [5]. En la banda de radiodifusión MF a menudo es suficiente con suponer que la propagación de la onda celeste solo se produce por la noche. En frecuencias superiores a 1.6 MHz, los métodos de predicción de la propagación HF, que se describen a continuación, comienzan a ser válidos. También por encima de 1.6 MHz, la onda celeste es cada vez más importante para los sistemas de comunicación móvil.

HF (3 $<f < 30$ MHz)

Dentro de este rango de frecuencias, la propagación de la señal se da generalmente a través de la ionosfera y, en consecuencia, muestra una considerable variabilidad. La naturaleza de la propagación ionosférica implica que los circuitos de largo alcance estarán sujetos a múltiples distorsiones, interferencias de señales y operación intermitente. Las largas distancias y los procesos físicos involucrados en la ionosfera necesitan del uso de modelos de predicción de propagación relativamente complejos.

Mapas numéricos de las características de la ionosfera (recomendaciones UIT-R P.1239 [8] y la UIT-R P.1240 [9]) se emplean en modelos computarizados utilizados para predecir la propagación de HF. La Recomendación UIT-R P.533 [10] se puede utilizar para predecir, para cualquier trayectoria, temporada y número de manchas solares, la frecuencia máxima utilizable (MUF, por sus siglas en inglés) básica y operacional, la intensidad del campo, potencia recibida, relación señal-ruido y la confiabilidad.

VHF y UHF (30 MHz $<f < 3$ GHz)

En estas bandas, la propagación a través de la ionosfera generalmente no ocurre, excepto en las frecuencias más bajas en este rango. Los efectos del clima se limitan a la súper-refracción y conductos que pueden ser causados por las variaciones del gradiente normal en el índice de refracción del aire. Otras partidas importantes de propagación en espacio libre son la dispersión troposférica y la difracción causada por los obstáculos que intervienen, incluyendo la curvatura de la Tierra y la difracción por terrenos y edificios.

Dependiendo del entorno de propagación en particular, las pérdidas de propagación se pueden estimar de la siguiente manera:

- **Atenuación en espacio libre.** En algunas circunstancias será suficiente suponer que la señal deseada solo está sujeta a la atenuación debido a la propagación en espacio libre (Recomendación UIT-R P.525 [11]).
- **Difracción en torno a una Tierra plana.** Para las predicciones de la señal deseada en rangos mayores que la distancia de la línea de vista, puede ser deseable tener en cuenta la curvatura de la Tierra. El programa de computador GRWAVE trata este caso y la Recomendación UIT-R P.526 [2] trata sobre la propagación por difracción.
- **Propagación en regiones específicas del mundo o sobre suelo de rugosidad específica.** La Recomendación UIT-R P.1546 [12] ofrece una estimación de los diferentes servicios de radio, bandas de frecuencia, regiones del mundo y alturas de antena que pueden ser aplicables para una situación particular.
- **Propagación a lo largo de un perfil de terreno determinado.** De ser necesario, se puede hacer un cálculo detallado para la propagación de un perfil del terreno obtenido a partir de una base de datos topográficos. Los algoritmos informáticos se basan en los métodos descritos en la Recomendación UIT-R P.526 [2].
- **Propagación en zonas urbanas.** Este caso es a menudo cubierto por los modelos desarrollados empíricamente, de los cuales uno de los más conocidos es el modelo de Okumura-Hata. Este modelo es cubierto por la Recomendación UIT-R P.1546 [12], que utiliza la fórmula de Okumura-Hata para calcular la atenuación en función de la distancia y la altura equivalente de la antena transmisora. Esta atenuación se corrige en función del porcentaje de edificios en todo el lugar de recepción y tipo de trayectoria (tierra, mar o mixto).

Algunos ejemplos de otros modelos empíricos y aplicaciones diseñadas a la medida son:

- COST231 Modelo Walfish-Ikegami, desarrollado para enfocarse en áreas urbanas y, por lo tanto, especialmente útil para la predicción de la propagación de los servicios móviles terrestres en las ciudades con edificios altos y de los efectos de propagación de las ondas por el espacio profundo, estrecho similar

a un valle, sobre las calles de una ciudad semejante a la forma natural de la Tierra, conocido como “street canyon” [39-41].

- Modelo Erceg, desarrollado a partir de datos experimentales recogidos de las mediciones en muchas macro-células en Estados Unidos, está específicamente dirigido a los ambientes de tipo suburbano [42]. El modelo Erceg es relativamente fácil de aplicar, tiene parámetros para tres tipos de ambientes y es válido para distancias de hasta 8 km.
- Modelo SUI (siglas de “Stanford University Interim”), [43], utilizado a menudo para los sistemas de comunicación de banda ancha móvil, como el acceso inalámbrico fijo, ya que proporciona información sobre la dispersión de tiempo de la señal recibida, es decir, el efecto de trayectoria múltiple, que es muy importante para los canales de comunicaciones de banda ancha. Este modelo recibió un amplio respaldo por su incorporación en el desarrollo de la familia de estándares 802.16 para WiMAX.

Además, también puede ser necesario dar cuenta de los mecanismos de propagación que puedan dar lugar a interferencias. Estos mecanismos incluyen:

- *Propagación ionosférica*. Durante ciertas épocas del año y horas del día, los modos de propagación ionosférica, como el que sucede a través de la capa E esporádica, pueden permitir la propagación a larga distancia en frecuencias de hasta 70 MHz (ver la Recomendación UIT-R P.534 [13]).
- *Súper refracción y conductos*. Estos efectos se tratan en las recomendaciones UIT-R P.834 [14] y la ITU-R P.452 [15].

SHF y frecuencias más altas ($f > 3$ GHz)

Los factores de propagación descritos anteriormente (a excepción de la propagación de onda celeste) son apropiados en frecuencias aún más altas. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la atenuación, la dispersión y la polarización cruzada producida por la precipitación y otras partículas de la atmósfera. Por encima de 15 GHz es cada vez más necesario tener en cuenta la atenuación de la señal por los gases atmosféricos.

La lluvia y otras precipitaciones se producen a lo largo de una trayectoria de propagación que puede crear varios problemas. En frecuencias superiores a los 10 GHz, la atenuación por las gotas de lluvia puede resultar en la alteración grave a la calidad de la señal. Los métodos para estimar la distribución de probabilidad para la atenuación se basan generalmente en el valor de la intensidad de la lluvia $R = 0.01$ mm/h, que se excede el 0.01% del tiempo.

Este valor debe basarse en observaciones de la precipitación a largo plazo hechas con pluviómetros con una resolución de tiempo de aproximadamente 1 min. Si tales datos a largo plazo no están disponibles para la región de interés, el valor puede ser estimado a partir del

modelo presentado en los mapas en la Recomendación UIT-R P.837 [16]. Para la frecuencia y polarización de interés, la atenuación “específica” se puede calcular de acuerdo con la Recomendación UIT-R P.838 [17]. La Recomendación UIT-R P.530 [4] proporciona un método para estimar el nivel de atenuación para otros porcentajes de tiempo en una trayectoria en línea de vista.

La propagación terrestre puede, en condiciones de cielo despejado, experimentar desvanecimiento debido a la difracción, por trayectoria múltiple atmosférica y en superficie, y por efectos de refracción (dispersión del haz, desenfoco de la antena), y atenuación debido a los gases atmosféricos y en algunas regiones, tormentas de arena y polvo. La Recomendación UIT-R P.530 [4] proporciona información sobre cómo tratar estos efectos. Los datos de refracción se dan en la Recomendación UIT-R P.453 [18]. Cuando no se dispone de información local, la Recomendación UIT-R P.836 [19] proporciona orientación sobre la media de las densidades de vapor de agua en la atmósfera y sus variaciones estacionales, cerca de la superficie de la Tierra, que se refieren a sistemas que operan por encima de 20 GHz.

Propagación Tierra a espacio

En las trayectorias Tierra a espacio, los efectos de propagación de mayor preocupación son la atenuación de la señal, el desvanecimiento de la oscilación y despolarización de la señal, donde la importancia de cada efecto depende de la geometría de la trayectoria, el clima y los parámetros del sistema de comunicaciones. La información complementaria se encuentra en la Recomendación UIT-R P.679 [20] (servicios de radiodifusión por satélite); la Recomendación UIT-R P.680 [21] (móvil marítimo por satélite); la Recomendación UIT-R P.681 [22] (móvil terrestre por satélite) y la Recomendación UIT-R P.682 [23] (móvil aeronáutico por satélite).

Al considerar las señales no deseadas, se debe prestar atención a la polarización cruzada, debido a los hidrometeoros (Recomendación UIT-R P.618 [24]), la rotación de la polarización en la ionosfera y los efectos de oscilación ionosférica (Recomendación UIT-R P.531 [25]). Como los ángulos de elevación de la trayectoria se vuelven pequeños, las pérdidas de trayectoria superarán el valor de espacio libre y, por supuesto, la posibilidad de bloqueo por el aumento de obstrucciones.

La Recomendación UIT-R P.618 [24] proporciona la fuente principal de datos de propagación y el asesoramiento de ingeniería sobre los efectos de la troposfera en la señal deseada para el diseño de enlaces Tierra a espacio. La Recomendación UIT-R P.618 [24] contiene los métodos para estimar la pérdida de señal por absorción de gases y atenuación por lluvia. Las técnicas para desarrollar escalas de frecuencia y polarización de estadísticas de atenuación se proporcionan en la Recomendación UIT-R P.618 [24], y la estimación estadística de los peores meses se prescriben en las recomendaciones UIT-R P.581 [26] y P.841 [27].

Los aumentos en la temperatura del ruido celeste que acompañan cualquier pérdida de trayectoria, también causan degradación en el receptor de la figura de mérito para una estación terrestre, que puede estimarse a partir de una expresión en la Recomendación UIT-R P.618 [24]. La diversidad del sitio puede reducir significativamente el nivel de atenuación correspondiente a un porcentaje de tiempo anual en trayectorias sujetas a atenuación grave, y también reducir los efectos de oscilación y despolarización. Los procedimientos de cálculo para estimar el rendimiento de la diversidad se encuentran en la Recomendación UIT-R P.618 [24].

La oscilación de la señal es la fluctuación rápida en la amplitud de la señal causada por las variaciones del índice de refracción troposférica. La Recomendación UIT-R P.618 [24] contiene un método de predicción para estimar la profundidad de desaparición de la oscilación, para porcentajes de tiempo de entre 0.01 y 50% del año.

Los dispersores asimétricos (gotas de lluvia, cristales de hielo) en una trayectoria de propagación generan despolarización de la señal, en sistemas de comunicaciones de polarización dual y reutilización de frecuencias. La Recomendación UIT-R P.618 [24] proporciona un método para estimar la discriminación por polarización cruzada (XPD, por sus siglas en inglés) para las frecuencias de 8 a 35 GHz (y escala de frecuencias de 4/6 GHz) y ángulos de elevación de trayectoria de 60° y menos. Una corrección empírica para la despolarización por hielo también se prescribe como XPD estimada para el factor de lluvia.

1.1.3 Resumen de los modelos de pérdida en la trayectoria

También es importante tener en cuenta que, aparte de la banda de frecuencias y los servicios de radiocomunicaciones relacionados, la elección del modelo de propagación generalmente hará una distinción entre los tipos de precisión que ofrecen. La mayoría de las veces esto está relacionado con la cuestión de si el modelo de propagación hace uso de la base de datos de terreno o no. En consecuencia, se distinguen los siguientes tipos de modelos de propagación:

- Modelos punto a área, que no utilizan datos específicos de perfil de trayectoria.
- Modelos punto a punto de trayectoria específica, que hacen uso del perfil de trayectoria.

Nótese que el modelo de punto a área generalmente se deriva de mediciones empíricas y como resultado normalmente influyen en el entorno para el que fueron definidos. Por lo tanto, se debe tener cuidado en el uso de este modelo, para asegurarse de que el entorno para el que fue creado corresponda estrechamente con el entorno en el que se va a utilizar.

Si esta propiedad es difícil de establecer, es posible que se deban verificar los modelos genéricos a través de mediciones prácticas en el área geográfica de aplicación. Con base en estas mediciones de verificación, el modelo genérico se podría ajustar para adaptarse al nuevo entorno. Una orientación más detallada sobre la verificación y ajuste de modelos de propagación se puede encontrar en el manual de la UIT sobre la propagación terrestre y móvil en las bandas VHF/UHF [105].

Una guía para la clasificación y aplicación de los diversos modelos de propagación fue desarrollada por la UIT-R y se proporciona en la Recomendación UIT-R P.1144 [28]. La Tabla 2 ofrece un resumen adaptado de las recomendaciones dadas en esta recomendación.

1.1.4 Ejemplos prácticos de los modelos de pérdida de trayectoria

Modelo de pérdida en espacio libre

Entre la gran variedad de modelos de propagación, uno de los modelos se destaca como fundamental. Se le llama modelo de pérdida en espacio libre (Recomendación UIT-R P.525 [11]), el cual define teóricamente la pérdida de trayectoria mínima experimentada por las ondas de radio que se propagan en el espacio libre (es decir, sin reflejos, sin obstáculos o alteraciones de ningún tipo) entre dos antenas isotrópicas. Debido a su carácter universal y naturaleza fundamental, el modelo de pérdida en espacio libre es a menudo utilizado en los estudios de ingeniería del espectro, como:

- Herramienta para precisar los límites teóricos de los escenarios de interferencia considerados.
- Herramienta de “último recurso”, es decir, en situaciones donde no es posible encontrar o ponerse de acuerdo sobre un modelo de propagación especializado, cuando el interferente y el interferido se encuentran muy cerca uno del otro (condición de línea de vista) o cuando la naturaleza de los estudios requiere considerar la peor caída posible de la señal interferente.

Existen varias maneras de expresar la pérdida en espacio libre, pero la manera práctica, que es utilizada la mayoría de veces, es proporcionada por la expresión logarítmica que se presenta a continuación en la Ecuación (1):

$$L_{FS} = 32.4 + 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(d), \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

TABLA 2
 Guía para la aplicación de métodos de predicción para la propagación de ondas de radio UIT-R

Método	Aplicación	Tipo	Resultado	Frecuencia	Distancia	% de tiempo	% ubicación	Altura de la terminal	Datos de entrada
Rec. UIT-R P.368	Todos los servicios (incl. MF y BC)	Punto a punto (incl. onda de superficie MF)	Intensidad del campo	10 kHz a 30 MHz	1 a 10.000 kilómetros	No aplicable	No aplicable	Con base en tierra	Frecuencia Conductividad en superficie
Rec. UIT-R P.452	Servicios que emplean estaciones en la superficie de la tierra; interferencia	Punto a punto	Pérdidas de trayectoria	700 MHz a 30 GHz	No se especifica, pero hasta más allá del horizonte de radio	0.001 a 50 Año promedio y peor mes	No aplicable	No hay límites especificados	Datos del perfil de la trayectoria Porcentaje de tiempo Altura de la antena Tx Altura de la antena Rx Latitud y longitud de Tx Latitud y longitud de Rx de Datos meteorológicos
Rec. UIT-R P.525	Pérdida en espacio libre	Punto a punto, área	Pérdida de trayectoria, intensidad del campo	Ilimitada	Ilimitada	No aplicable	No aplicable	Ilimitada	Distancia, Frecuencia
Rec. UIT-R P.528	Aeronáutico móvil	Punto a área	Pérdidas de trayectoria	125 MHz a 15 GHz	0-1800 kilómetros (para aplicaciones aeronáuticas 0 km de distancia horizontal no significa	5, 50, 95	No aplicable	H1: 15 m hasta 20 km H2: 1 a 20 km	Distancia Altura Tx Frecuencia Altura Rx Porcentaje de tiempo

Método	Aplicación	Tipo	Resultado	Frecuencia	Distancia	% de tiempo	% ubicación	Altura de la terminal	Datos de entrada
Rec. UIT-R P.530	Línea de vista enlaces fijos	Punto a punto Línea de vista	Mejora en la diversidad de pérdidas de trayectoria (condiciones de aire claro) Corte de XPD Error de rendimiento	Aproximadamente 150 MHz a 40 GHz	Hasta 200 km si hay línea de vista	Todos los porcentajes de tiempo en condiciones de aire claro; 1 a 0.001 en condiciones de precipitación (1)	No aplicable	Suficientemente alto como para garantizar una trayectoria clara	Distancia Altura Tx Frecuencia Altura Rx Porcentaje de tiempo Datos de obstrucción de la trayectoria Datos sobre el clima Información sobre el terreno
Rec. UIT-R P.533	Radiodifusión fija o móvil	Punto a punto	MUF básica Intensidad de campo de onda celeste Potencia disponible del receptor disponible Tasa señal/ruido: LUF Confiabilidad de circuito	2 a 30 MHz	0-40.000 kilómetros	Todos los porcentajes	No aplicable	No aplicable	Latitud y longitud de Tx Latitud y longitud de Rx Número de manchas solares Mes Hora (s) del día Frecuencias Potencia de Tx Ganancia de Antena Tx Tipo de Antena Rx
Rec. UIT-R P.534	Radiodifusión fija o móvil	Punto a punto a través de E esporádica	Intensidad del campo	30 a 100 MHz	0-4000 kilómetros	0 a 50	No aplicable	No aplicable	Distancia frecuencia

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Método	Aplicación	Tipo	Resultado	Frecuencia	Distancia	% de tiempo	% ubicación	Altura de la terminal	Datos de entrada
Rec. UIT-R P.617	Enlaces fijos a lo largo del horizonte	Punto a punto	Pérdidas de trayectoria	>30 MHz	100 a 1000 kilómetros	20, 50, 90, 99, y 99,9	No aplicable	No hay límites especificados	Frecuencia Ganancia de la antena Tx Ganancia de la antena Rx Geometría de la trayectoria
Rec. UIT-R P.618	Satelital	Punto a punto	Pérdidas de trayectoria Aumento de la diversidad y (para la condición de precipitación) XPD	1 a 55 GHz.	Cualquier altura práctica de órbita	0.001-5 para atenuación; 0.001-1 para XPD	No aplicable	No hay límite	Datos meteorológicos Frecuencia Ángulo de elevación Altura de la estación terrena Separación y ángulo entre los sitios de las estaciones terrestres (para ganancia de la diversidad) Diámetro de la antena y eficiencia (para oscilación) Ángulo de polarización (para XPD)
Rec. UIT-R P.620	Estaciones terrestres de Coordinación de frecuencias	Coordinación de distancia	Distancia de la cual se logra la pérdida de trayectoria requerida	100 MHz a 105 GHz	Hasta 1200 kilómetros	0.001 a 50	No aplicable	No hay límites especificados	Mínima pérdida básica de transmisión Frecuencia Porcentaje de tiempo Ángulo de elevación Tierra a estación
Rec. UIT-R P.679	Radiodifusión por satélite	Punto a área	Pérdidas de trayectoria Efecto del entorno local	0.5 a 5.1 GHz	Cualquier altura práctica de órbita	No aplicable	No hay límites especificados	No hay límites especificados	Frecuencia Ángulo de elevación Características del entorno local

Método	Aplicación	Tipo	Resultado	Frecuencia	Distancia	% de tiempo	% ubicación	Altura de la terminal	Datos de entrada
Rec. UIT-R P.680	Servicio móvil marítimo por satélite	Punto a punto	Desvanecimiento por la superficie del mar Interferencia (satélite adyacente)	0.8-8 GHz	Cualquier altura práctica de órbita	Al 0.001% a través de la distribución de Rice-Nakagami Límite de 0.01% para interferencia (1)	No aplicable	No hay límite	Frecuencia Ángulo de elevación Máximo incremento en el eje de puntería de la antena
Rec. UIT-R P.681	Terrestre Móvil Satelital	Punto a punto	Duración del desvanecimiento Duración del No desvanecimiento	0.8 a 20 GHz	Cualquier altura práctica de órbita	No aplicable Porcentaje de la distancia recorrida 1 a 80% (1)	No aplicable	No hay límite	Frecuencia Ángulo de elevación Porcentaje de distancia recorrida Nivel aproximado de sombra óptica
Rec. UIT-R P.682	Satelital Móvil Aeronáutico	Punto a punto	Desvanecimiento por la superficie de mar Trayectoria múltiple de superficie y aeronaves durante el aterrizaje	1 a 2 GHz (desvanecimiento por la superficie del mar) 1 a 3 GHz (multitrayecto desde la superficie de la Tierra)	Cualquier altura práctica de órbita	Hasta el 0.001 a través de la distribución de Rice-Nakagami (1)	No aplicable	No hay límite el desvanecimiento por la superficie del mar Hasta 1 km de reflexión en tierra durante el aterrizaje	Frecuencia Ángulo de elevación Polarización Máxima ganancia en el eje de puntería de la antena Altura de la antena
Rec. UIT-R P.684	Fijo Móvil	Punto a punto Punto a área	Intensidad del campo de onda celeste	30 a 150 kHz	0 a 4000 kilómetros	50	No aplicable	No aplicable	Latitud y longitud de Tx Latitud y longitud de Rx Distancia Potencia TX Frecuencia Constantes del suelo Estación Número de man-

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Método	Aplicación	Tipo	Resultado	Frecuencia	Distancia	% de tiempo	% ubicación	Altura de la terminal	Datos de entrada
									chas solares Hora del día
Rec. UIT-R P.843	Radiodifusión Fija Móvil	Punto a punto a través de ráfagas meteorológicas	Potencia recibida Tasa de ráfaga	30 a 100 MHz	100 a 1000 kilómetros	0 a 5	No aplicable	No aplicable	Frecuencia Distancia Potencia de TX Ganancias de la antena
Rec. UIT-R P.1147	Radiodifusión	Punto a área	Intensidad del campo de onda celeste	0.15 a 1.7 MHz	50 a 12 000 kilómetros	1, 10, 50	No aplicable	No aplicable	Latitud y longitud de Tx Latitud y longitud de Rx Distancia Número de man-chas solares Potencia de TX Frecuencia
Rec. UIT-R P.1238	Móvil RLAN	En la creación de métodos de propagación	Pérdidas de trayectoria Propagación retrasada	900 MHz a 100 GHz	Dentro de edificios	No aplicable	No aplicable	Base: alrededor de 2 - 3 m Móvil: aproximadamente 0.53 m	Frecuencia Distancia Factores de suelo y pared
Rec. UIT-R P.1410	Acceso de radio banda ancha	Punto a área	Cobertura Reducción temporal de la cobertura debido a la lluvia	3 a 60 GHz	0 a 5 km	0.001 a 1 (para el cálculo de la cobertura debido a la lluvia)	Hasta 100	No hay límite; 0-300 m (típico)	Frecuencia Tamaño de celda Alturas de la terminal Construcción de los parámetros estadísticos de altura
Rec. UIT-R P.1411	Móvil	Métodos de propagación en trayectoria corta	Pérdidas de trayectoria Propagación retrasada	300 MHz a 100 GHz	< 1 km	No aplicable	No aplicable	Base: alrededor de 4-50 m Móvil: aproximadamente 0.53 m	Frecuencia Distancia Dimensiones de la calle Alturas de las estructuras

Método	Aplicación	Tipo	Resultado	Frecuencia	Distancia	% de tiempo	% ubicación	Altura de la terminal	Datos de entrada
Rec. UIT-R P.1546	Servicios terrestres, incl. Radiodifusión (televisión / radio FM)	Punto a área	Intensidad del campo	30 a 3000 MHz	1 a 1000 kilómetros	1 a 50	1 a 99	Base T/x: altura efectiva desde menos de 0 a 3000 m Rx / móvil: > 1 m	Altura del terreno y superficie de cobertura (opcional) Clasificación de la trayectoria Distancia Altura de la antena TX Frecuencia Porcentaje de tiempo Altura de la antena RX Ángulo de incidencia del terreno Porcentaje de locaciones Gradiente de refractividad
Rec. ITU-R P.1622	Enlaces ópticos satelitales	Punto a área	Pérdida de absorción Pérdida de dispersión Ruido de fondo Centello de amplitud Ángulo de llegada Recorrido del haz Propagación del haz	20 a 375 THz	Enlaces ópticos de campo lejano Tierra a espacio	No aplicable	No aplicable	No hay limite	Longitud de onda Altura de la terminal Ángulo de elevación Parámetro de la estructura de la turbulencia

Método	Aplicación	Tipo	Resultado	Frecuencia	Distancia	% de tiempo	% ubicación	Altura de la terminal	Datos de entrada
Rec. ITU-R P.1623	Satelital	Punto a área	Duración del desvanecimiento. Pendiente del desvanecimiento	10 a 50 GHz	Cualquier altura práctica de órbita	No aplicable	No aplicable	No hay límite	Frecuencia Ángulo de elevación Umbral de atenuación Ancho de banda del filtro

(1) Porcentaje de tiempo de corte; para la disponibilidad del servicio, reste el valor a 100.

El significado de las columnas de información:

- ✓ *Aplicación:* el (los) servicio (s) o aplicación (es) para los (las) cuales se dirige la Recomendación.
- ✓ *Tipo:* la situación en la que la Recomendación se aplica, como punto a punto, punto a área, línea de vista, etc.
- ✓ *Resultado:* el valor del parámetro de salida resultante del método de la Recomendación, tal como pérdida de trayectoria, etc.
- ✓ *Frecuencia:* el rango de frecuencia de aplicación de la Recomendación.
- ✓ *Distancia:* el rango de distancia aplicable de la Recomendación.
- ✓ % de tiempo: los valores de porcentaje de tiempo aplicables o rango de valores de la Recomendación; el % de tiempo es el porcentaje de tiempo en el que la señal deseada se excede en un año promedio.
- ✓ % de ubicación: el porcentaje de ubicación aplicable de la Recomendación; el % de ubicación es el porcentaje de ubicaciones dentro de un cuadrado con lados de 100 a 200 m en los cuales se excede la señal deseada.
- ✓ *La altura de la terminal:* el rango de altura de antena de la terminal aplicable de la Recomendación.
- ✓ *Los datos de entrada:* una lista de los parámetros utilizados por el método de la Recomendación, la lista está ordenada por la importancia de los parámetros y, en algunos casos, se pueden utilizar los valores por defecto.

Donde:

- L_{FS} : la pérdida en espacio libre, que se describe en [11] como “la pérdida básica de transmisión”, decibeles
- f : frecuencia de las ondas de radio, MHz
- d : distancia entre los puntos de transmisión y recepción, km

Modelo Okumura-Hata

Entre otros modelos prácticos, a menudo se podían ver referencias al modelo Okumura-Hata, un modelo derivado empíricamente de pérdida en la trayectoria de propagación adecuado para los sistemas de radiocomunicaciones, especialmente los sistemas móviles, en VHF/UHF (30-3000 MHz). Sus expresiones originales se pueden encontrar en [29, 30]. Sin embargo, la UIT-R ha aprobado una fórmula práctica como se muestra en el Anexo 8 de la Recomendación UIT-R P.1546 [12], que se presenta a continuación en la Ecuación (2):

$$E = 69.82 - 6.16 \log f + 13.82 \log H_1 + a(H_2) - (44.9 - 6.55 \log H_1)(\log d)^b \quad (2)$$

Donde:

- E : la intensidad de campo (dB μ V/m) para la potencia del transmisor de referencia de 1 kW e.r.p.
- f : frecuencia (MHz)
- H_1 : altura efectiva de la antena de la estación base sobre el suelo (m) en el rango de 30 a 200 m
- H_2 : altura de antena de la estación móvil sobre el suelo (m) en el rango de 1 a 10 m
- d : distancia (km)
- $a(H_2) = (1.1 \log f - 0.7) H_2 - (1.56 \log f - 0.8)$
- $b = 1$ para $d \leq 20$ km, o
- $b = 1 + (0.14 + 0.000187 f + 0.00107 H_1') (\log [0.05 d])^{0.8}$ para $d > 20$ km

Donde:

$$H_1' = H_1 / \sqrt{1 + 0.000007 H_1^2}$$

Nótese que la altura efectiva de la antena transmisora en el contexto de la Recomendación P.1546 [12] se define como altura de la antena por encima del nivel promedio del terreno sobre una distancia de 3 a 15 km, a lo largo de la trayectoria hacia el receptor. El cálculo de estos valores normalmente requiere que los datos del terreno se encuentren disponibles. Sin embargo, la expresión original Okumura-Hata se refería a la altura efectiva de la antena en el sentido de la altura sobre el obstáculo circundante, es decir, por encima de los edificios cercanos. Por lo tanto, la última interpretación podría ser utilizada para calcular la pérdida de trayectoria de acuerdo con el modelo Okumura-Hata.

Sin embargo, utilizar el modelo de pérdida de trayectoria para expresar la intensidad del campo recibida en dB ($\mu V/m$) referido a 1 kW de potencia transmitida para una antena dipolo, puede resultar inconveniente para las aplicaciones prácticas. Por tanto, es más común usar la expresión derivada que describe solo la pérdida en la trayectoria que incurre en las ondas de radio:

$$L = 69.58 - 26.16 \log f + 13.82 \log H_1 + a(H_2) - (44.9 - 6.55 \log H_1)(\log d)^b, \text{ [dB]} \quad (3)$$

El valor práctico de las ecuaciones (1) y (3) se deriva del simple hecho de que no se requieren herramientas automatizadas de cálculo, pero pueden ser utilizadas para calcular la pérdida de trayectoria con una calculadora de mano o una hoja de cálculo. Conocer el valor de pérdida por trayectoria permite determinar fácilmente la potencia recibida, utilizando la suma logarítmica del cálculo de enlace:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L \quad (4)$$

Donde:

P_{rx} : potencia en la entrada del receptor, la misma dimensión que la de P_{tx} (es decir, si P_{tx} se introduce en la fórmula en dBm, entonces P_{rx} se obtiene también en dBm)

P_{tx} : potencia de salida del transmisor, dBm o dBW

G_{tx} : ganancia en la antena del transmisor, dBi

G_{rx} : ganancia en la antena del receptor, dBi

De esta manera, usando apropiadamente el modelo de propagación seleccionado y la expresión del enlace presupuestado, de acuerdo con la Ecuación (4), se puede calcular la potencia recibida de la señal de radio deseada o el nivel de potencia de interferencia de la señal interferente (señal no deseada).

Nótese, sin embargo, que algunas consideraciones adicionales pueden ser necesarias antes de que los niveles de potencia obtenidos puedan ser utilizados para emitir un juicio

particular. Por ejemplo, es necesario hacer alguna provisión (margen) para el desvanecimiento y para la relación a nivel de ruido, cuando se considera si el nivel de potencia deseado es suficiente para una recepción confiable, o podría ser necesario corregir la intensidad de la señal no deseada, debido a diferentes anchos de banda o a la separación de frecuencia entre las señales deseadas y no deseadas antes de emitir un juicio sobre si la interferencia supera el umbral tolerable. Todas estas consideraciones se tratan a profundidad en las secciones pertinentes de este título.

Modelamiento de propagación en la banda de radiodifusión MF

Como se mencionó anteriormente en la sección 1.1.1, la propagación de ondas de radio en las bandas MF ampliamente utilizadas, por ejemplo en Colombia para la radio AM, es un tema complejo debido al hecho de que estas ondas presentan un comportamiento característico de los dos modos de propagación: onda de superficie y onda celeste. La onda de superficie MF en sí consta de tres componentes:

- Onda espacial en línea directa de vista.
- Onda de superficie reflejada.
- La llamada “onda de superficie Norton”, que difracta alrededor de la curvatura de la Tierra.

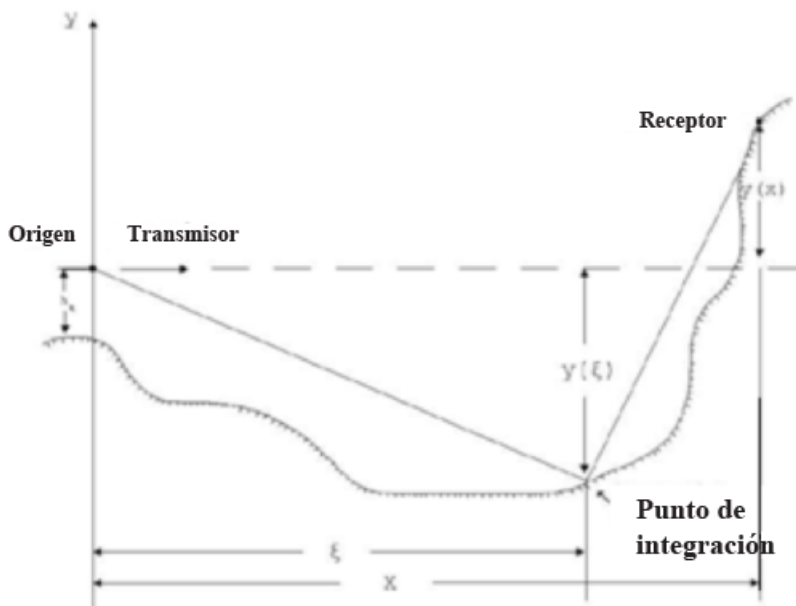
En la mayoría de los casos prácticos de grandes distancias de los transmisores, las ondas de superficie Norton se convierten en factor predominante en la recepción de MF. Puesto que la longitud de onda de MF de unos cientos de metros es de dimensiones comparables a las irregularidades del terreno observado en regiones montañosas, esto hace que los procesos difractivos sean muy profundos y, por ende, tiene un impacto en la propagación de las ondas de radio MF (ver el ejemplo anterior, en la Figura 6).

La referencia estándar para el modelamiento de propagación de las ondas de radio MF es la Recomendación UIT-R P.368 [6] y el atlas mundial de conductividad del suelo provisto en la Recomendación UIT-R P.832 [7]. La UIT también distribuye el programa informático GRWAVE (ver sitio web de la UIT, el software repositorio SG3 de UIT-R), el cual puede ser utilizado para reproducir las curvas de propagación de la Resolución UIT-R P.638. El GRWAVE realiza el cálculo de la intensidad del campo de las ondas de superficie en una atmósfera exponencial en función de la frecuencia, altura de la antena y las constantes de baja conductividad. Sin embargo, todos estos modelos y herramientas solo son adecuados para las condiciones de superficie terrestre lisa y homogénea (que se define en este contexto como un terreno con irregularidades menores a la longitud de onda, es decir, con una gradación de altura menor de 150... 175 m).

En el caso del terreno irregular con irregularidades mayores que la longitud de onda, el modelamiento de propagación es mucho más complejo y normalmente requiere la solu-

FIGURA 9

Trayectoria terrestre irregular para la definición de la ecuación integral del modelo de propagación MF



ción de la ecuación integral a lo largo de la trayectoria específica, utilizando la geometría de trayectoria, como se muestra en la Figura 9 [106].

Sin embargo, el cálculo integral involucrado para describir la intensidad del campo en una configuración de este tipo configuración, podría llegar a ser muy complejo, como lo muestra la siguiente fórmula ilustrativa de intensidad del campo relativa $f(x)$, que se reproduce a partir de [106]:

$$f(x) = g(x,y)W(x,0) - \sqrt{j/x} \int_0^x f(\xi) e^{-k\phi(x,\xi)} \cdot [y'(\xi)W(x,\xi) - \frac{y(x)-y(\xi)}{x-\xi} + (\Delta(\xi) - \Delta_r)W(x,\xi)] \cdot \sqrt{\frac{x}{\xi(x-\xi)}} d\xi$$

Es entonces evidente que la solución de esta ecuación representa una tarea muy tediosa, que es mejor delegar a los programas informáticos. En ese sentido, vale la pena señalar que en la Región 2 había desarrollos duraderos de tales herramientas de software de modelamiento de propagación MF. Una de las herramientas más exhaustivas y analíticas que permite el modelamiento de la onda de superficie y la onda celeste, ambas sobre terreno liso o terreno irregular, se presenta en [107].

Los últimos modelos desarrollados en la Región 2 son especialmente valiosos para un país como Colombia, ya que cuentan con algunos de los datos de propagación específicos de la región y hacen referencia a los aspectos de modelamiento de propagación de los acuerdos regionales de radiodifusión MF (Río de Janeiro, 1981).

Otra opción para resolver este problema es confiar en modelos empíricos prácticos. Uno de estos modelos, basado en mediciones en España, se presenta en [104]. El Gobierno colombiano hace uso de su propio modelo empírico y es importante que los modelos MF se incluyan como parte de la futura entrega de un sistema automatizado de gestión del espectro en Colombia (SAGE).

Disponiendo de herramientas confiables para el modelamiento de propagación de ondas MF y VHF, es necesario asegurar el mantenimiento profesional del Plan Técnico Nacional de Radiodifusión sonora en AM [130] y del Plan Técnico Nacional de Radiodifusión sonora en FM [131]. Sin embargo, también algunos de los modelos empíricos más simples podrían ser utilizados con fines de planificación general, como, por ejemplo, la planificación de la inversión inicial para las estaciones locales de radio. A continuación se muestra un ejemplo de este modelo empírico sencillo de propagación de MF con base en recomendaciones industriales [115].

El modelo comienza con la evaluación de la intensidad del campo de referencia a una milla (1.6 km) de la antena del transmisor, lo que dependerá de la potencia del transmisor y el tamaño de la antena como proporción de la longitud de onda, como se muestra en la Tabla 3.

TABLA 3

Intensidad del campo de referencia de la estación de radio AM a 1.6 km de la antena

Potencia del transmisor	Intensidad del campo a 1 milla/1.6 km, mV/m	
	$\frac{1}{4} \lambda$ antena (*)	$\frac{1}{2} \lambda$ antena (*)
250 W	95	120
1 kW	190	240
5 kW	425	530
10 kW	600	750
25 kW	950	1190
50 kW	1340	1680
100 kW	1900	2400

(*) Asume que la antena está equipada con estera terrestre hecha de 120 radiales enterrados de $\frac{1}{4} \lambda$.

En segundo lugar, el valor aproximado de la conductividad del suelo debe ser elegido en función del tipo de terreno circundante, utilizando la información en la Tabla 4.

TABLA 4

Valores representativos de la conductividad del suelo

Tipo de superficie de terreno	Conductividad representativa, mS/m
Agua de mar	5000
Tierras fértiles, suelo orgánico, llanuras	40
Tierras de cultivo montañosas	10
Superficie de agua dulce	10
Tierras altas continuas, bosques	4
Montañas, suelos arenosos, rocosos	1

Por último, la cobertura de la onda de superficie prevista como intensidad del campo de una estación de radiodifusión MF a una distancia dada, puede obtenerse multiplicando la intensidad del campo de referencia a 1 milla por el factor adecuado de reducción de intensidad del campo obtenido en la Tabla 5, que considera la frecuencia de operación, la baja conductividad y la distancia.

Por ejemplo, consideremos una estación de radiodifusión de MF que desea operar en una región de cultivos montañosa con un radio de 150 km, a una frecuencia de cerca de 1210 kHz, con la potencia de un transmisor de 1 kW y una antena con un tamaño de $\frac{1}{4} \lambda$. En primer lugar, se podría establecer que su radiación de intensidad del campo a 1 milla de la antena será de 190 mV/m. Luego, señalando que la región puede ser caracterizada como tierra de cultivos montañosa, se podría suponer una conductividad del suelo de 10 mS/m. Por último, a partir de la última tabla, se podría establecer que para los parámetros descritos anteriormente, el factor de atenuación correspondiente a 100 millas/160 km de distancia será de 0.037. En consecuencia, la intensidad del campo prevista para la cobertura de la onda de superficie durante el día en el borde del área de cobertura prevista sería del orden de $190 \text{ mV/m} * 0.037 = 7 \text{ mV/m}$.

Los valores típicos de intensidad de campo necesarios para la recepción de programas de radiodifusión de MF en diferentes tipos de áreas de urbanización (que tiene un impacto sobre el ruido ambiente electromagnético) y la ausencia asumida de las estaciones de interferencia se muestran en la Tabla 6.

TABLA 5

Factores de reducción de intensidad de campo MF para diferentes frecuencias

Conductivities x 10 ⁻¹⁴ electromagnetic unit (mS/m)								
Distance, miles	Distance, kilometers	Sea water 5,000	40	20	10	5	2	1
			Best Soil		Good Soil		Poor Soil	
610 kHz								
1	1.61	100	99	98	96	93	85	72
2	3.22	50	49	48	47	43	38	29
5	8.05	20	20	19	18	16.1	11.7	7.3
10	16.1	10	9.7	9	8.2	6.9	4.1	2.1
20	32.2	5	4.6	4.2	3.6	2.6	1.1	0.49
50	80.5	1.9	1.67	1.35	0.9	0.45	0.134	0.068
100	161	0.83	0.68	0.45	0.23	0.09	0.03	0.015
200	322	0.29	0.2	0.105	0.041	0.0145	0.0044	0.0022
500	805	0.028	-	-	-	-	-	-

Conductivities x 10 ⁻¹⁴ electromagnetic unit (mS/m)								
Distance, miles	Distance, kilometers	Sea water 5,000	40	20	10	5	2	1
			Best Soil		Good Soil		Poor Soil	
1,210 kHz								
1	1.61	100	98	96	91	81	59	41
2	3.22	50	49	46	42	35	21.3	13.3
5	8.05	20	18.3	17	14	9.6	4.3	2.43
10	16.1	10	8.6	7.2	5.25	2.85	1.102	0.59
20	32.2	5	3.7	2.7	1.53	0.65	0.23	0.144
50	80.5	1.8	0.95	0.48	0.19	0.08	0.032	0.021
100	161	0.78	0.244	0.092	0.037	0.0154	0.0066	0.0042
200	322	0.24	0.037	0.012	0.0044	0.00182	0.0007	0.00043
500	805	0.016	-	-	-	-	-	-

Conductivities x 10 ⁻¹⁴ electromagnetic unit (mS/m)								
Distance, miles	Distance, kilometers	Sea water 5,000	40	20	10	5	2	1
			Best Soil		Good Soil		Poor Soil	
790 kHz								
1	1.61	100	99	98	96	91	77	60
2	3.22	50	49	4.8	47	43	32.5	22.5
5	8.05	20	19.5	19.2	17.2	14.2	8.7	5
10	16.1	10	9.5	8.6	7.5	5.6	2.55	1.3
20	32.2	5	4.38	3.8	2.9	1.73	0.61	0.3
50	80.5	1.85	1.42	1.03	0.58	0.24	0.078	0.043
100	161	0.82	0.51	0.29	0.12	0.046	0.017	0.0092
200	322	0.27	0.125	0.052	0.0173	0.0065	0.0022	0.00115
500	805	0.023	-	-	-	-	-	-

Conductivities x 10 ⁻¹⁴ electromagnetic unit (mS/m)								
Distance, miles	Distance, kilometers	Sea water 5,000	40	20	10	5	2	1
			Best Soil		Good Soil		Poor Soil	
1,000 kHz								
1	1.61	100	99	97	93	87	68	49
2	3.22	50	49	4.7	44	39	26.4	17.2
5	8.05	20	18.3	17.4	15.3	12	6	3.35
10	16.1	10	8.8	8	6.3	4.15	1.58	0.83
20	32.2	5	3.95	3.26	2.1	1.04	0.35	0.2
50	80.5	1.8	1.15	0.72	0.324	0.127	0.048	0.028
100	161	0.79	0.35	0.16	0.062	0.026	0.01	0.0057
200	322	0.25	0.067	0.0234	0.0082	0.0032	0.00115	0.00067
500	805	0.0185	-	-	-	-	-	-

Conductivities x 10 ⁻¹⁴ electromagnetic unit (mS/m)								
Distance, miles	Distance, kilometers	Sea water 5,000	40	20	10	5	2	1
			Best Soil		Good Soil		Poor Soil	
1,380 kHz								
1	1.61	100	97	95	89	77	53	36.4
2	3.22	50	48	45	40	32	18.5	11.2
5	8.05	20	18	16	12.5	8.2	3.45	1.95
10	16.1	10	8.2	6.6	4.35	2.18	0.71	0.48
20	32.2	4.9	3.4	2.3	1.15	0.47	0.185	0.118
50	80.5	1.8	0.77	0.35	0.133	0.061	0.0265	0.017
100	161	0.78	0.176	0.065	0.027	0.0125	0.005	0.0032
200	322	0.23	0.024	0.008	0.00305	0.00125	0.00038	0.00023
500	805	0.0135	-	-	-	-	-	-

Conductivities x 10 ⁻¹⁴ electromagnetic unit (mS/m)								
Distance, miles	Distance, kilometers	Sea water 5,000	40	20	10	5	2	1
			Best Soil		Good Soil		Poor Soil	
1,600 kHz								
1	1.61	100	96	93	85	71	45	31
2	3.22	50	48	43	37.5	28	14.5	9.4
5	8.05	20	17.2	15	10.8	6.2	2.5	1.6
10	16.1	10	6.6	5.8	3.4	1.54	0.58	0.39
20	32.2	4.8	2.95	1.76	0.79	0.32	0.137	0.096
50	80.5	1.76	0.57	0.23	0.092	0.044	0.0195	0.0127
100	161	0.75	0.113	0.041	0.018	0.0084	0.0037	0.0026
200	322	0.215	0.0145	0.0043	0.0018	0.00077	0.00046	0.00023
500	805	0.011	-	-	-	-	-	-

TABLA 6

Valores típicos de intensidad del campo requeridos para la recepción de radiodifusión de MF

Tipo de área	Típica intensidad del campo recibida, requerida mV/m
Centro de ciudades y zonas industriales	10-50
Suburbios y zonas residenciales	2-10
Zonas rurales (temporadas de tormentas)	1-3
Zonas rurales (estaciones meteorológicas tranquilas)	0.25-1
Recepción poco confiable	0.1

Así, para este ejemplo, se podría concluir que la intensidad del campo sería suficiente para la recepción en zonas no urbanas.

Sin embargo, nuevamente se debe resaltar que tales modelos simplificados solo se podrían utilizar para la estimación aproximada de la cobertura.

Por último, cabe señalar también que la cobertura de la radiodifusión de MF en Colombia podría verse afectada en zonas tropicales con una vegetación muy densa. Las observaciones realizadas sobre la base de mediciones prácticas en el área del río Amazonas demuestran que cuando el receptor está dentro de la selva se observa una atenuación adicional. Se ha verificado experimentalmente que la atenuación adicional (A_a) puede ser expresada en unidades de dB mediante la siguiente expresión empírica [116]:

$$A_a = 0.0174 \cdot f \cdot \sigma^{1/2} \cdot h_f \quad (3)$$

Donde f es la frecuencia (kHz), σ es la conductividad de la tierra (mS/m) y h_f es la altura de la selva (m).

1.2 Datos topográficos

En la mayoría de los casos, como para las bandas de frecuencia, comenzando desde VHF y más altas, las longitudes de onda se vuelven comparables con el tamaño de los obstáculos típicos de las estructuras del terreno o estructuras hechas por el hombre (edificios, etc.), por lo tanto, las ondas de radio no podrán superar fácilmente esos obstáculos, y las características del terreno se vuelven dominantes en la determinación de la pérdida en la trayectoria. Por eso es de crucial importancia tener acceso a datos topográficos a fin de hacer una predicción fiable de la propagación de ondas de radio. Este es especialmente el caso de los países donde se alterna entre zonas montañosas y planas, lo que tendrá un impacto muy diferente sobre la propagación de las ondas de radio.

Las diferentes clases de terreno que son útiles: el mar, otros cuerpos de agua, el desierto, selva densa, selva, zonas rurales, zonas suburbanas y urbanas. Puede considerarse la siguiente información sobre los requisitos de composición y desarrollo de las bases de datos topográficas digitales, como se sugiere en la Recomendación UIT-R P.1058 [31].

1.2.1 Sistemas de coordenadas

Los datos topográficos pueden hacer referencia a cualquiera de los diferentes sistemas de coordenadas. Normalmente, estos se dividen en dos categorías principales:

- Coordenadas angulares, normalmente en relación con la latitud del Ecuador y la longitud en relación con un meridiano de referencia, normalmente el de Greenwich.
- Una proyección rectangular aplicada a un área particular de la superficie de la Tierra de acuerdo con una proyección matemática definida.

Las principales características de estos dos sistemas se pueden resumir de la siguiente manera:

- Las coordenadas de latitud y longitud ofrecen una cobertura mundial sin discontinuidad, pero con una relación no lineal entre los valores de coordenadas y distancias del terreno. En particular, el factor de escala entre la longitud y la distancia del suelo varía con la latitud.
- Las proyecciones rectangulares aproximan a una relación lineal de escala invariante entre las coordenadas y las distancias del suelo en un área geográfica definida, pero que deben ser redefinidas para las diferentes áreas para evitar una distorsión significativa. Muchas agencias nacionales de cartografía adoptan una proyección rectangular de mapas en papel y, por esta razón, la mayoría de los datos topográficos detallados de una zona determinada son a menudo indexados a intervalos regulares de proyección local.

Muchos de los sistemas nacionales de cartografía se basan en la proyección transversal de Mercator. El Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM, por sus siglas en inglés) es un conjunto de estas proyecciones basadas en las definiciones uniformes de diferentes longitudes, con coordenadas referenciadas al Ecuador. Esto proporciona un grado útil de estandarización. En algunos casos existe una preferencia por las proyecciones optimizadas para exactitud en una latitud y longitud específicas, en la que los valores de cada caso para la elipticidad terrestre suelen ser elegidos con el fin de minimizar los errores. Hay también un número de proyecciones Mercator no transversales.

La elección más adecuada de un sistema de coordenadas puede depender de varios factores, incluyendo:

- Donde la precisión más alta es importante hay una ventaja en la retención del sistema de coordenadas de origen, ya que la conversión a un sistema diferente por lo general se traducirá en una pérdida de precisión.
- En la extracción de perfiles de corta trayectoria, los datos están indexados a una proyección rectangular lo que ofrece una simplificación útil, ya que una línea recta en el espacio de las coordenadas se aproximará a una línea recta en el suelo. La discrepancia en comparación con una verdadera trayectoria en gran círculo dependerá del sistema de proyección, de la orientación de la trayectoria y la longitud. Como

guía general, una línea recta en una proyección rectangular es generalmente lo suficientemente precisa para los estudios de propagación hasta unos 100 km. Sin embargo, las discrepancias reales pueden variar de acuerdo con la proyección que se use, y tienden a ser mayores para las orientaciones oeste-este y en latitudes más altas. Los usuarios deben evaluar el peor de los casos cuando se exponen los errores de los perfiles de trayectoria como una línea recta en una proyección rectangular.

- Las coordenadas de latitud y longitud son valiosas en la prestación de una cobertura continua en áreas extensas. Cuando la geometría del gran círculo se utiliza para evitar el exceso de no-linealidad, el uso de coordenadas de latitud y longitud evita la necesidad de coordinar las conversiones a una proyección rectangular.

En vista de los factores mencionados, no es posible recomendar un sistema de coordenadas único para todos los efectos. Para la coordinación internacional se recomienda el uso de latitud y longitud dada su capacidad para cubrir toda la superficie de la Tierra sin discontinuidades. En los casos en que se necesita una proyección rectangular por razones de practicidad, el uso de coordenadas UTM es preferible por razones de uniformidad.

La discusión anterior se resume en la siguiente tabla, réplica de la Recomendación UIT-R P.1058 [31].

TABLA 7
Elección de los sistemas de coordenadas para mapas digitales

Parámetro	Latitud y longitud	UTM	Otro
Aplicabilidad	Toda la Tierra	La mayor parte de la Tierra	Por lo general, local
Malla de datos	Trapezio curvilíneo	Buena aproximación a un cuadrante	Por lo general, buena aproximación a un cuadrante
Variación del factor de escala	Varía con la latitud	Buena aproximación a la constante	Por lo general, buena aproximación a constante
Límites	Ninguno	De acuerdo con la longitud	Varía

1.2.2 Dato geodésico y compatibilidad con bases de datos

Un dato geodésico es el conjunto de valores de referencia sobre el cual se debe basar un sistema de coordenadas. El dato “WGS 84”, que se basa en el geoide “80 GRS”, se recomienda para la coordinación internacional.

Al combinar los datos topográficos o datos de mapeo de diferentes fuentes se debe tener cuidado para garantizar la compatibilidad. En general, los desajustes ocurrirán a menos que todos los datos se basen en el mismo dato geodésico y sistema de coordenadas.

1.2.3 Espaciamiento horizontal en una base de datos macroscópica

El valor del espaciamiento horizontal entre puntos de datos que se debe utilizar en una base de datos topográficos depende del uso que se le dará a los datos. No es posible recomendar un valor particular. En la práctica, las distancias horizontales en el rango aproximado de 20 metros a 1 km, o su equivalente en latitud y longitud, son típicos. Varios modelos de predicción de la propagación no solo tienen diferentes requisitos para la resolución horizontal, sino diferente sensibilidad a los cambios en la resolución horizontal. No se debe suponer que el aumento en la resolución horizontal con un método de propagación dado siempre mejora la precisión de la predicción.

1.2.4 Principios generales de almacenamiento de datos para alturas de terreno

La mayoría de bases de datos topográficos más usadas actualmente para la predicción de la propagación y la planificación del uso de la radio utilizan series de datos en dos dimensiones a intervalos iguales en el sistema de coordenadas seleccionado, conocidas como “malla de datos”. Esto tiene la ventaja de que las coordenadas horizontales solo deben ser proporcionadas por los puntos de referencia, con la mayoría de los datos consistiendo en series autoindexadas de datos relacionados con los valores de altura. Para las proyecciones rectangulares, el espaciamiento horizontal entre datos normalmente será el mismo a través de toda la base de datos. Para las coordenadas de latitud y longitud, el espaciamiento de la longitud a veces aumenta en pasos a medida que aumenta la latitud, a fin de mantener el factor de escala de longitud aproximadamente constante.

El almacenamiento en mallas de datos es recomendado para las bases de datos topográficas utilizadas para estudios de propagación, sobre la base de que es simple y de uso generalizado.

La siguiente información se proporciona como una guía general sobre otros métodos para el almacenamiento de datos topográficos que pueden resultar útiles.

Existe un interés creciente por el uso de otras estrategias de almacenamiento de datos topográficos, tanto para reducir el espacio de almacenamiento como para proporcionar una representación más eficaz de la altura del terreno en algunos casos.

Los métodos estándar se pueden utilizar para comprimir los datos topográficos, aunque, en general, las mayores tasas de compresión están disponibles utilizando métodos especializados, no todos libres de errores. Algunos ejemplos de compresión de datos reticulares son los siguientes:

- Transformada de coseno discreta.
- Diversas formas de codificación de Huffman, que pueden ser libre de errores, y que son particularmente eficaces si la diferencia entre las alturas reales y las predicciones de los puntos vecinos son codificadas, según Huffman, para su almacenamiento.
- El uso de la variable de espaciamiento mediante el uso de puntos de acuerdo con la irregularidad del terreno, que puede ser almacenada de manera eficiente en forma de una lista enlazada usando nodos “quadtree”.

Cuando los datos de altura del terreno están disponibles con una resolución horizontal de puntos colocados de manera irregular, lo que normalmente implica un sistema de medición que consiste en seleccionar características tales como líneas de cresta y valle, la red de triángulos irregulares (TIN, por sus siglas en inglés) tiene una serie de ventajas. El método se basa en el almacenamiento, tanto de las coordenadas horizontales como de la altura de cada punto. También es necesario definir una triangulación que una todos los puntos con el fin de representar el terreno contiguo en forma de facetas triangulares. La triangulación se puede almacenar de forma explícita o implícita para su reconstrucción durante la recuperación de datos.

Cabe señalar que la ventaja de la TIN se basa en los puntos relacionados con las características del terreno, que por lo general es irregular. Aquí surgen dos puntos:

- La cartografía tradicional no siempre proporciona estos puntos con suficiente exactitud como para ofrecer una resolución adecuada.
- Un sistema TIN derivado de una malla de datos debe emplear un sistema para identificar los puntos más significativos topográficamente. También hay que señalar que se pueden presentar triangulaciones ambiguas para los puntos espaciados regularmente.

1.2.5 Representación de los datos de altura del terreno

Las mallas de datos de los valores de altura pueden representar diferentes aspectos de la altura del terreno:

- La más alta, la más baja, la altura media u otro tipo de altura característica para un área cuadrada de terreno que tiene un lado igual a los datos del espaciamiento horizontal.
- La altura en un solo punto representada sin proporcionar información sobre la altura en otros lugares.

La decisión de cómo están representadas las alturas afecta tanto la manera como se deben extraer los perfiles de trayectoria a partir de una base de datos y cómo va a interactuar la información con un método de predicción de la propagación. No es posible ofrecer una recomendación general en esta área. Los métodos de extracción de perfil se describen en la siguiente subsección.

Al dibujar un perfil entre dos ubicaciones arbitrarias, pocos o ninguno de los puntos de datos en una malla de datos coincidirá exactamente con el perfil. Existen varios métodos para la extracción de datos sobre la altura del terreno en estos casos. Se recomienda lo siguiente, según las circunstancias:

- Cuando los datos de altura de alguna manera representan un área cuadrada de tierra, tal como se describe en el punto (a) anterior, los datos deben ser colocados en el perfil de cada uno de los cuadrados por los que pasa. Cada punto del perfil se puede colocar en la normal de la línea de perfil, hasta el punto de datos correspondiente, aunque en general no se producen puntos de perfil espaciados igualmente. Si el método de propagación requiere de puntos igualmente espaciados, es aceptable mover los puntos de perfil para lograrlo.
- Cuando los datos de altura representan solo la altura en cada punto exacto, tal como se describe en el punto (b) anterior, el método de extracción preferido es el de predeterminar puntos de perfil igualmente espaciados y obtener la altura del terreno para cada uno a través de una interpolación bilineal de los datos de valores inmediatamente circundantes.

Se aplican principios diferentes a la extracción de un perfil a partir de una base de datos basada en TIN. Estrictamente, el perfil es la línea continua siguiendo las facetas triangulares contiguas por medio de las cuales el TIN representa el terreno. En la práctica, es aceptable el muestreo de esta superficie para los puntos predeterminados de perfil igualmente espaciados.

La exactitud de los modelos de predicción de la propagación puede ser fuertemente afectada por la exactitud de los datos de altura del terreno en una base de datos topográficos. La precisión de las alturas del terreno generalmente se expresa como un valor de error de la raíz media cuadrática (r.m.s). La resolución horizontal, la precisión vertical y el método de propagación en uso afectarán el resultado calculado. En general, los métodos de determinación de la propagación más detallados requieren una mayor resolución y precisión en los datos topográficos, pero los detalles pueden variar en cada caso. Un error de r.m.s de 15 m en los datos de altura del terreno se considera aceptable para muchos propósitos.

1.2.6 Bases de datos topográficos de la zona urbana

Se aplican consideraciones especiales en el caso de las predicciones de propagación topográfica en las áreas urbanas, especialmente en frecuencias superiores a unos 1000 MHz, donde los reflejos de las superficies de edificios se deben tener en cuenta. En tales casos se necesita una información muy detallada, incluyendo la altura y la forma de los edificios y, posiblemente, la ubicación y el ancho de las calles, aunque la última información puede, en algunos casos, derivarse del área no cubierta por los edificios.

Dos enfoques diferentes han mostrado ser útiles en estos casos. El primer enfoque es una extensión del concepto general que se describe en la sección 1.2.3, con un espaciamiento horizontal de 5 a 10 metros y el almacenamiento de la información de la altura del edificio como parte de los datos de cobertura terrestre (ver Nota). En este caso, la orientación del promedio de los edificios solo se puede derivar aproximadamente. En el segundo enfoque, una base de datos vectoriales se establece con el fin de mantener las coordenadas de los vértices que definen la forma de cada edificio, en forma tridimensional (véase también el punto 1.2.8). En ambos casos, las alturas almacenadas pueden ser valores absolutos o valores relativos de la altura media del suelo local. Actualmente no hay pruebas suficientes para indicar cuál de estos dos métodos ofrece la mejor base para el cálculo de propagación.

Nota: los edificios de forma irregular se pueden almacenar como una combinación de subedificios de diferentes alturas.

1.2.7 Información de cobertura del terreno macroscópico

Como se señaló anteriormente, el rango de posibles categorías de suelo es muy grande y es poco probable que el rango sea relevante para un área geográfica particular. La Tabla 8 muestra los nombres y un esquema de codificación de dos niveles de un conjunto de

TABLA 8

Categorías que se mostrarán en una base de datos macroscópica de cobertura terrestre

00		Desconocido
10	RURAL ABIERTA	
	11	Pastos, praderas
	12	Campos de cultivo bajo
	13	Campos de cultivos alto (por ejemplo, las vides, lúpulos)
	19	Terreno de parque
20	CUBIERTA POR ÁRBOLES	
	21	Árboles dispersos en espacios irregulares
	22	Huertos (regularmente espaciados)
	23	Árboles caducos (espaciados irregularmente)
	24	Árboles caducos (regularmente espaciados)
	25	Coníferas (espaciadas irregularmente)
	26	Coníferas (regularmente espaciadas)
	27	Bosque de árboles mixtos
	28	Selva tropical
30	SUPERFICIE CONSTRUIDA	
	31	Casas separadas
	32	Centro de pueblo
	33	Suburbano
	34	Suburbios densos
	35	Urbano
	36	Zona urbana densa
	37	Zona industrial
40	TIERRA SECA	
	42	Dunas de arena
	43	Desierto
50	TERRENO HÚMEDO (SIN ÁRBOLES)	
	52	Zonas pantanosas
	54	Tierras bajas
60	AGUA DULCE	
70	AGUA DE MAR	
80	CRIOSFERA	
	82	Hielo marino
	83	Hielo de agua dulce
	84	Glaciar
	86	Nieve seca
	88	Nieve húmeda
90	OTROS	(Especificar)

categorías de cobertura terrestre. Una categoría describe el tipo de cobertura terrestre en un área específica (por ejemplo, un cuadrado de 100 metros). Cuando más de un tipo de cobertura existe en la zona en cuestión, se debe describir la categoría dominante. Las categorías en mayúsculas se pueden utilizar cuando no es necesaria o no existe una clasificación más detallada.

Una categoría puede ser indicada por un código de dos dígitos, como se indica en la primera columna de la Tabla 4. Si están disponibles, se pueden suministrar hasta tres parámetros opcionales, para sumar precisión a la descripción implícita por un nombre de categoría:

- *Altura Hc*: esta debe representar la altura característica de la cobertura terrestre en metros sobre el suelo, ignorando objetos aislados de mayor altura. En términos matemáticos, la mejor manera de aproximar este valor es mediante la altura modal de cobertura, pero la intención es proporcionar la altura más característica del panorama de cobertura sobre el nivel del suelo.
- *Densidad Dc*: el porcentaje de terreno en la zona en cuestión, que está cubierta por cierta cobertura terrestre a una altura igual o mayor que *Hc*.
- *Ancho mínimo Gc*: esto debería representar el ancho típico (m) de las brechas en la cobertura terrestre.

Nótese que la *Hc* se debe proporcionar si se suministra la *Dc*, y que la *Dc* debe ser suministrada si se proporciona el *Gc*.

En vista de la amplia variabilidad de la cobertura terrestre, a menudo solo será posible obtener estimaciones para los parámetros de *Hc*, *Dc* y *Gc*. Sin embargo, pueden ser útiles para añadir precisión a las categorías genéricas. Esto se puede hacer para un conjunto completo de datos como un todo, o se pueden suministrar de forma individual para cada punto de un conjunto de datos, como, por ejemplo, para un perfil de trayectoria.

1.2.8 Información de cobertura terrestre para fines especiales

Las consideraciones de la sección 1.2.6 se pueden extender a cualquier situación especial donde se requieran predicciones detalladas de propagación. La Tabla 9 presenta algunos ejemplos de categorías de cobertura terrestre, junto con un posible mecanismo para el registro de sus características, lo que es básicamente una extensión del método descrito por primera vez en la sección 1.2.6. Alternativamente, se puede utilizar el método vectorial para almacenar las coordenadas de las extremidades de los objetos.

TABLA 9

Categorías adicionales y parámetros para base de datos de estructuras especiales

Categoría de cobertura terrestre	Parámetros
Fila de edificios (Una fila aislada bien definida de edificios, por lo general, una hilera de casas idénticas a lo largo de una carretera que comparten sus paredes externas)	-Medidas de la altura de los edificios -Coordenadas de los extremos de la fila
Edificio aislado (Edificio aislado dentro de un cuadrado)	-Altura del edificio -Coordenadas del centro del edificio -El área cubierta por el edificio
Hilera de árboles (Normalmente, una carretera bordeada de árboles)	-La medida de la altura de los árboles -Coordenadas de los extremos de la línea de árboles
Torres (Postes de electricidad, turbinas de viento, etc.)	-Altura de las propiedades individuales medibles -Coordenadas en el centro de las propiedades individuales medibles

1.2.9 Datos de la cantidad

Para muchos propósitos es necesario establecer la cobertura de la población de un servicio de radiocomunicaciones. Esto se puede hacer de una forma muy conveniente si se establece un banco de datos de la población, se ha encontrado que es útil para tener el mismo espaciamiento horizontal tanto para la población como para la cobertura terrestre y la altura del terreno.

1.2.10 Sistema de Información Geográfica

Para la implementación práctica y el uso de datos topográficos, como parte de sistemas automatizados (computarizados), las administraciones emplean algún tipo de solución de Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés). El SIG es el sistema IT que integra hardware, software y base de datos topográficos reales, para capturar, gestionar, analizar y, finalmente, mostrar todas las formas de información referenciada geo-

gráficamente, tales como los datos de cobertura de radio, etc. Así que el SIG es una herramienta práctica que permite a los usuarios ver, entender, cuestionar, interpretar y visualizar los datos geográficos de muchas maneras, a veces de manera general, pero usualmente, a la medida de la aplicación específica, como el modelamiento de propagación de radio en el caso de la ingeniería del espectro.

La información y orientación sobre el uso de un Sistema de Información Geográfica en particular para ser usado en Colombia se puede encontrar en el Manual del Usuario de ASMS, disponible en el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC).

1.2.11 Ejemplos prácticos

El siguiente grupo de figuras 10 a14 representa algunos ejemplos prácticos del tipo de gestión del espectro y funciones de ingeniería e información, que se pueden conseguir empleando las funciones ofrecidas por un SIG con mapas digitales de terreno.

FIGURA 10

Ejemplo de validación del perfil de trayectoria para enlaces de microonda punto a punto

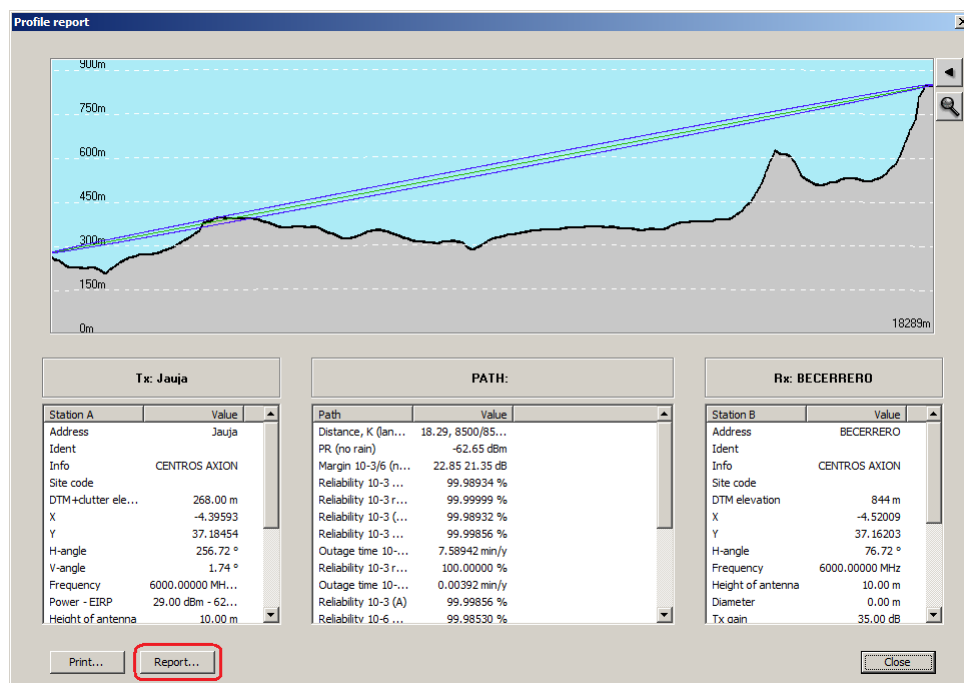


FIGURA 11

Cálculo de áreas de recepción basadas en la información del terreno

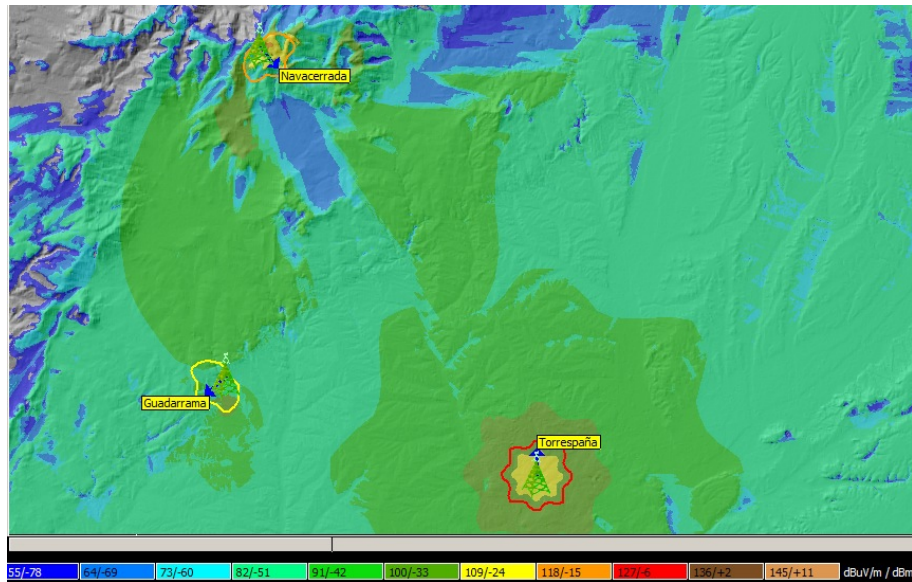


FIGURA 12

*Intensidad de campo en área urbana
(nótese la mejor propagación a lo largo de “street canyons”)*

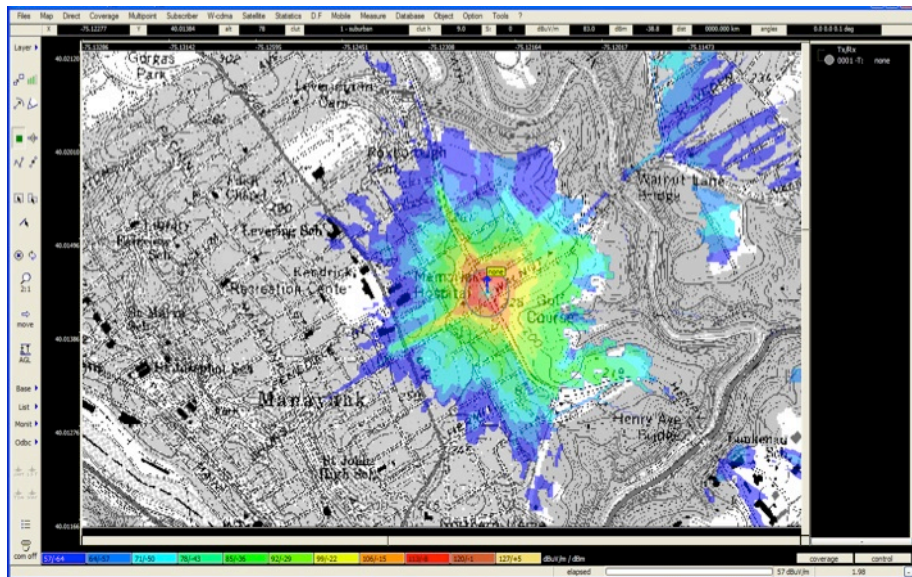


FIGURA 13

Vista tridimensional de la cobertura de las estaciones de radio en región montañosa

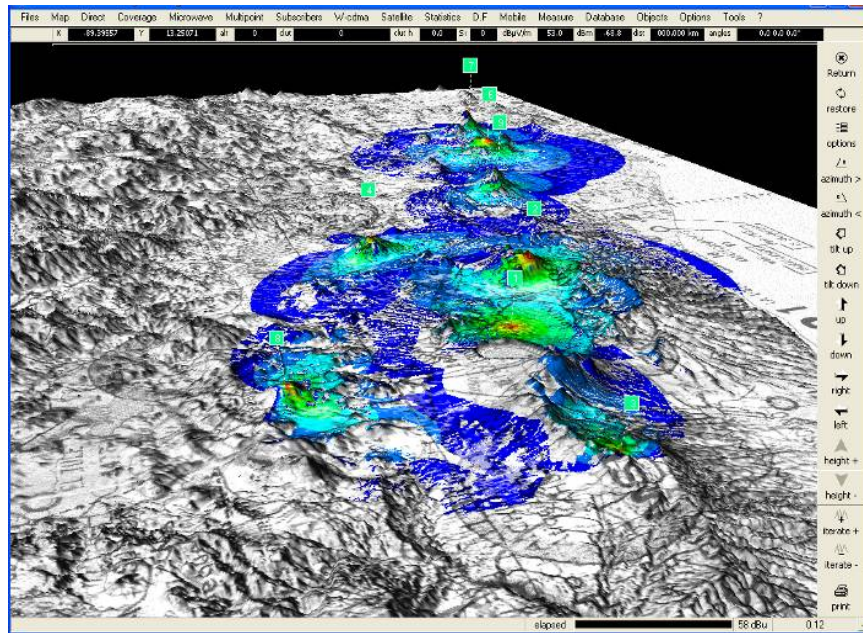
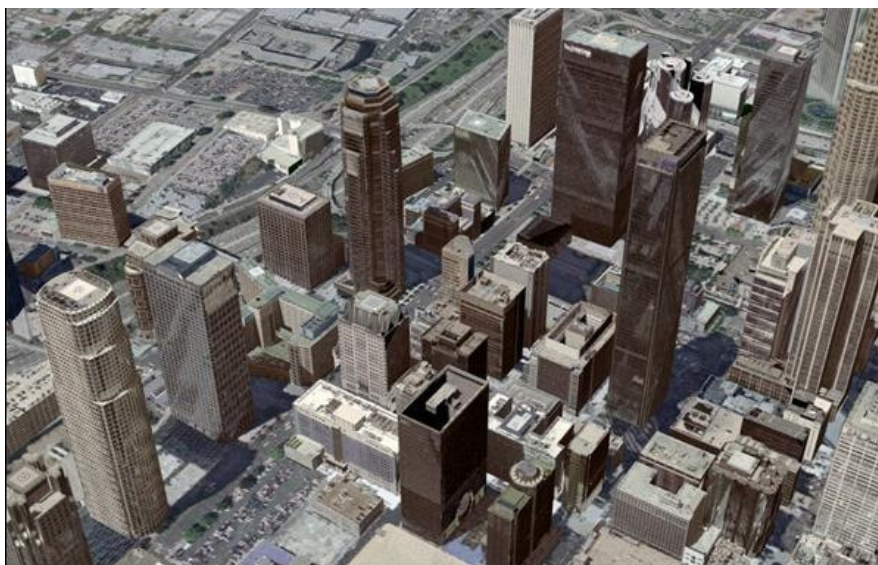


FIGURA 14

Ejemplo de un mapa urbano en 3D de la base de datos, que se puede lograr con resolución de edificios de 1-5 m



Los ejemplos de las figuras anteriores ilustran la riqueza de información que se puede obtener con el apoyo de los sistemas de información geográfica. En particular, la disponibilidad de datos de alta resolución, como se ilustra en la Figura 14, permiten la aplicación significativa de sofisticados métodos computacionales, tales como la evaluación de la propagación por difracción en zonas urbanas muy aglutinadas.

Para una mayor discusión de la integración con el sistema automatizado de gestión ver la sección 1.6.

1.2.12 Mapas de datos geofísicos

Además de los mapas que describen la naturaleza del terreno en sí, como ya se mencionó, también pueden ser necesarios mapas de los diversos datos geofísicos asociados, y son proporcionados por la UIT. El resumen de los distintos datos que pueden ser necesarios en los estudios de propagación se da a continuación en la Tabla 10, adaptada según la Recomendación UIT-R P.1144 [28].

1.3 Evaluación del nivel de ruido

Hay dos tipos de ruido que a menudo necesitan ser evaluados en estudios de ingeniería del espectro: el ruido externo y el ruido térmico del receptor. Ambos tienen características especiales que deben ser consideradas por separado.

1.3.1 Ruido radioeléctrico externo

El ruido externo, como el ruido atmosférico, ruido galáctico, ruido celeste y el ruido hecho por el hombre, afecta adversamente el funcionamiento de un sistema de radiocomunicaciones. El mínimo ruido externo que se espera en los sitios de los receptores terrestres proveniente de fuentes de ruido naturales y artificiales (con exclusión de las señales no deseadas) en el rango de frecuencia de 0.1 Hz a 100 GHz se especifica en la Recomendación UIT-R P.372 [32]. La figura de ruido externo, $F_a = 10 \log f_a$, se presenta para diferentes bandas de frecuencia en la Figura 15 y en la Figura 16, a partir de [1], y se representa a partir de una curva continua. Los otros ruidos de interés se muestran como curvas punteadas.

TABLA 10
Mapas digitales UIT-R de parámetros geofísicos

Recomendación UIT-R	Objeto de la recomendación	Descripción de los datos de los mapas	Resolución de las cuadrículas	Nombre de archivo
P.839	Modelo de altura de lluvia para los métodos de predicción	Media anual 0° C Altura isoterma (km) (zerodeg)	1.5° × 1.5°	ESAOHEIGHT.TXT
P.837	Características de la precipitación para el modelamiento de propagación	Tasa de probabilidad de exceso de lluvia (%) (tasa de lluvia)	1.5° × 1.5°	ESARAINxxx.TXT; xxx = PR6, MC, MS
P.1511	Topografía para modelos de propagación Tierra a espacio	Altitud topográfica (a.m.s.l.) (km) (Altitud)	0.5° × 0.5°	TOPODOT5.TXT
P.836	Vapor de agua: densidad de la superficie y contenido total de columnas	Probabilidad de exceso de columnas de vapor de agua (%) (IWVC)	1.5° × 1.5°	ESAWVCxx.TXT; xx = 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50
P.836.	Vapor de agua: densidad de la superficie y contenido total de columnas	Probabilidad de exceso de vapor de agua en la superficie (%) (Rho)	1.5° × 1.5°	SURF_WVxx.TXT; xx = 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50
P.1510	Temperatura de superficie anual media	Temperatura media anual de la superficie (temperatura)	1.5° × 1.5°	ESATEMP.TXT
P.453	Índice de refracción de radio: su fórmula y datos de refracción	Valor medio del término de humedad de refracción (Nwet)	1.5° × 1.5°	ESANWET.TXT
P.840	Atenuación debido a las nubes y la niebla	Probabilidad de exceso de columnas de nubes de agua líquida (%) (CLW)	1.5° × 1.5°	WREDPxx.TXT; xx = 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50

IWVC: contenido integrado de vapor de agua.
a.m.s.l: sobre el nivel del mar.-

FIGURA 15

Ruido radioeléctrico externo: frecuencias de 10 kHz a 100 MHz

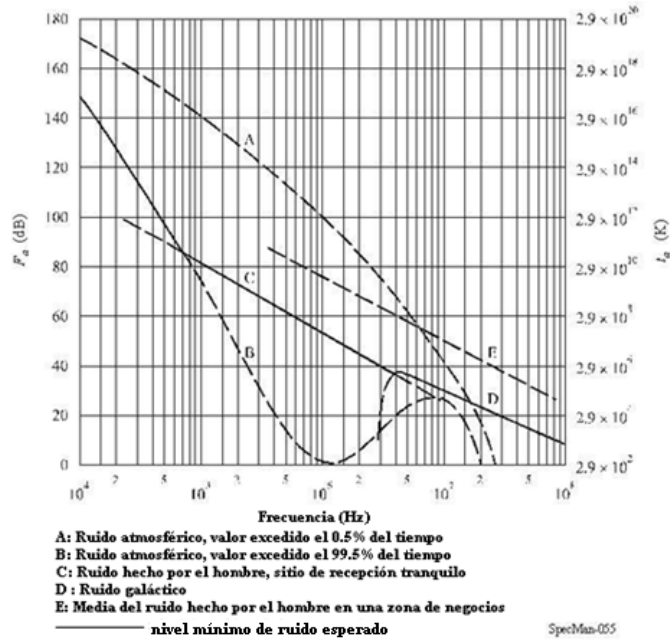
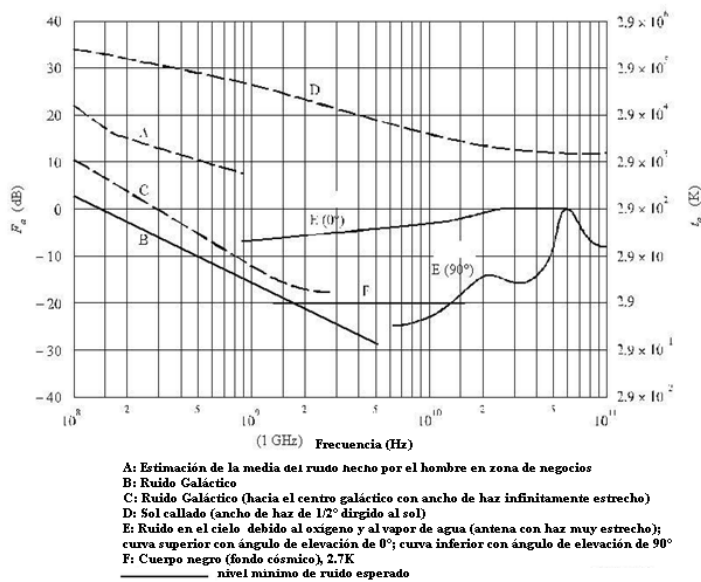


FIGURA 16

Ruido de radio externo: frecuencias de 100 MHz a 100 GHz



Cabe señalar que muchos de los ruidos externos son de naturaleza impulsiva. El rendimiento depende no solo de la potencia del ruido de interferencia, sino también de las características estadísticas detalladas del ruido de interferencia.

Las instalaciones de generación de energía eléctrica y las estaciones de distribución pueden ser una fuente de grave interferencia a las radiocomunicaciones, y el mantenimiento preventivo regular es necesario para reducir el ruido de interferencia a los servicios de radiocomunicaciones.

Cabe señalar especialmente que, incluso los más “humildes” dispositivos de generación de energía, como las turbinas de viento (que se han vuelto cada vez más populares en el mundo moderno), fueron reportadas recientemente por generar niveles residuales de interferencias de radio, especialmente cuando se encuentran en el camino de enlaces de microondas, a través de la acción reflexiva de sus hojas. Por lo tanto, cuando la administración encuentra informes de interferencia que aparecen como de bajo nivel, de naturaleza estocástica, que no contiene señales moduladas, se deben evaluar cuidadosamente las fuentes de ruido ambiental (industrial) externo.

1.3.2 Ruido térmico del receptor

El ruido térmico del receptor es una característica fundamental de los componentes físicos de la parte delantera de cada receptor, tales como amplificadores de bajo ruido, que suelen utilizarse en las primeras etapas de los receptores. En él se describe el nivel de ruido de fondo, por debajo del cual todas las señales de entrada no pueden ser identificadas por el receptor (a pesar de que podrían causar algunos disturbios), ya que estarían por debajo de su propio ruido “interno”. El ruido térmico es a menudo visto como un umbral de sensibilidad equivalente inherente a un receptor. Por lo tanto, se convierte en una parte de las ecuaciones que describen las relaciones entre las señales útiles y de interferencia, tales como la relación señal a ruido (S/N), relación señal a ruido a interferencia (S/(N + I)), ruido a interferencia (N/I). Los medios y modos de aplicación de ruido térmico y estas relaciones serán evidentes en la última parte de este manual. La fórmula fundamental del ruido térmico se da en la Ecuación (6):

$$N_{th} = k \cdot T_s \cdot BW_{rx} \cdot NF, \quad (6)$$

Donde:

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ - constante de Boltzmann}$$

T_s : temperatura de sistema, grados Kelvin, típicamente $T = 293 \dots 300$ K, es decir, corresponde a la temperatura ambiente operacional de $20 \dots 27^\circ$ C

BW_{rx} : ancho de banda del receptor, Hz

NF : factor de ruido del receptor, es decir, cuánto ruido térmico fundamental (molecular) se multiplica por las imperfecciones de los componentes del receptor o su diseño, por ejemplo, rango típico $F = 2-4$ veces, lo que corresponde a 3-6 dB en la escala logarítmica

Una fórmula práctica que permite calcular el ruido térmico a escala logarítmica, en unidades de dBm, para una temperatura ambiente estándar, es la siguiente:

$$N_{th}[dBm] = -113.83 + 10.1g(BW_{Rx}[MHz]) + NF[dB] \quad (7)$$

Algunas estaciones de recepción sofisticadas, como estaciones terrestres de comunicación por satélite o estaciones de radioastronomía, pueden tener refrigeración especial de los extremos de los cabezales de recepción por debajo de los niveles de temperatura ambiente. En estos casos, los parámetros del receptor se describen a menudo por su “temperatura del sistema” y el ruido térmico se puede calcular utilizando otra fórmula práctica como:

$$N[dBm] = -138.6 + 10.1g(BW_{Rx}[MHz]) + 10 \lg(T_s[^\circ K]) \quad (8)$$

Nótese que las ecuaciones tanto (7) como (8) se refieren a los mismos parámetros que se describen en la ecuación original (6). Exceptuando el uso de unidades prácticas, tal como se especifica en las fórmulas.

En conclusión, el nivel de ruido del receptor es un valor fundamental que está vinculado a sus características de diseño propias. Por lo tanto, en la ingeniería del espectro, el ruido del receptor se establece a menudo como una constante para un tipo de receptor determinado al comienzo de los estudios y así se le refiere de ahí en adelante.

1.4 Métricas del uso eficiente del espectro

Hay varias maneras en las que las mediciones de la utilización del espectro pueden ser utilizadas por una administración [1, 33]. Estas incluyen:

- Mapas de utilización del espectro mostrando las zonas de congestión, donde las normas restrictivas y coordinación intensiva son necesarias para asegurar el uso eficiente del espectro.
- Comparaciones cuantitativas de la intensidad de la utilización de diferentes bandas en cada región geográfica, ayudando a la planificación del espectro para las atribuciones de servicios específicos.
- Calcular periódicamente el uso del espectro en cada banda para revelar las tendencias que se pueden utilizar para la planificación estratégica.

Los principios fundamentales y las políticas para el empleo y utilización del espectro y los parámetros de eficiencia se encuentran en el Título VIII del Manual Nacional de Gestión del Espectro Radioeléctrico. En este Título II solo se presentan los indicadores técnicos de la utilización y eficiencia del espectro pertinentes a las consideraciones de ingeniería del espectro.

Cualquier sistema de radio funciona a una frecuencia determinada dentro de un ancho de banda en particular, en un lugar y momento determinados. En frecuencias suficientemente cercanas a la frecuencia de operación, otros sistemas de radio no pueden operar sin causar interferencia perjudicial, o sin recibir interferencia. Sin embargo, el rango de un sistema de radio no es infinito, más allá de cierta distancia, otro sistema de radio puede funcionar en la misma frecuencia sin causar interferencias perjudiciales o recibirlas. Además, algunos sistemas de radio no se encienden todo el tiempo. Ya que estos no van a causar ni a recibir interferencia cuando no están siendo utilizados, el espectro está disponible para ser utilizado por otro sistema. Por lo tanto, no hay un factor de tiempo asociado con el transmisor. Además de la separación geográfica y temporal, hay otros varios medios para evitar la interferencia como veremos a continuación.

Así que, fundamentalmente, el factor de utilización del espectro puede ser definido como el producto del ancho de banda de frecuencia, el espacio geométrico (geográfico) y el tiempo denegado a otros usuarios potenciales. De acuerdo con la Recomendación UIT-R SM.1046 [34] la medición es:

$$U = B \cdot S \cdot T \quad (9)$$

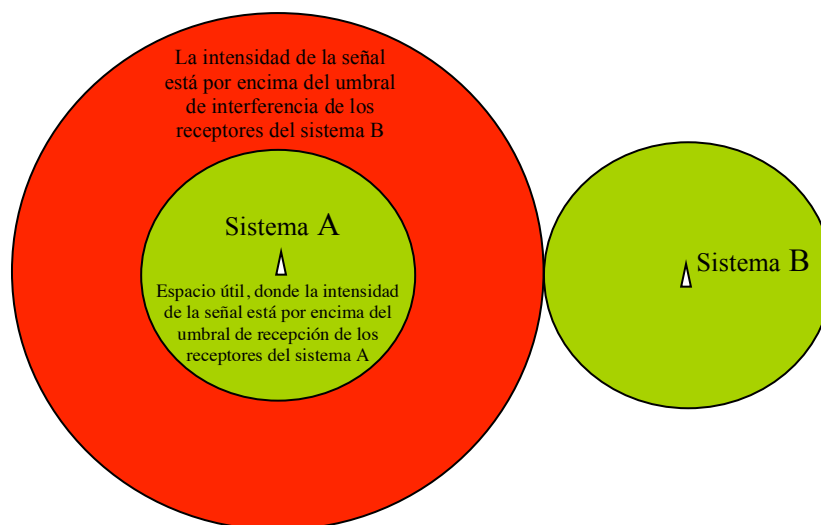
Donde:

- U*: factor de utilización del espectro, es decir, la cantidad de espacio utilizado del espectro ($\text{Hz} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}$)
- B*: ancho de banda de frecuencia
- S*: espacio geométrico (deseado y denegado)
- T*: tiempo

Sin embargo, puede ser difícil asignar valores prácticos a algunos de los factores que se utilizan en esta ecuación, en particular al parámetro S . Debido a que la extensión de espacio geométrico utilizado por un sistema de radio (espacio deseado), o denegado a otros sistemas (espacio denegado), como se ilustra en la Figura 17, no es fácil de definir universalmente, es decir, a menos que una conexión se realizara para un caso particular con parámetros técnicos muy específicos de los sistemas deseados y de los sistemas del afectado. Si estos sistemas fueran cambiados (por ejemplo, equipos nuevos que tendrían potencia de transmisión diferentes y/o diferentes parámetros de sensibilidad del receptor), sería necesario recalcular los parámetros de utilización del espectro.

FIGURA 17

Ilustración del concepto de espacio útil/denegado en un sistema de radio



De acuerdo con la definición en la Recomendación SM.1046 [34], la eficiencia del uso del espectro (SUE, por sus siglas en inglés), indicador de un sistema de radiocomunicaciones, se puede expresar por un criterio compuesto de:

$$SUE = \{M, U\} = \{M, B \cdot S \cdot T\} \quad (10)$$

Donde:

- M : efecto útil obtenido mediante la utilización del sistema de comunicación en cuestión
- U : factor de utilización del espectro para ese sistema

Más específicamente, el SUE se puede expresar como la relación entre el efecto útil y el factor de utilización del espectro:

$$SUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} \quad (11)$$

El efecto útil M se puede expresar de varias maneras, por ejemplo:

- Cantidad de tráfico transportado por el sistema de radiocomunicaciones (Erlangs o Mb).
- Capacidad ofrecida, tal como el número de canales de comunicación disponibles.
- Número de usuarios atendidos por el sistema.

Como ejemplo práctico, consideremos el caso del espectro utilizado por los sistemas públicos de telefonía móvil celular. En teoría, los sistemas celulares no tienen límite de capacidad, toda vez que cualquier crecimiento en el número de suscriptores puede ser compensado por el crecimiento proporcional del número de celdas desplegadas. Sin embargo, esa expansión, a través del aumento continuo en la densidad de estaciones base dentro de la red, es bastante costoso, lento y propenso a dificultades logísticas (por ejemplo, la oposición de los municipios y los ciudadanos por el creciente número de antenas de estaciones base y torres).

Por lo tanto, los operadores a menudo piden a la administración espectro adicional, que podría ayudar a compensar la sobrecarga por el crecimiento en el número de suscriptores, al ofrecer más canales de radio. En ese momento, la administración puede desear evaluar los SUE de los diferentes operadores y utilizar esta información como un factor para decidir a qué operador se le puede asignar espectro adicional y en qué cantidad.

En el caso de la red pública de telefonía móvil celular, su compuesto nacional SUE se puede expresar como:

$$SUE = \frac{total_subscribers}{Spectrum_available \cdot Coverage_area} = \frac{subscribers}{MHz \cdot km^2} \quad (12)$$

En tal caso, es obvio que el operador cuya red muestra un mayor SUE demostrará que ha hecho un mejor uso de su espectro disponible. Nótese, sin embargo, que la comparación relativa de SUE solo podría tener sentido si las áreas de cobertura de las redes de comparación son del mismo orden, a fin de evitar la sobrevaloración excesiva de redes que cubren solo uno o pocos lugares.

Información más detallada sobre la definición y el cálculo de SUE, así como ejemplos de su aplicación, se pueden encontrar en la Recomendación UIT-R. SM.1046 [34].

1.5 Unidades y su conversión

La mayoría de las matemáticas utilizadas en la ingeniería del espectro y las radiocomunicaciones en general se basan en cálculos logarítmicos. El uso de unidades logarítmicas se ha vuelto convencional en radiocomunicaciones debido a:

- La facilidad para reemplazar multiplicaciones y divisiones complejas por sumas y restas, lo que permite hacer cálculos básicos mentalmente o mediante el uso de simples calculadoras.
- La conveniencia de representar números muy pequeños (por ejemplo, de sensibilidad de los receptores, debilidad de las señales recibidas) y muy grandes (la pérdida de trayectoria durante la propagación de las ondas de radio, la ganancia de la antena en frecuencias de microondas) en números reales de valor moderado, que podrían ser comprendidos en forma intuitiva y utilizados para cálculos rápidos.

Por lo tanto, la conversión primaria a tener en cuenta es la conversión de números a escala lineal a decibeles:

$$U [\text{dB}] = 10 \cdot \log_{10} (u) = 10 \cdot \lg (u) \text{ – para términos de potencia} \quad (13)$$

$$V [\text{dB}] = 20 \cdot \log_{10} (u) = 20 \cdot \lg (u) \text{ – para los términos de voltaje/corriente}$$

Nótese que a pesar de que la Ecuación (13) ofrece dos formas para calcular las unidades de decibeles, en la ingeniería del espectro radioeléctrico la mayoría de los cálculos trabajan con unidades de potencia (por ejemplo, vatios, milivatios), por lo tanto, a menos que específicamente se requiera lo contrario, la versión con la multiplicación por 10 se debe utilizar en la mayoría de los casos tratados en este Título II.

Así, la potencia del transmisor expresada en unidades de decibeles sería:

$$P [\text{dBW}] = 10 \cdot \lg (p [\text{W}]) \quad (14)$$

Nótese que en este caso la unidad logarítmica de la energía se denota como dBW, lo que significa “decibel-Watt”. Muy a menudo dBW es demasiado grande, entonces se utiliza una unidad más pequeña, “decibel-milliWatt”:

$$P [\text{dBm}] = 10 \cdot \lg (p [\text{mW}]) = 10 \cdot \lg (1000 \cdot p [\text{W}]) = P [\text{dBW}] + 30 \quad (15)$$

Por ejemplo, la energía del transmisor de 5 vatios se puede expresar como 7 dBW o 37 dBm. En el lado receptor, la sensibilidad del receptor puede ser también expresada como

potencia de umbral de la señal recibida, por lo general expresada en dBm. Un ejemplo de umbral de sensibilidad del receptor podría ser un valor de -105 dBm, lo que, si se expresa en escala lineal, tendría que ser anotado como $3.16 \cdot 10^{-11}$ mW. Este ejemplo ilustra muy bien cómo el pequeño número engorroso puede ser representado por el número logarítmico conveniente con signo negativo.

Es importante señalar que las unidades dBW y dBm representan “valores relativos” (es decir, valores físicos auténticos con dimensión propia) en comparación con las unidades de decibeles que representan solo la “relación de transformación”. Esto último podría ser aplicado con signo positivo cuando ocurre la amplificación (ganancia) o con signo negativo cuando se suprime la señal (pérdida). Así, por ejemplo, la pérdida de trayectoria experimentada por las ondas de radio durante el paso entre el transmisor y el receptor se expresa en unidades de dB “puros”. Como ejemplo, están las expresiones de la pérdida de espacio libre en la Ecuación (1) y la ecuación en el modelo de pérdida de trayectoria Okumura-Hata (3), y luego se aplica al cálculo de la señal recibida con signo negativo, ver Ecuación (4).

Sin embargo, de manera algo confusa, hay otro tipo de unidades de decibeles de naturaleza relacional que tienen ciertos literales en su denominación. Se trata de las unidades utilizadas para denotar la ganancia de la antena, y en este caso la denominación literal significa el tipo de antena de referencia para la que se expresa la ganancia. La unidad de ganancia de antena más utilizada es “dBi”, lo que significa amplificación de la antena en comparación con la radiación uniforme de radiación de antena ideal de radiación isótropa (un solo punto):

$$G_a \text{ [dBi]} = 10 \cdot \lg(K_{ant}) \quad (16)$$

Donde:

K_{ant} : número de veces que la señal radiada por la antena (en la dirección de la máxima radiación) es amplificada en comparación con la antena de radiación isotrópica hipotética (es decir, la antena que tiene amplificación de 1 en todas las direcciones)


A veces se encuentran referencias de “dBd”, esto denota ganancia de la antena con respecto al dipolo vertical de onda media estándar. En otras palabras, si se dice que la antena tiene una ganancia de 3 dBd, esto significa que la antena amplifica la señal radiada dos veces más fuerte que la antena dipolo.

Es de señalar que $G_a \text{ [dBi]} = G_a \text{ [dBd]} + 2,2 \text{ dB}$ permite una fácil conversión entre unidades dBd y dBi, cuando es necesario.

Siempre que se realice la suma de los diferentes parámetros de decibeles expresados, por lo general debe haber un solo parámetro “absoluto”, como potencia, y los demás deben ser solo parámetros relacionales, como las diversas pérdidas o ganancias.


Por ejemplo, consideremos la expresión básica del cálculo de un enlace de radio determinado por la Ecuación (4), que se refiere a un transmisor de potencia con parámetro absoluto para la potencia del transmisor, que se ajusta mediante la adición o sustracción de tres parámetros relacionales, dos ganancias de antena y la pérdida de la trayectoria. El resultado da un nuevo parámetro absoluto (la potencia de la señal recibida), que tendrá la misma dimensión que la potencia del transmisor utilizado en la fórmula (es decir, dBW o dBm), tal como:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L =$$

$$33 \text{ dBm} + 7 \text{ dBi} + 2 \text{ dBi} - 150 \text{ dB} = -108 \text{ dBm}$$



o

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L =$$


$$3 \text{ dBW} + 7 \text{ dBi} + 2 \text{ dBi} - 150 \text{ dB} = -138 \text{ dBW}$$


En otros casos puede haber dos parámetros absolutos de *la misma clase y dimensión* dentro de una expresión, uno de ellos se utiliza con signo negativo, lo que produce como resultado un valor “dB” sin dimensión, que muestra la relación de esos dos parámetros absolutos originales. Esto se ilustra en el siguiente ejemplo que muestra el cálculo de la pérdida de acoplamiento mínima requerida:

$$L_{min} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - P_{sens} + S/O_{objetivo} =$$

$$33 \text{ dBm} + 7 \text{ dBi} + 2 \text{ dBi} - (-105) \text{ dBm} + 12 \text{ dB} = 159 \text{ dB}$$


Nota: dos valores absolutos de la misma dimensión se “cancelan” a sí mismos y producen resultados de relación adimensionales.



En los demás casos, cuando se necesita sumar más de dos parámetros absolutos (por ejemplo, en caso de la suma de potencias de interferencia), sus valores deben ser convertidos a escala lineal antes de que se puedan resumir, como puede verse, por ejemplo, en la Ecuación (21), en la sección 2.1.

Nótese que los cálculos anteriores se presentan en este apartado solo con el fin de mostrar la forma en que las diferentes unidades de decibeles deben ser tratadas en los cálculos, sin perjuicio del significado real o el contenido de las fórmulas que se han presentado y discutido en diferentes capítulos de este título.

Además de la comprensión de las unidades esenciales mencionadas, los profesionales de ingeniería del espectro a veces tienen que realizar conversiones entre distintos tipos de unidades. A continuación se muestra un resumen de algunas fórmulas de conversión útiles, que se reproducen a partir de [11] y se basan en los fundamentos de la propagación en espacio libre:

- Intensidad del campo para una potencia transmitida isotrópicamente:

$$E = P_t - 20 \log d + 74.8 \quad (17)$$

- Intensidad recibida isotrópicamente para una intensidad del campo determinada:

$$P_r = E - 20 \log f - 167.2 \quad (18)$$

- Densidad del flujo de potencia de una intensidad del campo determinada:

$$S = E - 145.8 \quad (19)$$

Donde:

P_t : potencia transmitida isotrópicamente, dBW

P_r : potencia recibida isotrópicamente, dBW

E : intensidad del campo eléctrica, dB (mV/m)

f : frecuencia, GHz

d : longitud de la trayectoria de radio, km

S : densidad del flujo de potencia, dB (W/m²)

1.6 Sistema automatizado de gestión del espectro

Las técnicas asistidas por computador se han vuelto de uso común para las autoridades reguladoras nacionales, con el fin de ayudarles a hacer frente a la gestión del espectro, desde mantenimiento de registros y procesamiento, para realizar los estudios analíticos necesarios.

Por otra parte, los avances tecnológicos que llevaron al desarrollo de computadores personales baratos, pero potentes, han permitido que estas técnicas asistidas por computador se desplieguen en toda la organización como una solución práctica y rentable. El sistema asistido por computador que se utiliza para ayudar en la realización de todo tipo de tareas de gestión del espectro se llama sistema automatizado de gestión del espectro (ASMS, por sus siglas en inglés).

Si se implementa ASMS, este ofrece grandes beneficios a la gestión, ayudando a llevar a cabo las siguientes tareas y funciones [35]:

- Verificación del cumplimiento de las solicitudes de asignación de frecuencias con el cuadro nacional e internacional de atribución de frecuencias y sus notas correspondientes.
- Verificación de que un conjunto de equipos (transmisor, receptor y antena) propuestos para ser utilizados en un enlace de radio determinado hayan sido previamente presentados y aprobados durante el proceso de certificación correspondiente o cumplir otras normas de acuerdos de reconocimiento mutuo.
- Una respuesta más precisa y optimizada a las solicitudes de asignación de frecuencias, a través de la selección de los canales adecuados, teniendo en cuenta detalles tales como las características del terreno.
- Tratamiento adecuado de los datos de monitoreo de radio, es decir, la integración y referencia cruzada de la gestión del espectro y el funcionamiento del radio monitoreo.
- El establecimiento de una documentación más rápida y amplia, la facturación oportuna para los clientes que usan el espectro.
- Preparación más exacta y presentación electrónica de formularios de notificación que se enviarán a la UIT, teniendo en cuenta el proceso de validación automático de datos que pueden ser implementados.
- Posibilidad de intercambio electrónico de datos entre administraciones o entre una administración y la UIT.
- Una mayor transparencia y disponibilidad de datos para los usuarios dentro y fuera de la gestión.

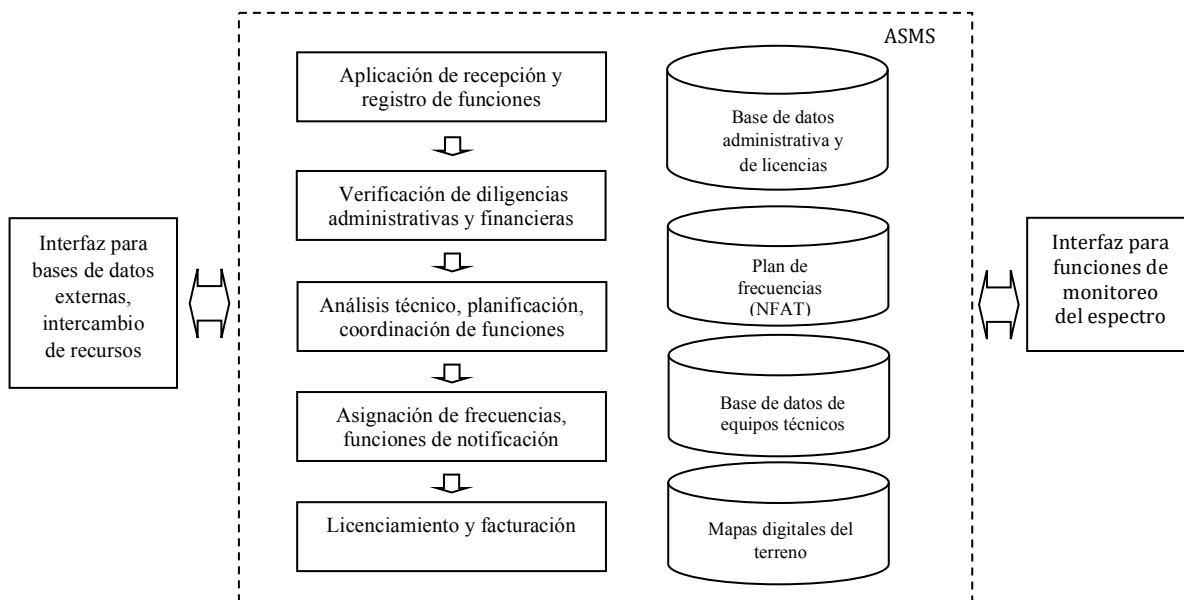
En general, la estructura y funcionalidad de cualquier ASMS deben corresponder a la estructura general del flujo de trabajo de la gestión del espectro, como se muestra en la Figura 18.

Adicionalmente, como puede verse en esa misma figura, cualquier ASMS tendrá lo siguiente:

- Un conjunto de módulos funcionales (cada uno de ellos podría representar un subconjunto de módulos especializados, por ejemplo, módulos separados de asignación de frecuencias para diferentes servicios de radiocomunicaciones).
- Un conjunto de bases de datos especializadas, lo que podría implementarse físicamente en las tablas de datos por separado o a través de un único sistema complejo de bases de datos

FIGURA 18

Estructura generalizada del sistema automatizado de gestión del espectro



Muy a menudo, ASMS es implementado a gran escala como un sistema de computador de oficina basado en un servidor, al que luego se puede acceder desde las estaciones de trabajo de cada usuario, cada uno de ellos teniendo la posibilidad de acceder a un determinado subconjunto de funciones y realizar el registro de datos y mantenimiento a diferentes niveles de acceso, por razones de seguridad y optimización del trabajo.

Más información sobre la contratación, la composición y el uso del ASMS se puede encontrar en:

- Manual de la UIT sobre Técnicas Asistidas por Computador para la Gestión del Espectro [35].
- Anexos 1-7 del Título VII del manual de la UIT sobre gestión nacional del espectro [1].
- Recomendación UIT-R SM.1048 [101].
- Recomendación UIT-R SM.1370 [102].
- En relación con la integración de las funciones de control automáticas al interior del ASMS, la Recomendación UIT-R SM.1537 [103].



CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA

Este capítulo describe los principios fundamentales para el análisis del potencial de interferencia; comienza con una definición de distintos modos de interferencia, para luego describir los principios básicos para su modelamiento.

2.1 Principios generales

La utilización eficiente del espectro depende del análisis efectivo de los parámetros ambientales y del sistema, por lo general de carácter estadístico, para reducir al mínimo la zona de interferencia. Ya que la interferencia reduce el rendimiento del sistema y la eficiencia del espectro, los parámetros técnicos de diseño y especificación de sistemas de radio licenciados, para operar en un determinado servicio y banda de frecuencias, se debe considerar para que los licenciatarios no estén sujetos a la interferencia ni tampoco la causen a otros usuarios.

Los parámetros importantes que deben ser considerados para evitar interferencias incluyen definiciones de frecuencias centrales, canalización de tramas, estabilidad de frecuencia, el tipo de emisión (análoga o digital y la modulación utilizada), el nivel de potencia del transmisor o de las portadoras y la potencia máxima radiada isotrópicamente (p.i.r.e) por canal, en un ancho de banda especificado, así como los niveles de emisiones fuera del ancho de banda. Las características de la antena, tales como la altura efectiva, directividad y patrón de radiación, polarización, relación de ganancia adelante/atrás, y el ángulo entre el

lóbulo principal y otros usuarios (interferido/sistemas interferentes), probablemente también deban ser considerados.

La señal deseada a la entrada del receptor es principalmente degradada por cuatro modos principales de intervención: el co-canal, el canal adyacente, la desensibilización, y la intermodulación. Los primeros tres tipos de interferencia pueden ser descritos por una ecuación general.

Básicamente, el nivel de interferencia en el receptor es una función de P_t , la potencia del transmisor interferente, G_t , la ganancia de la antena interferente en dirección del receptor (dBi), G_r , la ganancia de la antena del receptor en la dirección de la interferencia (dBi), $L_b(d)$, la pérdida de propagación por la distancia d entre el receptor y la interferencia, y el rechazo dependiente de la frecuencia (FDR, por sus siglas en inglés) (una función de $f \Delta$ - desplazamiento de frecuencia con respecto a la frecuencia central del receptor), y se expresa por:

$$I = P_t + G_t + G_r - L_b(d) - FDR(\Delta f) \quad (20)$$

Al FDR también se le llama selectividad del receptor o función de atenuación o, simplemente, máscara del filtro del receptor. Cabe señalar que la Ecuación (20) se puede utilizar para calcular el nivel de señal deseada, siempre que la pérdida de propagación sea calculada mediante un modelo de propagación adecuado.

Otra de las características generales relacionadas con la radio interferencia en un entorno de múltiples fuentes de interferencia, es que la potencia de interferencia total sea la suma de potencias individuales de interferencia:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_K \quad (21)$$

Cuando se utiliza la Ecuación (21) se debe tener cuidado de usar la conversión de unidades pertinente, según corresponda, es decir, si las potencias de interferencia se calculan en unidades de decibeles, deberán ser convertidas a escala lineal (watts) antes de que se puedan sumar directamente como en la Ecuación (21).

Las siguientes secciones ofrecen una breve descripción de los principales tipos de interferencias que tienen que ser considerados en los estudios de ingeniería del espectro.

2.2 Interferencia co-canal

La interferencia co-canal es causada por la presencia de señales deseadas e interferentes que operan en el mismo canal en el ancho de banda de funcionamiento del receptor (a

veces la interferencia del filtro pasa banda en la frecuencia intermedia (IF) del amplificador puede ser relevante).

Ya que en este asunto, tanto la señal deseada como las señales interferentes se superponen, el FDR (Δf) de la Ecuación (20) es igual a cero, y la señal interferente no puede ser filtrada por los medios normales.

El nivel de interferencia co-canal depende de las características de rechazo del co-canal del receptor y las características de emisión del transmisor.

En los diferentes servicios de radio, el cálculo de la interferencia co-canal es diferente. En el servicio móvil terrestre en bandas VHF/UHF, las estaciones co-canal pueden necesitar estar separadas una de la otra por una distancia tan grande, en el peor de los casos, hasta de 120 kilómetros. Esta distancia varía según las condiciones del terreno y frecuencias de operación. Para los servicios de radiodifusión, esta distancia de separación podría ser aún mayor. En el servicio fijo, la directividad de la antena juega un papel importante en el cálculo de los niveles de interferencia co-canal. Esto es especialmente importante cuando las estaciones terrestres y estaciones terrenas operan en la misma banda de frecuencia.

Una excepción notable para distancias de separación co-canal usualmente grandes podría cumplirse a la hora de considerar el despliegue de sistemas de radio móviles celulares. Estos sistemas están especialmente diseñados para hacer frente a las distancias de separación mucho más pequeñas, permitiendo lo que se llama “la reutilización de frecuencias” alrededor de cada segunda celda para sistemas FDMA/TDMA o cada celda para los sistemas CDMA. Sin embargo, por lo general, los operadores de estos sistemas que manejan la frecuencia reutilizan patrones dentro de su sistema, mientras se mantienen dentro de los límites del bloque de canales que les fueron asignados por la administración.

Otro caso especial de interferencia co-canal son los casos de compartición de banda con despliegue no coordinado de terminales ubicuas de radiocomunicaciones o dispositivos de consumo inalámbricos, a los que suele denominarse dispositivos de corto alcance (SRD, por sus siglas en inglés). En estas situaciones, tanto el número como la ubicación de posibles fuentes de interferencia no pueden ser conocidos, por ejemplo, cuando la radiación interferente es generada por equipos domésticos.

Ver la sección 7.1 para una discusión más detallada sobre los temas de la separación frecuencia-distancia.

2.3 Interferencia en el canal adyacente

La interferencia en canal adyacente puede ocurrir debido a una señal interferente que opera en el canal adyacente. El nivel de interferencia de canal adyacente depende de las características de rechazo (filtrado) del receptor.

Los efectos básicos de la interferencia de canal adyacente son el resultado de la interacción entre las señales deseadas, la interferencia y las características del receptor para varias separaciones de frecuencia. Estos pueden ser expresados en términos de separación frecuencia-distancia, el requerimiento FDR (filtro de atenuación, parámetro de selectividad del receptor) o la relación de protección de canal adyacente específica del sistema. La separación frecuencia-distancia es la distancia de separación mínima que se requiere entre un receptor y una interferencia en función de la diferencia entre sus frecuencias ajustadas (ver sección 7.1 para un tratamiento más detallado de este concepto). La relación de protección es una relación mínima requerida entre la señal deseada y no deseada en la entrada del receptor que, por lo general, se expresa en dB cuando las portadoras de los transmisores deseados y no deseados tienen la misma frecuencia, o una diferencia de frecuencia de Δf .

En cualquier caso, cuando se considera la interferencia de canal adyacente, su nivel depende del valor de FDR (Δf) en la Ecuación (20). Cuando se especifica un valor máximo I_M de potencia interferente aceptable para un receptor, el funcionamiento del receptor solo es aceptable si:

$$L_b(d) + FDR(\Delta f) \geq P_t + G_t + G_r - I_M \quad (22)$$

Una curva ilustrativa de las diversas combinaciones de las separaciones y el área de desempeño aceptable del receptor se muestra a continuación en la Figura 19 [1]. La ecuación que describe la curva A en esta figura es:

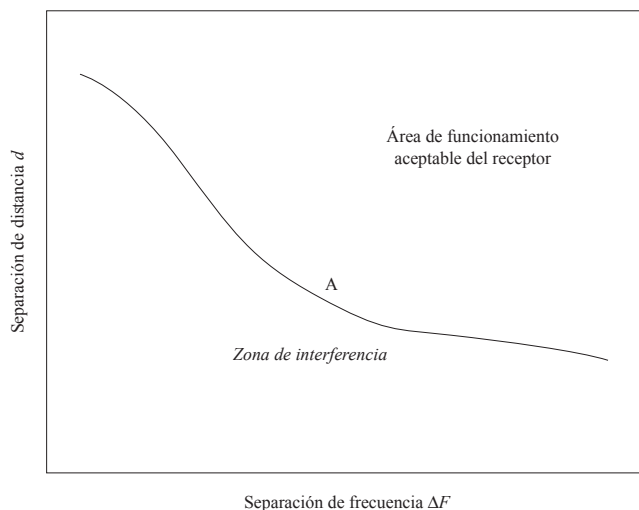
$$L_b(d) + FDR(\Delta f) = \xi \quad (23)$$

En la Figura 19, el área sobre de la curva es la región de funcionamiento aceptable del receptor. Debajo de la curva está la región de funcionamiento no aceptable del receptor.

Ver la sección 7.1 para una discusión más detallada del tema de separación frecuencia-distancia.

FIGURA 19

Ejemplo de la curva de separación frecuencia-distancia



2.4 Desensibilización (bloqueo)

La desensibilización, también llamada bloqueo, es un caso especial de interferencia de canal adyacente, que puede ocurrir cuando un transmisor interferente opera en estrecha proximidad física a un receptor. Si la señal interferente es lo suficientemente fuerte, el receptor puede ser conducido a saturación.

El nivel de desensibilización depende de la capacidad del receptor para resistir un impacto tan fuerte, que suele ser descrito por un bloqueo de atenuación/rechazo de la función, el cual, como el FDR discutido anteriormente, depende de la separación de frecuencia entre la frecuencia central del receptor afectado y la frecuencia de la señal interferente.

La situación que representa las relaciones de la señal en el momento en que se produce la desensibilización se muestra en la Figura 20. En esta figura, el factor de supresión de la señal $\alpha_{vr}(\Delta f)$ describe el impacto de la función de atenuación de bloqueo del receptor afectado.

Por lo general, las especificaciones del sistema señalarán la atenuación de bloqueo como una función dependiente de la frecuencia o algunas veces como un único valor constante, lo cual debe ser utilizado entonces independientemente de la frecuencia de desplazamiento entre los sistemas interferentes y los afectados.

Los métodos más comunes que se utilizan para evitar la interferencia de bloqueo incluyen la instalación de filtros (es decir, la mejora en la capacidad de bloqueo de atenuación

El impacto de la interferencia de intermodulación depende de la capacidad del receptor para filtrar las señales interferentes de intermodulación, lo cual suele ser descrito por una función de rechazo de intermodulación del receptor.

Aunque podría haber un número ilimitado de combinaciones de frecuencias para la formación de una señal IM descrito como “orden de la señal IM”, es decir, el número total de réplicas de la señal de entrada que participan en la formación de la señal de intermodulación (IM), por lo general solo son de mayor relevancia los armónicos de orden impar, pues su resultado de frecuencia generalmente cae en las proximidades de las frecuencias originales (se acomoda en la banda de paso de la etapa de frecuencia intermedia del receptor). De estas señales de intermodulación de orden impar, la más fuerte (y, por lo tanto, la más peligrosa en términos de interferencia potencial) es la señal IM de tercer orden (IM3), donde dos señales con frecuencias f_1 y f_2 se combinan para producir un derivado de IM con frecuencia:

$$f_{IM} = k_1 \cdot f_1 \pm k_2 \cdot f_2, \text{ Donde } k_1 + k_2 = 3 \text{ (entonces, el tercer orden)} \quad (24)$$

Esto significaría que todo el rango de combinaciones a considerar entre dos señales de entrada sería:

$$\begin{aligned} f_{IM1/2} &= 2 \cdot f_1 + f_2 \\ f_{IM1/2} &= 2 \cdot f_1 - f_2 \\ f_{IM2/1} &= 2 \cdot f_2 + f_1 \\ f_{IM2/1} &= 2 \cdot f_2 - f_1 \end{aligned} \quad (25)$$

El nivel de potencia interferente de intermodulación de interferencia de tercer orden de las dos señales se da en la siguiente fórmula [36]:

$$P_{ino} = 2(P_1 - \beta_1) + (P_2 - \beta_2) - K_{2,1} \quad (26)$$

Donde:

- P_1 y P_2 : potencias de las señales interferentes en las frecuencias f_1 y f_2 , respectivamente
- P_{ino} : potencia del producto de intermodulación de tercer orden en la frecuencia f_0 ($f_0 = 2f_1 - f_2$)

- $K_{2,1}$: el rechazo de intermodulación del receptor, se puede calcular a partir de mediciones de intermodulación de tercer orden o a partir de las especificaciones del equipo
- β_1 y β_2 : los parámetros de selectividad de frecuencia RF en las desviaciones de frecuencia Δf_1 y Δf_2 de la frecuencia de operación f_0 , respectivamente

Los valores de β_1 y β_2 , por ejemplo, se pueden obtener de la ecuación para calcular la atenuación de una señal en una frecuencia fuera de sintonía:

$$\beta(\Delta f) = 60 \log \left[1 + \left(\frac{2 \Delta f}{B_{RF}} \right)^2 \right] \quad (27)$$

Donde B_{RF} es el ancho de banda RF del receptor.

2.6 Otros tipos de interferencia

2.6.1 Emisiones espurias

Las emisiones espurias son la categoría más amplia para describir las emisiones no deseadas de cierto tipo. La definición dada en el No. 1.145 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT es la siguiente:

Emisión espuria: Emisión en una frecuencia o frecuencias, que está fuera del ancho de banda necesario y cuyo nivel puede reducirse sin afectar la transmisión de la información correspondiente. Las emisiones espurias incluyen emisiones armónicas, emisiones parásitas, los productos de intermodulación y los productos de conversión de frecuencia, pero excluyen las emisiones fuera de banda.

El dominio espurio consiste, generalmente, en frecuencias separadas del centro de frecuencia de la emisión en un 250% o más del ancho de banda necesario de la emisión. Sin embargo, esta separación de frecuencias puede depender del tipo de modulación utilizado, la velocidad máxima en el caso de la modulación digital, el tipo de transmisor y los factores de coordinación de frecuencias.

Los límites generales de las emisiones espurias se dan en el Apéndice 3 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT.

El límite práctico entre las emisiones fuera de banda y las emisiones espurias se determina con referencia a las definiciones contenidas en la Recomendación UIT-R SM.328 [37] y los límites reales de las emisiones espurias se dan en la Recomendación UIT-R SM.329 [38].

Por lo tanto, el impacto de las emisiones espurias es el mismo que la interferencia de canal adyacente, excepto que en este caso el nivel de emisiones interferentes no deseadas se determina con respecto a los parámetros de filtrado del transmisor interferente, para una separación de frecuencia dada entre el transmisor interferente y el receptor afectado.

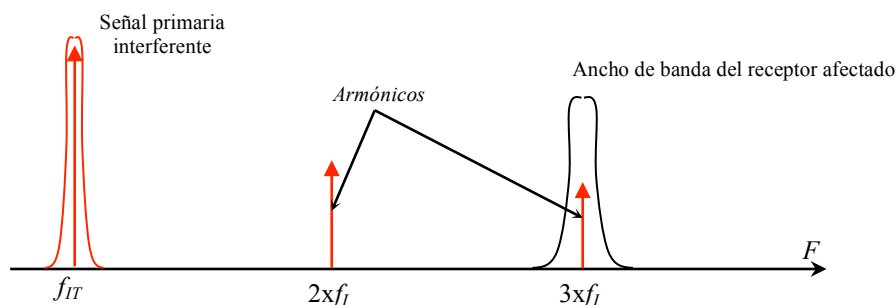
Generalmente, las emisiones en el dominio espurio son consideradas al momento de decidir sobre el equipo que permite utilizar una determinada banda de frecuencias, y si se consideran seguras para colocar el equipo en la banda dada, normalmente las emisiones en el dominio espurio no tienen que ser consideradas en cada caso de asignación de frecuencias. Sin embargo, en algunos casos puede haber un aumento de emisiones espurias, por ejemplo, debido al mal funcionamiento del equipo, y podrían convertirse luego en fuente de interferencia local.

2.6.2 Armónicos

Los armónicos son uno de los ejemplos más conocidos de emisiones espurias. Cuando el radio transmisor tiene poco filtrado de señal de salida, puede estar emitiendo no solo la señal modulada en la frecuencia de operación principal, sino también sus armónicos, es decir, las réplicas espejo de la señal original traducidas debido a la no linealidad de las fases de salida del amplificador del transmisor a frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia original de interferencia, ver la Figura 21.

FIGURA 21

Interferencia a través de los armónicos



Sin embargo, este tipo de interferencia es bastante atípica para la mayoría de los ejemplos de transmisores de radiocomunicaciones, ya que se supone que tienen filtros de salida lo suficientemente buenos para el filtrado de armónicos. Por lo tanto, generalmente solo el equipo de fabricación casera (como equipos hechos por entusiastas de la radio o aficionados a la radio, o los equipos fabricados ilegalmente) puede ser manufacturado sin tener debidamente en cuenta el diseño apropiado de los módulos de RF y, por lo tanto, causar interferencias a través de los armónicos. Por lo tanto, los armónicos son considerados el resultado de un funcionamiento anormal de los equipos de radio y no se tienen en cuenta en la planificación de uso de frecuencias radioeléctricas. Sin embargo, los armónicos son a menudo descubiertos por los equipos de inspección de radio, como los causantes de la interferencia durante la investigación de las quejas de interferencia.

Un ejemplo proverbial de la interferencia de armónicos puede ser la interferencia de equipos de banda ciudadana sin licencia que operan en la banda de 27 MHz, a los receptores de radio alrededor de $27 \times 3 = 81$ MHz.

2.6.3 Emisiones parásitas

Las emisiones parásitas son otro subconjunto de emisiones espurias, es decir, las emisiones no deseadas que ocurren más allá del 250% del ancho de banda necesario del transmisor de la frecuencia de operación. Las emisiones parásitas son aquellas que son generadas por accidente en las frecuencias que son independientes de la portadora o la frecuencia característica de una emisión, y de las frecuencias de oscilaciones producto de la generación de la portadora o frecuencia característica. Por lo general, estas emisiones son el resultado de acoplamiento parásito en circuitos impresos mal diseñados de los transmisores.

Como tal, el nivel permitido de emisiones parásitas se rige por los límites generales establecidos para las emisiones espurias en la Recomendación UIT-R SM.329 [38].

2.6.4 Modulación cruzada

La modulación cruzada es un efecto, donde la señal deseada débil está teniendo modulación cruzada en la entrada del receptor, con señal local muy fuerte de tipo diferente. Un ejemplo típico podría ser el caso en el cual la recepción de la señal deseada de la estación remota de radio FM se ve afectada por una fuerte señal local de la amplitud modulada de onda de emisora de radio de onda media. En tal caso, ambas señales se pueden escuchar en el receptor de radio.

Sin embargo, este también es un efecto bastante anormal de ocurrencia local, que debe ser evitado con un diseño adecuado (suficiente selectividad) del receptor de radio. Por lo tanto, este efecto no suele ser tenido en cuenta durante el proceso de asignación de frecuencias, pero se debe tener en cuenta como una de las causas potenciales durante la investigación de quejas de interferencia.

2.7 Alcance y probabilidad de interferencia

Según la definición en el Artículo No. 1.166 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, la interferencia es: “El efecto de energía no deseada... en la recepción en un sistema de radiocomunicaciones, que se manifiesta por una degradación en el funcionamiento, tergiversación, o pérdida de información que se pudiera extraer en ausencia de esa energía no deseada”.

Para estimar el grado de interferencia se han desarrollado simulaciones por ordenador, modelos de propagación y modelos de tráfico, para calcular el nivel de potencia interferente, la relación portadora a ruido y la relación de señal deseada a señal no deseada.

Hay dos métodos principales para evaluar el alcance de la interferencia:

- Método determinístico, denominado a menudo como método de pérdida de acoplamiento mínima (MCL, por sus siglas en inglés), el cual permite determinar la distancia fija sobre la cual se puede sentir la interferencia.
- Método probabilístico, que cuenta con simulaciones estadísticas, como el modelo Monte Carlo, para evaluar la probabilidad de interferencia en un escenario de interferencia dado (que puede incluir parámetros de entrada tanto fijos como variables, tales como el cambio de posición de las terminales interferentes móviles).

Las características más importantes del método MCL son [44]:

- El resultado generado es el aislamiento en dB, que se puede convertir en una separación física, si se elige una fórmula adecuada de pérdidas por trayectoria.
- Es fácil de usar y no requiere una computadora para su aplicación.
- Se trata de un análisis del peor caso y produce un resultado espectralmente ineficiente.
- Se asume que el receptor afectado funciona 3 dB por encima de la sensibilidad de referencia.
- Se considera un solo interferente transmitiendo a una potencia fija (por lo general, la máxima) y usando un solo canal.

El método MCL calcula el aislamiento necesario entre la interferente y el afectado para asegurarse de que no haya interferencia. El método es fácil de usar y no requiere de una computadora para su implementación. El principal inconveniente es que se trata de un análisis del peor caso y produce un resultado espectralmente ineficiente para los escenarios de naturaleza estadística.

Se asume que el receptor afectado opera continuamente a 3 dB por encima de la sensibilidad de referencia. La interferencia se debe limitar al ruido de fondo para mantener el radio de protección del receptor afectado. Una fórmula de pérdida en la trayectoria debe ser elegida para determinar la cantidad de aislamiento que puede ser alcanzada a través de la separación física. La media de la pérdida en la trayectoria es utilizada y no se ha tenido en cuenta el desvanecimiento. Tampoco hay una distribución estadística de interferentes en el método.

La MCL puede ser utilizada para expresar el aislamiento necesario para evitar:

- Interferencia de emisiones no deseadas (caso de interferencia co-canal o canal adyacente).
- Interferencia de desensibilización del receptor (bloqueo).

La ecuación de análisis de las emisiones no deseadas es [44]:

$$\text{Aislamiento} = P_{INT} + dB_{BW} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - (S_{VICT} - C/I_{VICT}) + f(dBc_{INT}, P_{INT}) \quad (28)$$

Donde:

P_{INT} : es la potencia de transmisión máxima de la interferencia

dB_{BW} : es el factor de conversión de ancho de banda entre interferencia y el afectado

MC_{INT} : es el margen de soporte múltiple para dar cuenta de que la interferencia es un sitio de base y cuenta con más de una única portadora siendo transmitida

G_{VICT} : es la ganancia de la antena interferida (inc. pérdida de cable)

G_{INT} : es la ganancia de la antena interferente (inc. pérdida de cable)

S_{VICT} : es la sensibilidad del receptor interferido

C/I_{VICT} : es el radio de protección del afectado

$f(dB_{C_{INT}}, P_{INT})$: es una función que define el poder del ruido del ancho de banda en el desplazamiento de frecuencia que se considera en relación con la potencia de la interferencia del portador

En caso de bloqueo, la ecuación de MCL se podría expresar:

$$Aislamiento = P_{INT} + MC_{INT} + G_{VICT} + G_{INT} - f(B_{VICT}, S_{VICT}) \quad (29)$$

Donde:

- P_{INT} : es la potencia de transmisión máxima del interferente
- MC_{INT} : es el margen de las múltiples portadoras que da cuenta de que la interferencia es un sitio base y cuenta con más de una única portadora siendo transmitida
- G_{VICT} : es la ganancia de la antena interferida (inc. pérdida de cable)
- G_{INT} : es la ganancia de la antena interferente (inc. pérdida de cable)
- $f(B_{VICT}, S_{VICT})$: es una función que define la potencia de la banda ancha al desplazamiento de frecuencia que se está considerando relativo a la potencia de la portadora de la interferente

Una simulación de Monte Carlo [44] es una técnica estadística basada en la consideración de muchos instantes independientes en el tiempo y las ubicaciones en el espacio. Para cada instante, o ejercicio de simulación de trayectoria, se construye un escenario con una serie de diferentes variables aleatorias, es decir, donde están las fuentes de interferencia con respecto al afectado, qué tan fuerte es la señal deseada, qué canales están usando el afectado y el interferente, etc. Si se considera un número suficiente de ejercicios de simulación, entonces la probabilidad de un evento en particular puede ser evaluada con un alto grado de exactitud.

Ejemplos de las probabilidades de distribución que pueden ser evaluados incluyen:

- La probabilidad de que un receptor afectado alcance su relación deseada C/I.
- La distribución de probabilidad de transmisión de potencia de una estación móvil.

Además, otros productos se pueden generar, tales como:

- El efecto de técnicas de planificación del sistema, como, por ejemplo, sectorización, diversidad, co-ubicación de la antena.

- El efecto del emisor y el rendimiento del receptor, es decir, las emisiones no deseadas y el bloqueo del receptor.
- Capacidad de evaluación de los sistemas CDMA.
- Efectos de la transferencia ligera de los sistemas CDMA.

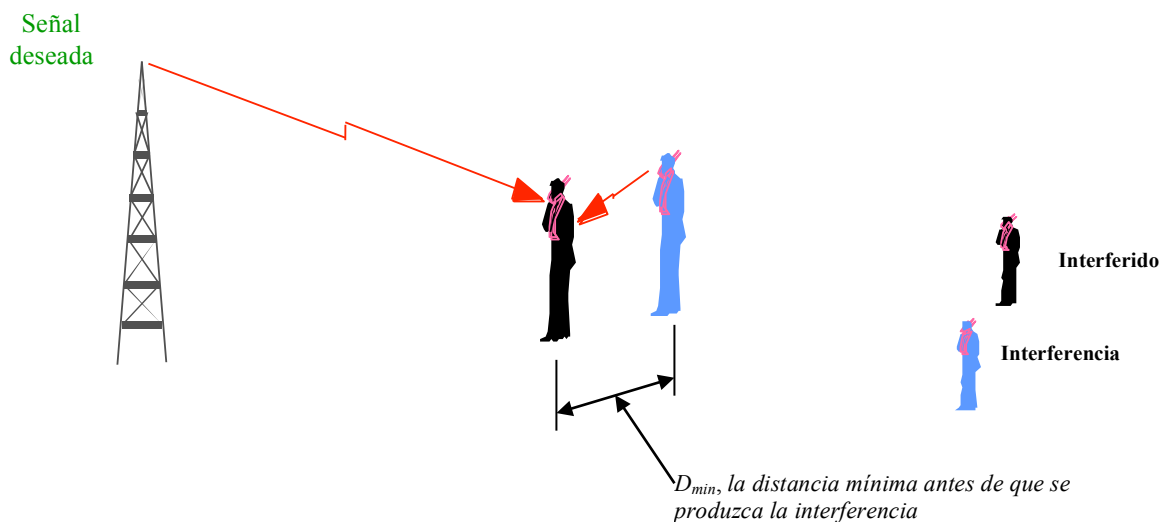
Los ingenieros del espectro pueden utilizar los resultados mencionados anteriormente para ayudar a optimizar la planificación de frecuencias y, además, hacer recomendaciones, por ejemplo, el rendimiento del transmisor y el receptor, los niveles de las emisiones no deseadas, el rechazo de canal adyacente, bloqueo del receptor, etc.

Con el fin de entender mejor la diferencia entre estos dos enfoques fundamentales, se considera el ejemplo de la interferencia de los teléfonos móviles de un estándar tecnológico, a teléfonos móviles de otro estándar, operados en las bandas de frecuencias adyacentes.

El enfoque MCL miraría la situación estática de dos teléfonos que se acercan el uno al otro, operando tiempo completo y estimaría la distancia de separación necesaria para lograr el aislamiento necesario de las dos terminales (de ahí el nombre de método de pérdida de acoplamiento mínimo, es decir, la pérdida de trayectoria necesaria para reducir la señal interferente, con el nivel justo por debajo del umbral de interferencia). Esto se ilustra en la Figura 22 [45].

FIGURA 22

Principio de la evaluación de distancia de separación mínima con enfoque MCL

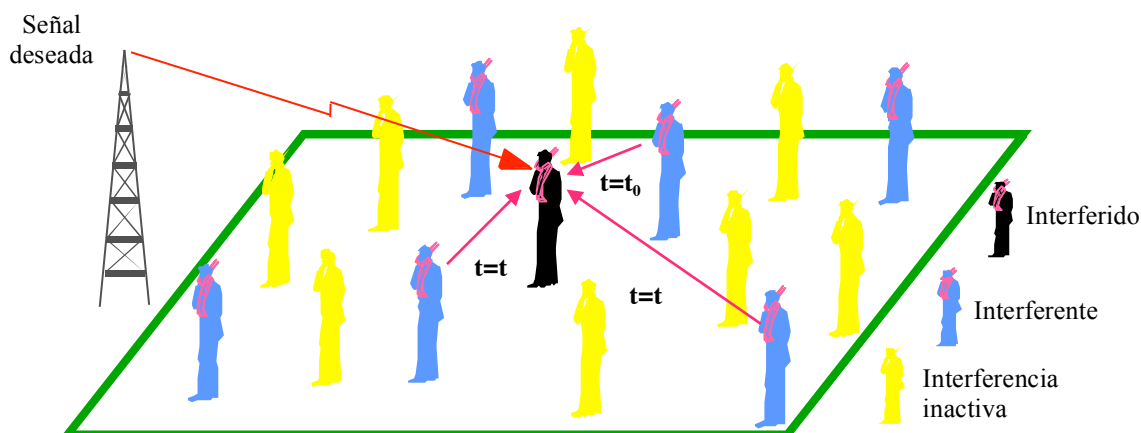


Sin embargo, es obvio que en la vida normal tal situación estática fija raramente ocurre, por lo que las reglas establecidas para la separación mínima pueden ser innecesariamente estrictas. Aquí el segundo método probabilístico entra en juego, al permitir la evaluación de cuál es la probabilidad de interferencias en determinadas circunstancias operacionales.

Por lo general, esto se logra mediante la simulación de Monte Carlo, donde muchas pruebas se llevan a cabo modelando el secuenciamiento al azar de diferentes parámetros de funcionamiento. Por ejemplo, en un instante de tiempo modelado, la interferencia y las terminales de los afectados pueden estar colocadas muy cerca una de la otra, pero una de ellas puede estar apagada, y en otro momento ambas terminales al estar encendidas no funcionan a pesar de estar a una distancia mayor, y así sucesivamente. Este principio se ilustra en la Figura 23 [45].

FIGURA 23

Secuencia aleatoria de escenarios reales de funcionamiento con enfoque Monte Carlo



Especialmente en el caso de los servicios móviles, debido a la gran variabilidad de los equipos de radio, las pérdidas de transmisión y la intensidad del tráfico, la estimación probabilística de la interferencia se vuelve más realista.

La probabilidad de interferencia depende de una serie de factores. Una ecuación general solo puede esbozar el concepto de la naturaleza estadística de las interferencias. La probabilidad real de interferencia tiene que ser evaluada en un criterio por categorías.

La consideración de la probabilidad de interferencia a nivel del sistema incluye, por ejemplo, para sistemas de comunicaciones móviles, el efecto de:

- La radiación fuera de la banda del transmisor en el canal fundamental de recepción de radio.

- La radiación armónica de la emisora en el canal de recepción.
- La radiación fundamental del transmisor en el canal de recepción espurio.
- La radiación de armónicos en un canal de recepción espurio.
- Interferencia de intermodulación de tercer orden.

La probabilidad de una recepción aceptable requiere que ninguno de los modos de interferencia pueda causar un problema. Se pueden calcular las funciones de distribución acumuladas de los modos de intervención. A partir de esta función es posible comparar los efectos de un modo de interferencia con otro modo, en términos de la probabilidad total de recepción.

Además, se puede evaluar el costo de la reducción de un modo de interferencia en comparación con otro para mejorar la calidad de recepción de una señal. Esto proporcionaría información acerca de si los parámetros de EMC del receptor y el transmisor deben ser mejorados y optimizados en relación con el criterio del costo total del equipo de radio.

El Informe UIT-R SM.2028 [46] describe una metodología de simulación estadística adecuada para la evaluación de escenarios complejos, basados en la técnica Monte Carlo. El método fue desarrollado originalmente con el fin de reevaluar los límites para las emisiones no deseadas en el Apéndice 3 del RR. Sin embargo, esta metodología también es apropiada para tratar los siguientes temas en la ingeniería del espectro:

- Estudios de compartición y compatibilidad entre diferentes sistemas de radiocomunicación que operan en la misma banda de frecuencias o frecuencias adyacentes respectivamente.
- Evaluación de máscaras del transmisor y receptor.
- Evaluación de los límites para parámetros, tales como niveles de bloqueo o intermodulación, además de las emisiones no deseadas.

El método Monte Carlo puede abordar prácticamente todos los escenarios de radio interferencia. Esta flexibilidad se logra mediante la forma en que los parámetros del sistema se definen. La forma de salida de cada parámetro variable (antena, forma, poder radiado, trayectoria de propagación, etc.) es su función de distribución estadística. Por tanto, es posible modelar situaciones muy complejas mediante funciones elementales relativamente simples. Un número de diversos sistemas pueden ser tratados, tales como:

- Radiodifusión (terrestre y satelital)
- Móvil (terrestre y por satélite)
- Punto a punto
- Punto a multipunto, etc.

El principio se explica mejor en el siguiente ejemplo, que solo tiene en cuenta las emisiones no deseadas como mecanismo de interferencia. En general, el método Monte Carlo aborda también otros efectos presentes en el ambiente del radio, como las emisiones fuera de banda, el bloqueo del receptor y la intermodulación. Algunos ejemplos de aplicaciones de esta metodología son:

- Estudio de compatibilidad entre sistemas PMR y sistemas celulares (por ejemplo, GSM) a 900 MHz.
- Estudio de compartición entre FS y FSS.
- Estudio de compartición entre dispositivos de corto alcance (Bluetooth) y las RLAN en la banda ISM de 2.4 GHz.
- Estudio de compatibilidad para las IMT-2000 y PCS1900 alrededor de 1.9 GHz.
- Estudio de compatibilidad para sistemas de ultra banda ancha y otros sistemas de radio que operan en estas bandas de frecuencia.

La metodología contenida en el Informe UIT-R SM.2028 se ha implementado en la Herramienta de Análisis Avanzada Monte Carlo para Ingeniería del Espectro (Seamcat®), que está disponible gratuitamente en la Oficina Europea de Radiocomunicaciones (ECO, por sus siglas en inglés) y puede ser descargada directamente desde el sitio web: www.seamcat.org [47].

Seamcat proporciona toda la funcionalidad descrita anteriormente en esta sección, a través de una sencilla interfaz gráfica de usuario. Una muestra de la vista de la interfaz gráfica de Seamcat se aprecia en las figuras 24 y 25.

FIGURA 24

Ejemplo de la interfaz gráfica de usuario Seamcat

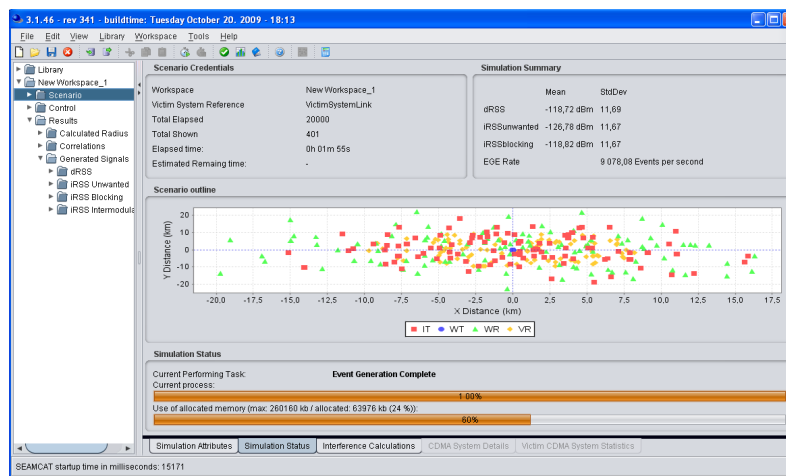
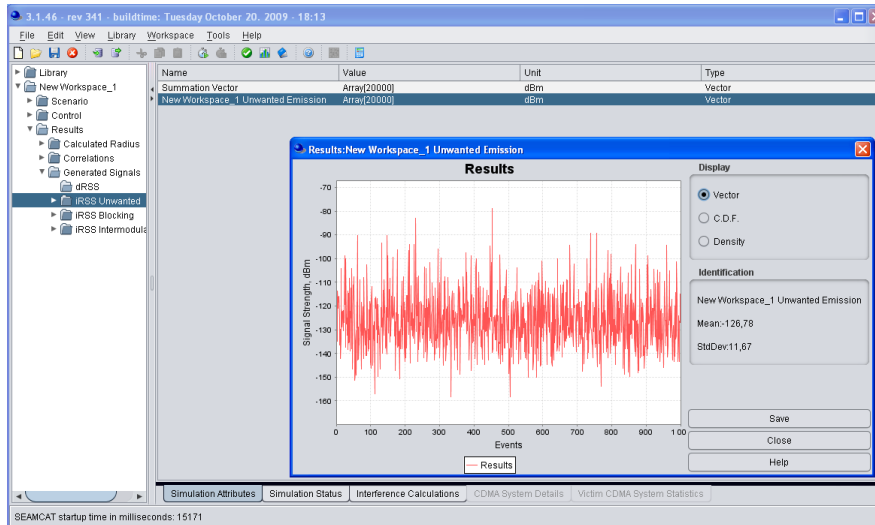


FIGURA 25

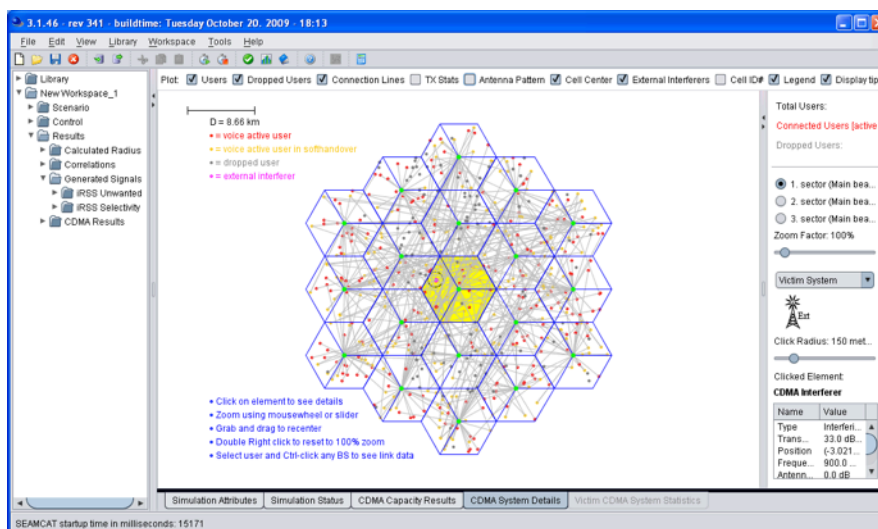
Ejemplo adicional de la interfaz gráfica de usuario Seamcat



Una ventaja adicional del uso de la simulación estadística con el modelamiento del sistema de real es que también los sistemas de radiocomunicaciones muy complejos ser modelados, tales como CDMA o sistemas OFDMA, ver ejemplo en la Figura 26.

FIGURA 26

Ejemplo simulación de interferencia CDMA en Seamcat





CAPÍTULO 3

COMPARTICIÓN DE LAS BANDAS DE FRECUENCIA

Este capítulo describe los principales principios y métodos que pueden ser empleados para permitir la compartición de bandas de frecuencias radioeléctricas por parte de varios servicios y aplicaciones de radiocomunicaciones. En primer lugar, se establecen los principios técnicos generales, luego se expone una discusión detallada de los distintos métodos. Al final del capítulo se presenta un glosario detallado de las recomendaciones UIT-R sobre el tema de compartición.

3.1 Principios técnicos de la compartición de bandas de frecuencias

La creciente demanda por la expansión de los actuales servicios de radiocomunicaciones y la instrucción de nuevos servicios es de gran importancia para el desarrollo de medios técnicos, con el fin de lograr un mayor uso del espectro mediante la compartición de bandas de frecuencia [1].

Desde el punto de vista práctico, hay dos tipos diferentes de compartición de bandas de frecuencia:

- **Compartición inter-servicios**, cuando dos o más servicios de radiocomunicaciones diferentes utilizan la misma banda de frecuencia. Un ejemplo podría ser la compartición de la misma banda de frecuencia entre un servicio fijo y un servicio fijo por satélite. Si se mira la tabla de atribución de frecuencias en el Artículo 5 del

Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, se verá que en la mayoría de los casos las bandas de frecuencia se atribuyen con base en asignaciones a los distintos servicios.

- Compartición inter-servicios, cuando varias aplicaciones distintas en el mismo servicio de radiocomunicación comparten la misma banda de frecuencia. Ejemplos típicos incluyen la compartición de la misma banda por parte de aplicaciones licenciadas y no licenciadas, por ejemplo, la misma banda utilizada para sistemas de acceso inalámbrico (licenciada) y dispositivos de corto alcance (no licenciada).

Como punto de partida, el Artículo 1 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT (No 1.166-1.176) define los parámetros que deben tenerse en cuenta en la compartición de frecuencias. La compartición de frecuencias es una manera efectiva de mejorar la utilización del espectro. La posibilidad de compartir las frecuencias existentes se debe considerar antes de que una nueva frecuencia sea asignada.

En principio, la utilización del espectro radioeléctrico depende de la frecuencia, tiempo, ubicación espacial, la modulación/codificación y separación de señales ortogonales. Cualquier compartición del espectro debe tener en cuenta una o más de estas cuatro dimensiones. La compartición se puede lograr de una forma sencilla cuando dos de estas dimensiones están en común y la tercera y/o cuarta dimensión difieren en un grado suficiente como para asegurar que todos los servicios implicados (dos o más) puedan funcionar de forma satisfactoria. La compartición también se puede lograr cuando los servicios tienen las cuatro dimensiones en común. En este caso, el intercambio se lleva a cabo mediante la aplicación de las condiciones técnicas que no pongan en peligro los requisitos de funcionamiento de los servicios involucrados.

En los últimos tiempos, se ha presentado una creciente cantidad de compartición del espectro con el fin de dar cabida a nuevos servicios y utilizar los recursos del espectro de manera más eficiente. La Tabla 11 [1, 48] muestra los métodos técnicos esenciales y los enfoques que pueden utilizarse para facilitar la compartición. Los métodos de compartición se agrupan en columnas basadas en las cuatro dimensiones: frecuencia, tiempo, ubicación espacial y la separación de la señal. Algunos de los métodos son nuevos o innovadores y pueden hacer un uso más eficiente del espectro y proporcionar flexibilidad. Muchos de esos métodos resultan de la introducción de nuevas tecnologías de equipos, informatización de los análisis y nuevas ideas. Algunos de los métodos son complejos e involucran en tiempo real la administración de equipos de frecuencia controlados. A menudo, la especificación de parámetros técnicos particulares para los equipos es necesaria para aplicar los métodos de compartición que se muestran en la Tabla 11.

TABLA 11

Métodos para facilitar la compartición de bandas de frecuencia

Separación de frecuencias	Separación espacial	Separación de tiempo	Separación de señal ¹
Planes de canalización Segmentación de la banda Sistemas de frecuencia ágiles Compartición dinámica: - Asignación de frecuencias dinámicas en tiempo real ⁽²⁾ FDMA Control de las características de emisión del espectro Partición dinámica variable Limitación de la tolerancia de frecuencia Acceso múltiple de asignación bajo demanda (DAMA, por sus siglas en inglés) Diversidad de frecuencia	Atribuciones geográficas compartidas Separación del sitio Características del sistema de antena: - Antena adaptativa (Antena inteligente) - Discriminación de polarización de antena - Discriminación del patrón de antena - Diversidad espacial - Ángulo de antena o diversidad del patrón Acceso múltiple por división espacial (SDMA, por sus siglas en inglés) Barreras físicas y protección del sitio	Control del ciclo de trabajo Asignación de frecuencia dinámica en tiempo real ⁽¹⁾ TDMA	Codificación de señales y procesamiento FEC Rechazo de interferencias CDMA Espectro ensanchado: - Secuencia directa - Salto de frecuencia - FM pulsado Desajustes de la potencia y ancho de banda de la interferencia: - Co-canal - Control del nivel del transmisor dinámico - Limitación de PFD y limitación de densidad de potencia espectral (psd) (dispersión de potencia) Complejidad de modulación Modulación codificada Procesamiento de señal adaptativa Polarización de antena

⁽¹⁾ Estas técnicas de separación de la señal también se pueden aplicar a la tecnología de separación de frecuencia, tiempo y espacio.

⁽²⁾ La asignación de frecuencias dinámicas en tiempo real facilita la compartición para el uso simultáneo de dominios de frecuencia y tiempo. Por lo tanto, este método se muestra en ambas columnas.

Ejemplos de algunos de estos parámetros son los siguientes:

- Especificación de distancia de separación geográfica entre los equipos de los servicios de compartición.
- Especificación de las características de modulación para los servicios de compartición, por ejemplo, la modulación digital, espectro ensanchado.
- Los límites de potencia del transmisor, los límites de densidad del flujo de potencia (PFD, por sus siglas en inglés), la antena del transmisor señalando los ángulos.
- Solo transmisiones punto a punto.

- La utilización de antenas directivas y adaptativas.
- Limitaciones en cuanto al ciclo de trabajo y tipo de mensaje de los equipos de servicio en la compartición, por ejemplo, solo uso intermitente, solo señales análogas, solo datos.
- Criterios de interferencia especificados, es decir, criterios de relación de error de bit, corrección de errores requerida.
- Criterios laxos de compartición técnica acordados para facilitar la compartición.

En la Tabla 11 algunos de los métodos son nuevos o innovadores y pueden hacer un uso más eficiente del espectro y proporcionar flexibilidad. Muchos de esos métodos resultan de la introducción de nuevas tecnologías de equipos, computarización de los análisis y nuevas ideas. Algunos de los métodos son complejos e involucran la gestión de frecuencias controlada por computadoras, en tiempo real. Las siguientes subsecciones discutirán los principios detrás de los métodos individuales [1, 48].

3.1.1 Separación de frecuencias

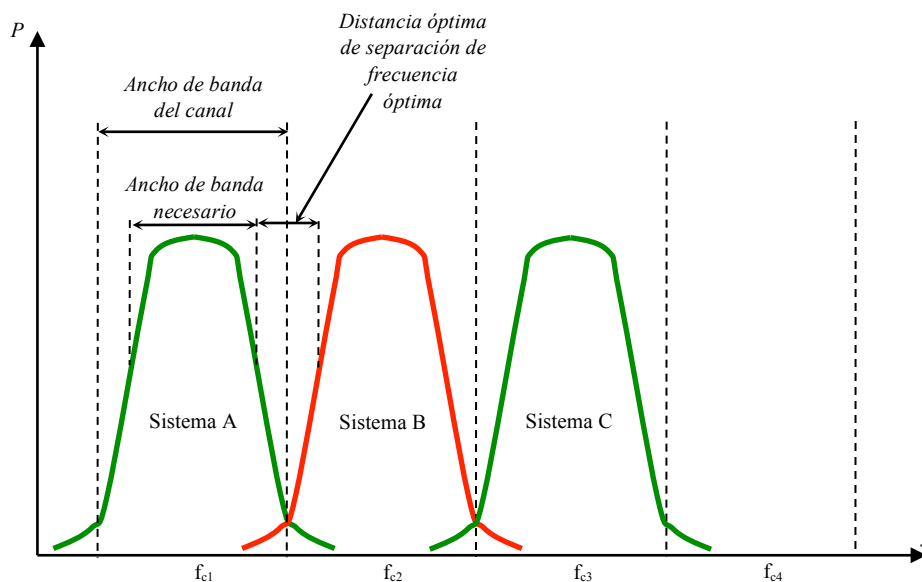
La esencia de los métodos de separación de frecuencias está en asegurarse que los canales de dos sistemas de radio co-existentes están separados de manera óptima y adecuada: lo suficientemente separados para no interferir el uno con el otro, pero lo suficientemente cerca para no perder mucho espectro en la banda de guarda. Este principio se ilustra en la Figura 27.

Nótese cómo la “trama del canal” —el marco de los canales de radio— está siendo creada por medio de la predeterminación de su ubicación en la escala de frecuencia, mediante la especificación de sus frecuencias centrales nominales (f_{ci}) y el tamaño del ancho de banda del canal. Una vez creados, a los canales de mapa de bits a menudo se les llama plan de canalización. Las diferentes bandas de frecuencia muchas veces tienen distintos planes de canalización, debido a los requisitos de ancho de banda de los sistemas de radio que los habitan.

Se debe tener en cuenta cómo el ancho de banda real que requiere el sistema de radio (que se define como el ancho de banda de la señal que es suficiente para una recepción confiable y demodulación de la señal de información original en el receptor) será algo menor que el ancho de banda del canal asignado, por incluir una separación necesaria para que las “alas” residuales de la señal se reduzcan lo suficiente antes de entrar en el receptor del sistema vecino y no crear interferencias allí.

FIGURA 27

Ilustración de la trama del canal y el concepto de separación de frecuencia



Los valores de precisión cuantitativos del ancho de banda del canal y la separación de frecuencia necesarios se obtienen por medios analíticos y experimentales, como se muestra en la sección 7.

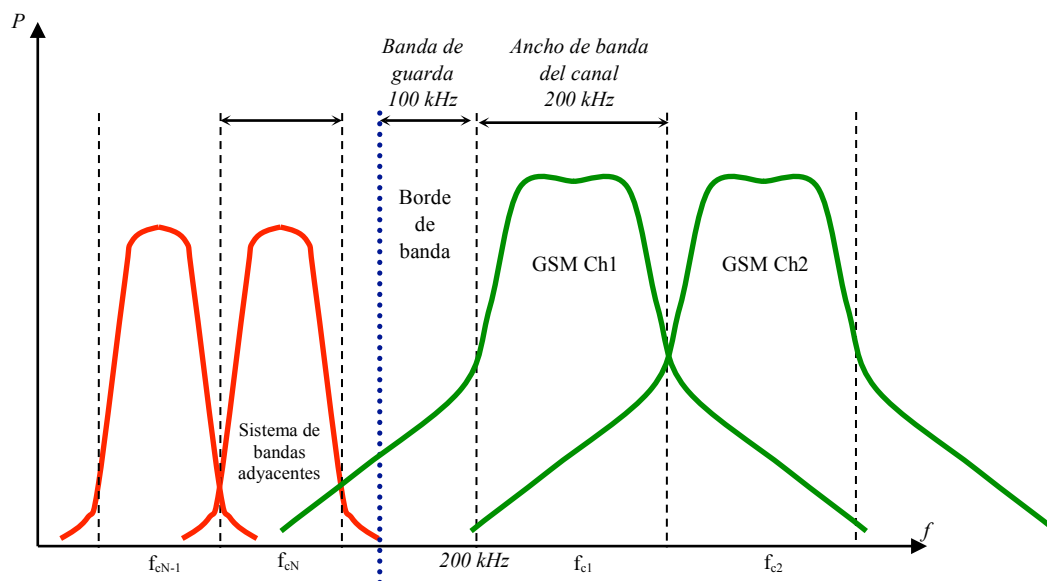
El ejemplo anterior considera el caso de la creación de reglas de separación de frecuencias entre los sistemas similares desplegados dentro de la misma banda de frecuencia. La representación se vuelve un poco diferente al considerar la situación al borde de dos bandas que se utilizan para sistemas de radio diferentes. Consideremos a continuación un ejemplo al borde de cualquiera de las bandas de frecuencia GSM, Figura 28.

Nótese cómo en este caso la “banda de guarda” adicional se utiliza como una porción dedicada de banda de frecuencia que separa el canal más próximo del borde de la banda. Las bandas de guarda a menudo se emplean en el borde de las bandas de frecuencia, especialmente las utilizadas para los sistemas de alta potencia o los sistemas de banda ancha que, en consecuencia, tienen “alas” más amplias. Para establecer el tamaño de la banda de guarda necesaria se utilizan los mismos principios de análisis, como se describe en el Capítulo 7, considerando dos sistemas diferentes, como parte de la ecuación.

Con base en los principios generales de la separación de frecuencias, antes mencionados, el resto de este apartado describe los casos particulares y derivados del mismo principio, de acuerdo con la lista proporcionada en la Tabla 11.

FIGURA 28

Ilustración de la banda de guarda en el borde de una banda GSM



Planes de canalización

Es posible organizar los canales de operación de manera homogénea o no homogénea, con el fin de configurar intersticialmente uno o más sistemas de comunicación. Este medio de evitar la interferencia debe ser coordinado con anticipación para que los canales estén debidamente separados para aprovechar el tipo de modulación.

Segmentación de la banda

La agrupación de una serie de canales, o la creación de una sub-banda para sistemas sin canalizar, para distintos usuarios o usos del espectro, es similar al uso de planes de canalización. En algunas situaciones esto será deseable, ya que tiene la ventaja de minimizar o evitar la necesidad de coordinación, mientras permite múltiples usos de una banda.

Sistemas ágiles de frecuencia

Los sistemas ágiles de frecuencia seleccionan las frecuencias de operación en cualquier lugar, dentro de los márgenes fijados, sobre una base en tiempo real, utilizando las técnicas de escuchar antes de transmitir. Estos son sistemas que no se basan en un proceso de coordinación mutua ni en la decisión de otro operador del sistema. Los sistemas ágiles de frecuencia buscan espectro no utilizado para la comunicación. Este tipo de sistemas no pue-

den ser adecuados para servicios públicos de telecomunicaciones o para la transferencia de datos críticos debido a una mayor posibilidad de interferencia.

Compartición dinámica

Utilizando técnicas avanzadas de computación, los gestores del espectro tienen mayores oportunidades para compartir las frecuencias y, por lo tanto, mayores oportunidades para reducir las ineficiencias creadas por los límites rígidos del servicio. El intercambio dinámico de frecuencias entre distintos sistemas, en los mismos servicios similares, permite que más de un sistema utilice las mismas frecuencias pero en momentos diferentes, en la misma región geográfica.

FDMA

La técnica FDMA consiste en asignar a cada usuario una fracción del ancho de banda y limitar su acceso a la sub-banda atribuida. La ortogonalidad se logra en el dominio de frecuencia.

Control de las características del espectro de emisión

El control de las características del espectro de emisión aumenta la cantidad de espectro disponible para las radiocomunicaciones, al limitar la cantidad de espectro perdido por las emisiones no deseadas (tanto emisiones espurias como fuera de banda).

Partición dinámica variable

Otro método de compartición que resulta en un uso flexible del espectro es la partición dinámica variable, que consiste en la compartición en tiempo real de un bloque de espectro entre los dos servicios donde un servicio tiene prioridad sobre el otro.

Limitación de tolerancia de frecuencia

La tolerancia de frecuencia se define como la salida máxima permitida por la frecuencia central de la banda de frecuencias ocupada por una emisión de la frecuencia asignada o por la frecuencia característica de una emisión de la frecuencia de referencia. La limitación de la tolerancia de frecuencia reduce el desperdicio de espectro mediante el control de la marcha en la frecuencia de la señal de transmisión, aumentando el número de sistemas que pueden funcionar dentro de una porción del espectro.

Acceso múltiple de asignación bajo demanda (DAMA, por sus siglas en inglés)

El principal inconveniente para la asignación prefija de canales es que es difícil de igualar la variación al azar del tráfico. Para el caso de trayectorias de bajo tráfico para todas

las estaciones, donde la red o el sistema tiene un gran número de estaciones, utilizar la tecnología DAMA es lo más adecuado para aumentar la eficiencia del espectro. El sistema DAMA SCPC (un único canal por portadora) y el sistema SPADE (equipos PCM de acceso múltiple de asignación bajo demanda, de un solo canal por portadora,) son los ejemplos típicos de este tipo de aplicación.

Diversidad de frecuencia

Cuando el desvanecimiento de propagación de radio varía con la frecuencia y el desvanecimiento en una ubicación distinta de frecuencia tiene un nivel diferente con una correlación pequeña o insignificante, utilizando la diversidad de frecuencia se obtendría una ganancia de diversidad bastante obvia en combinación con la conmutación libre de errores. El aumento de la diversidad de frecuencia depende de las características de dispersión y del factor de correlación entre los lugares de frecuencia para la diversidad, así como el desempeño de la conmutación libre de errores.

3.1.2 Separación espacial

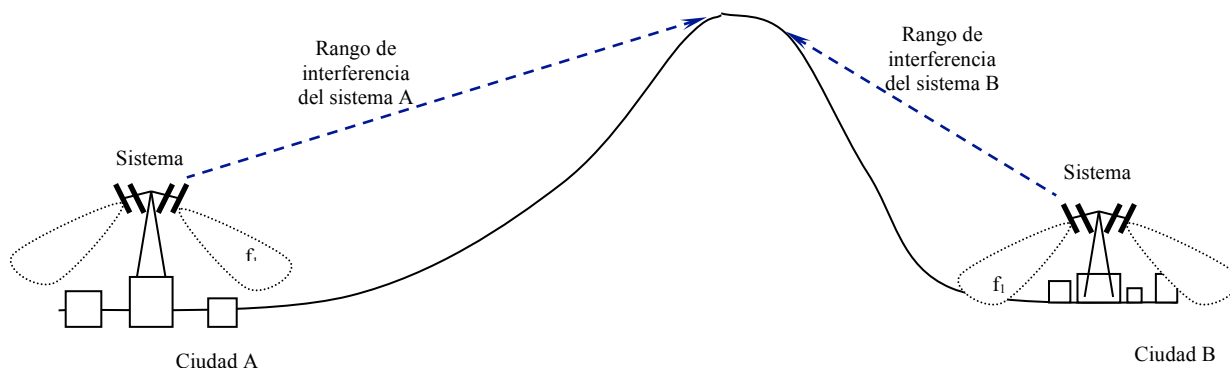
Este principio de separación se basa en la distancia física de dos sistemas de radio, distancia física el uno del otro. Uno de los ejemplos típicos se da cuando dos estaciones de televisión pueden utilizar el mismo canal de radio, cuando trabajan en dos ciudades suficientemente distanciadas. Como en el caso de la separación de frecuencias, elegir el tamaño óptimo de separación (distancia en este caso) es la clave para la utilización eficiente del espectro. La optimización de la separación espacial se está abordando, tanto en el plano normativo, por ejemplo, al asignar las mismas frecuencias para usar en sistemas separados geográficamente; como en el nivel operativo, por ejemplo, en los sistemas celulares donde la posibilidad de reutilizar el mismo canal de frecuencia en múltiples celdas resuelve el problema de escasez de capacidad.

La ilustración del concepto de separación espacial se muestra en la Figura 29, que representa el caso de dos sistemas en donde dos ciudades distantes pueden utilizar la misma frecuencia f_1 sin interferir entre sí.

Se debe tener en cuenta que la presencia de montañas entre las dos localidades ayuda al caso aumentando el aislamiento físico entre los dos sistemas. Es obvio que sin la montaña en el medio, la distancia de separación segura tendría que ser más grande. En ese sentido, debe recordarse también que los sistemas de radiocomunicaciones se pueden definir en dos dimensiones espaciales: espacio útil (el rango de cobertura útil) y el espacio denegado (el área donde la recepción es demasiado baja para ser útil, pero aún lo suficientemente fuerte como para crear interferencia con otros sistemas), como se puso de manifiesto con anterioridad en la Figura 17.

FIGURA 29

Ilustración de la separación espacial



La expresión numérica de la distancia de separación segura se puede obtener mediante la aplicación del análisis de separación de frecuencia y distancia proporcionado en el Capítulo 7.

Basado en el principio de separación espacial descrito anteriormente, el resto de esta subsección aclara los casos particulares y derivados del mismo principio, de acuerdo con la lista proporcionada en la Tabla 11.

Atribuciones compartidas geográficamente

Los usuarios de las diferentes zonas geográficas pueden reutilizar la misma frecuencia, si está separada por una distancia suficientemente grande. La compartición geográfica o de área de frecuencias es una técnica que habla por sí misma y ha sido considerada como de aplicación práctica.

Separación del sitio

La selección del sitio implica sobre todo la determinación de un lugar de funcionamiento que proporcione la distancia de separación adecuada de estaciones de operación en la misma frecuencia.

Características del sistema de antena

Existen diferentes posibilidades para el empleo de características del sistema de antena para facilitar la compartición de frecuencias o para minimizar la interferencia. La manera más obvia es el uso de antenas direccionales en la medida en que la tecnología lo permita.

Acceso múltiple por división espacial (SDMA, por sus siglas en inglés)

Se han desarrollado técnicas que permiten la discriminación de las transmisiones con base en la orientación espacial, de acuerdo con una variación controlada de los patrones de la antena. Esta técnica tiene especial importancia para las nuevas aplicaciones satelitales, de bucle local inalámbrico y telefonía móvil celular.

Barreras físicas y blindaje del sitio

La protección puede limitar la dirección en la que un emisor puede emitir y, por lo tanto, interferir con otros sistemas y un receptor puede recibir interferencias. Estas limitaciones permiten una mayor compartición de sistemas ajustándolos geográficamente que, de lo contrario, podrían interferir entre sí. El blindaje del sitio se puede realizar a través de la vegetación natural, terrenos o edificios.

3.1.3 Separación en el dominio del tiempo

La compartición de tiempo es el tipo más obvio de compartición, el cual es posible utilizar si los sistemas co-existentes necesitan tener acceso a canales de radio solo una parte de tiempo. Esto permite que el canal de frecuencia sea reutilizado por los distintos usuarios, como si estuvieran en modo de tiempo de acceso en cola.

El resto de esta subsección aclara los casos particulares del mismo principio, de acuerdo con la lista proporcionada en la Tabla 11.

Compartición de frecuencias

Los usuarios pueden compartir el espectro en términos de tiempo, como cuando los taxis alternativamente utilizan las mismas frecuencias o cuando los operadores de la banda ciudadana (CB, por sus siglas en inglés) comparten frecuencias.

Control del ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo es producto de la duración del pulso y de su relación de repetición. También es la proporción del promedio de potencia de salida y la potencia de salida pico.

Asignación dinámica de frecuencias en tiempo real

Otro método de compartición que resulta en un uso flexible del espectro es la variable de partición dinámica, que es una compartición en tiempo real de un bloque de espectro

entre dos servicios para que un servicio tenga prioridad sobre el otro. En la división de variables dinámicas hay una partición que divide en dos partes los canales contenidos en un bloque de espectro.

TDMA

La técnica TDMA consiste en asignar espacios predeterminados de tiempo de canal fijos a cada usuario, el usuario tiene acceso a todo el ancho de banda, pero solo durante sus horarios asignados.

3.1.4 Separación de señal

Este tipo de compartición es el más complicado, aunque es posible comprender intuitivamente este principio al considerar el siguiente ejemplo. Imagine que tres parejas que no se conocen entre sí tienen que viajar compartiendo el mismo vagón de tren. Las tres parejas llegan de diferentes países del mundo y cada una habla un idioma que las otras dos parejas no entienden. Entonces, mientras cada pareja habla entre sí, para pasar el tiempo, se comunica sin molestar las otras dos conversaciones. En este caso, vemos como la separación de frecuencia no está involucrada (todas las parejas utilizan el mismo espectro de audio), ni la separación espacial (todas las parejas se comprimen en el mismo lugar), ni la compartición del tiempo (todos hablan al mismo tiempo).

Lo que les ayuda a comunicarse es que cada pareja utiliza su codificación de señal única (el lenguaje), que el cerebro entiende bien (optimizado para decodificar el discurso en la lengua materna), incluso en condiciones de ruido. El lenguaje no conocido suena como un ruido ininteligible y, por lo tanto, no molesta ni distrae a las dos parejas que no lo hablan.

Este ejemplo también ayuda a comprender las limitaciones de este método, que en este caso sería la condición de que ninguna de las parejas comenzaran a hablar en voz muy alta, ya que entonces el sonido se ahogaría en la otra conversación, el ruido sería muy alto como para ser filtrado por el cerebro. El mismo principio físico se ve en los sistemas de radiocomunicación, donde la compartición de señal solo es posible siempre y cuando algunas condiciones se cumplan (protocolo de comunicación), como la limitación de la potencia máxima de la señal.

El resto de esta subsección aclara los casos concretos de aplicación de este principio, de acuerdo con la lista proporcionada en la Tabla 11.

Codificación y procesamiento de señales

Hay varias técnicas disponibles, generalmente clasificadas como codificación y procesamiento de señal (o modulación codificada). La codificación puede ocurrir como parte del proceso de modulación (codificación de canal, al igual que con CDMA) y también puede ocurrir en la señal original antes de la transmisión (codificación de la fuente, ya que la información se comprime cuando se desfibra).

FEC

Uno de los métodos es el uso de corrección de errores hacia adelante (FEC, por sus siglas en inglés) en enlaces digitales necesarios para reducir la relación $C / (N + I)$ requerida. El diseño FEC permite la disminución de los márgenes de potencia a costa de cualquier rendimiento o ancho de banda. En este caso, las técnicas de codificación de fuente se utilizan para detectar errores y controlar el transmisor para requerir la retransmisión de bloques de datos erróneos.

Rechazo de interferencias

Una técnica de reducción de la interferencia avanzada es el rechazo de interferencia no lineal utilizando potentes algoritmos de procesamiento de señales, que se aprovechan de las propiedades de correlación espectral tanto de la señal deseada como de la señal interferente.

CDMA

La modulación de espectro ensanchado o CDMA ofrece ventajas significativas para compartir de manera uniforme, ya sea en el mismo sistema o en varios sistemas.

La técnica de CDMA permite la superposición de la transmisión en frecuencia y tiempo. Logra la separación de la señal mediante el uso de diferentes códigos de señalización en conjunto con los filtros correspondientes (o de manera equivalente, la detección de correlación) en los receptores previstos. A cada usuario se le asigna una secuencia de código particular, que se modula en la portadora con los datos digitales modulados encima. Existen dos formas comunes: el salto de frecuencia y la fase de codificación. En el primer caso, la frecuencia cambia periódicamente de acuerdo con un patrón conocido, en el segundo, la portadora es modulada en la fase por la secuencia de datos digitales y la secuencia del código. Múltiples códigos ortogonales se obtienen a expensas de una mayor necesidad por anchos de banda más amplios, para difundir las formas de onda.

Espectro ensanchado

Los transmisores que usan técnicas de espectro ensanchado difunden la señal en un ancho de banda mucho más grande que el ancho de banda de la señal original, usando un código predeterminado repetitivo. El receptor utiliza el mismo código para devolver la señal a su forma original.

Una de las ventajas de espectro ensanchado es la supresión de interferencias. Las aplicaciones comerciales incluyen las comunicaciones personales, teléfonos celulares, sistemas de alarma inalámbricos, redes locales y sistemas de localización.

Mientras que la superposición de sistemas de espectro ensanchado en las bandas de frecuencia puede mejorar la eficiencia del espectro (como ocurre en los dispositivos de baja potencia no licenciados), aumenta la posibilidad de interferencia con un número creciente de sistemas de espectro ensanchado. La proliferación de sistemas de secuencia directa puede aumentar considerablemente el suelo de ruido, degradando la operación de todos los sistemas de banda angosta. Si el número de sistemas de salto de frecuencia aumenta dramáticamente, la ocurrencia de interferencias, aunque breve, puede llegar a ser tan frecuente como para degradar la operación.

Ajustes de potencia y ancho de banda de la interferencia

Si se puede asumir que el ruido y las interferencias afectan el rendimiento del receptor por igual, como es el caso de algunos sistemas, la técnica de ajuste de potencia o de ancho de banda puede ser utilizada para explotar la naturaleza no lineal de la relación portadora a interferencia (C/I), en función de la relación portadora a ruido (C/N) para una constante $C / (N + I)$. La técnica que se aplica consiste en aumentar la potencia del transmisor en el sistema que está siendo interferido. Al aumentar la potencia del transmisor de un sistema de ruido limitado en una pequeña cantidad, por ejemplo, 3 dB, la cantidad de interferencia que puede ser tolerada en el receptor se incrementa en una cantidad mucho mayor, por ejemplo, 10 dB.

Complejidad de modulación

El uso de la modulación de amplitud en cuadratura (M-QAM, por sus siglas en inglés), con un mayor número de estados y diseño avanzado de señales, ofrece la posibilidad de aumentar la relación de bits dentro de un ancho de banda de canal fijo o disminuir el ancho de banda de canal para una relación de bits fija, mejorando así el desempeño de la utilización de la potencia. El aumento en la complejidad de modulación, por lo general, requiere una mayor dependencia de la utilización de códigos de corrección de errores y puede requerir un procesamiento dinámico de canal más complejo, para alcanzar los objetivos de rendimiento.

Modulación codificada

La tecnología FEC puede mejorar la utilización de la potencia. Sin embargo, se reducirá la eficiencia del espectro debido a la inserción de la redundancia en el dominio del tiempo. Una tecnología importante para mejorar la utilización de la potencia, sin reducir la eficiencia, es la modulación codificada, que combina la modulación con tecnología de codificación, mediante el mapeo de la redundancia en los parámetros de modulación de la señal.

Procesamiento de señales adaptativas

El procesamiento de señales adaptativas avanzadas es la clave para obtener los beneficios de la nueva generación de transmisión inalámbrica digital de alta velocidad.

Mediante el uso de:

- La ecualización adaptativa en la frecuencia y/o en el dominio de tiempo.
- El control de potencia del transmisor de adaptación.
- La diversidad de antena, incluida la diversidad del espacio vertical y/o diversidad de espacio horizontal con varios combinadores adaptativos de diversidad.
- Diversidad de frecuencia incluyendo el uso de conmutación libre de errores contra la variación de retraso de propagación en tiempo real.
- Interferencia /cancelación de eco o supresión y detección de multi-usuarios contra la interferencia en tiempo real.
- Transmisión en paralelo con gran número de portadoras (o OFDM) contra la distorsión fuerte de las señales de banda ancha.
- Tecnologías de predistorsión o ecualización no lineal contra distorsión no lineal, etc.

Proporcionará fuertes medidas contra la variación del ambiente de transmisión en tiempo real, tales como la variación del nivel de señal recibida y la dispersión de la señal.

Polarización de antena

Como se mencionó anteriormente, el rendimiento de polarización de la antena, como el rendimiento de la polarización ortogonal, es muy importante para mejorar la capacidad de reutilización de la frecuencia de las radiocomunicaciones digital terrestre, las comunicaciones por satélite, del bucle inalámbrico local, banda angosta/banda ancha, así como las comunicaciones móviles. Una descripción más detallada de los métodos indicados en la Tabla 11 se puede encontrar en la Recomendación UIT-R SM.1132 [48].

3.1.5 *Papel de la radio definida por software y la radio cognitiva*

De acuerdo con el desarrollo de todos los módulos de función digital y el aumento en la velocidad operacional de procesamiento de señales digitales, la radio definida por software y la radio cognitiva serán un enfoque técnico muy importante en la aplicación de sistemas IMT-2000 y otros sistemas de comunicación inalámbricos avanzados, con el fin de alcanzar alta velocidad de control adaptativo, en tiempo real/pseudo real para los parámetros del sistema y/o su arquitectura [48]. También podría abrir nuevas oportunidades para enfoques más sofisticados de compartición del espectro.

La radio definida por software se define de tal manera que, basándose en el entorno del mismo hardware, podría realizar en forma flexible y conveniente la actualización del sistema, la extensión y/o extensión multi-modo con operación adaptativa por medio de control de software. Por ejemplo, junto con la antena inteligente, utilizando conversores A/D/A y alta velocidad de procesamiento de señal digital, para el control de adaptación eficaz de todas las partes del sistema a través de un software uniforme y una plataforma de hardware en la banda base, o banda de IF, o incluso en la banda de radiofrecuencia.

Esto podría entonces ser elevado a un nivel superior de desarrollo, proporcionando al software de radio características adicionales “cognitivas”, que permiten detectar el entorno del espectro radioeléctrico y la adaptación de su funcionamiento para adaptarse, a su vez, a ese entorno (por ejemplo, para seleccionar los canales de frecuencia que no se utilizan en ese momento en un determinado lugar, o intercalando las transmisiones, descubriendo parámetros de tiempo de otros usuarios de los canales en la misma frecuencia).

Esto incluye el análisis de compatibilidad electromagnética adaptativa y el análisis del control dinámico en tiempo real o pseudo real, el control adaptativo de cambio de la relación de bits y/o de los estados de modulación usando la tecnología de modo de transferencia asíncrona, así como el control dinámico multibanda, estructura de celda multinivel y las operaciones multimodo.

El principal objetivo de los controles es obtener las características eficientes y efectivas de interoperación y conexión sin desperfectos para los canales multibanda y multimodulación, así como diferentes formatos de datos. La radio definida por software que ha permitido tales funciones de autoadaptación cognitiva se conoce como radio cognitiva.

Por el momento, la tecnología de radio definida por software no está disponible en los dispositivos de consumo, pero ya está probada en equipos profesionales de gama alta, por ejemplo, en estaciones de transmisión de sistemas celulares públicos. Sin embargo, cabe esperar que la radio definida por software y radio cognitiva entren en las aplicaciones comerciales de consumo en unos pocos años. Cuando esto ocurra, la autoridad nacional de gestión del espectro tendrá que tomar una postura en cuanto al tratamiento de estos dispositivos en su régimen de gestión del espectro, incluidas las opciones para la compartición de bandas de frecuencia.

3.2 Compartición de frecuencias por servicios

3.2.1 Compartición entre el servicio móvil terrestre y el servicio de radiodifusión

El intercambio de separación espacial entre el servicio móvil terrestre y el servicio de radiodifusión en las bandas VHF y UHF se describe en la Recomendación UIT-R SM.851 [51]. Para permitir el funcionamiento satisfactorio de ambos servicios, se especifica la máxima intensidad del campo interferente en los receptores.

Para la protección de los servicios de televisión y radiodifusión sonora del servicio móvil terrestre con modulación angular, la intensidad del campo media para la que se brinda protección contra la interferencia, en el caso de la televisión, es la que figura en la Recomendación UIT-R BT.417 [49], ver Tabla 12. Estos valores son los máximos, citados a partir de valores promedio de todo el mundo de intensidad del campo a ser protegidos.

TABLA 12

*TV/Servicio de radiodifusión sonora FM:
valores de intensidad del campo a ser protegidos*

Banda de frecuencia (MHz)	Intensidad del campo ($\mu\text{V/m}$)	Notas
44-108	48	
66-108	54	Para servicio estéreo FM
137-254	56	
470-582	65	
582-960	70	

Estos valores aplican para una altura de la antena de recepción de 10 m por encima del suelo. La interferencia potencial de una estación base en el servicio móvil terrestre se calcula a partir del campo de perjuicio:

$$F_i = E(50, T) + A + B \cdot E(50, T) \quad (30)$$

Esta fórmula describe la intensidad de campo del transmisor interferente excedida en un 50% de los lugares para $T\%$ (entre 1% y 10%) del tiempo, con una altura de antena de 10 m, y se determina a partir de la Recomendación UIT-R P.1546 [12]. A (dB) es la rela-

ción de protección necesaria para la radiodifusión de televisión, B es la discriminación de la antena (dB). Para la polarización mixta, $B = 0$; para radiodifusión de TV polarizado horizontalmente, $B = -15$; para la radiodifusión sonora, B debe calcularse a partir de la Recomendación UIT-R BS.599 [50]. El efecto de interferencia múltiple de las estaciones base se calcula por medio de una suma de potencia.

Para la protección de los servicios móviles terrestres con modulación angular en bandas de frecuencias compartidas con respecto a la interferencia de los servicios de radiodifusión, el promedio de las intensidades deseadas que utilizan un espaciamiento de canal de 25 o 30 kHz, en el receptor móvil terrestre, se muestran en la Tabla 13.

TABLA 13

Servicio móvil terrestre: valores de intensidad del campo a ser protegidos

Banda de frecuencia (MHz)	La intensidad del campo ($\mu\text{V/m}$)	
	Interferencias molestas (Grado 3)	Interferencia apreciable (Grado 4)
44-68	16	19
68-87.5	15	20
87.5-108	14	20
137-254	14	21
470-582	20	24
582-960	30	38

A medida que disminuye el grado de recepción se requiere de un esfuerzo adicional para entender el discurso. Por lo tanto, un efecto de interferencia grado 5 es casi nulo, el grado 4 produce una interferencia “apreciable” y el grado 3 produce interferencia “molesta”. Para espaciamiento de canal de 12.5 y 15 kHz los valores mostrados en la Tabla 13 deben ser incrementados posteriormente en 3 dB.

La potencia recibida en el receptor móvil se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$P_r \text{ (dBm)} = E - 20 \log F - L_c + G_r - 77.2 \quad (31)$$

Donde:

E : intensidad del campo eléctrica (dB (μ V/m))

F : frecuencia (MHz)

L_c : pérdida del cable entre la antena y el receptor (dB)

G_r : ganancia de la antena del receptor (dBi)

La intensidad de campo del transmisor interferente excedida en 50% y durante el 10% del tiempo en un lugar, se puede determinar a partir de la Recomendación UIT-R P.1546 [12]. La discriminación de antena contra la radiodifusión de TV polarizada horizontalmente es de 18 dB para las estaciones base y 8 dB para las estaciones móviles terrestres. No se asume ninguna discriminación de antena para las emisiones polarizadas verticalmente o mixtas.

En el caso de categoría de compartición de grado 3 entre el servicio móvil terrestre y el servicio de radiodifusión sonora para diferentes separaciones de frecuencia entre las portadoras de los dos servicios, las relaciones de protección para el servicio móvil terrestre con 12.5 kHz de espaciamiento entre canales se muestran en la Tabla 14.

TABLA 14

Relaciones de protección para el servicio móvil terrestre desde el servicio de radiodifusión sonora

Separación de frecuencias (kHz)	Relación de protección (dB)
0	8
25	6
50	-5.5
75	-17.5
100	-27.5

Los valores de las relaciones de protección obtenidos pueden ser entonces utilizados para estimar el impacto de interferencia a los servicios móviles terrestres.

3.2.2 Compartición entre servicios fijos y de radiodifusión

Los procedimientos utilizados para determinar los criterios de compartición entre el servicio análogo de radiodifusión (sonora y de televisión) y el servicio fijo, cuando operan

simultáneamente en la misma banda o en bandas adyacentes de VHF o UHF, se encuentran cubiertos por la Recomendación UIT-R SM.851 [51].

3.2.3 *Compartición de la banda por parte del mismo servicio: radiodifusión*

La radiodifusión representa un ejemplo perfecto de compartición de la banda, por parte del mismo servicio (lo que se conoce como compartición intraservicio). Lo anterior se debe a que en la radiodifusión, el servicio es a menudo representado por varias estaciones separadas e independientes, por todo el país, compartiendo la misma banda de frecuencia. Esto es particularmente visible en la banda de radiodifusión sonora en FM, la cual no es muy ancha y a menudo se satura con numerosas estaciones de radio FM, que desean difundir programas de radio en una banda popular con alta calidad de sonido.

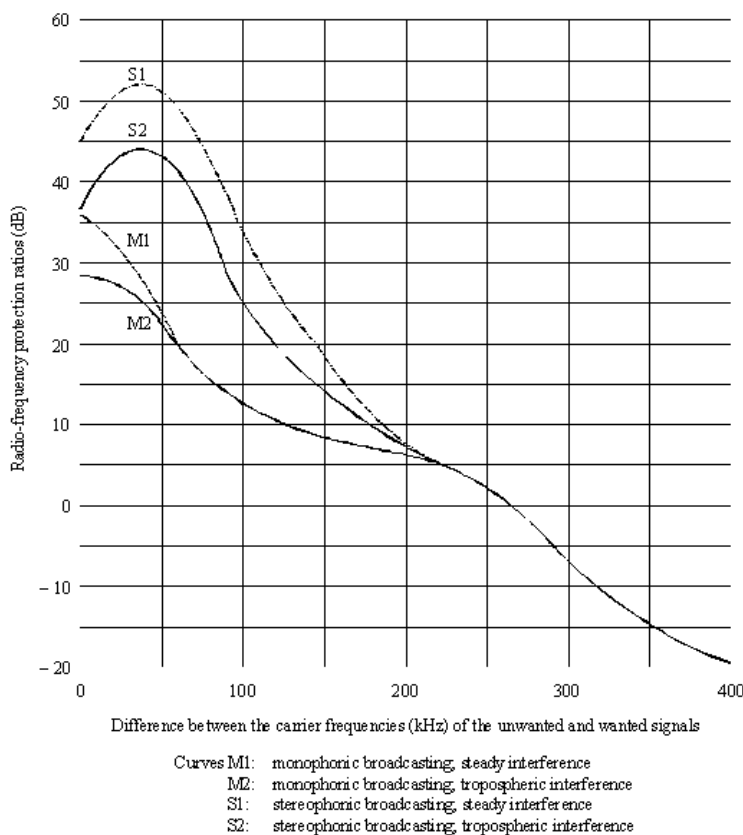
En tal caso de compartición intraservicio, dos de los cuatro enfoques de compartición se pueden excluir al instante: el tiempo de separación no es posible porque todas las estaciones quieren operar al mismo tiempo y compiten por la atención de los mismos usuarios, y la separación de la señal no es posible porque todas las estaciones utilizan el mismo tipo de señal. Por lo tanto, los dos únicos tipos de compartición son la frecuencia y la distancia de separación. En el caso de las estaciones de radio FM, la aplicación de estos principios puede ser guiada por normas especiales de separación determinadas para este tipo de transmisiones de radio, por ejemplo, como las establecidas en la Recomendación UIT-R BS.412 [108] que describe los principios de planificación de radio FM.

Los principios del cálculo de la separación frecuencia-distancia son los mismos que se describen en el capítulo 7.1, sin embargo, el hecho de que tanto el interferente como el afectado representan el mismo tipo de servicio y el mismo tipo de señal modulada simplifica la tarea un poco. Por ejemplo, no hay necesidad de establecer el rechazo fuera del canal de los receptores, por el contrario, el enlace directo con la relación de protección requerida (ver el Capítulo 4 para la explicación del concepto de relación de protección) se podría hacer, como se muestra en la Figura 30, para estaciones de radio FM, con una desviación máxima de $\pm 75\%$, [108]. En tales curvas la relación de protección se deriva generalmente como resultado de las mediciones prácticas, en las que la configuración de control por el grupo de oyentes que escucha el programa de radio con un nivel de umbral de interferencia aceptable, notan la degradación de la calidad recibida del programa de radio cuando aumenta la interferencia.

Otra de las reglas de compartición discutidas anteriormente, que está presente en el caso de la planificación de FM, es el cumplimiento de un plan de canales bien definido. En el caso de la banda de FM, las disposiciones de la Recomendación UIT-R BS.412 requieren

FIGURA 30

Relación de protección para planeación de estaciones de radio FM



que la separación entre canales sea de 100 kHz con una frecuencia de canales establecida en múltiplos de 100 kHz.

Como una combinación de las dos reglas, la administración puede establecer algunas normas secundarias derivadas. Por ejemplo, que en un área dada dos frecuencias vecinas con estaciones FM, deben estar separadas por lo menos 400 kHz. En el caso de una separación menor (100/200/300 kHz) o en caso de utilizar el mismo canal en las ciudades vecinas debe tenerse en cuenta la relación de protección necesaria para la planificación, que se puede derivar de la Figura 3 o de otras curvas similares (para una desviación pico diferente) que se encuentran en la Recomendación UIT-R BS.412 [108].

Una circunstancia especial en el caso de la banda de radiodifusión sonora FM es que se encuentra junto a la banda de radionavegación aeronáutica por encima de 108 MHz. Esto puede conducir a situaciones en las que una estación de FM de gran alcance podría afectar el funcionamiento sensible de los sistemas de aterrizaje por instrumentos (ILS, por sus siglas en inglés). Esta situación generalmente se limita a los transmisores de radio FM ubica-

dos dentro de la línea de vista de las instalaciones del aeropuerto. Los procedimientos especiales que han de seguirse en este caso se describen en la Recomendación UIT-R SM.1009 [109].

En el caso de la planificación de radiodifusión sonora AM en las bandas de MF pueden ser considerados los principios descritos anteriormente. En cuanto a las relaciones de protección necesarias, la protección co-canal de 40 dB en el mismo canal se ha establecido en la Recomendación UIT-R BS.560 [132], que permite la recepción de alta calidad. Sin embargo, una relación de protección tan alta podría ser una carga innecesaria para la planificación y, por lo tanto, han sido utilizados, con frecuencia, valores menores y más realistas. Por ejemplo, los 26 dB en la misma relación de protección co-canal fueron utilizados en la Conferencia Administrativa Regional de Radiodifusión en MF de Río de Janeiro para la Región 2. Teniendo en cuenta los niveles típicos de ruido ambiental en la banda de MF, esta correspondería aproximadamente a una intensidad del campo mínima utilizable de 60 dB (μ V/m) [116].

En el caso de los canales adyacentes, la relación de protección requerida podría ser derivada de la relación de protección co-canal mencionada anteriormente, mediante su corrección con el valor de la correspondiente “relación de protección relativa”, que se obtiene utilizando curvas dadas en la Recomendación UIT-R BS.560 [132]. Por ejemplo, en alta calidad (sin comprimir) las señales AM de 10 kHz de ancho de banda y el espaciamiento de canales de 10 kHz, la relación de protección relativa es del -25 dB (es decir, que resulta en la relación de absoluta protección de RF de 40 dB - 25 dB = 15 dB, o 26 dB - 25 dB = 1 dB cuando se utiliza una relación de protección co-canal de referencia de 26dB). Si se utilizan señales, un ancho de 4.5 kHz en todas las señales de AM con un espaciamiento de 10 kHz, la relación de protección relativa se reduce aún más a -32 dB.

Para una mayor discusión sobre los aspectos prácticos de la asignación de frecuencias para emisoras de radiodifusión véase el Capítulo 7.

3.2.4 Compartición con sistemas de radar

Los sistemas de radar realizan muchas funciones incluyendo la radio localización, radionavegación, meteorología, altimetría, astronomía por radar y mediciones de la tierra. La gran diversidad de funciones proporcionadas por el radar, en general, lo convierten en uno de los grupos de usuarios más grandes del espectro de radiofrecuencias.

La diversidad de las características del radar, en términos de frecuencia, potencia, características de la antena y las formas de onda definen un entorno electromagnético extremadamente complejo. La mayoría de los sistemas de radar operan en el modo de escaneo y con un volumen de interferencia en tres dimensiones. Si a esto se le adiciona que los sistemas

de radar son operados desde sitios de la tierra fijos y móviles, a bordo de buques y aeronaves y de vehículos espaciales, el potencial de interferencia entre los sistemas de radar y otros servicios de radiocomunicaciones es ineludible. Un factor común es que los componentes de propagación cielo y tierra son insignificantes en la banda de 200 MHz a 40 GHz. Sin embargo, la interferencia de la atmósfera cobra importancia, sobre todo las precipitaciones, para las frecuencias de alrededor de 5 GHz a 40 GHz.

Los servicios de radar se comparten, por lo general, solo con los servicios que operan en el mercado secundario o no protegidos. Se debe tener cuidado al considerar la compartición con sistemas que no son de radar. Esto se debe principalmente a la alta potencia de los sistemas de radar y a la posibilidad de interferencia entre sistemas. Hay, sin embargo, muchos ejemplos de compartición exitosa entre los radares y otros servicios.

Un ejemplo del éxito entre los sistemas de radar y otros servicios es el de las bandas de frecuencia de 5 GHz. Las regulaciones nacionales en muchos países permiten que las redes de radio de área local (RLAN, por sus siglas en inglés) operen con éxito en el rango de frecuencia de 5 GHz, que se atribuyen a título primario a la radio localización y que es utilizada por diferentes aplicaciones de radar. El desarrollo de la selección dinámica de frecuencia (DFS, por sus siglas en inglés), que permite a las RLAN evitar las frecuencias utilizadas por los radares, facilita la posibilidad de compartición.

3.2.5 Compartición utilizando técnicas de espectro ensanchado

Un sistema de espectro ensanchado se puede definir como aquel en el que se transmite la energía media de la señal transmitida a través de un ancho de banda, que es mucho más amplio que el ancho de banda de la información. En estos sistemas, por lo general, el ancho de banda de transmisión es más amplio, para una menor densidad de potencia espectral de la media y mayor rechazo de señales interferentes que operan en la misma banda de frecuencia.

Por lo tanto, tienen la posibilidad de compartir el espectro con sistemas convencionales de banda angosta, debido a la potencia relativamente baja que se transmite en la banda de paso del receptor de banda angosta. Además, los sistemas de espectro ensanchado son capaces de rechazar la interferencia de banda angosta. No obstante, cabe señalar que la compartición entre sistemas de espectro ensanchado con otros sistemas existentes en la misma banda, aumentará el ruido de fondo del canal y puede afectar el rendimiento de los sistemas de banda angosta.

La Recomendación UIT-R SM.1055 [52] contiene más información sobre el uso de técnicas de espectro ensanchado, incluyendo ejemplos de compartición de banda a través de

la aplicación de técnicas y procedimientos para el análisis de interferencias en los receptores convencionales.

3.3 Glosario de referencias sobre compartición de bandas de frecuencia

La Tabla 15 proporciona una lista útil de referencias que pueden ser utilizadas cuando se realizan diversos estudios sobre la compartición de bandas de frecuencia.

TABLA 15

Glosario de referencias sobre compartición de bandas de frecuencia

Ref. Nr.	Tema
BO.1785	Servicio dentro de los criterios de compartición de los sistemas GSO BSS en la banda 21.4-22.0 GHz en las Regiones 1 y 3.
F.758	Consideraciones en el desarrollo de criterios para la compartición entre el servicio fijo terrestre y otros servicios.
F.1247	Características técnicas y operativas de los sistemas del servicio fijo, para facilitar la compartición con la investigación espacial, operaciones espaciales y exploración de la Tierra por satélite, que funcionan en las bandas 2 025-2 110 MHz y 2 200-2 290 MHz.
F.1334	Criterios de protección para los sistemas del servicio fijo que comparten la misma banda de frecuencias en el rango de 1 a 3 GHz con el servicio móvil terrestre.
F.1401	Consideraciones para la identificación de posibles bandas de frecuencia para el acceso fijo inalámbrico y estudios relacionados con la compartición.
F.1402	Criterios de compartición de frecuencias entre un sistema de acceso inalámbrico móvil terrestre y un sistema de acceso inalámbrico fijo, utilizando el tipo de equipo igual que el sistema de acceso inalámbrico móvil.
F.1404	Atenuación mínima de propagación debido a los gases de la atmósfera, para su uso en estudios de compartición de frecuencias entre sistemas del servicio fijo y los sistemas de radio-difusión por satélite, servicios móviles por satélite y servicios de ciencia espacial.
F.1489	Una metodología para evaluar el nivel de compatibilidad operativa entre el acceso inalámbrico fijo y los sistemas de radio localización cuando comparten la banda de 3.4-3.7 GHz.
F.1498	Características de despliegue de sistemas del servicio fijo en la banda de 37-40 GHz para su uso en estudios de compartición.
F.1502	Protección del servicio fijo en la banda de frecuencias 8 025-8 400 MHz compartiendo con sistemas de satélites geoestacionarios de exploración de la Tierra por satélite (espacio a Tierra).

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Ref. Nr.	Tema
F.1608	Compartición de frecuencias entre sistemas del servicio fijo que utilizan estaciones en plataformas a gran altitud y sistemas convencionales del servicio fijo en las bandas 47.2-47.5 GHz y 47.9-48.2.
F.1706	Criterios de protección para servicio de sistemas inalámbricos fijos punto a punto, compartiendo la misma banda de frecuencia con sistemas de acceso inalámbrico nómada en el rango de 4 a 6 GHz.
F.1777	Características del sistema de televisión fuera de difusión, recopilación electrónica de noticias y producción electrónica de campo en el servicio fijo para su uso en estudios de compartición.
M.1039	Co-compartición de frecuencias entre las estaciones del servicio móvil por debajo de 1 GHz y estaciones terrestres y sistemas móviles por satélites no geoestacionarios (Tierra a espacio) con acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, por sus siglas en inglés).
M.1044	Criterios de compartición de frecuencias en los servicios de aficionados y aficionados por satélite.
M.1088	Consideraciones de compartición con los sistemas de otros servicios que operan en las bandas atribuidas al servicio de radionavegación por satélite.
M.1141	Compartición en el rango de frecuencias de 1-3 GHz entre las estaciones espaciales no geoestacionarias que operan en el servicio móvil por satélite y las estaciones del servicio fijo.
M.1142	Compartición en el rango de frecuencias de 1-3 GHz entre las estaciones espaciales geoestacionarias que operan en el servicio móvil por satélite y las estaciones del servicio fijo.
M.1184	Características técnicas de los sistemas móviles por satélite en las bandas de frecuencia por debajo de 3 GHz para su uso en la elaboración de criterios para la compartición entre el servicio móvil por satélite (MSS, por sus siglas en inglés) y otros servicios.
M.1232	Criterios de distribución para los enlaces espacio a Tierra que funcionan en el servicio móvil por satélite con satélites no geoestacionarios en la banda 137-138 MHz.
M.1247	Características técnicas y operativas de los sistemas del servicio fijo para facilitar la compartición con la investigación espacial, operaciones espaciales y exploración de la Tierra por satélite que funcionan en las bandas 2 025-2 110 MHz y 2 200-2 290 MHz.
M.1316	Principios y una metodología para la compartición de frecuencias en la banda 1 610.6-1 613.8 MHz y 1 660-1 660.5 MHz entre el servicio móvil por satélite (Tierra a espacio) y el servicio de radioastronomía.
M.1454	Límite de densidad de la p.i.r.e y restricciones operacionales para las RLAN u otros transmisores de acceso inalámbrico, a fin de garantizar la protección de los enlaces de conexión de los enlaces de alimentación de sistemas no geoestacionarios del servicio móvil por satélite, en la banda de frecuencias 5 150-5 250 MHz.

Ref. Nr.	Tema
M.1459	Criterios de protección para los sistemas de telemetría en el servicio móvil aeronáutico y técnicas de mitigación para facilitar la compartición con satélites geoestacionarios de radio-difusión por satélite y los servicios móviles por satélite en las bandas de frecuencia 1 452-1 525 MHz y 2 310-2 360 MHz.
M.1464	Características de los radares de radio localización y características y criterios de protección para los estudios de compartición de radionavegación aeronáutica y los radares meteorológicos en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz.
M.1469	Metodología para evaluar el potencial de interferencia por acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, por sus siglas en inglés)/acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, por sus siglas en inglés) servicios móviles por satélite (MSS, por sus siglas en inglés) (Tierra a espacio) en las transmisiones de los receptores de línea de vista del servicio fijo en el rango de 2 GHz.
M.1470	Metodología de compartición entre sistemas MSS (Tierra a espacio) y sistemas RNSS (espacio a Tierra) en las bandas de frecuencia de 149.9 a 150.05 MHz y 399.9 a 400.05.
M.1472	Metodología para evaluar el impacto de la interferencia de los sistemas de acceso múltiple por división de tiempo, acceso múltiple por división de frecuencia (TDMA/FDMA) Servicio Móvil por Satélite (MSS, por sus siglas en inglés), sistemas operativos en el rango de 2 GHz en el rendimiento de banda base en la multiplexación por división de frecuencia modulada (FDM-FM) en los receptores análogos de servicio fijo en línea de vista (LOS).
M.1473	Metodología para evaluar el impacto de la interferencia del acceso múltiple por división de tiempo/acceso múltiple por división de frecuencia (TDMA/FDMA) servicio móvil por satélite (MSS), de los sistemas operativos en el rango de 2 GHz en el rendimiento de vídeo de banda base de TV-FM de los receptores análogos de servicio fijo en línea de vista.
M.1474	Metodología para evaluar el impacto de la interferencia de acceso múltiple por división de tiempo/acceso múltiple por división de frecuencia (TDMA/FDMA) del servicio móvil por satélite (MSS) de los sistemas operativos en el rango de 2 GHz en el rendimiento en banda base digital de receptores digitales análogos en línea de vista del servicio fijo, basado en las estadísticas de la interferencia de radiofrecuencia.
M.1634	Protección contra interferencias de los sistemas terrestres de servicio móvil utilizando simulación de Monte Carlo para su aplicación a la compartición de frecuencias.
M.1638	Características y criterios de protección para los estudios de compartición de radio localización, radionavegación aeronáutica y radares meteorológicos que funcionan en las bandas de frecuencia entre 5 250 y 5 850 MHz.
M.1646	Parámetros que se utilizarán en estudios de compartición de co-frecuencia y de umbrales de PFD entre la IMT-2000 terrenal y sistema de radiodifusión por satélite BSS (sonora) en la banda 2 630-2 655 MHz.

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Ref. Nr.	Tema
M.1653	Los requisitos operativos y de implementación de sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local en el servicio móvil para facilitar la compartición entre estos sistemas y los sistemas de exploración de la Tierra por satélite (activo) y el servicio de investigación espacial (activo) en la banda 5 470-5 570 MHz en el rango de 5 460 5 725 MHz.
M.1732	Características de los sistemas que operan en los servicios de aficionados y aficionados por satélite para su uso en estudios de compartición.
M.1799	Compartición entre el servicio móvil y el servicio móvil por satélite en la banda 1 668.4-1 675 MHz.
M.1808	Características técnicas y operativas de los sistemas terrestres convencionales y sistemas troncales móviles que operan en las atribuciones de servicios móviles por debajo de 869 MHz que se utiliza en los estudios de compartición.
M.1823	Características técnicas y operativas de los sistemas digitales terrenos de telefonía móvil celular para su uso en estudios de compartición.
M.1824	Características del sistema de televisión fuera de difusión, recopilación electrónica de noticias y producción electrónica de campo en el servicio móvil para su uso en estudios de compartición.
M.1825	Orientación sobre los parámetros técnicos y metodologías para los estudios de compartición relacionados con los sistemas del servicio móvil terrestre.
P.844	Factores ionosféricos que afectan la compartición de frecuencias en las bandas VHF y UHF (30 MHz-3 GHz).
P.1060	Los factores de propagación que afectan a la compartición de frecuencias HF en los sistemas terrestres.
RS-1260	Viabilidad de la compartición entre sensores activos a bordo de vehículos espaciales y otros servicios en el rango de 420-470 MHz.
RS-1262	Criterios de coordinación y compartición para ayuda meteorológica en la banda de 400.15 a 406 y 1 668.4-1 700 MHz.
RS-1264	Viabilidad de compartición de frecuencias entre el servicio de ayuda meteorológica y el servicio móvil por satélite (Tierra a espacio) en la banda de 1 668.4- 1 700 MHz.
RS-1346	La compartición entre el servicio de ayuda meteorológica y los sistemas de comunicación para implantes médicos activos (MICS) que operan en el servicio móvil en la banda de frecuencias 401-406 MHz.
RS-1347	Viabilidad de compartición entre los receptores del servicio de radionavegación por satélite y los servicios de exploración de la Tierra por satélite (activo) y de investigación espacial (activo) en la banda 1 215-1 260 MHz.

Ref. Nr.	Tema
RS-1449	Viabilidad de compartición entre el servicio SFS (espacio a Tierra) y el servicio de investigación de la exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y espacial (pasivo), en la banda 18.6-18.8 GHz.
RS-1632	La participación en la banda 5 250-5 350 MHz entre el servicio de investigación de la exploración de la Tierra por satélite (activo) y los sistemas de acceso inalámbrico (incluidas las redes radioeléctricas de área local) en el servicio móvil.
S.1068	Los servicios fijo por satélite y de radio localización/radionavegación compartiendo en la banda 13.75-14 GHz.
S.1069	Compatibilidad entre el servicio fijo por satélite y los servicios de la ciencia espacial en la banda 13.75-14 GHz.
S.1151	Compartición entre el servicio inter-satélite que involucra satélites geoestacionarios en el servicio fijo por satélite y el servicio de radionavegación a los 33 GHz.
S.1340	Compartición entre los enlaces de alimentación para el servicio móvil por satélite y el servicio de radionavegación aeronáutica en sentido Tierra a espacio en la banda 15.4-15.7 GHz.
S.1341	Compartición entre los enlaces de alimentación para el servicio móvil por satélite y el servicio de radionavegación aeronáutica en el sentido espacio a Tierra en la banda de 15.4-15.7 GHz y la protección del servicio de radioastronomía en la banda 15.35-15.4 GHz.
S.1426	Límites agregados de densidad de flujo de potencia, en la órbita de los satélites FAA para RLAN que funcionan en la frecuencia 5 150-5 250 MHz compartida con el FSS (RR No. S5.447A).
S.1427	Metodología y criterio para evaluar la interferencia de los sistemas terrestres de acceso inalámbrico/radio transmisores de red de área local a satélites no geoestacionarios, servicio de satélites móviles en órbita, enlaces de servicio de alimentación en la banda 5 150-5 250 MHz.
SA-1154	Disposiciones para proteger la investigación espacial (SR), las operaciones espaciales (SO) y exploración de la Tierra por satélite (EESS) y para facilitar la compartición con el servicio móvil en las bandas 2 025-2 110 MHz y 2 200-2 290 MHz.
SA-1158	Viabilidad de compartición de frecuencias en la banda 1 670-1 710 MHz entre el servicio de meteorología por satélite (espacio a Tierra) y el servicio móvil por satélite (Tierra a espacio).
SA-1236	Compartición de frecuencias entre el servicio de investigación espacial actividad vehicular extra (EVA) y enlaces de servicio fijo y móvil en la banda 410-420 MHz.
SA-1258	Compartición de la banda de frecuencias 401-403 MHz entre el servicio de meteorología por satélite, exploración de la Tierra por satélite y servicio de ayuda a la meteorología.
SA.1277	Compartición en la banda de frecuencia 8 025-8 400 MHz entre el servicio de exploración de la Tierra por satélite y los servicios fijo, fijo por satélite, servicios de meteorología por satélite y móvil en las Regiones 1, 2 y 3.

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Ref. Nr.	Tema
SA-1278	Viabilidad de compartición entre la exploración de la Tierra por satélite (espacio a Tierra) y los servicios fijo, entre satélites y móvil en la banda 25.5-27.0 GHz.
SF.766	Métodos para determinar los efectos de interferencia en el rendimiento y disponibilidad de los sistemas terrestres sistemas de radioenlaces y sistemas del servicio fijo por satélite.
SF.1006	Determinación del potencial de interferencia entre las estaciones terrenas del servicio fijo por satélite y las estaciones del servicio fijo.
SF.1395	Atenuación mínima de propagación debido a los gases de la atmósfera para su uso en estudios de compartición de frecuencias entre el servicio fijo por satélite y el servicio fijo.
SF.1481	Compartición de frecuencias entre sistemas del servicio fijo que utilizan estaciones en plataformas altas y los sistemas de satélite en órbita geoestacionaria del servicio fijo por satélite en las bandas 47.2-47.5 GHz y 47.9-48.2.
SF.1486	Metodología de compartición entre los sistemas fijos de acceso inalámbrico en el servicio fijo y las terminales de apertura muy pequeña en el servicio fijo por satélite en las bandas 3 400-3 700 MHz.
SF.1602	Metodología para la determinación de las estadísticas de densidad de flujo de potencia para su uso en estudios de compartición entre sistemas inalámbricos fijos y de varios satélites de servicio fijo por satélite.
SF.1719	Compartición entre el servicio fijo punto a punto y punto a multipunto y estaciones terrenas transmisoras de GSO y los sistemas no GSO FSS en la banda 27.5-29.5 GHz.
SM.851	Compartición entre el servicio de radiodifusión y los servicios fijo y/o móvil en las bandas VHF y UHF.
SM.1009	Compatibilidad entre el servicio de radiodifusión sonora en la banda de unos 87-108 MHz y los servicios aeronáuticos en la banda 108-137 MHz.
SM.1132	Principios generales y métodos para la compartición entre los servicios de radiocomunicación o entre estaciones de radio.
SM.1751	Metodología adicional para la evaluación del efecto de la interferencia entre redes de radio-comunicaciones que funcionan en una banda de frecuencias compartidas.

Una herramienta de referencia cruzada adicional útil se proporciona en la Tabla 16 (actualizada de la Tabla 5-8 en [1]), que muestra a simple vista la relevancia de diversas recomendaciones UIT-R, referenciadas anteriormente, para uno u otro escenario de compartición.

TABLA 16

Importancia de las recomendaciones UIT-R para ciertos escenarios de compartición

Interferente:									
Interferido:	Radiodifusión	Fijo	Móvil	EESS/ SR/SO	MSS	FSS	Radio navegación	Ayudas Met-sat/Met	Inter- satélite
Radiodifusión		SM.851	SM.851						
Fija	SM.851		F.1402	SA.1236 SA.1258 SA.1277 SA.1278 F.1502	M.1469 M.1472 M.1473 M.1474	SF.1006 SF.1481 SF.1486			
Móvil	SM.851	F.1402		SA.1154 SA.1236 SA.1277 SA.1278					
EESS/SR/SO		F.1247 SA.1277 SA.1278	SA.1154 SA.1277 SA.1278			S.1069 SA.1277 RS.1449		SA.1277	SA.1278
MSS				SA.1277				RS.1264	
FSS		SF.1006 SF.1481 SF.1486	S.1426 S.1427 M.1454	SA.1277			S.1068 S.1151 S.1340		
Radionavegación					S.1341	S.1151			
Ayudas Met-sat/Met					SA.1158 RS.1264				
Inter-satélite				SA.1278					
RNSS				RS.1347	M.1470				
Radio- astronomía ⁽¹⁾									
Aeronáutica	SM.1009								

⁽¹⁾ La Recomendación UIT-R RA.1031 se refiere a la protección del servicio de radioastronomía en las bandas de frecuencia compartidas con otros servicios.

Para una discusión adicional sobre la aplicación de los métodos y principios de compartición, véase el Capítulo 9 del presente título.



CAPÍTULO 4 RELACIONES DE PROTECCIÓN

Este capítulo describe los principios fundamentales para el establecimiento de relaciones de protección, como uno de los criterios principales para la protección contra la interferencia de los servicios de radiocomunicaciones. Después de la introducción de principios generales, se proporcionan las listas de referencias de las recomendaciones UIT-R para los diferentes servicios y bandas de frecuencia.

4.1 Criterios generales

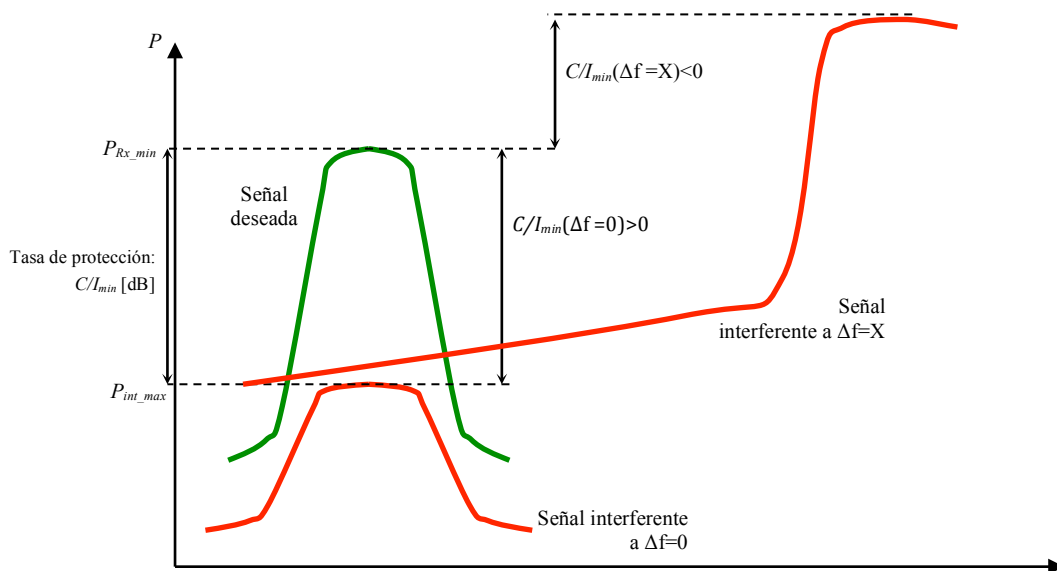
El numeral 1.170 del Artículo 1 del RR de la UIT define las relaciones de protección como: “El valor mínimo de la relación señal deseada a no deseada, por lo general expresada en decibeles a la entrada del receptor, determinada en condiciones especificadas de tal manera que una calidad especificada de recepción de la señal deseada se obtiene a la salida del receptor”. La calidad especificada se expresa en términos de una determinada actuación tal como la relación de error de bits, el grado de deterioro de la calidad de la imagen o la inteligibilidad del habla en función del tipo de emisión.

Para decirlo en otras palabras, la relación de protección se ha de entender como el valor mínimo del parámetro de la C/I_{VIC} que se utiliza en la expresión del MCL en la Ecuación (28). La ilustración de este concepto se proporciona a continuación en la Figura 31.

A menudo, las relaciones de protección necesarias para proteger a un determinado servicio de radiocomunicación o aplicación se establecen a través de medidas experimenta-

FIGURA 31

Ilustración del concepto de relación de protección



les. Por ejemplo, el receptor afectado puede ser configurado para operar a un nivel mínimo operacional de la señal recibida, por ejemplo, 3 dB por encima del umbral de sensibilidad del receptor. La señal interferente se incrementa hasta que la comunicación de enlace del receptor se interrumpe (es decir, la degradación de la calidad). La diferencia entre los niveles de señal deseada (el afectado) y no deseada (interferente) en ese momento es dada por la protección requerida.

Teniendo en cuenta este tipo de relaciones de protección derivadas, se vuelven intrínsecamente ligadas a un par en particular (interferido vs. interferencia) de servicios que interactúan. Dado que la interferencia entre canales no es el único escenario donde se requiere la protección de los servicios para los afectados, las relaciones de protección se presentan a menudo en forma de tabulaciones que muestran una relación de protección variable en función de la separación entre frecuencias centrales de los afectados y los servicios que puedan interferir. Nótese que en algunos casos (para grandes distancias de separación de frecuencia), las relaciones de protección pueden tomar valores negativos. Esto significa que la señal interferente puede ser en realidad de una potencia mayor que la de la señal del afectado, sin crear interferencias, lo cual es posible debido a la distancia suficiente entre las dos señales en la frecuencia (como se muestra en la parte derecha de la Figura 31).

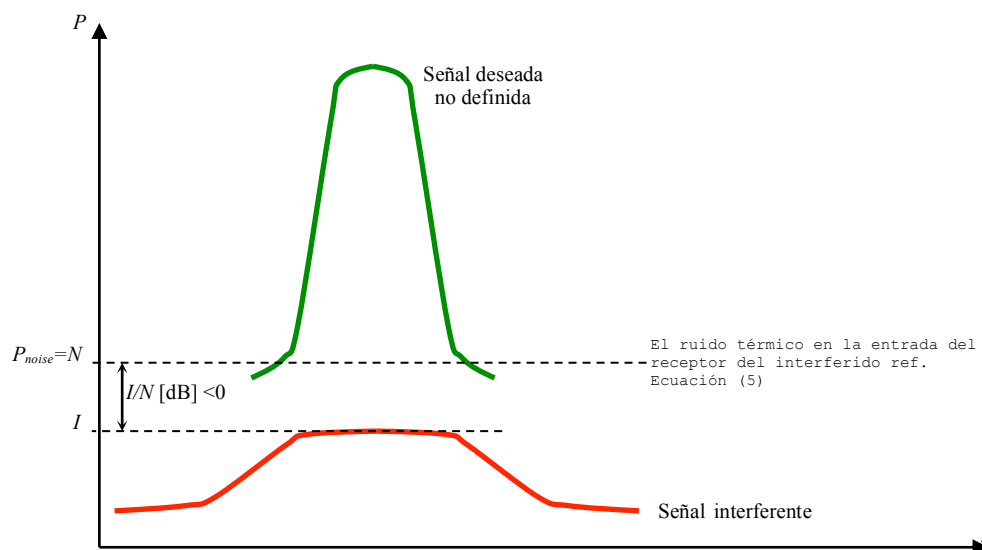
Cuando las relaciones de protección para alguna combinación de servicios interferidos a interferente no se ha establecido de antemano (esto ocurre a menudo cuando se considera la introducción de nuevos servicios propuestos), los ingenieros del espectro se pueden

referir a otros medios de evaluación de umbral de interferencia. Un ejemplo típico de tales criterios de interferencia alternativa es la relación interferencia a ruido (I/N). Su uso se basa en la suposición de que si el mecanismo de interferencia precisa de un nuevo servicio que no se ha establecido, por lo menos es seguro asumir que debe ser comparable en cierta medida con el ruido térmico experimentado por el receptor del interferido. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, el criterio I/N criterio tendrá un valor no-positivo (es decir, igual o inferior a 0 dB), lo que significa que la interferencia debe ser igual o menor que el ruido térmico, ver Figura 32.

Las siguientes subsecciones proporcionan material de referencia útil para determinar relaciones de protección que se utilizan para diferentes casos de interferencia.

FIGURA 32

Ilustración del concepto del criterio I/N



4.2 Para los diferentes servicios

A continuación, la Tabla 17 proporciona un glosario de recomendaciones UIT-R que establece relaciones de protección y otros tipos de criterios de protección necesarios para la protección de los distintos servicios.

TABLA 17

Glosario de referencias para los criterios de protección para varios servicios

Ref. Nr.	Tema
Radiodifusión por satélite	
BO.600	Conjunto estandarizado de condiciones de prueba y procedimientos de medición para la determinación subjetiva y objetiva de las relaciones de protección para televisión en los servicios de radiodifusión terrestre y de radiodifusión por satélite.
BO.792	Relaciones de protección contra interferencias para el servicio de radiodifusión por satélite (televisión) en la banda de 12 GHz.
BO.1297	Relaciones de protección para ser utilizadas con fines de planificación en la revisión de los apéndices 30 (Orb-85) y 30A (Orb-88) Planes del Reglamento de Radiocomunicaciones en las Regiones 1 y 3.
Radiodifusión sonora y TV terrestre	
BO.600	Conjunto estandarizado de las condiciones de prueba y procedimientos de medición para la determinación subjetiva y objetiva de las relaciones de protección para televisión en los servicios de radiodifusión terrestre y de radiodifusión por satélite.
BS.216	Relación de protección para la radiodifusión sonora en la Zona Tropical.
BS.412	Planificación de los estándares de radiodifusión sonora terrestre FM en VHF.
BS.559	Medición objetiva de las relaciones de protección de radiofrecuencia en la radiodifusión LF, MF y HF.
BS.560	Relaciones de protección de radiofrecuencia en la radiodifusión LF, MF y HF.
BS.638	Términos y definiciones utilizadas en la planificación de frecuencias de radiodifusión sonora.
BS.641	Determinación de las relaciones de protección de radiofrecuencia para la radiodifusión sonora en frecuencia modulada.
BS.773	Relaciones de protección requeridas por la radiodifusión sonora FM en la banda de 87.5 MHz y 108 MHz contra la interferencia de las transmisiones de televisión D/SECAM.
BT.417	Intensidad del campo mínima para las que puede solicitarse protección en la planificación de un servicio de televisión análoga terrestre.
BT.565	Relaciones de protección para la televisión de 625 líneas contra los transmisores de radionavegación en las bandas compartidas entre 582 y 606 MHz.

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Ref. Nr.	Tema
BT.655	Relaciones de protección de radiofrecuencia para los sistemas de banda lateral vestigial AM de televisión terrestre interferida por señales no deseadas de visión análoga y señales de sonido asociadas.
BT.1123	Métodos de planificación para la televisión terrestre de 625 líneas en VHF/UHF.
BT.1786	Criterio para evaluar el impacto de interferencia con el servicio de radiodifusión terrestre.
Servicio fijo	
F.240	Relaciones de protección señal a interferencia para las distintas clases de emisiones del servicio fijo por debajo de 30 MHz.
F.760	Protección de los ecosistemas terrestres de radio enlaces en línea de vista, contra las interferencias del servicio de radiodifusión por satélite en las bandas de cerca de 20 GHz.
F.1190	Criterios de protección para sistemas radioenlaces digitales para asegurar la compatibilidad con los sistemas de radar del servicio de radiodeterminación.
F.1334	Criterios de protección para los sistemas del servicio fijo que comparten la misma banda de frecuencias en el rango de 1 a 3 GHz con el servicio móvil terrestre.
F.1403	Criterios de densidad de flujo de potencia de recomendaciones UIT-R para la protección de los sistemas del servicio fijo en bandas de frecuencias compartidas con las estaciones espaciales de diversos servicios espaciales.
F.1502	Protección del servicio fijo en la banda de frecuencias 8 025-8 400 MHz compartiendo con sistemas de satélites geoestacionarios de exploración de la Tierra por satélite (espacio a Tierra).
F.1670	Protección de los sistemas inalámbricos fijos de sistemas terrestres de video digital y sistemas de radiodifusión sonora en bandas compartidas VHF y UHF.
F.1706	Criterios de protección para sistemas inalámbricos de servicio fijo punto a punto que comparten la misma banda de frecuencias con sistemas de acceso inalámbrico nómada en el rango de 4 a 6 GHz.
M.1800	Protección de los servicios de telefonía fija, móvil y de radio localización de los enlaces de conexión del MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
Servicio móvil aeronáutico	
M.441	Relación señal-interferencia y puntos de intensidad del campo mínimos necesarios en el servicio móvil aeronáutico (R) por encima de 30 MHz.

Ref. Nr.	Tema
M.1459	Criterios de protección para los sistemas de telemetría en el servicio móvil aeronáutico, y técnicas de mitigación para facilitar el compartimiento con satélites geostacionarios de radio-difusión por satélite y los servicios móviles por satélite en las bandas de frecuencias 1452-1 525 MHz y 2 310-2 360 MHz.
Servicio de radionavegación	
M.589	Características técnicas de los métodos de transmisión de datos y protección contra las interferencias de los servicios de radionavegación en las bandas de frecuencia entre 70 y 130 kHz.
M.631	Uso de sistemas hiperbólicos marítimos de radionavegación en la banda de 283.5 a 315 kHz.
M.1464	Características de los radares de radio localización y características y criterios de protección para los estudios de compartición de radionavegación aeronáutica y los radares meteorológicos en la operación de servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz.
M.1466	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radionavegación en la banda de frecuencia 31.8-33.4 GHz.
M.1638	Características y criterios de protección para los estudios de compartición de radio localización, radionavegación aeronáutica y radares meteorológicos que funcionan en las bandas de frecuencia entre 5 250 y 5 850 MHz.
M.1639	Criterio de protección para el servicio de radionavegación aeronáutica con respecto a las emisiones agregadas de estaciones espaciales del servicio de radionavegación por satélite en la banda 1 164-1 215 MHz.
M.1830	Características técnicas y criterios de protección de los sistemas de radionavegación aeronáutica en la banda de frecuencias 645-862 MHz.
Servicio móvil por satélite	
M.1454	Límite de la densidad p.i.r.e y restricciones operacionales para las RLAN u otros transmisores de acceso inalámbrico a fin de garantizar la protección de los enlaces de alimentación de sistemas no geostacionarios del servicio móvil por satélite en la banda de frecuencias 5 150-5 250 MHz.
Servicio de radiodeterminación	
M.1460	Características técnicas y operativas y criterios de protección de los radares de radiodeterminación en la banda 2 900-3 100 MHz.
M.1462	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radio localización en la gama de frecuencias 420-450 MHz.
M.1463	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 1 215-1 400 MHz.

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Ref. Nr.	Tema
M.1464	Características de los radares de radio localización y características y criterios de protección para los estudios de compartición de radionavegación aeronáutica y los radares meteorológicos en la operación de servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz.
M.1465	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 3 100-3 700 MHz.
M.1640	Características y criterios de protección para los estudios de compartición de los radares que funcionan en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 33.4-36 GHz.
M.1730	Características y criterios de protección para el servicio de radio localización en la banda de frecuencia 15.4-17.3 GHz.
M.1796	Características y criterios de protección para los radares terrestres que operan en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias de 8 500 a 10 500 MHz.
M.1800	La protección de los servicios de telefonía fija, móvil y de radio localización de los enlaces de conexión del MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
M.1802	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radio localización en la banda de frecuencias 30-300 MHz.
RS-1281	Protección de las estaciones del servicio de radio localización de las emisiones de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales en la banda 13.4-13.75 GHz.
GMDSS, búsqueda y rescate	
M.1467	Predicción de la zona marítima A2 y rangos de NAVTEX y protección de las comunicaciones marítimas mundiales de socorro A2 y el sistema de seguridad del canal de socorro.
M.1478	Criterios de protección de los instrumentos de búsqueda y rescate Cospas-Sarsat en la banda de 406-406.1 MHz.
M.1731	Criterios de protección de las terminales locales de usuario Cospas-Sarsat en la banda 1 544-1 545 MHz.
Sistemas móviles	
M.1739	Criterios de protección para sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local, que operan en el servicio móvil de acuerdo con la Resolución 229 (WRC-03) en las bandas 5 150-5 250 MHz, 5 250-5 350 y 5 470-5 725 MHz.
M.1767	Protección de los sistemas móviles terrestres vídeo digitales y sistemas de audio de radiodifusión en las bandas compartidas VHF y UHF atribuidas a título primario.

Ref. Nr.	Tema
M.1800	Protección de los servicios de telefonía fija, móvil y de radio localización de los enlaces de alimentación del MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
Exploración de la Tierra por satélite (pasivo)	
M.1747	Protección de la exploración de la Tierra por satélite (pasivo) en la banda 1 400-1 427 MHz contra emisiones no deseadas de los enlaces móviles por satélite de servicios de alimentación que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
Servicio de radioastronomía	
M.1748	Protección del servicio de radioastronomía en la banda 1 400-1 427 MHz contra emisiones no deseadas de los enlaces de alimentación de MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio-Tierra).
RA.517	Protección del servicio de radioastronomía procedente de transmisores que funcionan en bandas adyacentes.
RA.769	Criterios de protección utilizados para las mediciones radioastronómicas.
RA.1031	Protección del servicio de radioastronomía en las bandas de frecuencias compartidas con otros servicios.
RA.1237	Protección del servicio de radioastronomía procedente de las emisiones no deseadas derivadas de las aplicaciones de modulación digital de banda ancha.
RA.1272	Protección de las mediciones de radioastronomía por encima de 60 GHz contra la interferencia terrestre.
S.1341	Compartición entre los enlaces de alimentación para el servicio móvil por satélite y el servicio de radionavegación aeronáutica en el sentido espacio a Tierra en la banda de 15.4-15.7 GHz y la protección del servicio de radioastronomía en la banda 15.35-15.4 GHz.
Servicios de investigación espacial	
SA.609	Criterios de protección para los enlaces de radiocomunicación de los satélites de investigación tripulados y no tripulados cercanos a la Tierra.
SA.1155	Criterios de protección en relación con la operación de los sistemas de retransmisión de datos por satélite.
SA.1157	Criterios de protección para la investigación del espacio profundo.
SA.1396	Criterios de protección para el servicio de investigación espacial en las bandas 37-38 y 40-40.5 GHz.

4.3 Para diferentes bandas

A continuación, la Tabla 18 proporciona un glosario de recomendaciones UIT-R que establecen relaciones de protección y otros tipos de criterios necesarios para la protección de los diferentes servicios por diferentes bandas de frecuencia.

TABLA 18

Glosario de las referencias sobre criterios de protección relevantes en diferentes bandas

Ref. Nr.	Tema
HF y por debajo (<30 MHz)	
BS.216	Relación de protección para el radiodifusión sonora en la Zona Tropical.
BS.559	Medición objetiva de las relaciones de protección de radiofrecuencia en la radiodifusión LF, MF y HF.
BS.560	Relaciones de protección de radiofrecuencia en la radiodifusión LF, MF y HF.
BS.638	Términos y definiciones utilizados en la planificación de frecuencias de radiodifusión sonora.
F.240	Relaciones de protección señal a interferencia para las distintas clases de emisiones del servicio fijo por debajo de 30 MHz.
M.589	Características técnicas de los métodos de transmisión de datos y protección contra las interferencias de los servicios de radionavegación en las bandas de frecuencia entre 70 y 130 kHz.
M.631	El uso de sistemas hiperbólicos marítimos de radionavegación en la banda de 283.5 a 315 kHz.
VHF (30-300 MHz)	
BS.412	Estándares de planeación de radiodifusión sonora terrestre FM en VHF.
BS.638	Términos y definiciones utilizados en la planificación de frecuencias de radiodifusión sonora.
BS.641	Determinación de las relaciones de protección de radiofrecuencia para la frecuencia modulada de radiodifusión sonora.
BS.773	Relaciones de protección de radiofrecuencia requeridas por la radiodifusión sonora FM en la banda de 87.5 MHz y 108 MHz contra la interferencia de las transmisiones de televisión D/SECAM.
BT.417	Intensidades del campo mínimas para que pueda solicitarse protección en la planificación de un servicio de televisión analoga terrestre.

Ref. Nr.	Tema
BT.655	Relaciones de protección de radio-frecuencia para los sistemas de banda lateral vestigial AM de televisión terrestre interferida por señales no deseadas de visión análoga y sus señales de sonido asociadas.
BT.1123	Métodos de planificación para la televisión terrestre de 625 líneas en VHF/UHF.
BT.1786	Criterio para evaluar el impacto de interferencia con el servicio terrestre de radiodifusión.
F.1670	Protección de los sistemas inalámbricos fijos vídeo digitales terrestres y los sistemas de radiodifusión sonora en bandas compartidas VHF y UHF.
M.441	Relación señal a interferencia e intensidades del campo necesarias en el servicio móvil aeronáutico (R) por encima de 30 MHz.
M.1802	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radio localización en la banda de frecuencias 30-300 MHz.
M.1767	Protección de los sistemas móviles terrestres de vídeo digital terrestre de sistemas de radiodifusión de audio y vídeo en las bandas VHF y UHF compartidas, atribuidas a título primario.
UHF (300 MHz - 3 GHz)	
BO.600	Conjunto estandarizado de condiciones de prueba y procedimientos de medición para la determinación subjetiva y objetiva de las relaciones de protección para la televisión en la radiodifusión terrestre y los servicios de radiodifusión por satélite.
BT.417	Intensidades del campo mínimas para poder solicitar protección en la planificación de un servicio de televisión análoga terrestre.
BT.565	Relaciones de protección para la televisión de 625 líneas contra los transmisores de radionavegación en las bandas compartidas entre 582 y 606 MHz.
BT.655	Relaciones de protección de radio-frecuencia para los sistemas de banda lateral vestigial AM de televisión terrestre interferida por señales de visión análogas no deseadas y señales de sonido asociadas.
BT.1123	Métodos de planificación para la televisión de 625 líneas terrestres en VHF/UHF.
BT.1786	Criterio para evaluar el impacto de interferencia con el servicio de radiodifusión terrestre.
F.1334	Criterios de protección para los sistemas del servicio fijo que comparten la misma banda de frecuencias en el rango de 1 a 3 GHz con el servicio móvil terrestre.
F.1670	Protección de los sistemas inalámbricos fijos de vídeo digital terrestre y los sistemas de radiodifusión sonora en bandas VHF y UHF compartidas.

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Ref. Nr.	Tema
M.1800	Protección de los servicios de telefonía fija, móvil y de radio localización de los enlaces de alimentación del MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
M.1459	Criterios de protección para los sistemas de telemetría en el servicio móvil aeronáutico, y técnicas de mitigación para facilitar el intercambio con satélites geoestacionarios de radiodifusión por satélite y los servicios móviles por satélite en las bandas de frecuencia 1 452-1 525 MHz y 2 310-2 360 MHz.
M.1464	Características de los radares de radio localización y características y criterios de protección para los estudios de compartición de radionavegación aeronáutica y los radares meteorológicos en la operación del servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 2 700-2 900 MHz.
M.1639	Criterio de protección para el servicio de radionavegación aeronáutica con respecto a las emisiones agregadas de estaciones espaciales del servicio de radionavegación por satélite en la banda 1 164-1 215 MHz.
M.1830	Características técnicas y operativas y criterios de protección de los sistemas de radionavegación aeronáutica en las bandas de frecuencia 645-862 MHz.
M.1460	Características técnicas y operativas y criterios de protección de los radares de radiodeterminación en la banda 2 900-3 100 MHz.
M.1462	Características y criterios de protección para los radares que operan en el servicio de radio localización en el rango de frecuencias 420-450 MHz.
M.1463	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 1 215-1 400 MHz.
M.1464	Características de radares de radio localización y características y criterios de protección para los estudios de compartición de radionavegación aeronáutica y los radares meteorológicos en la operación de servicio de radiodeterminación en las bandas de frecuencia 2 700-2 900 MHz.
M.1800	Protección de los servicios de telefonía fija, móvil y de radio localización de los enlaces de alimentación de MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
M.1467	Predicción de la zona marítima A2 y rangos NAVTEX y la protección del canal de vigilancia del sistema mundial de socorro y seguridad marítimos A2.
M.1478	Criterios de protección de los instrumentos de búsqueda y rescate Cospas-Sarsat en la banda de 406-406.1 MHz.
M.1731	Criterios de protección de las terminales locales de usuario Cospas-Sarsat en la banda 1 544-1 545 MHz.

Ref. Nr.	Tema
M.1767	Protección de los sistemas móviles terrestres de vídeo digital y sistemas de audio de radiodifusión en las bandas VHF y UHF compartidas, atribuidas a título primario.
M.1800	Protección de los servicios de telefonía fija, móvil y de radio localización de los enlaces de alimentación de MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
M.1747	Protección de la exploración de la Tierra por satélite (pasivo) en la banda 1 400-1 427 MHz contra emisiones no deseadas de los enlaces móviles por satélite de servicios de alimentación que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y una 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
M.1748	Protección del servicio de radioastronomía en la banda 1 400-1 427 MHz contra emisiones no deseadas de los enlaces de alimentación de MSS que pueden operar en las bandas 1 390-1 392 MHz (Tierra a espacio) y 1 430-1 432 MHz (espacio a Tierra).
SHF y por encima (3 GHz - 300 GHz)	
BO.600	Conjunto estandarizado de condiciones de prueba y procedimientos de medición para la determinación subjetiva y objetiva de las relaciones de protección para la televisión en la radiodifusión terrestre y los servicios de radiodifusión por satélite.
BO.792	Relaciones de protección contra interferencias para el servicio de radiodifusión por satélite (televisión) en la banda de 12 GHz.
BO.1297	Relaciones de protección para ser utilizadas con fines de planificación en la revisión de los apéndices 30 (Orb-85) y 30A (Orb-88) Planes del Reglamento de Radiocomunicaciones en las Regiones 1 y 3.
F.760	La protección de los sistemas de radio enlace terrestres en línea de vista, contra las interferencias del servicio de radiodifusión por satélite en las bandas de cerca de 20 GHz.
F.1190	Criterios de protección para el sistema de radioenlaces digitales para asegurar la compatibilidad con los sistemas de radar del servicio de radiodeterminación.
F.1403	Criterios de densidad del flujo de potencia de las recomendaciones UIT-R para la protección de los sistemas del servicio fijo en bandas de frecuencia compartidas con las estaciones espaciales de diversos servicios espaciales.
F.1502	Protección del servicio fijo en la banda de frecuencias 8 025-8 400 MHz compartidas con sistemas de satélites geoestacionarios de exploración de la Tierra por satélite (espacio a Tierra).
F.1706	Criterios de protección para los servicios inalámbricos fijos punto a punto compartiendo la misma banda de frecuencias con sistemas de acceso inalámbrico nómada en el rango de 4 a 6 GHz.

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Ref. Nr.	Tema
M.1466	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radio-navegación en la banda de frecuencia 31.8-33.4 GHz.
M.1638	Características y criterios de protección para los estudios de compartición de radio localiza-ción, radionavegación aeronáutica y radares meteorológicos que funcionan en las bandas de frecuencia entre 5 250 y 5 850 MHz.
M.1454	Límite de densidad p.i.r.e y las restricciones operacionales para las RLAN u otros transmisores de acceso inalámbrico a fin de garantizar la protección de los enlaces de conexión de sistemas no geoestacionarios del servicio móvil por satélite en la banda de frecuencias 5 150-5 250 MHz.
M.1465	Características y criterios de protección para los radares que funcionan en el servicio de radio-determinación en la banda de frecuencias 3 100-3 700 MHz.
M.1640	Características y criterios de protección para los estudios de compartición de los radares que funcionan en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias 33.4-36 GHz.
M.1730	Características y criterios de protección para el servicio de radio localización en la banda de frecuencias 15.4-17.3 GHz.
M.1796	Características y criterios de protección para los radares terrestres que operan en el servicio de radiodeterminación en la banda de frecuencias de 8 500 a 10 500 MHz.
RS-232	Protección de las estaciones del servicio de radio localización de las emisiones de los sensores activos a bordo de vehículos espaciales en la banda 13.4-13.75 GHz.
M.1739	Criterios de protección para sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local, que operan en el servicio móvil de acuerdo con la Resolución 229 (CMR-03) en las bandas 5 150-5 250 MHz, 5 250-5 350 MHz and 5 470-5 725 MHz.
RA.517	Protección del servicio de radioastronomía procedente de transmisores que funcionan en ban-das adyacentes.
RA.769	Criterios de protección utilizados para las mediciones radioastronómicas.
RA.1031	Protección del servicio de radioastronomía en las bandas de frecuencias compartidas con otros servicios.
RA.1237	Protección del servicio de radioastronomía procedente de las emisiones no deseadas derivadas de las aplicaciones de la modulación digital de banda ancha.
RA.1272	La protección de las mediciones de radioastronomía por encima de 60 GHz contra la interfe-rencia terrestre.
SA-609	Criterios de protección para los enlaces de radiocomunicación de los satélites de investigación tripulados y no tripulados cercanos a la Tierra.

Ref. Nr.	Tema
SA-1155	Criterios de protección en relación con la operación de los sistemas de retransmisión de datos por satélite.
SA-1157	Criterios de protección para la investigación del espacio profundo.
SA-1396	Criterios de protección para el servicio de investigación espacial en las bandas 37-38 y 40-40.5 GHz.



CAPÍTULO 5

LÍMITES DE RADIACIÓN

Aparte de los límites fundamentales de la máxima potencia para equipos de radiocomunicaciones de transmisión especificados en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, en algunos casos, las administraciones, así como usuarios de los diversos aparatos radioeléctricos, deben tener en cuenta otros límites de radiación electromagnética. Estos límites no pueden ser establecidos solo para garantizar condiciones de compartición adecuadas para la compartición del espectro radioeléctrico, sino también para lograr diferentes objetivos, tales como la protección de otro tipo de aparatos (no de radio) contra las perturbaciones electromagnéticas o la protección de los seres humanos contra los posibles efectos nocivos de la radiación electromagnética. Estos límites se describen en este capítulo.

5.1 Límites CISPR

Esta sección se refiere a los límites de radiación de los equipos, que generan o utilizan la potencia de radiofrecuencia para la comunicación con fines excluyentes, tales como los sistemas informáticos y los alimentadores de alta potencia eléctrica. Esto incluye las aplicaciones ICM (también conocidas como ISM, por sus siglas en inglés, para servicios, equipos y aplicaciones industriales, científicas o médicas), donde se utiliza potencia de radiofrecuencia para generar calor para el tratamiento de los tejidos humanos y para el procesamiento de materiales y la fabricación de productos.

Las frecuencias empleadas actualmente para ICM y otras aplicaciones diferentes de comunicación cubren un espectro muy amplio. El reconocido cuerpo internacional de estandarización es el CISPR (del francés: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques), Comité Internacional Especial de Perturbaciones Radioeléctricas, que forma parte de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [54]. Dicho organismo publica tres tipos de estándares:

- **Estándares básicos**

Los estándares básicos EMC proporcionan las condiciones generales y fundamentales o normas para el logro de EMC, que están relacionadas o son aplicables a todos los productos, sistemas o instalaciones, y sirven como documentos de referencia. Las normas básicas son de carácter general y, por lo tanto, no se dedican a familias de productos o productos específicos. Se refieren a la información general, a los fenómenos perturbadores y a las técnicas de medición o de prueba. No se incluyen límites establecidos relacionados con el rendimiento.

- **Estándares genéricos**

Los estándares genéricos EMC son las normas relacionadas con un ambiente particular, que especifica un conjunto mínimo de requisitos esenciales y procedimientos de prueba, aplicables a todos los productos o sistemas que operan en este entorno, siempre y cuando no existan estándares específicos de EMC para una familia de productos en particular, producto, sistema o instalación. Los límites están incluidos y se hace referencia a los procedimientos de prueba.

- **Estándares de productos**

Los estándares de producto definen requisitos específicos de EM, los procedimientos de prueba y límites dedicados a determinados productos, sistemas o instalaciones en los que las condiciones específicas deben ser consideradas.

A continuación se muestra la lista de estándares CISPR pertinentes a cada una de las categorías específicas.

CISPR Estándares básicos EMC

- CISPR 16-1-1 Parte 1-1: Aparatos de medida
- CISPR 16-1-2 Parte 1-2: Equipo auxiliar - Perturbaciones conducidas
- CISPR 16-1-3 Parte 1-3: Equipo auxiliar - Perturbaciones de la potencia
- CISPR 16-1-4 Parte 1-4: Equipo auxiliar - Perturbaciones radiadas

- CISPR 16-1-5 Parte 1-5: Sitios de prueba de calibración de la antena 30 MHz a 1 000 MHz
- CISPR 16-2-1 Parte 2-1: Medición de las perturbaciones conducidas
- CISPR 16-2-2 Parte 2-2: Medición de la perturbación de potencia
- CISPR 16-2-3 Parte 2-3: Mediciones de perturbación radiada
- CISPR 16-2-4 Parte 2-4: Mediciones de la inmunidad
- CISPR 16-4-2 Parte 4-2: Incertidumbre en las mediciones de EMC

CISPR/IEC Estándares genéricos EMC

- CE 61000-6-3: Estándar genérico para emisiones en entornos residenciales, comerciales y de industria ligera
- IEC 61000-6-4: Estándar genérico para emisiones en entornos industriales
- IEC 61000-6-1: Estándar genérico de inmunidad para el entorno industrial residencial, comercial e industria ligera
- IEC 61000-6-2: Estándar genérico de inmunidad para el entorno industrial

CISPR Estándares de producto

- CISPR 11: Límites y métodos de medición de las características de perturbaciones radioeléctricas de equipos industriales, científicos y médicos (ICM) de radiofrecuencia
- CISPR 12: Límites y métodos de medición de las características de las perturbaciones radioeléctricas de los vehículos, embarcaciones motorizadas y de encendido por chispa accionadas por dispositivos de motor
- CISPR 13: Límites y métodos de medición de las características de las perturbaciones radioeléctricas de receptores de radiodifusión sonora y televisión y equipos asociados
- CISPR 14-1: Límites y métodos de medición de las características de las perturbaciones radioeléctricas de los aparatos eléctricos accionados por motor térmico y para uso doméstico y herramientas y aparatos eléctricos similares
- CISPR 14-2: Requisitos para aparatos electrodomésticos, herramientas eléctricas y aparatos análogos. Parte 2: Inmunidad
- CISPR 15: Límites y métodos de medición de las características de las perturbaciones radioeléctricas de luz eléctrica y equipos similares
- CISPR 20: Límites y métodos de medición de las características de inmunidad de receptores de sonido y televisión y equipos asociados
- CISPR 22: Límites y métodos de medición de las características de las perturbaciones radioeléctricas de ITE

- CISPR 24: Límites y métodos de medición de las características de inmunidad de ITE
- CISPR 25: Límites y métodos de medición de las características de las perturbaciones radioeléctricas para la protección de los receptores utilizados a bordo de vehículos

De los estándares anteriores, el CISPR 11, en particular, podría ser de valor para las administraciones de radiocomunicaciones, ya que trata con los límites de emisión para equipos ICM penetrantes.

El CISPR 11 formula los requisitos de emisiones de radiofrecuencia y es aplicable a los aparatos que intencionalmente generan potencia en las frecuencias ICM, según lo señalado por la UIT. Sin embargo, el estándar también es aplicable a todo tipo de aparatos, equipos e instalaciones que son para uso en un entorno industrial y para aplicaciones de laboratorio. Incluye equipos médicos, por ejemplo, con fines terapéuticos. El estándar es adecuado para las mediciones en sitio.

Algunos ejemplos son los siguientes:

- r.f. equipos de calefacción e instalaciones
- Electrodomésticos de cocina de inducción
- Hornos de microondas y aparatos de cocina
- r.f. equipos de soldadura agitados
- Equipos de soldadura de punto
- Equipo de erosión por chispa
- Equipo terapéutico de microondas
- Equipos de ultrasonido
- Equipos médicos e industriales de rayos x
- Equipos de laboratorio tales como:
 - Osciloscopios
 - Analizadores de espectro
 - Analizadores lógicos y de red
 - Generadores de señal
- Fuentes independientes de alimentación y generadores de potencia

Se excluyen del CISPR 11 los aparatos cuyos requisitos de emisión están explícitamente formulados en otros estándares IEC o CISPR, por ejemplo:

- IEC 61800-3: Conversores de potencia de semiconductores para sistemas de velocidad variable de accionamiento eléctrico
- IEC 61326: Equipo eléctrico para el control de medición y uso en laboratorio

- IEC 60601-1-2: Equipos electro médicos
- IEC 60118-13: Audífonos

Sin embargo, los límites de emisión en estas últimas normas se realizaron en estrecha cooperación con CISPR y están de acuerdo con CISPR 11.

Cabe también señalar que para la mayoría de los aparatos contemplados en los requisitos de CISPR 11, las emisiones adicionales se formulan en los estándares IEC 61000-3-2 y IEC 61000-3-3.

Los estándares CISPR se pueden obtener a partir de la IEC con un pago determinado [54].

Ejemplos de límites de emisiones medidas para equipos ICM en diversas bandas de frecuencia de mayor relevancia para los límites de emisiones CISPR se indican a continuación en la Tabla 19 [55].

TABLA 19

Niveles medidos de intensidad del campo de los equipos ICM en varias bandas

Banda de frecuencia	Frecuencia central	No. de la nota correspondiente al cuadro de atribución de frecuencias del RR de la UIT	Rango de intensidades de campo medidas (DB (μ V/m)) (Nota ¹)
6.765-6.795 MHz	6.78 MHz	5.138	80-100
13.553-13.567 MHz	13.567 MHz	5.150	80-120
26.957-27.283 MHz	27.12 MHz	5.150	70-120
40.66-40.70 MHz	40.68 MHz	5.150	60-120
433.05-434.79 MHz	433.92 MHz	5.138 (Región 1), 5.280	60-120
902-928 MHz(2)	915 MHz	5.150 (Región 2)	60-120
2 400-2 500 MHz	2 450 MHz	5.150	30-120
5.725-5.825 GHz	5.8 GHz	5.150	No hay información
24.00-24.25 GHz	24.125 GHz	5.150	No hay información
61.00-61.50 GHz	61.25 GHz	5.138	No hay información
122-123 GHz	122.5 GHz	5.138	No hay información
244-246 GHz	245 GHz	5.138	No hay información

⁽¹⁾ La intensidad del campo es la que existe a una distancia de 30 m desde el límite del edificio en el que se encuentra el equipo de ICM. Por lo tanto, la distancia real entre los equipos ICM y el punto de medición no se conoce.

Normalmente, el cumplimiento de los límites de CISPR no se considera en la práctica diaria de los ingenieros del espectro radioeléctrico, pero sí le concierne al especialista en la aprobación del tipo de equipo y las unidades pertinentes responsables de la administración de radio o de otros organismos que trabajan en el campo de la homologación y la certificación de equipos.

5.2 Límites humanos de exposición a CEM

El tema de la limitación de la exposición humana a los campos electromagnéticos es cada vez más importante, dada la proliferación de las radiocomunicaciones en todos los aspectos de la vida humana y el creciente número de personas que llevan consigo uno o más dispositivos de radio transmisión, tales como teléfonos móviles.

La atención del público sobre los posibles efectos de exposición a campos electromagnéticos (CEM, por sus siglas en inglés) ha aumentado aún más debido a la proliferación y la perspectiva amenazante de las antenas y mástiles de radiocomunicaciones, como aquellas necesarias para las estaciones base de comunicación celular. Por eso es muy importante que las administraciones de radio presten la debida atención a estas preocupaciones del público y establezcan ciertas reglas y límites de exposición a los CEM. Estos pueden ser controlados posteriormente, por ejemplo, como una de las condiciones previas al registrar permisos de estaciones de transmisión de radio y conseguir su funcionamiento.

Durante varios años, ha habido una cantidad considerable de investigación en el campo de la determinación de la influencia de la exposición del cuerpo humano a los campos electromagnéticos. Son conocidos los efectos inmediatos de la exposición a corto plazo y los límites apropiados, por ejemplo, para proteger a los trabajadores. Los efectos a largo plazo son menos conocidos y son objeto de una investigación en curso.

A fin de garantizar que la exposición humana a campos electromagnéticos no tenga efectos adversos para la salud, y que los dispositivos de campos electromagnéticos creados por el hombre sean seguros, se han generado varias pautas e instrumentos internacionales y se han adoptado diversas normas. Estas normas se desarrollan después de las revisiones de toda la literatura científica por parte de grupos de científicos que buscan evidencia de efectos reproducidos consistentemente con consecuencias perjudiciales para la salud. Estos grupos luego recomiendan lineamientos para las normas que dictan los organismos competentes nacionales e internacionales.

Una organización no gubernamental, reconocida formalmente por la OMS en el campo de la protección de las NIR (por sus siglas en inglés, *Non-Ionizing Radiation*), es la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP). La ICNIRP ha establecido directrices internacionales sobre los límites de exposición humana para todos

los campos electromagnéticos, incluyendo la radiación ultravioleta (UV), luz visible y radiación infrarroja, así como los campos de RF y microondas [56].

Basándose en las recomendaciones de la ICNIRP se han desarrollado varios documentos normativos relacionados por parte de la IEC y la UIT, que se deben considerar al abordar los problemas de exposición de los humanos a los CEM. Estas tres recomendaciones UIT-T son las herramientas más importantes para ser consideradas por la administración nacional:

- Recomendación UIT-T K.52 [57] proporciona orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición humana a campos electromagnéticos.
- Recomendación UIT-T K.61 [69] proporciona una guía para la medición y predicción numérica de los campos electromagnéticos para el cumplimiento de los límites de exposición humana.
- Recomendación UIT-T K.70 [70] donde se describen las técnicas de mitigación para limitar la exposición humana a campos electromagnéticos en las cercanías a las estaciones de radiocomunicaciones.

En particular, la Recomendación UIT-T K.52 [57] aparece como el documento de referencia más amplio, ya que establece las definiciones y los antecedentes sobre el tema y establece los límites de los CEM que deben cumplirse. Es importante destacar que también ofrece orientación sobre los métodos a seguir a fin de evaluar la exposición a los CEM, así como enfoques para la mitigación de los efectos de exposición a los CEM.

La Recomendación UIT-T K.70 [70] es útil puesto que centra su atención en la simulación y la mitigación de la exposición a los CEM. Además, también incluye una herramienta de software que puede utilizarse para la realización de las simulaciones.

Además de estas recomendaciones generales UIT-T, puede existir alguna orientación para servicios específicos, como en la Recomendación UIT-R BS.1698 [112], en cuanto a la evaluación de los campos de exposición en la proximidad de las poderosas antenas de estaciones de radiodifusión.



CAPÍTULO 6

CONSIDERACIONES SOBRE LA INGENIERÍA EN SITIO

Este capítulo explora los principios y consideraciones relacionadas con la compartición de los sitios de la radio y la infraestructura general de la red. En la primera sección de este capítulo se cubrirán los principios de la ingeniería de radio en sitio, que se necesitan para evitar la interferencia entre los diferentes dispositivos de radiocomunicación utilizando el mismo sitio (torre). En la segunda sección se ofrecen consideraciones de la compartición de la infraestructura de red, práctica que se vuelve muy relevante, especialmente con el fin de aumentar las redes celulares más viejas (2G) para llevar las tecnologías más avanzadas, tales como 3G/4G.

6.1 Compartición del sitio

6.1.1 Consideraciones generales

El crecimiento de los servicios de radio se ha traducido en un aumento en el número de sitios de radio requeridos y el número de usuarios que comparten estas instalaciones. Los sistemas de radio deben estar diseñados para que los distintos sistemas sean eficientes y funcionen con un mínimo de interferencia con otros sistemas. También puede ser necesario demostrar el uso óptimo de la instalación propuesta para satisfacer las limitaciones de la estética de las estructuras de radio y las preocupaciones ambientales de la comunidad que impacta. El ETSI, en su sistema de publicaciones específicas (como el estándar EN 300 279

[71]), que establece requisitos para los sistemas terrestres de radio móvil privada o un estándar EMC que abarca los diferentes sistemas de radiocomunicaciones EN 301 489 [72]), proporciona una guía para los ingenieros que se ocupan del diseño, especificación, instalación, operación y mantenimiento de sistemas de radio. Está especialmente dirigido a los sistemas que trabajan en las bandas VHF y UHF en el servicio móvil.

La ubicación cercana de los transmisores entre sí causa diversas no linealidades que tienen un impacto significativo al provocar interferencias en el equipo receptor. Los problemas de interferencia de sitios compartidos van desde menores molestias a graves perturbaciones del sistema. Hay tres tipos básicos de interferencia:

- Interferencias de radiofrecuencia (RFI, por sus siglas en inglés).
- Interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés).
- Interferencia de intermodulación (IM, por sus siglas en inglés).

La RFI se utiliza para describir la interferencia en el dispositivo interferido como resultado de las emisiones de radio de otros dispositivos de RF, compartiendo el mismo lugar (la torre que soporta la antena). Por ejemplo, potentes transmisores de radio y televisión que pueden generar suficiente potencia de radiofrecuencia, incluso fuera de sus canales de frecuencia de operación, que pueden bloquear la recepción por otros sistemas en canales y bandas vecinas.

La EMI es la interferencia causada por las computadoras, equipos digitales, equipos eléctricos, sistemas de iluminación, equipos médicos (diatermia), etc.

La intermodulación (IM) es un tipo de interferencia que se produce como resultado de la oscilación interna en el equipo de radio, como resultado de una fuente interna o externa (ver sección 2.5). Cuando los diferentes sistemas de comunicación son colocados en el mismo sitio, la posibilidad de interferencia IM aumenta significativamente.

El problema de los sitios compartidos puede ser abordado mediante la mejora de [1]:

- Gestión de sitios activos.
- Un registro detallado de bases de datos de los equipos de compartición en sitio y parámetros especiales de interferencia.
- Capacidad de análisis de interferencia de compartición en sitio.

La capacidad de recibir correctamente la señal de radio deseada en el receptor fijo depende de si se proporciona el mejor ambiente posible de radiofrecuencia en el sitio. Para lograr esto, el nivel de potencia no deseada que ocurre en la frecuencia recibida debe ser minimizado. En la mayoría de los casos, lo que minimiza el nivel de potencia no deseada emitida por los transmisores locales y el filtrado de señales no deseadas que entran en el receptor elimina la interferencia recibida en el medio receptor. Es más probable que la in-

terferencia sea un problema en sitios con múltiples antenas. Si se han tomado medidas y el receptor sigue captando ruido, las fuentes de interferencia en el entorno deben ser identificadas y eliminadas.

Las áreas problemáticas comunes y las soluciones incluyen:

- Oxidación: todos los materiales deben estar libres de óxido (para evitar que se produzca un mecanismo no lineal).
- No se debe utilizar alambre trenzado, ya que se puede corroer y causar señales de intermodulación.
- Las conexiones de metal a metal deben ser fuertes.
- Todo el metal suelto debe ser retirado del lugar.
- El material de enlace de cadena tipo rejilla debe ser revestido de vinilo.
- La conexión de metales diferentes se debe hacer después de la revisión de una tabla galvánica para cada metal. Las conexiones deben ser fuertes y apretadas.
- No se deben utilizar líneas de transmisión sin revestimiento.
- Los aisladores de línea de potencia (de tipo vidrio) que estén rotos o agrietados son una fuente muy probable de ruido de banda ancha.
- Asegurar que todas las antenas transmisoras direccionales estén apuntando a la transmisión o lejos de las antenas receptoras para prevenir posible desgaste. Mantener una separación de 20 m para evitar el agotamiento.
- Otro elemento a considerar es la colocación de la antena y el espaciamiento. Los criterios de diseño que especifican un espacio mínimo son muchas veces ignorados, para poder llenar la torre o la parte superior del techo con antenas adicionales. Los estándares relativos a la torre y a la capacidad de carga del techo deben ser revisados y corregidos si es el caso.
- Se deben aplicar todos los estándares de los equipos a todas las instalaciones de los sitios, si se pretende reducir al mínimo los problemas de interferencia.

Aunque no se pueden garantizar las operaciones libres de interferencia, cuando se cumple con todos los estándares y se realiza una buena gestión del sitio existe la posibilidad de que los problemas se reduzcan y que el tiempo de resolución de interferencias sea mínimo.

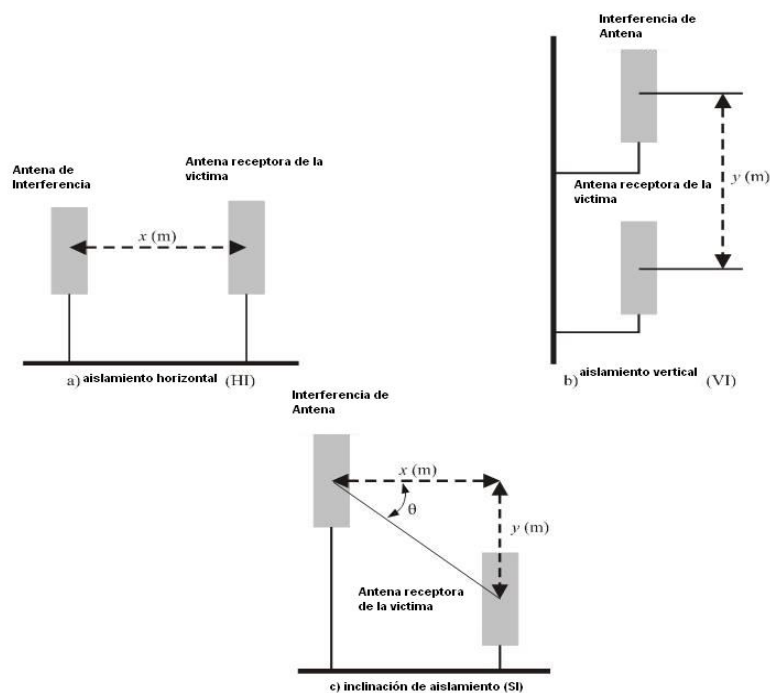
6.1.2 Consideraciones sobre el aislamiento de la antena

Caso general

La razón principal de la RFI en las configuraciones de sitios compartidos puede resultar por un aislamiento insuficiente entre las antenas de dos sistemas de radio interferentes.

FIGURA 33

Aislamiento de la antena en dirección horizontal, vertical e inclinación



0337-01

Por lo tanto, cuando varios sistemas de radio están localizados en el mismo sitio, el concepto de aislamiento de la antena debe ser tenido en cuenta en el cálculo de la interferencia entre ellos. La Figura 33 [58] proporciona ejemplos genéricos de organización de antenas que ilustran los aislamientos de configuraciones de antena horizontales (HI), verticales (VI) y de inclinación (SI).

El aislamiento de la antena depende principalmente de la distancia de separación y la longitud de onda, λ (m). La distancia de separación entre dos antenas es la distancia desde el centro de la antena interferente a la antena del receptor interferido.² El aislamiento de antena a antena se expresa normalmente en términos de dB de atenuación.

El aislamiento entre dos antenas dipolo puede ser calculado utilizando las siguientes expresiones:

² En situaciones prácticas, la distancia entre la antena interferente y la antena del receptor interferido puede ser medida, para mayor comodidad, entre los bordes más próximos de ambos sistemas de antena.

$$\begin{aligned}
 HI(\text{dB}) &\approx 22 + 20 \log(x/\lambda) \\
 VI(\text{dB}) &\approx 28 + 40 \log(y/\lambda) \\
 SI(\text{dB}) &\approx (VI - HI) \cdot 2\theta/\pi + HI
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

Donde:

θ (rad): es $\tan^{-1}(y/x)$

x : es la distancia horizontal

y : es la distancia vertical

Las Ecuaciones (32) son aplicables cuando x es mayor que 10λ y y es mayor que λ .

Estos aislamientos obtenidos a partir de las Ecuaciones (32) pueden ser utilizados para el cálculo de la potencia recibida empleando las consideraciones típicas del cálculo de enlace, como la fórmula de la Ecuación (4). En este caso de antenas ubicadas en el mismo sitio, el aislamiento de la antena calculado debe ser introducido como la pérdida básica en la trayectoria de propagación (L_p) para obtener la potencia de la señal interferente.

6.1.3 Co-ubicación de antenas de radiodifusión MF

En caso de que se desee transmitir más de una señal de radio de MF desde un sitio, primero se debe considerar si es posible alimentar varias señales a una antena de MF. Esto podría hacerse mediante el uso de los dispositivos llamados diplexor o triplexor, para combinar, respectivamente, las señales de dos o tres transmisores AM en MF que se ajusten con el circuito de salida, combinada con la impedancia de la antena. Especialmente, los diseños de antena conocidos como “de dipolo doblado” (antenas no direccionales polarizadas verticalmente de media longitud de onda y una sola torre (antena) alimentada en un punto elegido especialmente por encima de la base inferior) son muy adecuados para transmitir señales de las estaciones de MF en la misma banda.

En general, no se recomienda la co-ubicación de antenas MF muy cerca de torres de antena de sistemas de radiocomunicaciones (y cualquier otra clase de torres conductoras/estructuras en general), debido a los efectos de re-radiación sobre el patrón de señal de la estación AM en MF interferida. Lo que sucede es que la otra torre (antena) de gran tamaño, que tiene unas dimensiones de tamaño comparables a la longitud de onda del transmisor AM (por ejemplo, en el orden de $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{4}$ de λ longitud de onda), actuará como caja de resonancia eficaz, que recibirá parte de la potencia del transmisor AM e irradiará más allá, ac-

tuando así como elemento pasivo que irradia dentro del sistema aéreo de transmisión de AM y, en consecuencia, cambiando su patrón de radiación.

Por ejemplo, en Estados Unidos, las regulaciones de la FCC exigen que la protección de estaciones de radio AM se tengan en cuenta al construir o modificar las torres existentes y otras estructuras similares, que podrían distorsionar el patrón de la estación AM a 1 km del sitio de un transmisor de radiodifusión no direccional (una sola torre) y a 3 km de un sistema direccional (multi-torre).

Otra guía práctica utilizada entre los radiodifusores europeos es una consideración que varios problemas EMC pueden ocurrir hasta una distancia donde la intensidad del campo radiada cae a 3 V/m [117]. La radiación de intensidad de campo de una antena, en el campo lejano, se puede calcular utilizando la expresión:

$$E = \sqrt{377 \cdot \frac{P_{TX} \cdot G_A}{4 \cdot \pi \cdot r^2}} \quad [\text{V/m}] \quad (33)$$

Donde: P_{TX} es la potencia del transmisor [W], G_A es la ganancia de la antena (lineal en este caso) y r es la distancia desde la antena [m].

Nótese que la condición de campo lejano requiere una distancia de 10λ , preferiblemente, pero en circunstancias prácticas se puede utilizar un valor de antena de por lo menos $(1/2 \dots 1) \lambda$. En general, incluidas las situaciones que tratan de complejos arreglos de antenas múltiples, se puede utilizar la siguiente fórmula [117] para estimar el valor mínimo de r :

$$r = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} \quad [m] \quad (34)$$

Donde:

$D [m]$: es la mayor dimensión de la antena

Así, por ejemplo, para una antena mono polo típica de MF operando con un transmisor de 100 kW, la zona “problema”, caracterizada por la intensidad del campo de 3 V/m o más, se extendería hasta 1280 m.

En el caso de que otras antenas más grandes (o torres conductoras) deban ser montadas en el rango de impacto de las antenas de MF, su influencia de radiación podría ser reducida con la aplicación de técnicas especiales de “desorientación de torre”, que prevén aislar la torre (antena) interferente de la Tierra y también fragmentarla en secciones aisladas mucho más pequeñas que la longitud de onda del transmisor AM en MF, o instalar un dispositivo especial externo en la torre (antena) interferente para reducir sus características de

re-radiación (reduciendo esencialmente la posibilidad de que la corriente fluya en la antena interferente o cambie su frecuencia de resonancia del transmisor AM en MF afectado).

La evaluación precisa del impacto de la ubicación cercana de las antenas es posible utilizando herramientas computacionales avanzadas, tales como NEC (código numérico electromagnético), que es una herramienta de software para modelamiento [114, 118].

Sin embargo, los avances más recientes en la ingeniería de torres proporcionan evidencia de algunas de las posibilidades de ubicar en el mismo sitio antenas en MF con antenas de sistemas trabajando en bandas VHF/UHF, por ejemplo, mediante el montaje de esas otras antenas directamente en los mástiles de la antena activa en MF. Esto es posible gracias a una separación suficiente de frecuencia de dos sistemas y al hecho de que las transmisiones desde las antenas compactas VHF/UHF representan la radiación en “espacio libre”, es decir, que no requieren de la Tierra como elemento que defina el sistema radiante. Un ejemplo que trata con el montaje de antenas de estaciones base celulares en el mástil de la antena en MF se puede encontrar en [114]. Otra aplicación típica sería el montaje de antenas para la radiodifusión de FM en VHF en la antena activa de radiodifusión AM.

Algunas otras referencias útiles sobre el diseño y ubicación de antenas de radiodifusión AM en LF/MF son:

- La Recomendación UIT-R BS.139 [110], que tiene recomendaciones generales sobre la selección del sitio, por ejemplo, situar la antena transmisora cerca del centro del área de servicio, y el uso de esteras de tierra activas.
- La Recomendación UIT-R BS.1386 [111] sobre parámetros de rendimiento, diseño y modelado de la antena en LF/MF. En particular, proporciona recomendaciones interesantes sobre el diseño de antenas antidesvanecimiento. El desvanecimiento se ve agravado cuando los componentes de la onda de tierra y aérea se suman en el receptor. Por lo tanto, si la recepción está dirigida principalmente a la propagación de la onda de superficie (que debería ser el caso cuando se trata de estaciones de radio local/regional en MF, un escenario típico en Colombia), el desvanecimiento se puede reducir mediante el control de la cantidad de potencia de las ondas celestes radiadas en el área de servicio deseada. Este control se puede lograr mediante la selección de antenas verticales mono polo con alturas eléctricas en el rango de $(0,5 \dots 0,6) \lambda$. En este caso, el patrón de radiación vertical muestra los lóbulos laterales mínimos y menores en el sector angular de 50° a 90° , donde la radiación se dirige a la ionosfera.
- La Recomendación UIT-R BS.1698 [112] sobre modelamiento de EMF alrededor de las antenas BC. En contraste con las frecuencias de microondas, donde la EMF tiene características de campo en la zona lejana, incluso a distancias muy cortas de la fuente de radiación, y donde el concepto de densidad de potencia radiada (intensidad del vector Poynting) es muy útil, en la banda de frecuencia MF/LF, el campo

en las cercanías de antena es muy complejo. De hecho, en la zona de campo cercano, la simple relación entre los campos eléctricos y magnéticos ya no existe: los dos campos no están en fase y su relación no es de 377Ω .

Este hecho, además, complica las relaciones en EMF por debajo de 10 MHz. Esta recomendación muestra que la intensidad del campo medida dependerá del tipo de antena de transmisión, potencia de transmisión y la distancia de la antena transmisora. Por ejemplo, las intensidades del campo de alta potencia de transmisión, en un sitio típico de LF/MF, pueden variar desde unos pocos V/m hasta 250 V/m. Muy cerca de la antena de transmisión, la fuerza del campo puede ser del orden de 1000 V/m, lo que claramente requiere establecer las áreas donde debe prohibirse el acceso al personal de servicio durante la operación del transmisor (s).

6.2 Compartición de infraestructuras

La compartición de la infraestructura se debe entender como un principio general para la implementación conjunta de las redes de radiocomunicaciones, a través del intercambio amplio de las instalaciones:

- Sitios de radio, torres de antenas y antenas.
- Instalaciones y recursos de la red transmisión (*backbone*).
- Instalaciones del núcleo (*core*) de la red (equipos de conmutación, si es el caso).

La compartición de la infraestructura de diferentes grados se ha hecho cada vez más atractiva, ya que proporciona muchos beneficios en términos de economía y disminución de los tiempos de implementación, pues evita la necesidad de erigir una nueva y costosa infraestructura.

Las prácticas habituales más recientes de compartición de infraestructura incluyen:

- Compartición de sitios remotos (zonas rurales, escasamente pobladas) y enlaces de transmisión de las zonas rurales de diferentes operadores de las redes 2G/3G.
- Reutilización de la infraestructura 2G (desde los sitios de radio a los elementos del núcleo de la red) para aumentar la red celular 2G con tecnología de acceso en radio de 3G.

La primera práctica es especialmente adecuada para los operadores que necesitan cubrir áreas en zonas poco pobladas, ya que la construcción y mantenimiento de las instalaciones del sitio es muy costosa (es bastante exigente en términos de seguridad y especial-

mente en cuanto al mantenimiento de compartición, debido a los altos costos de suministro de electricidad, ya que a menudo los generadores diesel son la única opción). La segunda práctica es muy común en estos días, cuando los operadores tradicionales de redes 2G actualizan sus redes para la tecnología 3G.

En muchos países, los principios de compartición de infraestructura están consagrados como parte de las obligaciones impuestas a los operadores de redes públicas. Aunque generalmente no es responsabilidad de los organismos reguladores especificar esta función en detalle, sino, en principio, solo establecerla.

El análisis de las diferentes posibilidades de compartición de la infraestructura arroja los siguientes resultados:

- Las soluciones disponibles (niveles de compartición) contribuyen al objetivo de la reducción de la inversión inicial y a la optimización de la cobertura de las redes 3G a medida que estas son desplegadas. Están técnicamente disponibles en el marco de los estándares internacionales (IMT-2000).
- Estas soluciones permiten la evolución hacia redes separadas, durante las últimas fases de implementación, en respuesta a las necesidades cambiantes de tráfico y servicios.
- Solo afectan a los diferentes elementos de la infraestructura, el diseño y la gestión operativa de las redes, sin repercusión especial en los terminales de usuario.
- En relación con el nivel adaptado de compartición, la distribución de los elementos de la infraestructura requiere de la coordinación y cooperación entre los operadores interesados. Además de un marco regulatorio adecuado, la participación requiere de cooperación eficaz entre los operadores.
- Se requiere de una coordinación muy detallada entre los operadores involucrados.
- Todas las soluciones de compartición con grados variables tienen repercusiones sobre la implementación de la red y sus funciones operativas, en particular:
 - La sincronización de las operaciones de control y mantenimiento.
 - La capacidad para cumplir con las exigencias de cada operador, el desempeño técnico y la calidad del servicio, que es esencial para desarrollar en un marco de intercambio.
 - La asignación de los recursos disponibles en un entorno de competencia.
- El despliegue de redes puede conservar los patrones individuales, ya que cada operador es libre de decidir sobre sus estrategias de expansión y solo solicitar el acceso a una infraestructura específica cuando sea necesario de acuerdo con su estrategia de expansión propia.

El arreglo más eficiente es el que permite, según el entorno y las circunstancias, los efectos económicos deseados, conservando las bandas de frecuencia asignadas a los operadores de estos servicios. En consecuencia, la política de compartición debe tener en cuenta

la situación nacional con una flexibilidad que permita soluciones adaptativas con base en cada caso.

La compartición de infraestructura como tal no es tema de consideración por parte de los ingenieros de espectro, sino que es más bien un tema de política general de desarrollo de las telecomunicaciones. Sin embargo, en caso de aprobarse podría tener repercusiones sobre las prácticas de ingeniería del espectro, tanto de carácter positivo como negativo:

- En cuanto a las repercusiones positivas, la compartición de infraestructura tiende a simplificar algunos aspectos de uso en la planificación de frecuencias, ya que reduce el número de sitios de radio a tener en cuenta y contribuye a un uso más eficiente del espectro radioeléctrico. Por ejemplo, un número reducido de frecuencias necesarias para los enlaces de radio transmisión, etc.
- Sin embargo, la compartición de infraestructura supone la misma ubicación de los equipos transmisores de radio, lo que requiere más cuidado y consideración de la ingeniería del terreno (ver sección 6.1). Sin embargo, este efecto puede ser resuelto fácilmente mediante el empleo de medidas de organización adecuadas.

PARTE 2

APLICACIONES PRÁCTICAS



CAPÍTULO 7

ASEGURAR LA COMPATIBILIDAD EN LA ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS

Este capítulo describe los principios para garantizar la compatibilidad electromagnética al hacer las asignaciones de frecuencias a las estaciones de radio (otorgamiento de licencias). Cuando la administración implementa estos principios se asegura de evitar interferencias entre los distintos usuarios del espectro radioeléctrico, maximizando el uso eficiente de los recursos del espectro.

La primera sección presenta los principios fundamentales para asegurar la compatibilidad a través de la separación de la frecuencia y la distancia de las asignaciones. En las siguientes secciones se describen las prácticas y ejemplos de cómo estos principios se aplican a diversos servicios típicos: el caso de telefonía móvil, fija, así como en el caso de la utilización compartida de la banda por parte del servicio fijo y el servicio fijo por satélite.

7.1 Principios de la separación de frecuencia-distancia

La separación de las asignaciones de frecuencia (es decir, las estaciones que utilizan frecuencias particulares en determinados lugares), en frecuencia y distancia, es el principio fundamental para asegurar que las asignaciones de frecuencia no produzcan interferencias mutuas. Esto se conoce como la separación frecuencia y distancia (FD) de estaciones de radio y asignaciones de frecuencia.

Los principales factores que determinan los criterios de separación adecuada FD incluyen:

- La sensibilidad y el ancho de banda (los parámetros del filtro) del receptor.
- Potencia y distribución espectral de las señales interferentes recibidas por el receptor interferido.
- La pérdida de transmisión de la onda de radio entre el interferente y el intereferido (pérdida de trayectoria).

La Recomendación UIT-R SM.337 [58] prescribe el siguiente procedimiento para el cálculo de la separación entre las asignaciones de frecuencia FD:

- 1) Seleccionar el modelo de propagación apropiado UIT-R para ser utilizado.
- 2) Determinar la potencia (y la distribución espectral, de ser relevante) de la señal interceptada deseada (útil) por el receptor.
- 3) Determinar la potencia (y la distribución espectral de ser relevante) de las señales interferentes y el ruido interceptado por el receptor.
- 4) Determinar los efectos interactivos entre señales deseadas, la interferencia y las características del receptor para varias frecuencias o separaciones de distancia, mediante el uso de ecuaciones adecuadas (se encuentran abajo, en esta sección).
- 5) Determinar, a partir de los datos anteriores, el grado de separación FD que proporcionará el grado de servicio requerido y la probabilidad del servicio requerido.

En la práctica, las reglas de FD a menudo se establecen de antemano y podrían ser aplicadas durante el proceso de asignación como un simple conjunto de condiciones algorítmicas. Para los servicios canalizados, estas reglas de FD adoptan la siguiente forma: los transmisores co-canal deben estar separados al menos por d_0 (km), los transmisores del canal adyacente deben estar separados al menos por d_1 (km), los transmisores separados por dos canales deben estar por lo menos a d_2 (km) de distancia y así sucesivamente. A continuación, se presenta la metodología que se requiere para determinar las reglas de separación de FD entre sistemas similares y no similares.

El desarrollo de una nueva regla de FD requiere del cálculo del nivel de interferencia en la entrada del receptor interferido, y también requiere la definición de un criterio de interferencia aceptable.

Cálculo de interferencia

Esto depende de dos factores principales: un factor espectral y un factor espacial.

El *factor espectral* depende de las características espectrales del transmisor interferente y de la respuesta de frecuencia del receptor interferido. Para efectos de cálculo se de-

be tener un conocimiento preciso de la densidad de potencia espectral de la señal interferente, que depende de factores tales como la técnica de modulación subyacente y el ancho de banda de la señal de información, para los sistemas análogos, y la velocidad de transmisión de datos, en el caso de los sistemas digitales.

En cuanto al receptor interferido se refiere, hay que conocer las características de respuesta de frecuencia equivalente IF del receptor. Las especificaciones del fabricante, tales como 6 dB y el ancho de banda de 40 dB de la etapa IF, pueden ser utilizados como base para el modelamiento de la frecuencia IF del receptor.

El factor espectral está representado por el factor OCR (Δf), rechazo fuera de canal, que se define por la siguiente relación:

$$\text{OCR}(\Delta f) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df} \quad (35)$$

[dB]

Donde:

$P(f)$: densidad de potencia espectral de la señal interferente en (W/Hz)

$H(f)$: respuesta de frecuencia IF equivalente del receptor interferido

Δf : separación de frecuencias entre el receptor interferido y el transmisor de la interferencia

A partir de la Ecuación (35), es evidente que el OCR (Δf) depende en gran medida del grado de superposición entre el ancho de banda del receptor y el espectro de potencia de la señal interferente. A medida que aumenta Δf , disminuye el grado de superposición, resultando en un nivel de potencia interferente menor o valores equivalentes más altos para OCR (Δf).

El *factor espacial* de la metodología tiene que ver con el cálculo de la atenuación de la señal relacionada con la distancia y, por lo tanto, está estrechamente relacionado con el modelo de propagación que se utilizará y la distribución estadística de la señal que interfiere en el extremo frontal del receptor interferido. Debe utilizarse un modelo de propagación adecuado según lo recomendado por la UIT-R (ref. Tabla 2). El modelo de propagación a utilizarse con este procedimiento, depende, por supuesto, de la configuración del sistema, así como de la banda de frecuencia de operación y el entorno geográfico que rodea el área de servicio y el ancho de banda del sistema.

Criterio de interferencia

Generalmente es una simple relación en la cual uno se basa para determinar si la interferencia es perjudicial o tolerable. Este criterio debería estar idealmente ligado al nivel de degradación en el rendimiento que el receptor interferido puede tolerar. Sin embargo, esto no es práctico, por lo menos si se considera que hay muchos tipos de sistemas y tecnologías diferentes que pueden no ser capaces de lidiar con la interferencia de la misma manera. Se adopta un criterio más genérico basado en una relación de protección de α (dB) (ver sección 4.1). La interferencia se considera tolerable si se cumple la siguiente desigualdad:

$$P_d - P_i \geq \alpha \quad (36)$$

Donde:

P_d : nivel de señal deseado (dBW)

P_i : nivel de señal interferente (dBW)

α : relación de protección (dB)

Procedimiento

El procedimiento para el desarrollo de una regla de separación FD se puede resumir de la siguiente manera:

Paso 1: determinar el nivel de señal deseada P_d (dBW) en el extremo frontal del receptor interferido.

Paso 2: calcular el nivel de interferencia resultante en el extremo frontal del receptor interferido mediante la fórmula:

$$P_i = P_t + G_r - L_p - \text{OCR}(\Delta f) \quad (37)$$

Donde:

P_t : potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) del emisor interferente (dBW)

G_r : ganancia de la antena receptora con respecto a una antena isotrópica (dBi)

L_p : pérdida en la trayectoria de propagación

OCR (Δf): factor de rechazo fuera de canal para una separación de frecuencia Δf , tal como se expresa en la Ecuación 33.³

Paso 3: sustituir P_d y P_i de los pasos 1 y 2 en la Ecuación (36) para obtener o calcular numéricamente una relación entre la separación de frecuencia Δf y la distancia de separación d , de tal manera que la interferencia se considere tolerable.

Procedimiento alternativo

En el entorno real, la señal recibida en el receptor interferido experimenta el desvanecimiento de sombra que está representado por la distribución log normal. Para compensar este efecto de atenuación, el nivel de señal recibida debe ser más alto que el nivel de sensibilidad. Por lo tanto, un procedimiento alternativo para la determinación del aislamiento necesario entre el afectado y el interferente, refleja el efecto de sombra y se presenta de la siguiente manera:

Paso 1: calcular el aislamiento necesario para evitar causar radio interferencias al posible afectado mediante la fórmula:

$$L_I = P_t + G_r - (P_{min} - \alpha) - \text{OCR}(\Delta f) - 10 \log(10^{N/10} - 1) \quad (38)$$

Donde:

- L_I : aislamiento necesario entre la interferencia y el afectado para asegurar interferencias tolerables (dB)
- P_t : potencia radiada isotrópica equivalente (p.i.r.e.) del emisor interferente (dBW)
- G_r : ganancia de la antena receptora con respecto a una antena isotrópica (dBi)
- P_{min} : nivel de señal deseado mínimo (dBW)
- α : relación de protección (dB)
- OCR(Δf): factor de rechazo fuera de canal para la separación de frecuencia Δf tal como se expresa en la Ecuación (32)
- N : margen de desvanecimiento logarítmico normal (dB)

³ A menudo, los valores de OCR se pueden obtener como parte de la descripción técnica de los equipos en cuestión.

Paso 2: el empleo de un modelo de propagación UIT-R adecuado para la Ecuación (38), proporciona la separación de frecuencia Δf y la distancia d en la que la interferencia puede ser tolerable.

7.2 Servicios móviles terrestres (radio móvil privado)

Para demostrar la metodología de separación de FD aplicada al caso del servicio móvil terrestre (PMR, por sus siglas en inglés), en esta sección se describe un ejemplo usando dos sistemas diferentes de radio móvil [58]. Los dos sistemas considerados podrían ser digitales o análogos con técnicas de acceso TDMA o FDMA. Los cálculos siempre se basan en las máscaras de emisión espectral y ciertos requisitos de selectividad del receptor y, como tal, los resultados son independientes de cualquier técnica de modulación que pueda ser utilizada por cualquiera de los dos sistemas. En este ejemplo, la selectividad del receptor se supone que tiene características similares a las máscaras de emisión espectral, una consideración que se espera sea el caso en los sistemas digitales.

Los supuestos para los parámetros técnicos de los dos sistemas PMR considerados, se resumen en la Tabla 20.

TABLA 20

Parámetros de los sistemas PMR considerados

Mínimo nivel de señal deseada, P_{min}	-145 DBW
Relación de protección requerida, α	18 dB
Altura de la antena de la estación base, h_b	75m
Frecuencia de operación, f	450 MHz
Estación base p.i.r.e.	20 dBW
Ganancia de la antena receptora base	0 dBi
Permisividad relativa equivalente, ϵ	30
Conductividad equivalente, σ	10^{-2} S/m

En los sistemas PMR hay cuatro modos de interferencia:

- Base a base
- Base a móvil

- Móvil a base
- Móvil a móvil

En los sistemas simplex, donde la base y los móviles transmiten en la misma frecuencia, están presentes los cuatro modos de interferencia. Por otro lado, en los sistemas dúplex, los móviles y la base transmiten en frecuencias diferentes y, por lo tanto, solo los modos de base a móvil y de móvil a base se deben tener en cuenta. Para el análisis de la distancia de separación, sin embargo, solo tenemos que mirar el peor de los casos: el caso de interferencia, que exige la mayor distancia de aislamiento entre los sistemas. En la mayoría de las situaciones, las estaciones base se supone que operan cerca de 100% del tiempo y el modo de interferencia de base a base es el modo dominante, por lo cual exige la mayor distancia de separación. Por esta razón, no se consideran otros modos en este documento.

Ahora procedemos a presentar los modelos de propagación para sistemas PMR, seguidos por los resultados numéricos para cada una de las dos combinaciones del sistema en estudio.

Interferencia de base a base

El modelo de propagación elegido para el modo base a base es el modelo de propagación por difracción (ver la Recomendación UIT-R P.526 [2]). Bajo este modelo, la pérdida en la trayectoria se expresa como:

$$L_{P_{bb}} = L_{FS} - L_{DIF/FS} \quad (39)$$

Donde:

L_{FS} : la pérdida de trayectoria (dB), debido al espacio libre

$L_{DIF/FS}$: la pérdida de difracción sobre la pérdida en espacio libre (dB) y se define de la siguiente manera:

$$L_{DIF/FS} = 20 \log \left(\frac{E_{DIF}}{E_{FS}} \right) = F(X) + G(Y1) + G(Y2) \quad (40)$$

Donde:

$F(X)$: término de ganancia dependiendo de la distancia normalizada entre las estaciones base

$G(Y1), G(Y2)$: los términos de ganancia dependientes de las alturas normalizadas de las antenas de estaciones base

X : distancia normalizada entre las antenas de las estaciones base

Y_1, Y_2 : altura de las antenas normalizadas y se define como sigue:

$$X = 2.2\beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \quad (\text{xx3}) \quad (41)$$

$$Y = 9.6 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h_{1,2}$$

Donde:

$$\beta = \frac{1 + 1.6 K^2 + 0.75 K^4}{1 + 4.5 K^2 + 1.35 K^4} \quad (42)$$

Donde:

K : la admisión de superficie de la Tierra para la polarización vertical

$$K = 0.36(a_e f)^{-1/3} \left[(\epsilon = 1)^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{-1/4} \left[\epsilon^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad (43)$$

Donde:

ϵ : permisividad relativa equivalente de la Tierra

σ : conductividad equivalente (S/m) de la Tierra

a_e : radio equivalente de la Tierra igual a 4/3 de 6.371 kilómetros

d : distancia entre el transmisor y el receptor (km)

f : frecuencia de transmisión

h_1 and h_2 : alturas de las antenas del transmisor y receptor, respectivamente

$$F(X) = 11 + 10 \log(X) - 17.6X$$

$$G(Y) \approx 17.6 (Y - 1.1)^{1/2} - 5 \log(Y - 1.1) - 8 \quad \text{para } Y > 2;$$

$$G(Y) \approx 20 \log(Y + 0.1Y^3) \quad \text{para } 10 K < Y < 2;$$

$$G(Y) \approx 2 + 20 \log K + 9 \log(Y/K) [\log(Y/K) + 1] \quad \text{para } K/10 < Y < 10 K;$$

$$G(Y) \approx 2 + 20 \log K \quad \text{para } Y < K < 10.$$

Donde K es la admisión de superficie normalizada.

Resultados numéricos

Aspectos del espectro

En este ejemplo, nos fijaremos en dos estudios de caso:

Caso 1: un sistema de 25 kHz con un sistema de 12.5 kHz.

Caso 2: un sistema de 12.5 kHz con un sistema de 25 kHz.

Los resultados numéricos de los dos casos se muestran en la Tabla 21, en la que OCR (Δf) se expresa como una función de la separación de frecuencia Δf (kHz).

TABLA 21

Resultados del rechazo fuera de canal para la interferencia entre dos sistemas PMR

Δf (kHz)	Caso 1: OCR(Δf) (dB)	Caso 2: OCR(Δf) (dB)
0	@ 0	@ 0
12.5	26.4	29
25	57.7	58.8
37.5	57.7	59

Aspectos espaciales

Con base en los parámetros asumidos, como se muestra en las tablas 20 y 21, y suponiendo una distribución logarítmica normal de la potencia de la señal recibida deseable, un factor de variabilidad en la ubicación de 17 dB, la cobertura del 90% para el sistema móvil terrestre sería de 32 km. El correspondiente nivel de potencia deseado del receptor es:

$$P_d = P_{min} + L_{VF} = -128 \text{ dBW}$$

Por lo tanto, el nivel de interferencia aceptable es: $P_d - \alpha = -146 \text{ dBW}$

Las distancias de separación requeridas, D, entre las estaciones base para los dos casos en estudio, se han calculado con base en el procedimiento presentado en las ecuaciones (39) - (43) arriba. Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 22.

TABLA 22

Distancia de separación requerida entre dos sistemas PMR

Δf (kHz)	Caso 1 y Caso 2: D (km)
0	107.5
12.5	72.5
25	33
37.5	33

Margen de desvanecimiento dependiente de los aspectos de aislamiento

Utilizando los parámetros indicados en las tablas 20 y 21 y el procedimiento alternativo para el cálculo de la separación de FD descrito en el apartado anterior, se obtiene el aislamiento requerido, L_I , en términos de margen de desvanecimiento logarítmico como en la Tabla 19.

Nótese a partir de la Tabla 23 que el N más grande requiere menor aislamiento, lo cual significa más cortas distancias de separación permitidas por un modelo de propagación.

Todos estos ejemplos demuestran cómo las reglas de separación de FD podrían ser establecidas para su uso en la asignación de frecuencias en las estaciones de servicio móvil terrestre.

TABLA 23

Aislamiento requerido, L_I (dB) como función del margen de desvanecimiento N (dB)

Δf (kHz)	Caso 1		Caso 2	
	$N = 3$ dB	$N = 10$ dB	$N = 3$	$N = 10$
0	183.02	173.46	183.02	173.46
12.5	156.62	147.06	154.02	144.46
25	125.32	115.76	124.22	114.66
37.5	125.32	115.76	124.02	114.46

7.3 Servicios fijos

En el caso de los servicios fijos (FS, por sus siglas en inglés), con las aplicaciones a menudo llamadas “enlaces de relevadores radioeléctricos” o “enlaces de microondas”, las normas de asignación de frecuencias toman una forma más específica y simplificada que ofrece detalles del despliegue de servicios fijos. Lo más notable es que sus antenas altamente direccionales proporcionan una reducción suficiente en los lóbulos laterales y traseros, para permitir el despliegue de los canales adyacentes o incluso de los mismos canales en el mismo sitio de radio, siempre y cuando las respectivas antenas se encuentren apuntando en distintas direcciones y utilicen distinta polarización.

Por lo tanto, garantizar la separación de frecuencias necesaria consiste en la selección cuidadosa de los patrones de canal homogéneo para el despliegue de FS y el estricto apego a los mismos. Los principios de la gestión de canales FS se describen en la Recomendación UIT-R F.746 [59], que prescribe que en la asignación de frecuencias para FS, los arreglos del canal se desarrollen a partir del patrón homogéneo y en concordancia con el alterno (ver Figura 34 (a)), de la reutilización de la banda co-canal (ver Figura 34 (b)), o se hagan arreglos para la reutilización intercalada de bandas de radiofrecuencia (ver Figura 34 (c)).

La elección de la disposición de los canales de radiofrecuencia depende de los valores de polarización cruzada y de la discriminación del filtro de red (XPD), donde estos parámetros se definen como:

$$XPD_{H(V)} = \frac{\text{Potencia recibida en la polarización } H(V)}{\text{Potencia recibida en polarización opuesta}} \frac{\text{Transmitida en la polarización } H(V)}{\text{Transmitida en la polarización } V(H)} \quad (44)$$

$$NFD = \frac{\text{Potencia recibida de canal adyacente}}{\text{Potencia recibida de canal adyacente o el receptor principal después de filtrado RF, IF, BB}} \quad (45)$$

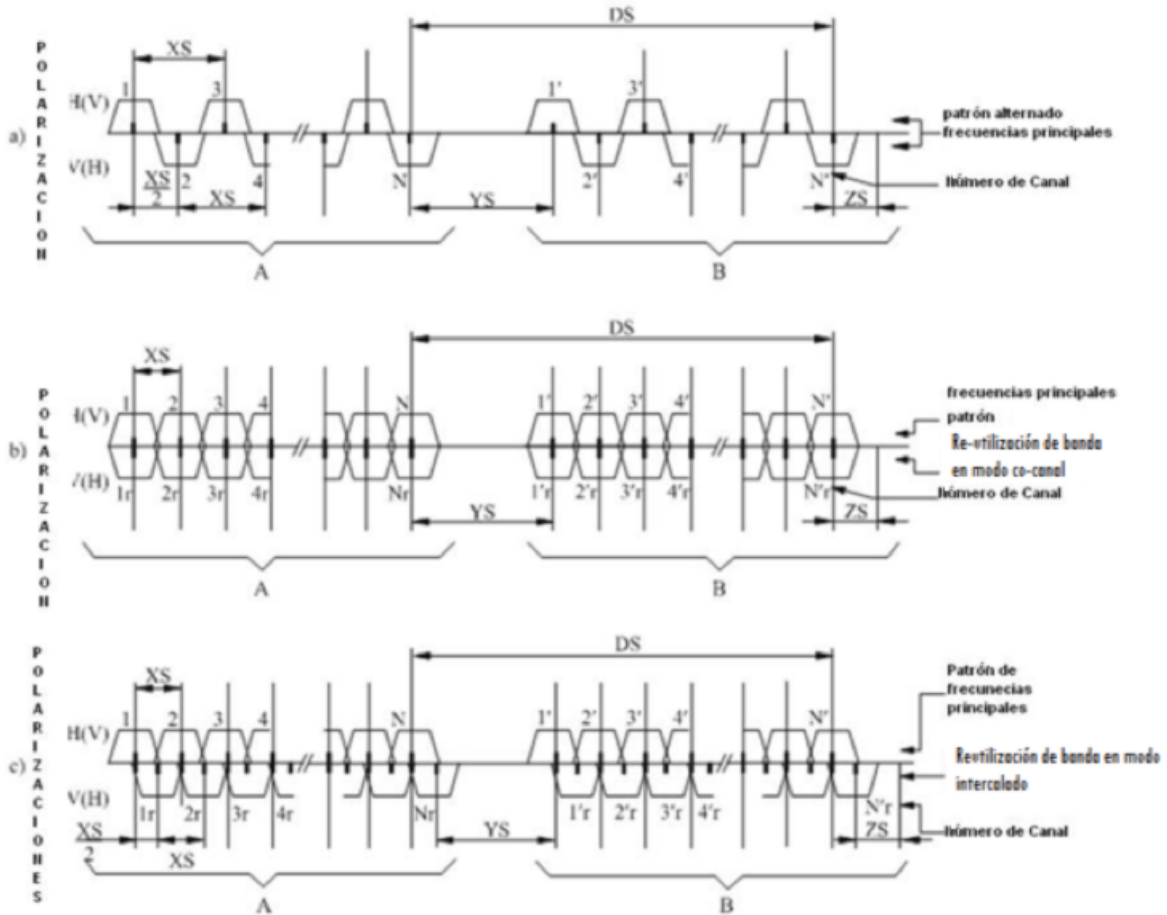
Nótese que en la definición NFD se hacen los siguientes supuestos:

- No se han tenido en cuenta los canales adyacentes XPD, si los hay.
- Solo se considera un canal interferente de un solo costado. Para interferencias con modulaciones de doble costado se debe tener en cuenta un valor NFD 3dB más bajo.

Los parámetros XPD y NFD (dB) contribuyen al valor de la relación portadora a interferencia. Si XPD_{min} es el valor mínimo alcanzado por el porcentaje de tiempo requerido, a partir de ese valor y del canal adyacente NFD , la cantidad total de intensidad del campo in-

FIGURA 34

Tres tipos de arreglos de canales de radiofrecuencia para FS



terferente puede ser evaluada, y este resultado debe ser comparado con el valor mínimo de la portadora a interferencia $(C/I)_{min}$ aceptable para la modulación adoptada (ver las recomendaciones UIT-R F.1093 [60] y P.530 [4]).

Los arreglos de canales alternados (Figura (a)) se pueden utilizar (dejando a un lado la contribución de interferencia co-polar de canal adyacente de canales adyacente) si:

$$XPD_{min} + (NFD - 3) \geq (C/I)_{min} \quad (46)$$

Los acuerdos de co-canal (Figura (b)) se pueden utilizar si:

$$10 \log \frac{1}{\frac{1}{10^{\frac{XPD + XIF}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{NFD_a - 3}{10}}}} \geq (C/I)_{min} \quad (47)$$

Los arreglos de canales intercalados (Figura (c)) se pueden utilizar si:

$$10 \log \frac{1}{\frac{1}{10^{\frac{XPD + (NFD_b - 3)}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{NFD_a - 3}{10}}}} \geq (C/I)_{min} \quad (48)$$

Donde:

NFD_a : discriminación del filtro de red evaluada en espaciamiento de frecuencia XS

NFD_b : discriminación del filtro de red evaluada en espaciamiento de frecuencia $XS/2$

XIF : factor de mejoramiento XPD de cualquier contramedida de interferencia de polarización cruzada, si se aplica en el receptor interferido

La UIT ha desarrollado una serie de acuerdos de canal de radio para aplicaciones FS, que pueden ser seleccionados de acuerdo con la banda de frecuencia y el ancho de canal de radio necesario para los enlaces desplegados en FS. La nomenclatura de los modelos de canal FS se muestra en la Tabla 24.

TABLA 24

Arreglos de canal de radiofrecuencia para enlaces FS

Banda FS GHz	Rango de frecuencias GHz	Recomendación UIT-R Serie F	Separación entre canales MHz
0.4	0.4061-0.430 0.41305-0.450	1567, Anexo 1 1567, Anexo 1	0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.6; 0.25; 0.3; 0.5; 0.6; 0.75; 1; 1.75; 3,5
1.4	1.35-1.53	1242	0.25, 0.5, 1, 2, 3.5

Banda FS GHz	Rango de frecuencias GHz	Recomendación UIT-R Serie F	Separación entre canales MHz
2	1.427-2.69 1.7-2.1, 1.9-2.3 1.9-2.3 1.9-2.3 1.9-2.3 2.3-2.5 2.29-2.67	701 382 1098 1098, los anexos 1, 2 1098, Anexo 3 746, Anexo 1 1243	0.5 (patrón) 29 3.5; 2.5 (patrones) 14 10 1; 2; 4; 14; 28 0.25; 0.5; 1; 1.75; 2; 3.5; 7; 14; 2.5 (patrón)
3.6	3.4-3.8 3.4-3.8	1488, Anexo 1 1488, Anexo 2	25 ⁽¹⁾ 0.25 ⁽²⁾
4	3.8 - 4.2 3.7-4.2 3.6-4.2 3.6-4.2	382 382, Anexo 1 635 635, Anexo 1	29 28 10 (patrón) 90, 80, 60, 40, 30
U4	125.0 125.0 125.0 4.54-4.9	1099 1099, Anexo 1 1099, Anexo 3 1099, Anexo 2	10 (patrón) 40, 60, 80 28 40, 20
L6	5.925-6.425 5.85-6.425 5.925-6.425 5.925-6.425 5.925-6.425	383 383, Anexo 1 383, Anexo 1 383, Anexo 2 383, Anexo 3	29.8 90; 60, 40 28 40, 20, 10, 5
U6	6.425-7.11 6.425-7.11	384 384, Anexo 1	40, 30, 20, 10, 5 80
7	7.25-7.55 7.425-7.725 (7.125-7.425) (3) (7.250-7.550) (3) (7.550- 7.850) (3) 7.425-7.725 7.435-7.75 7.11-7.75	385, Anexo 5 385 385, Anexo 1 385, Anexo 2 385, Anexo 3	37.5 7; 14; 28 28 5 28
8	7.725-8.275 8,275-8,5 7.9-8.4 7.725-8.275 8,025-8,5 7.725-8.275 8.2-8.5	386, Anexo 1 386, Anexo 2 386, Anexo 3 386, Anexo 4 386, Anexo 5 386, Anexo 6 386, Anexo 7	30; 20; 10; 5; 2.5; 1.25 14;17 28; 14; 7 40; 20; 10; 5 28; 14; 7 29.65 11.662

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

Banda FS GHz	Rango de frecuencias GHz	Recomendación UIT-R Serie F	Separación entre canales MHz
10	10.0-10.68 10.15-10.65 10.15-10.65 10.3-10.68 10.5-10.68 10.55-10.68	746, Anexo 2 1568, Anexo 1 1568, Anexo 2 746, Anexo 2 747, Anexo 1 747, Anexo 2	3.5, 7, 14, 28 (patrones) 28 (1) 30 (1) 5;2 7; 3.5 (patrones) 5; 2.5; 1.25 (patrones)
11	10.7 - 11.7 10.7 - 11.7 10.7 - 11.7 10.7 - 11.7 10.7 - 11.7	387 387, Anexo 1 387, Anexo 3 387, Anexo 2 387, Anexo 4	40 67 60 80 5; 10; 20
12	11.7-12.5 hs 12.2-12.7	746, Anexo 3, sección 3 746, Anexo 3, sección 2	19.18 20 (patrón)
13	12.75-13.25 12.7-13.25	497 746, Anexo 3, sección 1	28; 14; 7; 3.5 25; 12.5
14	14.25-14.5 14.25-14.5	746, Anexo 4 746, Anexo 5	28; 14; 7; 3.5 7, 14, 28
15	14.4-15.35 14.5-15.35 14.5-15.35	636 636, Anexo 1 636, Anexo 2	28; 14; 7; 3.5 2.5 (modelo) 2.5
18	17.7-19.7 17.7-19.7 17.7-19.7 17.7-19.7 17.7-19.7 17.7-19.7 17.7-19.7 17.7-19.7 18.58-19.16	595 595, Anexo 1 595, Anexo 2 595, Anexo 3 595, Anexo 4 595, Anexo 5 595, Anexo 6 595, Anexo 7 595, Anexo 7	220; 110; 55; 27.5 60 (bloque) 50; 40; 30; 20; 10; 5; 2.5 7; 3.5 27.5; 13.75; 7.5; 5; 2.5; 1.25 7; 3.5; 1.75 55; 110 55; 27.5; 13.75 60
23	21.2-23.6 21.2-23.6 21.2-23.6 21.2-23.6 21.2-23.6 21.2-23.6 22.0-23.6	637 637, Anexo 1 637, Anexo 2 637, Anexo 3 637, Anexo 4 637, Anexo 5 637, Anexo 1	3.5; 2.5 (patrones) 112 a 3.5 28; 3.5 112 a 3.5 50 112 a 3.5 112 a 3.5

Banda FS GHz	Rango de frecuencias GHz	Recomendación UIT-R Serie F	Separación entre canales MHz
27	24.25-25.25	748	3.5; 2.5 (patrones)
	24.25-25.25	748, Anexo 3	40 ⁽¹⁾
	25.25-27.5	748	3.5; 2.5 (patrones)
	25.27-26.98	748, Anexo 3	60 ⁽¹⁾
	24.5-16.5	748, Anexo 1	112 a 3.5
	27.5-16.5	748	3.5; 2,5 (patrones)
	27.5-16.5	748, Anexo 2	112 a 3.5
31	31.0-31.3	746, Anexo 6	25; 50
	31.0-31.3	746, Anexo 7	28; 14; 7; 3.5
32	31.8-33.4	1520, Anexo 1	3.5; 7; 14; 28; 56
	31.8-33.4	1520, Anexo 2	56 ⁽¹⁾
38	36.0-40.5	749	3.5; 2,5 (patrones)
	36.0-37.0	749, Anexo 2	112 a 3.5
	37.0-39.5	749, Anexo 1	140; 56; 28; 14; 7; 3.5
	38.6-39.48	749, Anexo 2	60 ⁽¹⁾
	38.6-40.0	749, Anexo 2	50 ⁽¹⁾
	39.5-40.5	749, Anexo 3	112 a 3.5
52	51.4-52.6	1496, Anexo 1	56; 28; 14; 7; 3.5
57	55.78-57.0	1497, Anexo 1	56; 28; 14; 7; 3.5
	57.0-59.0	1497, Anexo 2	100.50
<p>⁽¹⁾ Ancho de banda del bloque de frecuencia.</p> <p>⁽²⁾ Espacio de frecuencia básica para agregar un ancho de banda de bloque de frecuencia más amplio.</p> <p>⁽³⁾ Bandas alternativas entre paréntesis.</p>			

Una vez elegido el plan de canalización apropiado para una banda de frecuencias dada, normalmente se fija, dentro del país, toda la duración del uso FS de esta banda, ya que cambiar el plan, cuando existen enlaces que utilizan el plan antiguo, complicaría innecesariamente la planificación de nuevos enlaces.

Si todos los enlaces siguen el mismo esquema de asignación de canal, entonces la asignación de canales para nuevos enlaces suele ser un procedimiento bastante sencillo. Puede no haber reglas de separación entre distancia y frecuencia como se discutió en los servicios móviles, ya que, en el caso de la FS, la naturaleza altamente direccional de los enlaces hace que sea irrelevante considerar aéreas de exclusión ampliamente definidas. En el caso de la FS, la compatibilidad de la nueva asignación con los trabajos anteriores existentes en ese canal podría ser evaluada por:

- La identificación, en el registro de frecuencias, todos los enlaces FS utilizando los mismos canales/canales adyacentes dentro de una distancia de coordinación de umbral determinada (por ejemplo, establecida por la práctica nacional o por acuerdos internacionales. Ver Tabla 25 de [61]).
- El cálculo de la interferencia recibida desde/hacia cada enlace identificado y luego juzgar si el nivel de interferencia es suficiente. En FS, esto suele hacerse mediante el empleo del criterio de degradación de umbral.

TABLA 25

Coordinación de las distancias para la asignación de frecuencias para enlaces FS

Rango de frecuencia GHz	Coordinación de distancia km
1-5	200 (Nota)
5-10	150 (Nota)
10-12	100
12-20	80
20-24.5	60
24.5-30	40
30-39.5	30

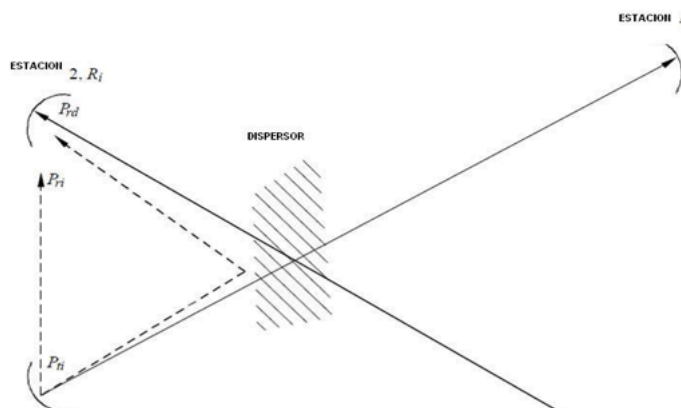
Nota: La distancia de coordinación para frecuencias por debajo de 10 GHz está limitada a 100 km para alturas de antena de 300 metros sobre el nivel del mar.

Hay una serie de configuraciones de interferencias que deben tenerse en cuenta [62]. Dos de ellas se muestran en la Figura 35. La parte (a) de la Figura 35 muestra el caso de interferencia dentro del sistema, es decir, una interferencia co-canal que es frecuente en las redes FS grandes y densas, operadas por una sola empresa. Las señales, que operan en la misma frecuencia, entran en la estación 2 desde diferentes direcciones. La señal del transmisor interferente T_i puede llegar al receptor con interferencia R_i directamente a través de un lóbulo lateral (incluido el lóbulo trasero) de la antena receptora, así como por *clutter* trasero del campo delantero o a través del lóbulo principal de la antena receptora.

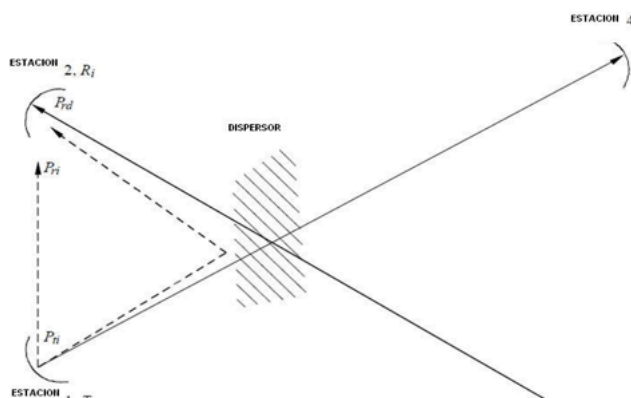
FIGURA 35

Casos de interferencia en enlaces terrestres FS

A) Interferencia intra-sistema



(B) Interferencia inter-sistema



La parte (b) de la Figura 35 muestra un caso de interferencia entre sistemas, donde los saltos de radio pertenecientes a diferentes empresas, pero que operan en la misma frecuencia, se cruzan entre sí. Esto puede dar lugar a interferencias muy graves, causadas por la dispersión de terreno, si el terreno donde se cruzan los rayos es visible desde las estaciones T_i y R_i . Este ejemplo pone de manifiesto que la estimación precisa de la interferencia entre los enlaces FS solo es posible cuando se emplean los datos de terreno en los cálculos. El *clutter* de interferencia no se limita a la zona donde los lóbulos de la antena principal se cruzan. Aunque a menudo es más fuerte allí, el terreno expuesto a lóbulos laterales también puede ser un contribuyente (ver la Recomendación UIT-R F.1096 [63])

Para todos los efectos prácticos se puede suponer que la señal deseada y la interferente no están correlacionadas, lo que significa que cuando se desvanece la señal deseada, la señal interferente se mantendrá sin cambios. Esto es una consecuencia del efecto de diversidad del espacio, que es bastante fuerte, incluso para las señales que viajan exactamente en la misma dirección, pero por trayectorias ligeramente diferentes en elevación.

Con el fin de cuantificar el efecto interferente, la diferencia en dB entre la señal deseada recibida P_{rd} y la potencia interferente en el receptor P_{ri} tiene que ser definida. Refiriéndose a la Figura 35, la expresión adecuada para dar cuenta de la interferencia puede ser [62]:

$$P_{rd} - P_{ri} = P_{td} - P_{ti} + D \quad (49)$$

Donde:

- P_{rd} : potencia deseada en la entrada del receptor (dBm)
- P_{ri} : potencia interferente en la entrada del receptor (dBm)
- P_{td} : potencia de salida del transmisor deseado (dBm)
- P_{ti} : potencia de salida del transmisor interferente (dBm)
- D : la discriminación (es decir, atenuación de la antena, pérdida de trayectoria entre la señal deseada e interferente)

Como se mencionó anteriormente, la discriminación D es provista principalmente por la atenuación de los lóbulos laterales de la antena y/o los efectos de *clutter* del terreno. En un sistema existente, D puede medirse fácilmente mediante la transmisión de la misma potencia desde las dos estaciones, $P_{td} = P_{ti}$, y la medición de la diferencia en dB entre las potencias recibidas, o $D = P_{rd} - P_{ri}$. Más adelante se verá cómo calcular el requerimiento para D . Se espera que el valor medido exceda el requisito.

Con el fin de determinar el requerimiento para D , se puede asumir que la trayectoria de radio deseada se desvanece a su valor máximo por el margen de desvanecimiento térmico F_t , y que la interferencia puede disminuir el umbral del receptor en 1 dB. Esto puede aumentar el tiempo de interrupción en un salto de radio en un 26%. Entonces, la potencia recibida estará en su valor umbral, es decir, asociada a $BER = 10^{-6}$, y $P_{rd} - P_{ri} = T/I_c$. La señal deseada desvanecida por completo puede ser representada por un transmisor que transmite por debajo de su potencia máxima P_{tdm} o en $P_{td} = P_{tdm} - F_t$. Al insertar estos números en la Ecuación (49), se puede obtener la discriminación requerida:

$$D_{req} = T/I_c + P_{ti} - P_{tdm} + F_t \quad (50)$$

Por ejemplo, consideremos un enlace FS modulado en 16-QAM con $T/I_c = 29$ dB, potencias transmitidas iguales $P_{ti} = P_{tdm}$ y un margen de desvanecimiento $F_t = 40$ dB. Esto produce $D_{req} = 69$ dB. Un margen de desvanecimiento de 50 dB requeriría una discriminación de 79 dB. En muchas instalaciones, tales discriminaciones se pueden conseguir fácilmente, pero en un número significativo de casos se pueden encontrar discriminaciones por debajo de 60 dB. Si la interferencia no puede ser tolerada, se pueden necesitar cambios de antena o aun la reubicación de estaciones de radio. El problema se agrava aún más en una densa red por una multitud de exposiciones a la interferencia. No se permiten exposiciones múltiples para reducir el margen de desvanecimiento del sistema interferido por más de 1 dB, es decir, el requisito de T/I_c aún tiene que ser cumplido.

Un método muy eficaz para mitigar los problemas de interferencias de red es usar un sistema de control adaptativo o automático de potencia del transmisor (ATPC, por sus siglas en inglés). Por ejemplo, si un salto de radio tiene un margen de desvanecimiento de 40 dB y la potencia de transmisión se reduce en 10 dB bajo condiciones normales, sin desvanecimiento; por lo tanto, el nivel normal de la potencia recibida es de solo 30 dB en lugar de 40 dB por encima del umbral del receptor, pero esto no tiene absolutamente ningún efecto en el rendimiento, el cual sigue siendo libre de errores. Si se produce un desvanecimiento de 40 dB, la potencia transmitida se eleva en 10 dB a plena potencia, a partir de una profundidad de desvanecimiento de 25 dB y alcanzando una plena potencia a unos 35 dB. Dado que la energía total se proporcionó cuando era necesario, el tiempo de interrupción se mantuvo bajo. Los periodos de mayor potencia son en realidad muy cortos.

Para efectos de coordinación de frecuencias en sistemas ATPC, la potencia baja del transmisor se utiliza para determinar la interferencia en otros sistemas, mientras que la potencia alta se utiliza para determinar la susceptibilidad a la interferencia de otros sistemas. Por lo tanto, ATPC permite una reducción de la discriminación requerida D_{req} por la cantidad de cambio de potencia. Este resultado sale directamente de la Ecuación (50) si la potencia del transmisor interferente P_{ti} se reduce a 10 dB.

Para una discusión más detallada sobre el cálculo de interferencias en enlaces FS, se puede consultar el Anexo 9 de [61].

7.4 Servicios de radiodifusión

7.4.1 Antecedentes de la planificación de radiodifusión

Los servicios de radiodifusión son generalmente desarrollados con algún tipo de proceso de manejo centralizado, que es dirigido de acuerdo con las políticas nacionales de los medios de radiodifusión. Dada la alta sensibilidad política de los medios para alcanzar di-

versos objetivos sociales, este proceso suele ser coordinado por el legislativo y por la entidad gubernamental competente para los asuntos de medios masivos. Por otro lado, con el fin de lograr la mayor cobertura posible, la radiodifusión por lo general emplea transmisores de muy alta potencia con antenas localizadas en alturas apropiadas. Esto significa que la cobertura geográfica de estas estaciones es muy amplia, hasta varios cientos de kilómetros (a veces, en algunas bandas incluso más); a menudo se extiende por las fronteras nacionales y requiere otras medidas internacionales para garantizar un acceso justo y la utilización eficiente de las bandas de radiodifusión por parte de los países vecinos.

Por lo tanto, con mucha frecuencia, la técnica de asignación de frecuencias para los servicios de radiodifusión se inicia a nivel internacional a través del proceso de creación de planes internacionales de radiodifusión. Dentro de los límites establecidos por los planes, las administraciones nacionales planifican las asignaciones de frecuencias a estaciones de radiodifusión en sus países.

En el sentido más general, la planificación de asignación de frecuencias es el proceso para determinar las características de ubicación, frecuencia, potencia y antena de las futuras estaciones de radiodifusión [116]. Dicha planificación se puede hacer a nivel regional, nacional o internacional. El proceso de distribución siempre se diseña para lograr una calidad de recepción deseada en un área de servicio. La planificación exitosa depende de una serie de factores entre los cuales están:

- La mínima intensidad del campo utilizable.
- Los niveles permisibles de potencia de la estación, ya sea para estaciones individuales o para una red, pueden ser una función de la frecuencia elegida.
- Las relaciones de protección de frecuencia necesarias.
- La distancia entre los transmisores que comparten el mismo canal, en los casos en que la interferencia no se calcula como parte del proceso de planificación.
- El espaciamiento de canal adoptado.
- El ancho de banda de la emisión.
- La propagación de radiofrecuencia y los factores por los cuales tal propagación es influenciada.
- Planes de canalización previamente adoptados.

Antes de determinar los parámetros de la estación es necesario decidir el área de servicio previsto. Entonces, se desarrolla una estrategia para servir a esa zona con una instalación que pueda ser aceptada por los usuarios anteriores del canal. Esta estrategia podría llamar a una serie iterativa de cálculos del tipo “qué pasaría si”, utilizando un software adecuado. De esta manera, se podrían evaluar diferentes conjuntos de parámetros de operación, para tratar de minimizar la interferencia causada y la coordinación posterior requerida.

En una situación práctica, el ingeniero de planificación es llamado a responder a una serie de preguntas como:

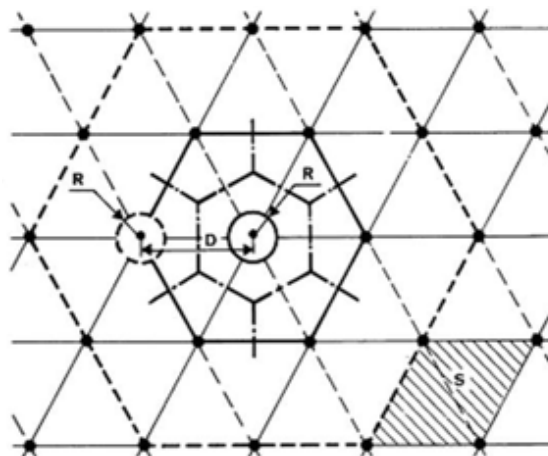
- ¿Qué frecuencias de canales no están siendo utilizadas en el área local y se podrían utilizar sin violar las restricciones aplicables, nacionales o internacionales?
- Dado el tiempo de servicio previsto, y las condiciones de propagación esperadas, ¿cuál será la potencia de estación necesaria para prestar servicio al área deseada, dado el actual nivel de interferencia?
- Si una red sincronizada nacional o regional está prevista, ¿qué tamaño de área es el más eficiente para ser atendido por un transmisor sencillo?
- ¿Qué combinación de potencia de estación y antena de transmisión direccional o no direccional dará el nivel necesario de protección a las estaciones existentes?

Cuando una banda de frecuencia está siendo desarrollada desde cero, el proceso de planificación suele comenzar con la planificación teórica, mientras que todos los canales disponibles se asignan con algún patrón de regularidad a los transmisores, formando la red regular a través de las áreas de planificación, como se muestra en la Figura 36, a partir de [116].

Una vez que la red de transmisores se haya establecido, la asignación de canales de frecuencia para todos los transmisores se ajustará a los principios generales para garantizar la necesaria distancia de frecuencia-distribución como se explicó anteriormente. La regularidad de la red en este caso solo actúa como el factor simplificador que ayuda a la distribu-

FIGURA 36

Red de transmisores de radiodifusión teóricamente previstos



ción uniforme de las frecuencias corriendo algún tipo de algoritmo óptimo de búsqueda, por lo general mediante la utilización de una herramienta de software.

Dichos planteamientos teóricos de planificación uniforme han sido el punto de partida para todas las grandes conferencias internacionales de planificación de radiodifusión. La teoría detallada de este enfoque se describe en [116, 122, 124].

Sin embargo, las estaciones reales a menudo tienen que desviarse de los vértices de la red del plan, debido a la necesidad de acomodar varias consideraciones de ubicación para grandes antenas de radiodifusión. Pero mientras esas desviaciones sean secundarias, en comparación con el paso general y la extensión de la red, no deberían tener un impacto importante en la situación general de la interferencia en el plan.

Cuando el plan teórico existe como un plan de atribución internacional o cuando la banda ha sido utilizada ya por algún tiempo, e incluye un número de usuarios titulares, entonces se lleva a cabo la planificación nacional incremental bajo el principio de “relleno de espacios”; mientras que las brechas de cobertura se identifican y las estaciones de radiodifusión/redes se han previsto una por una con el objetivo de identificar la asignación de frecuencia adecuada, para satisfacer el objetivo de llenar las brechas de cobertura identificadas, manteniendo el statu quo con los servicios titulares o dispuestos en el plan internacional. Este proceso se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 37 de [116].

En las partes restantes de esta sección se describen algunos detalles de los principios de planificación, cuando se aplican para los distintos tipos de servicios de radiodifusión.

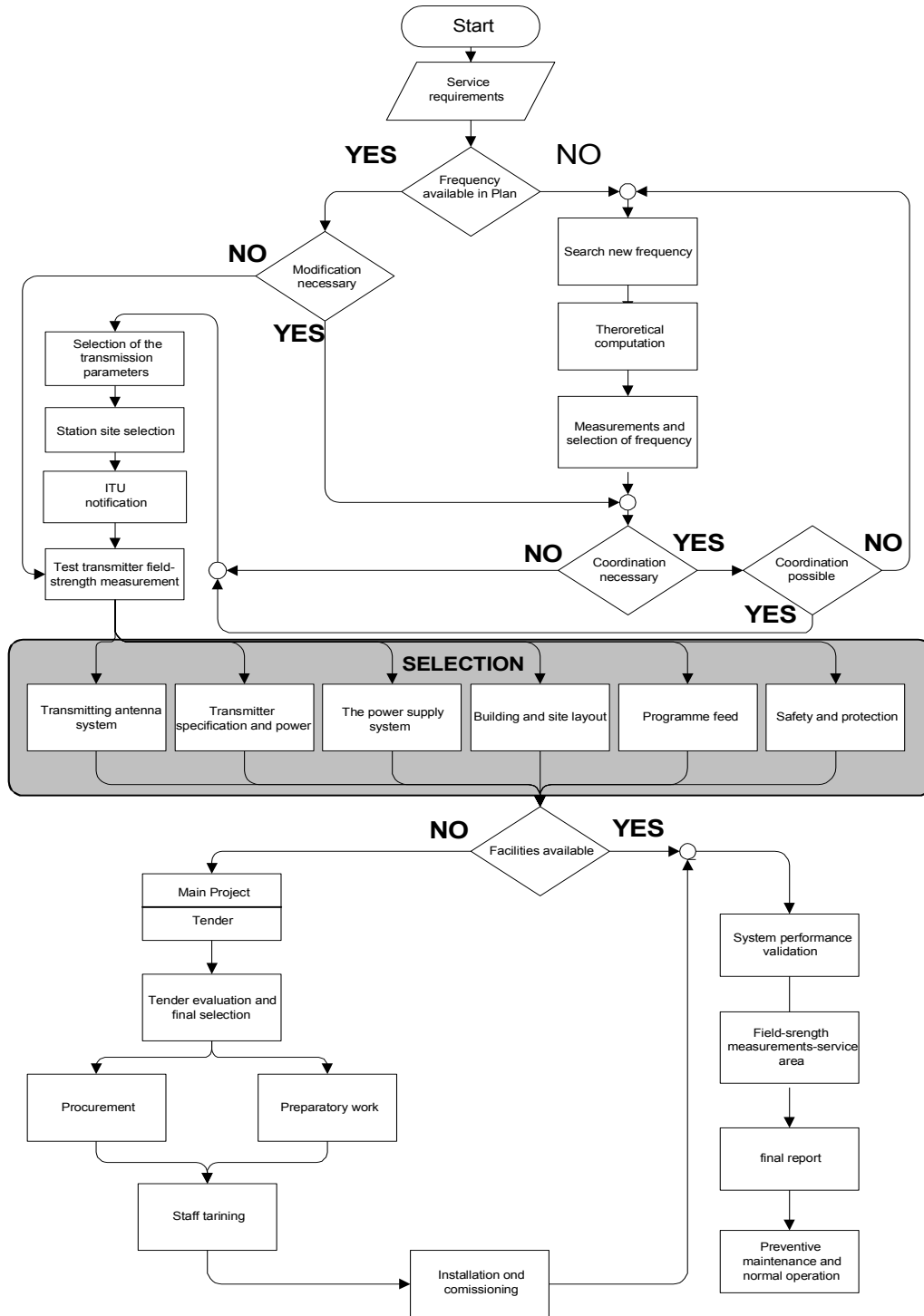
7.4.2 Radiodifusión en AM

La radiodifusión en amplitud modulada (AM) en la banda MF entre 525-1705 kHz es una de las más antiguas generaciones de radiodifusión, que fue más activamente desarrollada después de la Segunda Guerra Mundial, durante varias décadas. Sin embargo, independientemente de la creciente proliferación de nuevos tipos de radiodifusión (como radio FM, en VHF y TV), la radiodifusión AM en MF mantiene un importante papel como el medio de cobertura total de radiodifusión en todo el país. En Colombia, con sus vastos territorios, la importancia de la radiodifusión en MF no puede ser subestimada y cada municipio tiene un canal de radio asignado en la banda MF para radiodifusión sonora local.

Las bandas MF se caracterizan tanto por propagación de onda de superficie y onda celeste. Esta última, sobre todo, hace posible que las emisiones MF se propaguen muy rápido durante la noche. Por lo tanto, la radiodifusión MF es considerada para planeación internacional. Los siguientes acuerdos internacionales formales, existentes en la actualidad, rigen el uso de MF en América:

FIGURA 37

Asignación de frecuencias y puesta en marcha de estaciones de radiodifusión



- Plan de radiodifusión MF en la Región 2, Río de Janeiro, 1981 (RJ81).
- Plan para el uso de la banda 1605-1705 kHz en la Región 2, Río de Janeiro, 1988 (RJ88).

Colombia ha desarrollado su propio Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en AM [130], y cubre la radiodifusión MF, así como radiodifusión HF en las siguientes bandas:

- Ondas tropicales: 2300-2495 kHz, 3200-3400 kHz y 4750-5060 kHz.
- Ondas internacionales: 5900-6200 kHz, 7300-7350 kHz, 9400-9900 kHz, 11600-12100 kHz, 13570-13870 kHz, 15100-15800 kHz, 17480-17900 kHz, 21450-21850 kHz y 25670-26100 kHz.

La técnica nacional de radiodifusión en AM describe los parámetros relevantes de transmisiones y estaciones que van a utilizarse y establece normas de canalización (en múltiplos de 10 kHz para MF y bandas de ondas internacionales HF, y de 5 kHz en la banda HF de ondas tropicales). También expone algunos criterios de planificación e implementación, como la intensidad del campo mínima utilizable para diferentes clases de estaciones, la separación geográfica de instalaciones de monitoreo de radio, etc. El plan concluye con un listado de asignaciones de frecuencias planificadas agrupadas por localidades.

Por lo tanto, cuando se desea traer a uso una frecuencia prevista en particular, el proceso habitual de asignación de frecuencias y establecimiento definitivo de una estación de radiodifusión sería como se describe a continuación, con base en la orientación [116] y de acuerdo con el diagrama de flujo general presentado en la Figura 37.

Paso I: definición del servicio requerido

En primer lugar, la clase de estación de destino, la banda operativa, así como el tipo de cobertura y el objetivo (incluyendo preferencias de funcionamiento día o noche) para la estación de servicio de radiodifusión planeada deben ser establecidos de acuerdo con el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en AM [130]. Esto corresponde a poner en servicio la asignación prevista o el gatillo de planificación, que consiste en “identificar las brechas” existentes en la cobertura de radiodifusión.

Nótese que, en este sentido, se entiende que las brechas o espacios tienen tanto la dimensión geográfica (un área que no está lo suficientemente cubierta) como la dimensión de programación (necesidad de proporcionar el programa de radiodifusión adicional). La mayoría de los parámetros técnicos de las futuras estaciones de radiodifusión (s) serán determinados por estos requisitos, mientras se reconcilian con la necesidad general de proteger estaciones existentes. El servicio se define en los siguientes términos:

- Área requerida para ser atendida con una señal mínima definida.
- Tipo de programa (formato).
- Horas requeridas de operación (día, noche, 24/7).

Al determinar estos objetivos, la planificación podría pasar a la siguiente etapa.

Paso II: determinación de las frecuencias disponibles

Una vez que el servicio se ha definido, el siguiente paso es establecer la lista de frecuencias que pueden ser utilizadas, ya sea mediante la determinación de las frecuencias previstas para la localidad en el plan nacional que no estén en uso aún [130]. O si se trata del diseño de una estación adicional, para la cual no se tomaron medidas en el plan original, hay que establecer un nuevo conjunto de frecuencias que cumplan con los criterios de planificación nacional y luego ordenarlas por orden de preferencia (potencial descendente de causar o recibir interferencia inaceptable).

El primero se logra simplemente por observación: es decir, enlistando todas las frecuencias no utilizadas anteriormente en el área determinada. El último se puede hacer mediante la aplicación de los principios de análisis de compatibilidad de separación de frecuencia-distancia discutida a lo largo de este título. Dado el gran número de frecuencias consideradas candidatas, esta tarea, por lo general, tiene que ser relegada a las herramientas de software y seguir el algoritmo “qué pasaría si”, como se describe más adelante.

Paso III: encontrar un sitio provisional de transmisión

La selección del sitio de transmisión es una decisión muy importante. Hay muchos factores que deben tenerse en cuenta y algunos de ellos se plantean a continuación:

- ¿Es la ubicación geográfica óptima con respecto al área de servicio deseado y otras estaciones que requieren protección? Por ejemplo, el suministro a un área urbanizada requerirá señales relativamente más fuertes dentro de la ciudad, porque el nivel de ruido producido por el hombre es mayor allí que en zonas rurales (ver ejemplos en la sección 1.1.4). Un sitio mal elegido puede complicar enormemente la prestación del servicio y la coordinación de frecuencia de la estación. Mientras que una ubicación muy cercana podría reducir la potencia requerida del transmisor, puede hacer que sea difícil proteger otras estaciones con una antena direccional, sin dejar de servir a algunas partes del área de servicio requerido. Estas consideraciones hacen ver claramente la necesidad de considerar todos los lugares posibles, hasta que los cálculos “qué pasaría si” del ordenador se hayan completado y se elija una frecuencia final.

- ¿Cuáles son las características eléctricas del suelo en el sitio de transmisión y en los alrededores (especialmente la conductividad del suelo)?
- ¿Hay suficiente espacio para la instalación, sistema de antena, sistema de suministro de potencia, etc.?
- ¿La infraestructura existente necesitará ser complementada? ¿Cuál sería el impacto de una construcción en la zona? La infraestructura incluye:
 - Carretera y/o ferrocarril necesarios para llevar los materiales y mano de obra al sitio.
 - Fuente de potencia. ¿La demanda de la estación requerirá actualización?
 - ¿Hay provisión adecuada de agua para el sistema de refrigeración (transmisores de alta potencia) y de agua potable para el personal de trabajo de la estación?
 - Evacuación de aguas residuales, etc.
 - Disponibilidad de alimentación del programa (por cable, enlace de microondas, satélite, etc.).

Una vez que la tentativa del sitio del transmisor ha sido seleccionada, el proceso podría avanzar a las siguientes etapas.

Paso IV: preparación de las especificaciones iniciales de la estación y realización de análisis de interferencias

Si la estación que se va a construir ya tiene los derechos de radiación, ya sea mediante su inclusión en el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en AM [130] o por coordinación previa, este paso puede ser omitido. De lo contrario, sobre la base de los requisitos de servicio y el uso de una frecuencia disponible, se especifica una instalación inicial y pasa a ser analizada por un software “qué pasaría si”.

Después de esto, se deben realizar rondas sucesivas de cálculos con el fin de verificar las posibilidades de compatibilidad para diferentes frecuencias candidatas consideradas. Con base en dicho análisis, la frecuencia preferida puede ser seleccionada y asignada provisionalmente al dueño de la estación para “propósitos de diseño”, como se describe a continuación.

Paso V: llevar a cabo el diseño detallado de la estación

Este paso requiere que se tomen muchas decisiones prácticas. Es probable que varias de esas decisiones tengan que ser verificadas durante el proceso de coordinación, cuando sea necesario, de conformidad con las obligaciones internacionales y las disposiciones del RR, etc. La siguiente es una lista no exhaustiva de varias acciones administrativas y decisiones que se requieren en esta etapa:

- Con base en el análisis de interferencia mencionado anteriormente, puede definirse un patrón de antena adecuado y se pueden seleccionar la antena de transmisión y el sistema de alimentación. Este paso se debe hacer en relación con la finalización del proceso de coordinación de frecuencias. El sistema de antena final debe reflejar los compromisos adquiridos durante el proceso de coordinación de frecuencias.
- Se determina la ubicación del estudio. Esta decisión influirá en las instalaciones necesarias de comunicaciones auxiliares requeridas, tales como los enlaces entre el estudio y el transmisor.
- Los permisos gubernamentales necesarios deben ser protegidos a nivel local, regional y/o nacional. La presentación y consideración de estas peticiones puede requerir modificación de alguno o todos los pasos anteriores.
- Consideración de logística: solicitud de propuestas para el transmisor, carreteras, dotación de personal, etc.

Una vez se ha completado el diseño detallado del sitio, el propietario tendrá que proporcionar las especificaciones de todo el diseño al regulador, para la revisión final y definitiva de asignación de frecuencias (ver abajo).

Paso VI: confirmar que el servicio requerido será proporcionado de acuerdo con el diseño final

Tener todos los detalles sobre el diseño de la estación permite que los supuestos iniciales, hechos para la asignación de frecuencias provisionales, sean evaluados y se puedan hacer los ajustes pertinentes, y finalmente volver a confirmar las intensidades del campo viables que van a definir la extensión geográfica real de servicio. Esta revisión de la realidad debe hacerse antes que la construcción se lleve a cabo, para evitar cualquier compromiso de inversiones. Si el servicio requerido no es proporcionado o el diseño final viola algunas de las suposiciones planteadas al principio del proceso, todos los pasos anteriores pertinentes deben repetirse, hasta que se alcance la combinación perfecta de las instalaciones deseadas y los objetivos de cubrimiento e interferencia esperados.

Paso VII: el registro de la nueva estación en el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en AM

Una vez que a la nueva estación se le ha asignado la frecuencia y es puesta en servicio, podría ser necesario actualizar el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en AM [130] para reflejar el establecimiento y los parámetros de una nueva estación/activada.

7.4.3 Radiodifusión FM en la banda VHF

La radiodifusión sonora en Frecuencia Modulada (FM) se concentra en la banda 88-108 MHz, que es exclusivamente atribuida para este fin. La radiodifusión FM se caracteriza por anchos de canal relativamente amplios, que en asociación con el uso de modulación FM proporciona una calidad de sonido superior, en comparación con la radiodifusión en AM. Por lo tanto, tal difusión es muy popular, sobre todo, en las aglomeraciones urbanas más grandes, donde las administraciones a menudo tienen que luchar para satisfacer la demanda de canales de frecuencia de todo tipo de emisoras.

Dado el corto alcance geográfico en el rango de frecuencia VHF, la planificación nacional para la radiodifusión FM a menudo se convierte en un factor predominante. Este es también el caso de América del Sur, donde no existen planes de difusión FM regionales, mientras que Colombia ha desarrollado su propio Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en FM [131]. Este plan establece los parámetros relevantes de transmisiones y estaciones a ser utilizadas y las normas de canalización. También establece los criterios de planificación e implementación. El plan concluye con un listado de asignaciones de frecuencias planificadas agrupadas por localidades, incluyendo las asignaciones que ya están en uso y las previstas para uso futuro.

Los procedimientos generales para la planificación y puesta en servicio de estaciones de radio FM son similares a los que se muestran en la Figura 37 y se describen con más detalle en el apartado anterior de radiodifusión AM. La principal diferencia estará en la realización de los pasos, es decir, en el caso de transmisores FM en VHF, la situación de compatibilidad electromagnética entre varias estaciones será diferente de aquella en la banda MF, debido a las diferentes características físicas de las bandas y a las diferentes características de los equipos involucrados. También, en este caso, es necesario remitirse al plan técnico nacional correspondiente [131].

Más detalles técnicos involucrados en la planificación de radio FM se abordaron en el apartado 3.2.2, en relación con la orientación en la Recomendación UIT-R BS.412 [108]. Esas medidas específicas pueden incluir:

- El cumplimiento de un estricto plan de canalización.
- Elección de intensidades del campo específicas para su protección (puede estar relacionada con el tipo de zona, es decir, urbano vs. rural).
- Establecimiento de una regla mínima de separación de frecuencia entre las estaciones FM en una ciudad determinada (por ejemplo, 400 kHz).
- Co-ubicación obligatoria de los transmisores en el área de servicio dado.
- Consideración de interferencia a sistemas aeronáuticos por encima de 108 MHz.

Más allá de los aspectos técnicos, el caso de planificación FM también podría tener algunas implicaciones políticas y sociales importantes debido a la demanda de estos servicios en áreas urbanas densamente pobladas, como la capital del país y otras ciudades importantes. Por lo tanto, podría ser recomendable establecer algunas directrices generales para la asignación de frecuencias para estaciones de radio FM, incluida la asignación/distribución de frecuencias previstas provisionalmente de conformidad con el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en FM [131]. Por ejemplo, tal documento de política inicial, aprobado a nivel gubernamental, puede considerar aspectos como:

- La exigencia y prioridad para las redes FM de “todo el país”, entendiéndose aquí que todo el país no necesariamente abarca su extensión geográfica completa, sino más bien la disponibilidad de un determinado programa FM en cada uno de los municipios más grandes. Ejemplos de tales prioridades de redes FM en todo el país generalmente incluyen los organismos públicos de radiodifusión, pero el plan también puede prever las disposiciones para el establecimiento comercial de redes en todo el país.
- Las normas de acceso a frecuencias previstas de radio FM “aleatorias” (es decir, que no forman parte de redes en todo el país).
- Disposiciones relativas a las estaciones locales de radio comunitaria con transmisores de baja potencia (hasta unos pocos vatios) que pueden ser objeto de autorización simplificada.
- Disposiciones antimonopolio (es decir, que no existe ninguna entidad que pueda tener más de una frecuencia FM en cada área de servicio, etc.).

Un ejemplo interesante de los enfoques y políticas de planificación nacional de radiodifusión FM, para el entorno de un país con condiciones geoclimáticas y tamaño similar al de Colombia, se puede encontrar en [121]. Otros ejemplos nacionales de naturaleza detallada incluyen Estados Unidos [125] y Australia [127].

7.4.4 Radiodifusión de televisión en bandas VHF/UHF

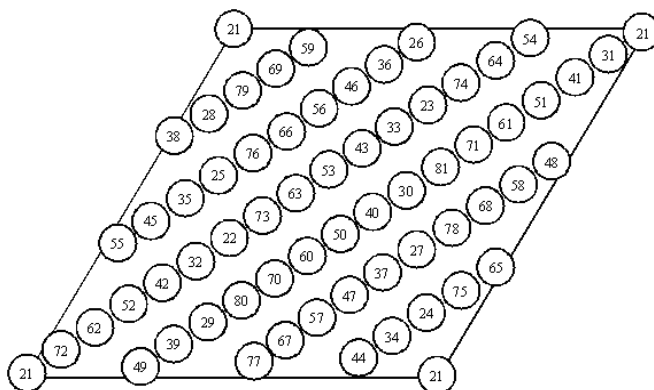
La radiodifusión de televisión en Colombia se lleva a cabo mediante el empleo de la transmisión de TV a color estándar M/NTSC y hoy en día la utilización de canales de TV de 6 MHz del 2-13 (canales 2-4: 54-72 MHz; canales 5-6: 76-88 MHz; canales 7-13: 174-216 MHz) y para los canales 21-69 (512-806 MHz). Los canales de TV 14-20 (470-512 MHz) en Colombia estaban atribuidos a servicios fijos y móviles.

Relación de protección co-canal de 45 dB para sistemas de televisión de 525 líneas, de acuerdo con la Recomendación UIT-R BT.655 [123].

En general, la radiodifusión de televisión tiene por objetivo la creación de redes a nivel nacional que ofrecen la difusión pública universal y la difusión comercial a la población. Por lo tanto, la planificación teórica de la red tradicional utilizando el principio de red antes mencionado es ideal como punto de partida para la planificación de cobertura de televisión [124]. Un ejemplo de asignación de canales de TV en un patrón de red regular se muestra a continuación en la Figura 38.

FIGURA 38

Ejemplo de asignación de canales de televisión en red teórica



Teniendo en cuenta la demanda de radiodifusión de televisión, la asignación de canales de televisión podría ser planeada en grupos, por ejemplo, grupos de planificación de 2-4 canales de televisión que estén disponibles en cada cuadrícula (zona de difusión). Sin embargo, tal planificación multi-canal solo es posible cuando se utiliza el grupo más grande de canales de UHF.

Una vez que la planificación de red teórica se ha realizado, posteriormente se puede mantener y actualizar el plan de frecuencias, siguiendo los mismos principios como se mencionó anteriormente y se ilustra en la Figura 37. También, la consideración política general de desarrollo, como se explica en la sección 7.4.3 para el caso de la radio FM, sería relevante para la planificación de la radiodifusión de televisión políticamente sensible.

Algunas de las reglas específicas de planificación se pueden derivar también en este caso, como se indicó anteriormente para la radiodifusión. Por ejemplo, la orientación típica es el uso mínimo de separación de canales en un área determinada de dos canales en VHF y tres canales en UHF. Algunas otras dificultades específicas de planificación [124] que pueden tener un impacto sobre la planificación de TV son:

- Receptor de televisión local-oscilador de radiación.
- Canal de imagen.
- Los armónicos de VHF/osciladores locales de recepción FM.
- Armónicos y productos de intermodulación en condiciones de sobrecarga en los receptores.

Como resultado de todas las consideraciones anteriores, pueden establecerse algunas reglas específicas simplificadas, como excluir la asignación de los canales 1, 2, 3 (en UHF), 5 y 14 de los que ya se utilizan en una ubicación dada.

Para mayor orientación sobre cómo tratar estas limitaciones véase la Recomendación UIT-R BT.1123 [124] y [126]. Ejemplos detallados de las políticas y reglamentos nacionales para la planificación de TV se pueden encontrar en [125-127].

7.4.5 Introducción de la radiodifusión digital

En la actualidad, todas las ramas de radiodifusión se preparan para la revolución tecnológica en una escala global. Esto está relacionado con la conversión de las transmisiones análogas, con la tecnología digital, proceso que se conoce a menudo en los círculos de radiodifusión como “*digital switch-over*” (transición digital). Este proceso se está produciendo tanto en la radiodifusión sonora como en televisión.

La transición digital es un proceso complejo que requiere una planificación cuidadosa, tanto en el ámbito nacional como internacional. También es importante que, a nivel nacional, la administración cuente con respaldo de carácter político para el proceso, ya que el cambio masivo de un medio de comunicación tan importante como la televisión significa, inevitablemente, afectar la vida de gran parte de la población.

Como este proceso es demasiado complejo para ser expuesto en forma resumida en este título, los lectores deben remitirse a los siguientes documentos de orientación de la UIT:

- Informe UIT-R BT.2140 sobre la transición de análogo a digital (2009) [119].
- UIT-D Directrices para la transición de la radiodifusión análogo a la digital (2010) [120].

Estos documentos proporcionan una gran cantidad de información útil sobre cómo hacer frente a estos procesos a nivel nacional.

7.5 FS/FSS en bandas compartidas

Las bandas de frecuencia que son compartidas por ambos servicios, el servicio fijo (FS) y el servicio fijo por satélite (FSS, por sus siglas en inglés), son las bandas más bajas de 6 GHz para enlaces satelitales comerciales, la banda de 4 GHz para el enlace descendente y la banda de 11 GHz que se utiliza para ambos sentidos de transmisión. Los potentes transmisores de estación terrena en la banda de 6 GHz pueden ser interferentes graves para los sistemas terrestres de radio [62].

La solución se encuentra normalmente en grandes separaciones geográficas entre los dos tipos de estaciones y el uso de protección natural, como colinas y montañas. La contribución a la interrupción de un sistema de radio terrestre causado por la interferencia del FSS debe ser solo el 11% del incremento debido a las interferencias, o alrededor del 2.6% si se utiliza el 26% del total. La degradación en el umbral del receptor, entonces, equivale a un promedio de 0.1 dB por salto, para los 50 saltos en un sistema de 2500 km de radio. Puesto que los transmisores de estaciones terrenas pueden ser poderosos interferentes, la mayor parte o la totalidad de la asignación de los 2500 km se puede dar a un solo salto, que se traduce en una reducción de 3.6 dB del umbral del receptor (o F_t), en ese salto en particular.

La interferencia de los transmisores vía satélite a los enlaces de FS a 4 GHz es un problema menor, porque la energía o la densidad del flujo de potencia están distribuidos de manera más uniforme en un área muy grande en la superficie de la Tierra. Las interferencias causadas por transmisores terrestres FS de 6 GHz en los receptores de satélite pueden ser controladas evitando ciertas direcciones de azimut, donde se encuentran los satélites estacionarios.

En la Recomendación UIT-R SM.1448 [64] se describen los procedimientos para el establecimiento de la zona de coordinación necesaria en torno a una estación terrena. Orientaciones adicionales sobre evaluación del potencial de interferencia pueden ser encontradas en la Recomendación UIT-R SF.1006 [65].

El método de cálculo de área de coordinación, como se describe en la Recomendación UIT-R SM.1448 [64], asume ciertos valores de referencia para los parámetros de las estaciones terrestres. Un gran porcentaje de las estaciones terrestres reales o previstas en un área de coordinación pueden no considerarse para el futuro cuando se conocen sus parámetros actuales o planeados mediante el uso de los contornos auxiliares, tal como se define en el Anexo 7 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT.

Los valores del factor de sensibilidad a la interferencia, S , de la estación terrestre, se asocian a un conjunto de curvas. El valor S se define como:

$$S = G_r - P_r(p), \quad [\text{dBW}] \quad (51)$$

Donde:

G_r : ganancia neta (dBi) (es decir, la ganancia de la antena en sí, menos la pérdida de alimentación (dBi), en relación con el isotrópico, donde la pérdida de alimentación no se conoce y su valor se debe asumir como 0 dB) de la antena receptora de la estación terrestre en dirección a la estación terrena

$P_r(P)$: potencia interferente admisible (dBW) en el ancho de banda de referencia que no debe excederse en más del porcentaje p de tiempo en la entrada del receptor de una estación que sufre interferencias (en este caso una estación terrestre)

El otro conjunto de curvas de nivel se asocia con valores de la estación terrestre p.i.r.e:

$$E = P_t + G_t, [\text{dBW}] \quad (52)$$

Donde:

P_t : potencia de transmisión disponible (dBW) en el ancho de banda de referencia B en la entrada de la antena de una estación interferente (en este caso, una estación terrestre)

G_t : ganancia (dBi en relación con el isotrópico) de la antena transmisora de la estación terrestre en dirección a la estación terrena

Cada estación terrestre que se encuentra dentro de la zona de coordinación se puede examinar para determinar si puede ser excluida de otras consideraciones:

- Para las estaciones FS, que puedan estar recibiendo interferencia de la estación terrena FSS, se debe determinar el factor de sensibilidad a la interferencia en dirección a la estación terrena. Si este valor es menor que el asociado con el contorno exterior más cercano a la estación, la estación puede ser excluida. De lo contrario, se deben llevar a cabo los cálculos detallados como se describe en la sección 2 de la Recomendación UIT-R SF.1006 [65].
- Para las estaciones FS, que puedan estar causando interferencias a la estación terrena FSS, debe determinarse el actual p.i.r.e en dirección a la estación terrena. Si este valor es menor que el asociado con el contorno exterior más cercano a la estación terrestre, la estación puede ser excluida. De lo contrario, los cálculos detallados, como se describe en la sección 2 de la Recomendación UIT-R SF.1006 [65], deben llevarse a cabo.

El método anterior se ha basado en el supuesto de que no se supera el número de entradas de interferencia asumido en la Recomendación UIT-R SM.1448 [64], para el cálculo de los contornos auxiliares.

Las estaciones terrestres eliminadas por el procedimiento anterior, para ser consideradas con respecto a mecanismos de propagación en gran círculo, deben, sin embargo, ser consideradas en lo que se refiere a la propagación de precipitación cuando caen dentro de esta área de coordinación.

En un aspecto formal, se deben tener en cuenta las disposiciones del Artículo 9 y el Apéndice 5 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT.



CAPÍTULO 8

COORDINACIÓN INTERNACIONAL: FACTORES DESENCADENANTES Y PROCEDIMIENTOS

Este capítulo describe los principios de coordinación de uso de frecuencias radioeléctricas en las zonas fronterizas. En primer lugar, introduce los principios básicos y el concepto de los acuerdos internacionales. Las siguientes secciones analizan la aplicación de los principios de coordinación para distintos servicios: los servicios móviles, fijos y fijos por satélite.

Nótese que el Artículo 9 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT debe ser siempre consultado con el fin de establecer los requisitos formales para los procedimientos de coordinación.

8.1 Principios generales, el papel de los acuerdos internacionales

La coordinación internacional de la asignación de frecuencias es de suma importancia para garantizar un funcionamiento estable y libre de interferencias de los servicios de radio cerca de las zonas fronterizas. El significado de “frontera cercana” será diferente dependiendo del tipo de servicios de radiocomunicación, banda de frecuencia y la situación geográfica. Sin embargo, incluso cuando los dos países vecinos comprendan la extensión del concepto “cerca de la frontera” de la misma manera, las áreas requerirían una cierta cantidad de negociaciones previas y acuerdos formales. Por lo tanto, se puede concluir que, en todos los casos, es aconsejable para cualquier administración reunirse con sus pares en paí-

ses vecinos y ponerse de acuerdo sobre los términos y procedimientos para coordinar la utilización de frecuencias entre los países interesados.

En particular, la Recomendación UIT-R SM.1049 [66] hace un llamando a las administraciones vecinas para establecer acuerdos de coordinación, [61], que deben incluir:

- El intercambio de información adecuada de gestión del espectro de bases de datos nacionales (en esta discusión los términos “base de datos” y “modelo” no necesariamente significan utilizar los sistemas informáticos de gestión del espectro).
- Un medio para resolver casos de interferencia perjudicial inesperado.
- Mecanismos procesales como el establecimiento de una zona de coordinación, dentro de la cual se aplica el convenio de coordinación. Aplican las siguientes definiciones:
 - *Zona de coordinación*: el área a lo largo de la frontera en la que se aplica un acuerdo de coordinación.
 - *Perímetro de coordinación*: una línea que establece el límite acordado de la *zona de coordinación*.
 - Los métodos para determinar el *perímetro de coordinación* se basan en los típicos requisitos técnicos y operativos para el servicio de radio en cuestión.

Los siguientes pasos proporcionan una guía para las administraciones que están considerando entrar en un acuerdo bilateral o multilateral para el establecimiento de una zona de coordinación. En el desarrollo de cualquier acuerdo las administraciones deben determinar el método adecuado para su aplicación.

Acuerdos para el establecimiento de la zona de coordinación

La profundidad de los detalles y las partidas incluidas en los acuerdos bilaterales o multilaterales para el establecimiento de una zona de coordinación dependerá de las necesidades individuales de las administraciones. Sin embargo, los acuerdos deben abarcar tanto los aspectos administrativos como las disposiciones técnicas y puede incluir la estandarización de los parámetros técnicos y operativos.

Los acuerdos pueden incluir componentes tales como:

- Rango (s) de frecuencia (s).
- Ancho de banda autorizado del servicio.
- Modulación del sistema.
- Altura efectiva de la antena.
- Limitar el área de servicio de los transmisores al área que se requiere cubrir.
- Un método para recopilar, estandarizar e intercambiar información.

- Un método para identificar las estaciones que requieren coordinación.
- El punto en el proceso en el que se lleva a cabo la coordinación.

Las administraciones también deben considerar las necesidades de todos los sistemas existentes que se encuentran dentro del rango de frecuencias cubiertas por el acuerdo, pero cuyos parámetros técnicos y operativos no se ajustan a los parámetros del acuerdo. La resolución de las dificultades causadas por los sistemas existentes debe ser considerada por las administraciones y se debe incorporar un mecanismo adecuado, que podría incluir un acuerdo sobre una base de evolución o caso por caso.

Dentro de la zona de coordinación, las administraciones deben considerar las opciones de compartición de frecuencia:

- *Frecuencias atribuidas*: frecuencias designadas a una administración individual de forma exclusiva o preferencial, que pueden ser asignadas por dicha administración sin coordinación previa, siempre y cuando se cumpla con las características técnicas fijadas. Esta opción es la más adecuada para los sistemas de cobertura de área, como VHF/UHF de servicios móviles terrestres.
- *Frecuencias compartidas*: frecuencias que pueden ser compartidas por las administraciones sin coordinación previa, siempre y cuando se cumpla con las características fijadas por acuerdo previo. Esta opción es la más adecuada para los sistemas de cobertura de área, como VHF/UHF de servicios móviles terrestres.
- *Frecuencias coordinadas*: frecuencias que se pueden asignar solo después de una coordinación exitosa. Esta opción es la más adecuada para los sistemas de servicio fijo como enlaces de microondas punto a punto.
- *Frecuencias asignadas utilizadas sobre la base de planes de la red geográfica*: las frecuencias utilizadas en los países involucrados sobre la base de un plan de red geográfica elaborado y aprobado con antelación, teniendo en cuenta las características técnicas establecidas en el plan (por ejemplo, planes de asignación celular o de radiodifusión).

La zona de coordinación

Para un servicio, una zona de coordinación más pequeña puede permitir a una administración coordinar menos tareas en la planificación operativa del servicio, manteniendo, al mismo tiempo, el riesgo de interferencia a un nivel aceptable. Refinar el mapa del perímetro de coordinación requeriría que las administraciones adoptaran mecanismos más complejos para regular el funcionamiento del acuerdo y lograr una mayor precisión en la determinación de los niveles de interferencia. Para matizar el mapa del perímetro de coordinación y reducir al mínimo la zona de coordinación se puede estimar el perímetro de coordinación mediante los métodos de predicción de la propagación. Estos métodos pueden variar en

complejidad y aplicabilidad concreta según la realidad del terreno y condiciones climáticas. En esencia, el objetivo es mejorar el enfoque de “línea simple”, mediante el uso de métodos de predicción para estimar las pérdidas introducidas por el exceso de colinas que intervienen y características similares, y evaluar el grado en el cual las condiciones anómalas de propagación mitigarán el riesgo contra estas pérdidas en exceso. También puede ser necesario acordar estrategias de medición mediante las cuales se puedan verificar la exactitud y la aplicabilidad de los métodos y modelos de predicción.

Para determinar el perímetro de coordinación se requiere el mutuo acuerdo sobre una serie de factores:

- La máxima interferencia de intensidad del campo permitida para cada servicio/banda de frecuencia.
- Los valores máximos de potencia de transmisión, altura efectiva de antena y la ganancia permitida o un método de inclusión de estos en los cálculos.
- Un método adecuado de cálculo de predicción.
- Métodos para permitir a cada administración verificar el uso correcto o aceptado del modelo (s) sobre una base caso por caso.

Para un modelo más detallado se puede requerir una base de datos del terreno que cubra las partes pertinentes de cada territorio de las administraciones. Además, puede ser necesario ponerse de acuerdo sobre una estrategia para llevar a cabo mediciones reales, con el fin de verificar la aplicabilidad del modelo y dar confianza en cuanto a los procedimientos elegidos. Esta estrategia de medición deberá tener en cuenta una serie de factores:

- La selección de puntos de prueba en los que se encuentran los transmisores y receptores de medición.
- Las condiciones, como los índices de clima y la relación señal a ruido, sobre las cuales los resultados se considerarán válidos.
- El mecanismo para dar testimonio de los programas de medición y resolver cualquier dificultad.
- La duración de las mediciones, en cuyo contexto se deben abordar dos temas:
 - La duración de las medidas necesarias para validar las predicciones de pérdida de terreno en condiciones climáticas normales.
 - La mayor duración requerida para evaluar la probabilidad de que el tiempo de propagación anómala mejorará significativamente la propagación y los niveles de señal recibida.
- El método de relacionar los resultados medidos con los modelos de predicción y las condiciones bajo las cuales pueden probarse la aplicación y la precisión del modelo considerado.

Varios ejemplos de acuerdos de coordinación se proporcionan en los anexos de la UIT-Rec. SM.1049 [66].

Cabe señalar que el material arriba mencionado aborda los acuerdos de coordinación internacional para los servicios terrestres como los servicios móviles terrestres o los fijos. Otros servicios pueden requerir determinados tipos de acuerdos, el ejemplo más notable es el servicio de radiodifusión en el que se requieren transmisores de muy alta potencia (con antenas situadas a gran altura), que causan interferencias significativas a distancias de más de cientos de kilómetros. Por lo tanto, con el fin de dar cierta seguridad al proceso de coordinación, así como para garantizar la igualdad de derechos en el acceso al espectro radioeléctrico, la asignación de frecuencias a estaciones de radiodifusión se suele hacer mediante planes de cooperación internacional regional y planes incorporados por los tratados internacionales. En algunos casos, estos acuerdos se alcanzan mediante la convocatoria a las Conferencias Regionales de Radiocomunicaciones de la UIT Regional (RRC). Las RRC son las conferencias de la UIT, ya sea en una región o un grupo de países, con el mandato de elaborar un acuerdo sobre un servicio de radiocomunicaciones en particular o banda de frecuencia. Estas conferencias no pueden modificar el Reglamento de Radiocomunicaciones, a menos que sean aprobadas por una Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones, y las Actas Finales de la Conferencia solo comprometen a los países que son parte del acuerdo. La última de estas conferencias se celebró en Ginebra, en el año 2006 [67].

Otros ejemplos de acuerdos regionales en la planificación de los servicios de radiodifusión:

- El Plan para la radiodifusión en MF en las Regiones 1 y 3 y de radiodifusión en LF en la Región 1, Ginebra, 1975 (GE75).
- El Plan de radiodifusión en MF en la Región 2, Río de Janeiro, 1981 (RJ81).
- El Plan para el uso de la banda 87.5-108 MHz para la radiodifusión sonora FM en la Región 1 y parte de la Región 3, Ginebra, 1984 (GE84).
- El Plan para el uso de la banda 1605-1705 kHz en la Región 2, Río de Janeiro, 1988 (RJ88).
- El Plan de VHF/UHF de radiodifusión de televisión en la Zona Africana de Radiodifusión y países vecinos, Ginebra, 1989 (GE89).

Cualquier acuerdo en particular se aplica solo a las administraciones que son parte del mismo. Cualquier país miembro de la UIT, que pertenece a una región de planificación y que no ha firmado un acuerdo particular, puede acceder a él en cualquier momento, mediante el depósito de un instrumento de adhesión. Como regla general, la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT (BR, por sus siglas en inglés) requiere que todos los países de la región de planificación sean parte en el acuerdo, a menos que explícitamente fueran informados de lo contrario [68].

Las partes en un acuerdo se comprometen a aceptar las limitaciones que se especifican en el texto. Esto significa cumplir con ciertos procedimientos y plazos para la notificación, cuando una administración propone una modificación al plan. Cualquier administración, ya sea directamente o a través de la BR, obtiene el acuerdo de cualquier otra administración cuyos servicios sean susceptibles de ser afectados.

Cada uno de los acuerdos establece en su Artículo 4 un procedimiento detallado que debe seguir cuando se modifica su plan. En el caso de los planes de asignación de frecuencias, la modificación del plan significa una de estas posibilidades:

- (A) La adición al plan de una asignación de frecuencia a una estación de radiodifusión.
- (M) Modificar las características de una asignación de frecuencia a una estación de radiodifusión que figura en el plan.
- (S) Cancelar una asignación de frecuencia a una estación de radiodifusión.

Las partes tienen derecho a disponer de la protección especificada en el acuerdo vis-à-vis en relación con las otras partes en el acuerdo. Por ejemplo, se podría instituir un periodo de tiempo determinado para la presentación de comentarios sobre cualquier propuesta de modificación. Después de este periodo, la modificación se puede introducir en el plan si el gobierno hiciera una solicitud a la UIT.

Una vez que una misión se inscribe en el plan, tiene derecho a la protección contra toda interferencia perjudicial, de conformidad con las normas técnicas establecidas en el acuerdo pertinente.

8.2 Servicios móviles terrestres

8.2.1 Radio móvil privada (VHF/UHF)

Con el fin de optimizar la coordinación y el uso de radiofrecuencias para radio móvil privada/profesional (PMR, por sus siglas en inglés) y sistemas móviles terrestres similares entre los países vecinos, pueden considerarse las siguientes disposiciones organizativas y técnicas [61, 73]:

El uso armonizado de las bandas de frecuencia en diferentes países

Siempre que sea posible, se deben asignar las mismas bandas de frecuencia en los distintos países para un tipo similar de uso, como PMR, radio móvil de acceso público (siglas en inglés, PAMR), los servicios de transporte y salvamento para las conexiones transfron-

rizas, etc. Para ello, se adoptarán las medidas regionales de armonización mediante la designación de alguna banda o sus partes para aplicaciones específicas que deben ser tomadas en consideración.

Canalización

Aplicaciones móviles terrestres análogas y digitales de banda angosta (separación entre canales de hasta 25 kHz).

A fin de lograr el uso óptimo de las bandas de frecuencia, se recomienda que todas las administraciones vecinas estén de acuerdo con utilizar la misma red de frecuencia en el mismo canal, por ejemplo, donde las frecuencias centrales se definen mediante la siguiente fórmula:

$$F_n = \text{BandEdge} - (\text{Channel Spacing}/2) + n * \text{Channel Spacing} \quad (53)$$

Donde:

F_i :	frecuencia central de canal n
$n =$	1, 2, 3, ...: número de canal en el plan de canales para la banda dada
<i>BandEdge</i> :	es el borde inferior de la banda de frecuencia atribuida, MHz
<i>ChannelSpacing</i> :	es la separación entre canales adoptada para la banda dada, por ejemplo, 0.00625 MHz (es decir, 6.25 kHz trama), 0.0125 MHz (es decir, 12.5 kHz trama), 0.025 MHz (es decir, 25 kHz trama)

Aplicaciones digitales móviles terrestres de banda ancha

La administración debe seleccionar frecuencias centrales de la siguiente manera:

- Para sistemas con un ancho de banda de canal de 50 kHz, 100 kHz y 150 kHz, las frecuencias centrales deben ser seleccionadas de acuerdo con la fórmula preferida en la Ecuación (53).
- Para sistemas con un ancho de banda de canal de 200 kHz, las frecuencias centrales deben ser seleccionadas de acuerdo con la fórmula preferida en la Ecuación (53), con la opción de compensar estas frecuencias centrales en 100 kHz.
- Para sistemas con un ancho de banda de canal de 1.25 MHz, las frecuencias centrales deben ser seleccionadas de acuerdo con la fórmula preferida en la Ecuación (53), con la opción de compensar estas frecuencias centrales en múltiplos de 12.5

kHz, para proporcionar flexibilidad en la localización de las frecuencias centrales en una posición óptima dentro de la banda.

Separación dúplex de canales o simplex de dos frecuencias y ubicación de sub-bandas

En la medida en que las administraciones estén en condiciones de definir la separación dúplex, sus valores y los de las respectivas posiciones de las sub-bandas deben corresponder a los planes acordados regionalmente. En ausencia de tales planes, algunas de las prácticas internacionales pueden ser consideradas, como los planes de la banda en el Anexo 1 de [73].

Las frecuencias de las emisiones de las estaciones base o repetidoras deben ser colocadas en la banda superior y las de las estaciones móviles en la banda inferior. Las mismas posiciones de las bandas superior e inferior deben ser seleccionadas por los países fronterizos y adyacentes.

Umbrales de coordinación

Los umbrales indicativos de coordinación de aplicaciones de banda angosta hasta 25 kHz (co-canal, 50% de las ubicaciones, 10% del tiempo, 10 m de altura de la antena receptora, en la línea fronteriza) son los siguientes:

- 0 dB ($\mu\text{V/m}$) para las frecuencias entre 29.7 y 47 MHz.
- 6 dB ($\mu\text{V/m}$) para las frecuencias entre 47 y 108 MHz.
- 12 dB ($\mu\text{V/m}$) para las frecuencias entre 108 y 380 MHz.
- 18 dB ($\mu\text{V/m}$) para las frecuencias entre 380 y 400 MHz.
- 20 dB ($\mu\text{V/m}$) para las frecuencias entre 400 MHz y 606.
- 26 dB ($\mu\text{V/m}$) para las frecuencias entre 606 MHz y 921.

En aplicaciones digitales de banda ancha móvil terrestre ($\text{ChannelSpacing} > 25$ kHz) un valor de:

$$6 \times \lg (\text{ChannelSpacing}/25 \text{ kHz}), [\text{dB}] \quad (54)$$

debe añadirse a los valores anteriores. Esta Ecuación (54) es válida para 25 kHz, 200 kHz y 1.25 MHz e interpola los valores para los sistemas entre estos puntos.

Por ejemplo, para un canal de 200 kHz a 919 MHz, el umbral de coordinación se convierte en:

$$6 \times \lg (200 \text{ kHz}/25 \text{ kHz}) + 26 \text{ dB } (\mu\text{V/m}) = 31.42 \text{ dB } (\mu\text{V/m})$$

Sin embargo, cabe señalar que, en algunos casos, especialmente en las bandas de frecuencia más baja, la interferencia puede ocurrir incluso si estos límites no se superan.

Características de planificación en las zonas fronterizas

La ubicación, el poder y la altura de la antena de todas las estaciones de la red deben ser seleccionados de tal manera que su alcance sea limitado, en la medida de lo posible, a la zona deseada a ser cubierta por el servicio.

Se deben evitar alturas de antena y salidas del transmisor excesivas, utilizando varias ubicaciones de altura reducida siempre que sea posible. En las zonas fronterizas las antenas direccionales se deben utilizar con el fin de minimizar el potencial de interferencia.

La potencia radiada aparente y la altura de la antena deben ser lo más bajas posible en relación con el área a ser atendida.

8.2.2 Los sistemas móviles (2G/3G)

En esencia, los principios fundamentales de la coordinación examinados en la sección 8.2.1 también son aplicables al caso de los sistemas públicos de telecomunicaciones móviles terrestres (PLMS, por sus siglas en inglés), como los sistemas comerciales 2G/3G. Sin embargo, algunas medidas adicionales podrían ser beneficiosas, por ejemplo, en el caso de zonas densamente pobladas que se encuentran adyacentes a ambos lados de la frontera. En tales casos, podría ser razonable suponer que los operadores de los dos países (o más, por ejemplo, en el caso de una densa conexión tres países) tendrán un importante despliegue de la red 2G/3G en la región fronteriza ocupada y esto requeriría objetivos específicos, tales como:

- Una distribución justa de los canales disponibles entre los operadores en diferentes países. Nótese que en este caso el significado de “justa” puede depender de las circunstancias, por ejemplo, podría significar “igual” si los dos lados de la frontera tienen un tipo similar de densidad de población, o podría significar una división desigual de los canales, que sea proporcional a la densidad de población en ambos lados.
- Menos acceso restringido al máximo número de canales asignados a un determinado país (operador), es decir, con nivel de potencia muy superior a los valores de coordinación estándar.

El concepto de coordinación de frecuencias que aborda estas dos preocupaciones es el esquema de “frecuencias preferenciales”. En este esquema, las administraciones de los paí-

ses vecinos están de acuerdo en dividir en dos todos los canales disponibles en determinada banda (por ejemplo, los canales de 900 MHz en la banda 2G), o en más partes (por ejemplo, en una frontera que una múltiples países). Luego, cada uno de los conjuntos se convierte en preferencial para un país y no preferencial para otro país. En otras palabras, cada país obtiene su propio conjunto de canales preferenciales (véase la Figura 39).

FIGURA 39

Concepto de canales preferenciales para la coordinación de frecuencias

Canales preferenciales del país A	# de canal	Canales preferenciales del país B
■	1	
	2	
	3	
	4	
	5	■
	6	
	7	
	8	
■	9	
	10	
	11	
	12	
	13	■
	14	
	15	
	16	
■	...	

Una vez que la partición de la banda en canales preferenciales se haya establecido, los países pueden desplegar sus redes, de tal manera, que a las estaciones que utilizan sus fre-

cuencias preferenciales se les concede niveles de potencia más flexibles en la frontera, es decir, pueden generar una mayor potencia en el país vecino. Esto sucede, generalmente, cuando la estación base del sistema de PLMS está instalada muy cerca de la frontera, con el fin de garantizar mejores condiciones de itinerancia (*roaming*) para los clientes, hacia ese país vecino.

Por ejemplo, la recomendación europea para la coordinación de las frecuencias de GSM [74] ofrece los siguientes valores de umbral para el uso de canales preferenciales vs. no preferenciales:

- Frecuencias preferenciales, excepto extremos de bloques adyacentes de las frecuencias preferenciales, pueden utilizarse sin coordinación, si la intensidad de campo de cada portadora, producida por la estación base, no excede un valor de 19 dB μ V/m en la banda de 900 MHz y 25 dB μ V/m en 1800 MHz, para los sistemas digitales a una altura de 3 m y a una distancia de 15 km al interior del país vecino.

Nota: Cuando se asignan bloques de frecuencias preferenciales a los diferentes países en las zonas fronterizas, todos los extremos de bloques adyacentes deben ser tratados de tal manera que se evite la interferencia de canales adyacentes, ya sea transfiriendo las características de las estaciones base utilizando los canales de los extremos del bloque o regulando su utilización mediante acuerdos bilaterales o multilaterales.

- Las frecuencias no preferenciales pueden ser utilizadas sin coordinación, si la intensidad del campo de cada portadora producida por la estación base no excede un valor de 19 dB μ V/m en la banda de 900 MHz y 25 dB μ V/m en la banda de 1800 MHz, para los sistemas de televisión digital y analógica, a una altura de 3 m en la frontera.

En otras palabras, para los canales preferenciales, el umbral de coordinación está siendo reasignado a la distancia de 15 km al interior del país vecino. Esto simplifica en gran medida los procedimientos de coordinación y, por lo tanto, permite la creación de superposición útil de los sistemas PLMS entre los países vecinos.

Para los sistemas 3G que emplean la tecnología CDMA, la situación se vuelve más complicada, ya que en este caso no solo las intensidades del campo, sino también los códigos de modulación, deben ser coordinados entre los países vecinos. Esto puede hacerse mediante la ampliación del concepto de asignaciones preferenciales, para incluir la partición preferencial y no preferencial de todos los códigos disponibles (o, más bien, grupos de códigos establecidos por estándar correspondiente para la tecnología CDMA, por ejemplo, 64 grupos de códigos para UTRA-WCDMA), para cada uno de los países vecinos [75, 76]. Un ejemplo de esta división de código se da en la Figura 40 [75].

FIGURA 40

Ejemplo de partición de códigos para la coordinación de sistemas CDMA 3G

	Conjunto A	Conjunto B	Conjunto C	Conjunto D	Conjunto E	Conjunto F
País 1	0..10	11..20	21..31	32..42	43..52	53..63
Frontera 1-2	■	■				■
Zona 1-2-3						
Frontera 1-3	■	■	■			
Zona 1-2-4						■
Frontera 1-4			■			■
Zona 1-3-4	■		■			

	Conjunto A	Conjunto B	Conjunto C	Conjunto D	Conjunto E	Conjunto F
País 2	0..10	11..20	21..31	32..42	43..52	53..63
Frontera 2-1			■	■	■	
Zona 2-3-1						
Frontera 2-3		■	■	■		
Zona 2-1-4						■
Frontera 2-4						■
Zona 2-3-4			■	■		

	Conjunto A	Conjunto B	Conjunto C	Conjunto D	Conjunto E	Conjunto F
País 3	0..10	11..20	21..31	32..42	43..52	53..63
Frontera 3-2	■				■	■
Zona 3-1-2						
Frontera 3-1				■		
Zona 3-1-4						■
Frontera 3-4			■			
Zona 3-2-4					■	■

	Conjunto A	Conjunto B	Conjunto C	Conjunto D	Conjunto E	Conjunto F
País 4	0..10	11..20	21..31	32..42	43..52	53..63
Frontera 4-1		■		■	■	
Zona 4-1-2						
Frontera 4-2	■	■			■	
Zona de 4-2-3						
Frontera 4-3	■	■		■		
Zona 4-3-1		■		■		

Nota: Los conjuntos AF representan diferentes conjuntos de grupos de código, por ejemplo, Conjunto A los grupos de código 0... 10, y así sucesivamente.

Incluso el caso más complicado se produce cuando diferentes tipos de PLMS 2G y 3G se despliegan en diferentes lados de la frontera, por ejemplo, 2G no CDMA está en un lado y 3G CDMA está en el otro, o la mezcla de esquemas de duplexación de frecuencias FDD y TDD (por sus siglas en inglés). La Recomendación [76] proporciona un ejemplo europeo para resolver esas situaciones.

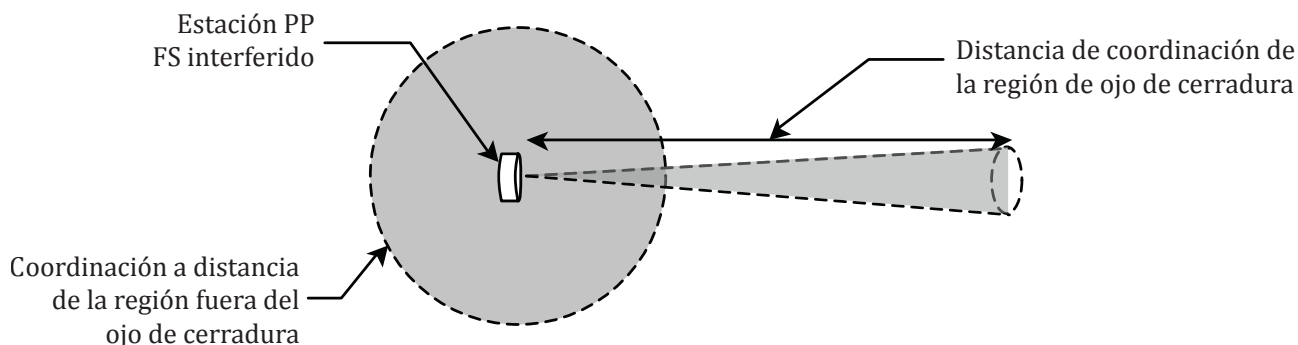
8.3 Servicios fijos

8.3.1 Punto a punto

El concepto y los procedimientos para establecer el área de coordinación de los enlaces punto a punto (PP) se explica en la Recomendación UIT-R F.1095 [77]. Se presenta una metodología para determinar el número de estaciones que deben ser coordinadas y la probabilidad de interferencia que pueda existir entre ellas.

FIGURA 41

El concepto de área de coordinación de ojo de cerradura para enlaces del servicio fijo



Debido a la directividad de las antenas de microondas, el concepto de ojo de cerradura se puede utilizar para el desarrollo de un procedimiento de coordinación de análisis a distancia, como se muestra en la Figura 41.

El concepto de ojo de cerradura tiene en cuenta la mayor distancia a lo largo del haz principal (zona del ojo de cerradura) de una estación de microondas, y la probabilidad de interferencia en la región. De esto se deduce que la región fuera de la zona del ojo de cerradura (la zona de la viga principal) requiere distancias de coordinación más cortas.

Las cifras numéricas específicas para las distancias de coordinación para las zonas de ojo de cerradura y regiones fuera de los haces principales dependen de los tipos de antenas y frecuencias utilizadas.

La distancia de coordinación se puede obtener mediante la solución de la relación entre la potencia de la señal interferente recibida por la estación interferida y la distancia de la estación interferente:

$$I = P_T + [G_R - D_R(\theta)] - L(d) + [G_T - D_T(\theta')] \quad (55)$$

Donde:

- I : potencia en la distancia d procedente de la estación interferente (dBm)
- P_T : el máximo nivel de potencia de transmisión (dBm) en el ancho de banda de referencia en la entrada a la antena de la estación interferente
- G_T : ganancia (dBi) de la antena transmisora de la estación interferente
- G_R : ganancia (dBi) de la antena receptora de la estación interferida

D_T : la discriminación de antena (dB) de la antena transmisora (en diferentes ángulos θ')

D_R : la discriminación de la antena (dB) de la antena de recepción (en diferentes ángulos θ)

$L(d)$: la pérdida total de la trayectoria (dB) para la curvatura de la Tierra, con $K = 1.33$

Como ejemplo de análisis de interferencia entre sistemas PP y FS, se puede asumir una relación C/I mayor o igual a 65 dB y expresarse de la siguiente manera:

$$C - I \geq 65 \text{ [dB]} \quad (56)$$

Donde:

C : potencia nominal recibida de la señal deseada (dBm)

I : potencia interferente máxima tolerable (dBm)

Sustituyendo la Ecuación (55) en la Ecuación (56) se obtiene:

$$C \geq P_T + [G_R - D_R(\theta)] - L(d) + [G_T - D_T(\theta')] + 65 \text{ [dBm]} \quad (57)$$

La distancia de coordinación d , en diferentes ángulos θ , puede ser calculada para diferentes valores del patrón de discriminación $D_T(\theta')$ de la estación interferente. Para $D_T(\theta') = 0$, la Ecuación (54) representa una situación en la que las estaciones interferentes están dirigidas hacia la estación propuesta. La distancia de coordinación calculada en esta condición, especifica una región en la que se localizarán todas las estaciones interferentes. Sin embargo, en algún momento, la distancia de coordinación conservadora puede ser reducida con cierta probabilidad de interferencia.

8.3.2 Punto a multipunto

La coordinación transfronteriza de sistemas punto a multipunto (PMP, por sus siglas en inglés) representa una tarea muy difícil, debido a que los sistemas PMP esencialmente representan una mezcla conceptual de los sistemas fijos y móviles:

- Los sistemas PMP usualmente se licencian en términos de área con despliegue no licenciado de terminales de usuario, lo que significa que no se pueden predecir los

puntos particulares en los cuales puedan aparecer estacionales terminales. Sin embargo, una vez desplegadas, las terminales en el sistema fijo PMP permanecerían estacionarias.

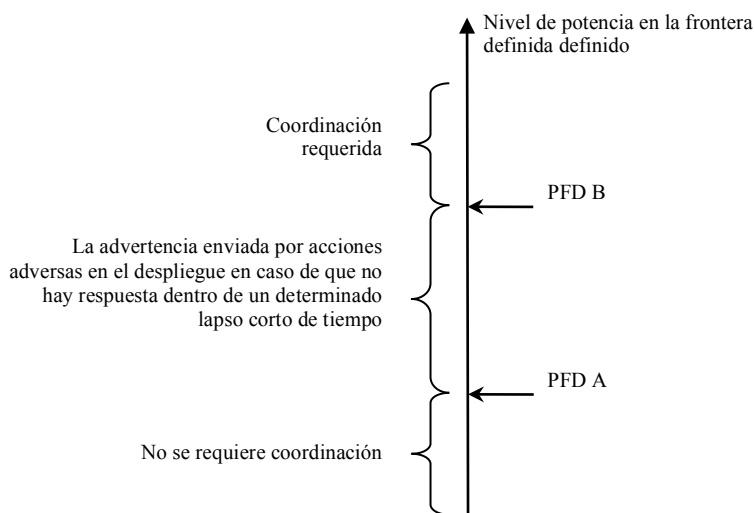
- Las estaciones base PMP se despliegan con antenas sectoriales de ángulo ancho de una manera similar a la implantación de estaciones base de la red celular PLMS, lo que hace irrelevantes las características de la coordinación de área de ojo de cerradura de los sistemas propia de los sistemas PP FS.
- Un nivel adicional de dificultad se presenta debido a que a los sistemas PMP se les asigna, a menudo, las mismas bandas de frecuencia que a los enlaces PP FS. Por lo tanto, puede surgir el problema de que la administración de un país desee utilizar una banda en particular para los sistemas PMP, mientras que los países vecinos pueden preferir utilizar la misma banda para los sistemas de PP. En tales casos de despliegue no homogéneo la coordinación se vuelve aún más complicada.

Dado el sesgo significativo hacia sistemas móviles impredecibles, el sistema de coordinación de los sistemas PMP tiende a ser construido a partir de los conceptos esenciales aplicados en la coordinación de los sistemas móviles (ver la sección 8.2.1 y sección 8.2.2), a saber:

- Es aconsejable acordar con el país vecino la asignación armonizada de las mismas bandas de frecuencia para el uso de sistemas PMP, así como acordar el uso del mismo sistema dúplex, plan de canalización, etc. (por ejemplo, ver las orientaciones en la Recomendación UIT-R F.1488 [78]).
- Es aconsejable aplicar el concepto de canales preferenciales también para el caso de despliegue de sistemas de PMP, ya que esto haría mucho más fácil prever el despliegue de estaciones terminales no coordinadas en las zonas fronterizas, si estas fueran a utilizar los canales preferenciales.
- El umbral de coordinación podría entonces ser fijado en términos del valor de la densidad del flujo de potencia (PFD, por sus siglas en inglés), que no debe excederse en la frontera (o al menos a cierta distancia dentro del país vecino si se utiliza el concepto de canales preferenciales), sin coordinación.
- La protección a los usuarios de los bloques de frecuencias adyacentes (un conjunto de canales atribuidos al sistema PMP) se lleva a cabo mediante la imposición de máscaras de borde de bloque, que describen los límites máximos de emisiones de todas las estaciones de la red en bloques adyacentes (en [79] se puede encontrar un ejemplo con el planteamiento europeo de la definición de máscara de borde de bloque para los sistemas PMP de 3.5 GHz).

FIGURA 42

Concepto de doble desencadenante PFD para la coordinación de los sistemas PMP



Algunas orientaciones sobre la aplicación de dicho plan están recogidas en la Recomendación UIT-R F.1671 [80]. En particular, se propone establecer dos niveles de desencadenamiento de PFD, como se ilustra en la Figura 42.

Ejemplos de los ajustes PFD A y B se proporcionan en la Tabla 26 [80]. Otros ejemplos de diferentes límites de PFD para las mismas y otras bandas se pueden encontrar en [81].

TABLA 26

Ejemplos de los límites de PFD para sistemas PMP con implementación coordinada

Bandas de frecuencia, GHz		PFD A dB(W/m ²)/MHz	PFD B dB(W/m ²)/MHz
24	24.25-24.45 25.05-25.25	-114	-94
28	25.35-28.35		
38	38.6-40	-125 (Note)	-105

Nota: El nivel PFD A de la banda de 38 GHz se determinó con base en parámetros conocidos de los sistemas FS PP.

En caso de tener sistemas de PP FS en un lado de la frontera y sistemas PMP en el otro lado de la frontera, y cuando no haya un acuerdo apropiado previo entre los países existentes para coordinar la implementación de estos sistemas, una posible solución para la coordinación sobre una base, caso por caso, se puede encontrar en [81].

8.4 FSS

Para efectuar la coordinación de las estaciones de FSS, deben tenerse en cuenta las disposiciones del Artículo 9 y el Apéndice 5 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT. Así mismo, la BR de la UIT debe involucrarse en el proceso de coordinación internacional para FSS, cuando este lo haya iniciado una administración responsable.

Como se mencionó en la sección 7.4, la Recomendación UIT-R SM.1448 [64] describe los procedimientos para el establecimiento de la zona de coordinación necesaria en torno a una estación terrena. El procedimiento detallado descrito en esta recomendación, así como las disposiciones pertinentes del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, deben ser seguidos por la administración para garantizar la protección de sus estaciones terrenas del FSS.

Dada la alta complejidad del método descrito en la Recomendación UIT-R SM.1448 [64] y los muchos casos examinados, no es práctico repetir todo el material en este título.



CAPÍTULO 9

EVALUACIÓN DE LA COMPARTICIÓN DE BANDA

En este capítulo se discutirán detalles de la realización de estudios de compartición de banda. La primera sección tendrá en cuenta el algoritmo general de los estudios de compartición y describirá los principios de la evaluación estadística, como el uso de simulaciones basadas en el método de Monte Carlo. En la segunda sección se revisarán los principales principios de compartición, tal y como se aplican a la compartición entre los servicios civiles y no civiles.

9.1 Los modelos estadísticos de la interferencia potencial

Los modelos estadísticos de interferencia potencial representan el método más poderoso y universal para evaluar el potencial de compartición de nuevos servicios de radiocomunicaciones. La Recomendación UIT-R SM.1271 [82] aconseja el uso de métodos probabilísticos para la evaluación de la interferencia como el principal medio para lograr la utilización más eficiente del espectro radioeléctrico. En general, los métodos probabilísticos se pueden dividir en dos categorías:

- *Métodos probabilísticos expresados analíticamente:* en este enfoque, el conjunto específico de expresiones analíticas se desarrollan para un determinado caso de coexistencia, que expresa una relación entre los diferentes parámetros de entrada y la probabilidad resultante de la interferencia. Dos ejemplos de tales evaluaciones

probabilísticas analíticamente expresadas se proporcionan en los anexos de la Recomendación UIT-R SM.1271 [82]. La desventaja de este método es que requiere el desarrollo de aparatos matemáticos para cada caso de escenarios de coexistencia, por lo tanto, es difícil de realizar y requiere un alto grado de competencia matemática, así como una muy buena capacidad de análisis.

- *Simulaciones estadísticas, como las que se utilizan en el método Monte Carlo*: este enfoque permite un tratamiento uniforme y realista de todo tipo de escenarios de coexistencia, por lo tanto, su aplicación es más sencilla y no requiere otras habilidades, más que conocer los fundamentos de la ingeniería del espectro y obtener la comprensión de los principios aplicados por la herramienta de simulación estadística (ver la introducción inicial de este tema y una herramienta de simulación, en particular en la sección 2.7).

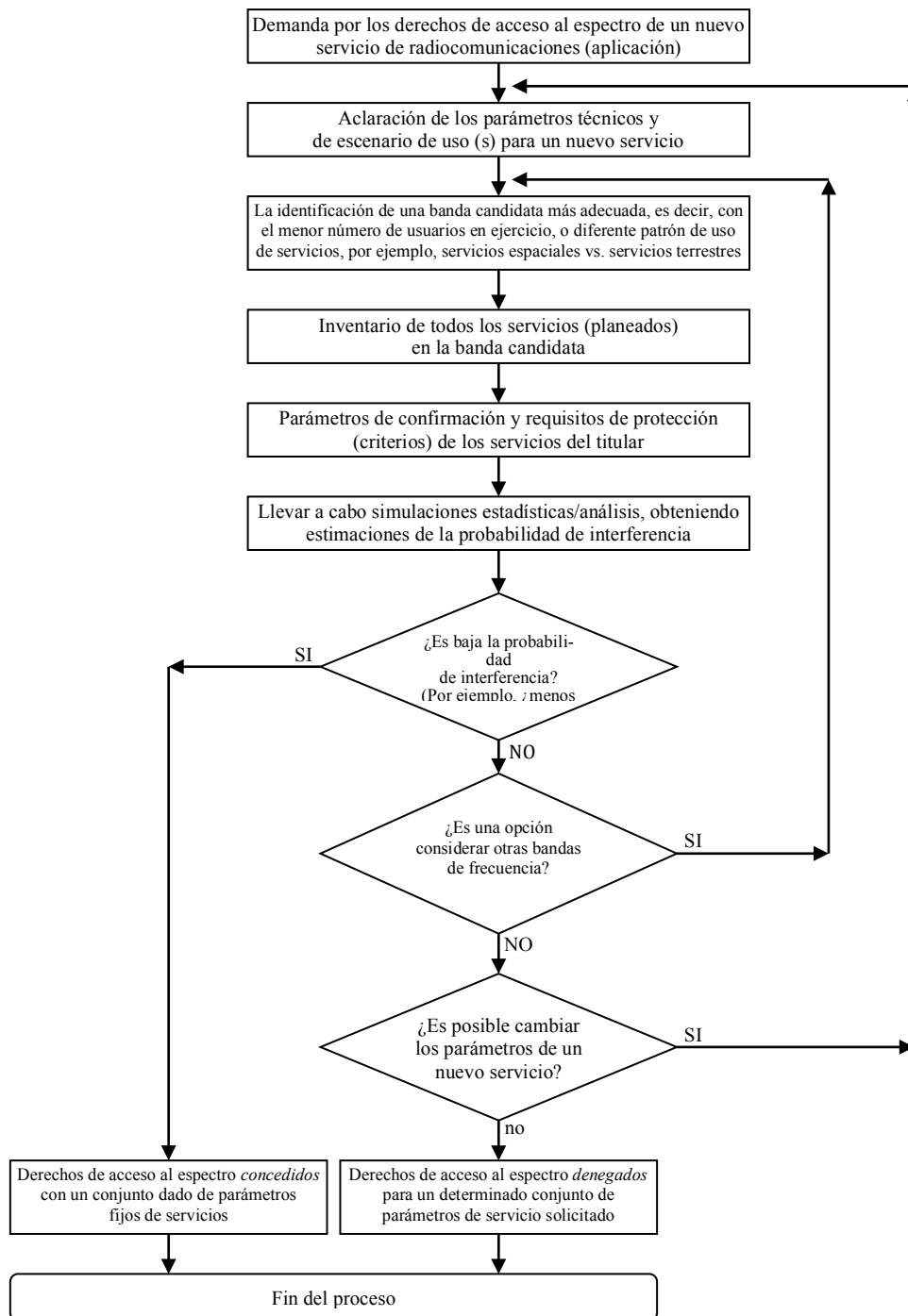
En general, cualquier investigación de compartición nace a partir de la demanda de un nuevo servicio de radiocomunicaciones o nuevas aplicaciones por tener acceso a cierta parte del espectro radioeléctrico, que ya es utilizado por otros servicios o aplicaciones diferentes de un mismo servicio. El diagrama de flujo general para las investigaciones de compartición se muestra en la Figura 43.

Los principios fundamentales de la utilización de la metodología Monte Carlo para la evaluación estadística de la probabilidad de interferencia y las perspectivas de compartición se describen en el Informe UIT-R SM.2028 [46]. La esencia de este método es que los dos (o más) sistemas de radiocomunicaciones considerados en el escenario de coexistencia se describen en términos de probabilidades del posicionamiento de sus elementos y su programación en la herramienta de simulación de Monte Carlo (como la herramienta pública Seamacat [45, 47]).

Consideremos un ejemplo [44] con un terminal de radio que opera activamente con una cantidad de terminales de radio. La cantidad de terminales de radio puede pertenecer al mismo o a un sistema diferente de radiocomunicaciones. El terminal de radio activo puede considerarse como un receptor afectado que incurre en interferencia por parte de la cantidad circundante de terminales de radio activas. Para facilitar la explicación, el receptor interferido será considerado como una estación móvil, pero es igualmente posible si es una estación base. Además, se debe suponer que la cantidad de transmisores interferentes puede corresponder a estaciones móviles, estaciones base o una mezcla de las dos.

FIGURA 43

Diagrama de flujo para el proceso de evaluación de compartición del espectro



Una simulación de Monte Carlo utiliza muchas pruebas de simulación, instantes en el tiempo y ubicaciones en el espacio. Para cada prueba de simulación se construye una representación instantánea de la situación. Esto podría involucrar los siguientes pasos:

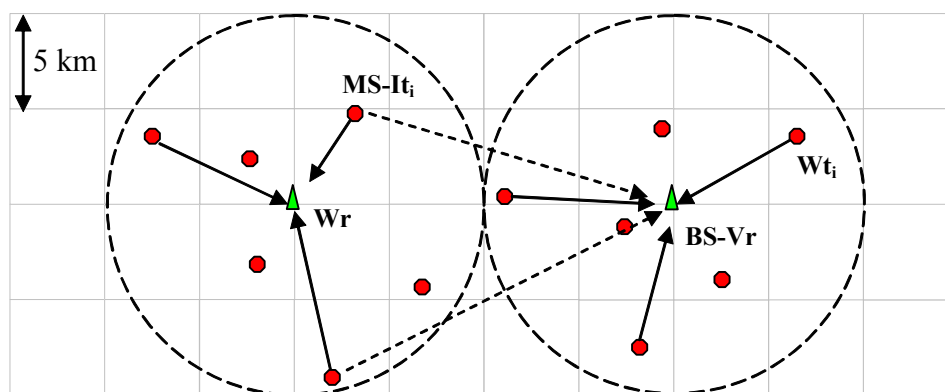
- 1) El receptor de la estación móvil interferido se coloca al azar dentro de una de sus celdas. El tamaño de la celda del sistema afectado debe haber sido especificado por el usuario.
- 2) El cálculo de enlace para la señal deseada del interferido se evalúa mediante un modelo de pérdida de trayectoria, patrones de ganancia de la antena, la potencia de transmisión, el algoritmo de control de potencia y la ubicación del transmisor deseado.
- 3) Una cantidad de interferentes se distribuye alrededor del afectado. Esto se hace comúnmente con una distribución aleatoria uniforme, pero se puede hacer utilizando cualquier distribución definida por el usuario, de ser necesario para modelar escenarios específicos, por ejemplo, interferencias que se limitan a estar dentro de un edificio cercano. La cantidad de interferencias puede ser de un solo tipo o una mezcla de varios tipos. Características tales como la técnica de acceso múltiple de los interferentes deben tenerse en cuenta, es decir, si la interferencia es FDMA, entonces transmitirá continuamente cuando esté activa, pero si es TDMA, entonces transmitirá periódicamente.
- 4) Si el control de potencia va a ser utilizado por los interferentes, entonces las terminales receptoras correspondientes a los transmisores interferentes se colocan y se evalúa el enlace presupuestado.
- 5) Las características de cada interferencia se identifican. Esto incluye las propiedades tales como frecuencia de transmisión y potencia. El usuario define un rango de canales de transmisión permitido que puede consistir en múltiples canales o simplemente un solo canal. La potencia de transmisión se determina usando el algoritmo de control de potencia adecuado y el cálculo del enlace con el terminal de recepción.
- 6) El efecto de cada interferencia sobre el afectado puede ser acumulado para proporcionar un nivel de interferencia total recibido por su receptor. El nivel de interferencia recibida por el afectado puede incluir el efecto de las emisiones no deseadas, que depende de los niveles de emisión no deseada en las señales interferentes y del desplazamiento de frecuencia entre la interferencia y el afectado; el bloqueo del receptor, que dependerá del desempeño del bloqueo del receptor interferido y del desplazamiento de frecuencia entre la interferencia y el afectado; la intermodulación, que dependerá de las potencias de transmisión y desplazamientos de frecuencia.

- 7) Una vez que el nivel de interferencia y la intensidad de la señal deseada se conocen, se puede realizar una verificación para determinar si el objetivo de C/I se ha logrado, como se ilustra más adelante en esta sección.

Consideremos la posibilidad de que la interferencia entre dos sistemas móviles pueda ser descrita por un escenario en el cual se colocan dos áreas de cobertura en áreas geográficas adyacentes como se muestra en la figura siguiente.

FIGURA 44

Escenario de interferencia móvil a móvil



En esta figura: MS, estación móvil; BS, estación base; It, transmisor de interferencia; Wt, transmisor deseado; Wr, receptor deseado (es decir, el correspondiente de It); Vr, receptor de la víctima (es decir, el que sufre la interferencia).

Después de haber programado lo anterior, en la herramienta de simulación estadística se podría obtener el siguiente cuadro (Figura 45), después de una sucesión de fotos instantáneas, cada una de ellas generando una colocación aleatoria de interferencia y transceptores interferidos en sus sistemas pertinentes.

Para cada uno de los fallos aleatorios de las posiciones de interferente e interferido, el nivel de señal deseado y no deseado (interferencia) se indican para cada instantánea. Después de un determinado número de simulaciones (por lo general, más de 10.000 eventos), las señales deseadas y no deseadas se registran como vectores, que contienen el número de valores que corresponde al número de instantáneas modeladas (eventos de interferencia), como se demostró anteriormente, por ejemplo, en la Figura 25.

Lo que queda por hacer para obtener una estimación de la probabilidad de interferencia es comparar los niveles de señal deseada y no deseada en cada instantánea por separado y considerar si los niveles de señal cumplen con el criterio C/I, ver la Figura 46.

FIGURA 45

Ejemplo de simulación de un escenario móvil a móvil

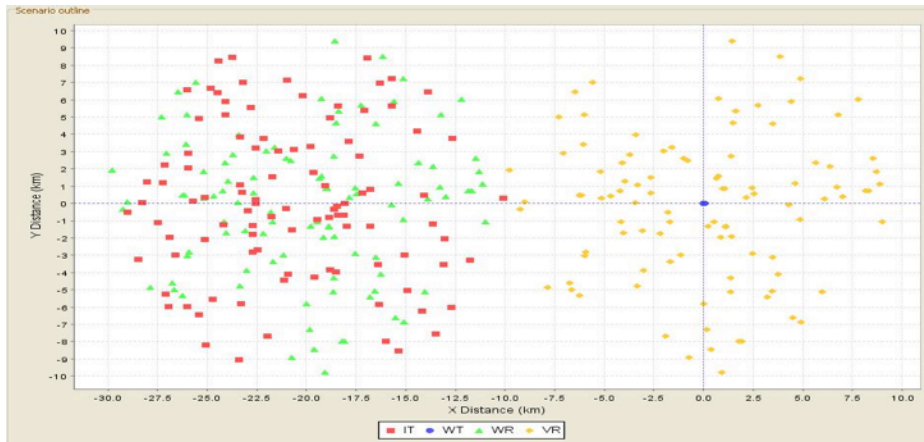
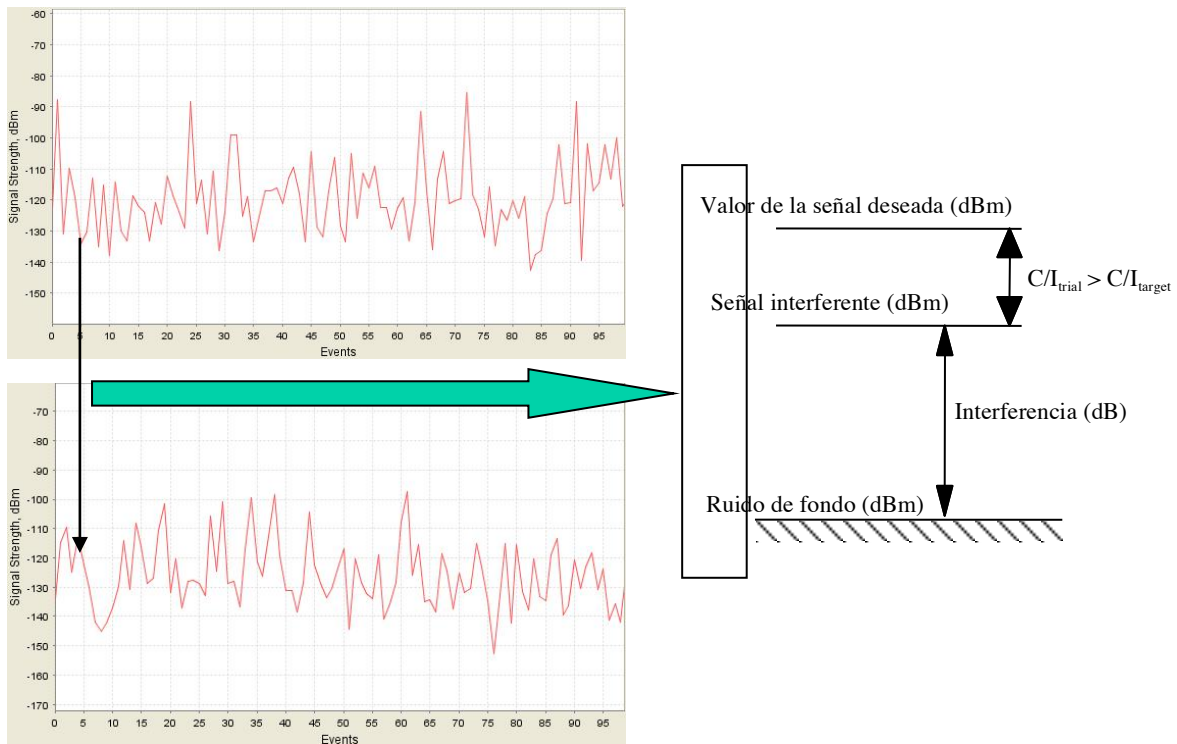


FIGURA 46

Estimación de C/I para el cumplimiento de los eventos generados estadísticamente



En un ensayo dado $C/I \geq C/I_{target}$, esto se considera un “buen” evento, pero si resulta $C/I < C/I_{target}$, dicho evento será considerado como una evaluación con un resultado negativo. Después de comparar de manera similar el cumplimiento ($N_{eventos}$), para todos los eventos y de contar cuántos eventos resultaron en una evaluación positiva (N_{bueno}), la probabilidad final de interferencia puede ser calculada como:

$$P_{interferencia} = (1 - (N_{bueno}/N_{eventos})) \cdot 100 [\%] \quad (58)$$

El resultado de una simulación de Monte Carlo es una medida del rendimiento del sistema, en términos de probabilidad de interferencia. Se debe tener cuidado al interpretar una probabilidad de interferencia. El problema es similar al que enfrenta un operador del sistema al especificar su disponibilidad. El operador del sistema móvil especifica que un sistema puede proveer una disponibilidad del 95%. No es seguro si esto significa que el 5% de los usuarios están fuera de la cobertura el 100% del tiempo o que el 100% de los usuarios están fuera de la cobertura el 5% del tiempo. Sin embargo, en general se entiende que la realidad está en algún lugar entre estos dos límites extremos.

La probabilidad de la interferencia que resulta de una simulación de Monte Carlo se puede interpretar en dos etapas. En primer lugar, lo que precisamente la simulación está computando y, en segundo lugar, lo que relaciona esto con el mundo real.

Precisamente lo que la simulación está computando dependerá de la situación que se está modelando. Para la mayoría de las simulaciones, donde los interferidos son tratadas por igual y no tienen restricciones impuestas a sus posiciones, cada uno experimentará el mismo nivel de interferencia. En este caso el significado del resultado es que el 100% de los usuarios experimentan un $P\%$ de probabilidad de ser molestados. Para las simulaciones que se limitan a la posición de algunos o todos los interferidos, entonces es posible que algunos de los afectados sufran más interferencias que otras. En este caso, el significado de los resultados estará en algún lugar entre el 100% de los usuarios experimentando una probabilidad de $P\%$ de ser molestados y $P\%$ de los usuarios experimentando un 100% de probabilidades de ser molestados.

9.2 Compartición entre los servicios civiles y no civiles

En la sección 3 se describieron los principios fundamentales de la compartición entre los distintos servicios. En la presente sección se hace una revisión de algunos de los principales principios de distribución, a la luz de su aplicación en la compartición entre los servicios civiles y no civiles, con base en material de [83]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una red civil muy densa en todo el país, como la radiodifusión sonora y de televisión o

redes celulares/PCS, demandan un uso del espectro muy pesado, lo cual hace difícil, si no imposible, su despliegue sobre una base de compartición con los servicios militares.

Compartición de tiempo

Parece sencillo sugerir que los servicios civiles deben usar espectro militar en tiempo de paz y el espectro debe volver a su uso exclusivamente militar en situaciones de emergencia o de guerra. Sin embargo, algunos sistemas de defensa están en funcionamiento en tiempo de paz, por ejemplo, sistemas de detección de misiles estratégicos, control de tráfico aéreo y radares de defensa aérea. También la formación y ejercicios militares continúan en tiempo de paz a fin de prepararse para las funciones de guerra. Además, muchos servicios civiles de radio estarían reacios a renunciar a su uso de radio durante ejercicios militares o en un periodo de transición a la guerra. Los procedimientos de transición a la guerra pueden implicar arreglos para que las bandas de frecuencia sean tomadas por los militares, pero estos acuerdos constituyen una preparación para la guerra abierta y es poco probable que se logren, excepto en la última etapa del proceso de transición. Los procedimientos de transición a la guerra no son apropiados para las circunstancias concernientes a los principales usos nacionales o internacionales, cuando un espectro más amplio podría ser necesario. Sin embargo, la compartición de tiempo es factible en las circunstancias adecuadas, particularmente en HF.

Separación de frecuencias

El uso civil de las partes de las bandas de frecuencias del gobierno podría ser acordado en muchos casos en que la banda no gubernamental está completamente ocupada en términos de canales de frecuencia. Eso está bien en el sentido que la administración pública funciona en los canales dedicados de forma independiente al uso gubernamental, aunque las agencias gubernamentales, militares normalmente, insisten en una condición de “no interferidos, no protegidos” para los sistemas civiles utilizados en tales bandas compartidas, para evitar la necesidad de una coordinación detallada y la protección de los bordes de la banda por bandas de guarda. Pueden surgir dificultades si el uso gubernamental/militar aumenta posteriormente, en especial si el usuario civil no es consciente de las condiciones de ocupación y los derechos anteriores de los usuarios gubernamentales. La separación de frecuencias es el método de partición del espectro más ampliamente practicado. Donde es posible utilizar el mismo equipo operando en la misma banda de frecuencia con el mismo plan de canal, este a su vez facilitará el intercambio.

Separación geográfica

En algunos casos, el uso de bandas de frecuencias del gobierno puede limitarse a una parte específica del país, por ejemplo, zonas de entrenamiento militar, y el intercambio

puede estar de acuerdo con los servicios civiles, cuando estos servicios se pueden restringir a otros lugares. La separación geográfica puede ser posible con los servicios de radio licenciados, debido a que son sometidos a un procedimiento de limpieza de sitio de radio, lo que permite a las agencias gubernamentales oponerse a los distintos sitios civiles si la interferencia es probable. La compartición no se acordaría para servicios civiles no licenciados, a menos que se hayan aplicado limitaciones de potencia que harían insignificante la interferencia a los sistemas gubernamentales/militares. Esto depende de la sensibilidad del equipo de radio del gobierno, como receptores de radar en la banda correspondiente y al tipo de operación civil.

Por ejemplo, la compartición de dispositivos de baja potencia en las bandas de comunicación de aeronaves ha sido objeto de oposición por parte de los militares, sobre la base de que una aeronave podría estar sujeta a un nivel de ruido peligroso, debido al número de dispositivos de los que podría recibir este ruido, incluso si solo una pequeña proporción de los dispositivos estuviera en uso al mismo tiempo. Por lo tanto, la compartición basada en la separación geográfica ha demostrado ser de poco valor cuando se trata de compartición entre servicios civiles y no civiles.

Operación sobre la base de no interferencia (NIB)

En la operación NIB (por sus siglas en inglés) las nuevas aplicaciones pueden utilizar la banda de frecuencia sobre una estricta base de no interferencia (también conocida como “operación subyacente”). La autorización requiere el cuidado de un estudio a priori de compartición, que podría confirmar una muy baja probabilidad de interferencia.

En este caso, los diferentes servicios de radio pueden compartir la misma frecuencia, si los canales de los servicios de compartición se comprometen a no causar interferencias al servicio anfitrión. Este es el mismo principio previsto por el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT como base de una compartición entre las atribuciones primarias y secundarias en la misma banda.

Sin embargo, hay una posibilidad de sanciones severas a la compartición de bandas NIB si el primer servicio opera en un contexto de seguridad para la vida, debido a que se pueden requerir pruebas largas y costosas para demostrar que no se producirá interferencia. Un ejemplo de cuando se puede emplear una operación NIB es la compartición con radares.



CAPÍTULO 10

NOTIFICACIÓN A LA UIT BR IFIC

Este capítulo describe los principios y procedimientos para la notificación de las asignaciones de frecuencias dentro del marco internacional establecido por el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT. La información proporcionada en este capítulo se deriva de las presentaciones relevantes de la Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT (BR), durante seminarios regulares de Radiocomunicaciones [84-86].

La Circular de Información Internacional de Frecuencias (BR IFIC, por sus siglas en inglés) es una publicación de servicio publicada cada dos semanas por la BR, de acuerdo con el Artículo 20 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR 20.1 a 20.6 y RR 20.15).

El propósito de la BR IFIC es proporcionar información sobre las asignaciones/atribuciones de frecuencias presentadas por las administraciones a la BR para su inscripción en el Registro Maestro Internacional de Frecuencias (MIFR) y en el Registro Espacial Maestro Internacional de Frecuencias (SMIFR), así como en los varios acuerdos y planes regionales o mundiales. La notificación de asignaciones de frecuencia presenta la etapa final reglamentaria antes de que las asignaciones de frecuencia se puedan registrar en el MIFR mantenido por la BR.

Las disposiciones relativas a la notificación de las asignaciones de frecuencia son las principales estipuladas en el Artículo 11 del Reglamento de Radiocomunicaciones, excepto por ciertos servicios de mayor relevancia para los planes especiales (tales como los planes de adjudicación de frecuencias para los servicios fijos por satélite y las redes de los servicios de radiodifusión por satélite). Los procedimientos de notificación de estos servicios son, sin embargo, bastante similares a los de los servicios generales conforme a lo estipulado en el Artículo 11.

Tal como se especifica en los números 11.2 y 11.9 del RR, cualquier asignación de frecuencia a estaciones transmisoras y receptoras se notificará a la BR:

- Si el uso de esa asignación puede causar interferencia perjudicial a cualquier servicio de otra administración.
- Si la asignación se va a utilizar para la radiocomunicación internacional.
- Si esa asignación está sujeta a una adjudicación de frecuencias mundial o regional, o un plan de trabajo que no tiene su propio procedimiento de notificación.
- Si esa asignación está sujeta a los procedimientos de coordinación del Artículo 9 o artículos relacionados en ese caso.
- Si se desea obtener el reconocimiento internacional de dicha asignación.
- Si se trata de una asignación no conforme con el número 8.4 del RR y si la administración desea registrarla para obtener información.

Dado el volumen de los datos que contiene, el IFIC de la BR se publica en dos partes: una para los servicios terrestres y la otra para los servicios espaciales.

10.1 Servicios terrestres

La BR IFIC (servicios terrestres) se publica en DVD-ROM en los seis idiomas oficiales de la Unión Internacional de Telecomunicaciones: árabe, chino, inglés, francés, ruso y español. La BR IFIC (servicios terrestres) contiene:

- El Registro MIFR actualizado.
- La asignación y atribución de frecuencias para servicios terrestres.
- Las notificaciones de asignaciones de frecuencias nuevas, pasando por el procesamiento del Artículo 11 del RR para su inclusión en el Registro Internacional de Frecuencias.
- Notificaciones en proceso, en virtud de los acuerdos regionales para la actualización de los planes.

Además de la información acerca del procesamiento de las notificaciones y asignaciones de frecuencia, la BR-IFIC también contiene algunas utilidades:

- El programa TerRaQ para consultar la información publicada.
- El programa TerRaNV para la verificación de notificaciones electrónicas.
- El Prólogo a la BR IFIC (servicios terrestres).

Los dos programas de software incluidos son necesarios para el manejo de la información proporcionada en la BR IFIC, mientras que el Prólogo es una fuente de información y referencia que describe el contenido y el uso de la BR IFIC.

El Prólogo explica el significado de abreviaturas, símbolos y palabras codificadas utilizadas en la BR IFIC, es actualizado periódicamente por el departamento y publicado en la BR IFIC y en la página web de la UIT.

La versión en español se puede obtener en la siguiente URL: http://www.itu.int/ITU-R/publications/brific-ter/preface/PREFACE_ES.PDF.

La base de datos BR IFIC (terrestre) se divide en tres partes:

- FM/TV (radiodifusión sonora y de televisión en las bandas VHF y UHF).
- LF/MF (radiodifusión sonora en las bandas LF y MF).
- FXM (servicios fijos, móviles y otros, a excepción del servicio de radiodifusión en las bandas LF/MF y en VHF/UHF).

Cada parte está subdividida en:

- Asignaciones registradas (MIFR y planes).
- Notificaciones en proceso (TIP).

Al considerar las categorías anteriores, las partes de los servicios de radiodifusión deben ser de interés para Colombia, para lograr el reconocimiento internacional de sus estaciones de radiodifusión. En particular, la base de datos LF/MF se debe referir a los registros de acuerdo con las disposiciones del plan regional para la radiodifusión en MF (RJ81).

La parte FXM contiene todos los avisos en proceso, las asignaciones y las atribuciones de los servicios terrestres fijos, móviles o de otro tipo. Se compone de los siguientes fragmentos:

- NTFD_RR: asignaciones inscritas en el Registro Maestro y avisos presentados en virtud del Artículo 11 del RR.
- Req_agrt: avisos presentados en virtud del RR 9.21 para los servicios terrestres.
- Com_Freq: registros en el Registro Maestro para frecuencias cuyo uso se prescribe de acuerdo con RR 11.13 y RR 11.14.
- AP25: RR Apéndice 25 del Plan de atribución.
- AP26: RR Apéndice 26 del Plan de atribución.
- AP27: RR Apéndice 27 del Plan de atribución.
- Otros planes.

El MIFR contiene las características completas de asignaciones notificadas a la BR y registradas de conformidad con las disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones.

Cualquier asignación que pueda causar interferencia a las estaciones existentes o previstas de otro país o susceptibles de recibir interferencias de las estaciones deberá notificarse a la BR para ser inscrita en el Registro y, por tanto, beneficiarse del derecho al reconocimiento internacional. El MIFR es actualizado por la BR de acuerdo con la función de determinadas etapas procesales y la información publicada en diferentes partes de la BR IFIC:

- 1) Cualquier notificación recibida es publicada por primera vez en la Parte I, si contiene toda la información requerida.
- 2) La BR examina la notificación sobre la base de la banda de frecuencia y la categoría del servicio en cuestión. Si sus resultados son desfavorables, el departamento devuelve la notificación a la administración notificante, una vez que ha sido publicada en la Parte III de la BR IFIC.
- 3) Si los resultados son favorables, el departamento publica el aviso en la Parte II de la BR IFIC y registra la asignación en el MIFR.

La Parte IIB (cuando se incluye en BR IFIC) lista las asignaciones de frecuencias para las cuales los hallazgos registrados en el MIFR fueron revisados por el departamento de conformidad con el Artículo 14 del RR.

Las solicitudes de modificación de los distintos planes están publicados en las correspondientes secciones especiales de la BR IFIC, así como las peticiones de coordinación bajo el Artículo 9 del RR (RR 9.21/C para la información proporcionada por una administración que busca un acuerdo bajo el procedimiento del Artículo 9 y RR 9.21/D sobre los progresos realizados en la coordinación).

De particular importancia para Colombia, la sección especial RJ81 proporciona la información publicada de conformidad con el Artículo 4 de ese acuerdo regional. La sección especial consta de tres partes:

- A. Pormenores de las modificaciones propuestas.
- B. Pormenores de las modificaciones sobre las que se han logrado acuerdos.
- C. Pormenores de asignaciones en el plan que han sido canceladas.

Los planes son actualizados por el departamento sobre la base de la información publicada en las partes A, B y C. Por lo tanto, cualquier aviso de *suprimir* que se reciba se publica en la Parte C, para confirmar el recibido de la notificación, y la correspondiente asignación de los parámetros de identificación notificados se retira del plan en cuestión. Cualquier aviso recibido de *adición* o *modificación* se publica en la Parte A. Una vez que el tiempo estipulado para recibir observaciones ha pasado, la asignación se publica en la Parte B y se registra en el plan correspondiente, si no hay objeciones y la administración notificante le ha solicitado el registro a la BR.

De conformidad con el No. 8.3 del Reglamento de Radiocomunicaciones, las asignaciones de frecuencias inscritas en el MIFR con una conclusión favorable tienen derecho al reconocimiento internacional. En el marco de la aplicación de esta disposición fundamental, es esencial para los administradores de la frecuencia consultar la BR IFIC regularmente. Con este fin, se proporciona una copia gratuita de la BR IFIC a cada administración y el Departamento de Radiocomunicaciones publica la lista de asignaciones en las partes I, II, III y IIB y las secciones A, B y C de las secciones especiales en la web de la UIT en la siguiente URL: <http://www.itu.int/ITU-R/publications/brific-ter/index-es.html>.

Adicionalmente, bajo el No. 11.28 del Reglamento de Radiocomunicaciones, la BR publica los anuncios recibidos completos en la BR IFIC, en un plazo de dos meses. Esta publicación constituye el reconocimiento de recibo para la administración notificante y el personal encargado de archivar las notificaciones de la BR puede utilizarla para verificar que la información publicada corresponda a las notificaciones presentadas a la BR.

El personal responsable de la coordinación también puede utilizar la BR IFIC para mantenerse al tanto de las notificaciones presentadas por otras administraciones (en particular, ¡las de los países vecinos!), con el fin de determinar si la coordinación es necesaria en cada caso.

Información, orientación del proceso y formularios de notificación para la notificación de las asignaciones terrestres a la BR se encuentra en el sitio web de la UIT, en la siguiente dirección: <http://www.itu.int/ITU-R/terrestrial/pub-reg/notice-forms/index.html>.

10.2 Servicios espaciales

Del mismo modo como se describe en la sección anterior 10.1 para el caso de la BR IFIC (servicios terrestres), la BR IFIC (servicios espaciales) representa todo lo que abarca la plataforma para la distribución de información relacionada con las asignaciones de frecuencia efectuadas en los servicios espaciales, así como notificaciones del curso de los procesos de asignación de frecuencias. La BR IFIC (Servicios Espaciales), por lo tanto, contiene la siguiente información principal:

- Actualización del SMIFR.
- La asignación y atribución de planes de frecuencia para los servicios espaciales (AP30x).
- Las notificaciones de nuevas asignaciones de frecuencias, objeto de tratamiento para su inclusión en los planes SMIFR.

La información sobre el procesamiento de las notificaciones en curso es una vez más estructurada en varias partes, representando las diferentes etapas del proceso de notificación: Partes I-S II-S y III-S.

Además, la BR IFIC (espacio) contiene mucha información adicional y herramientas útiles, tales como:

- Software de captura de gráficos e información (GIMS).
- El Prólogo (servicios espaciales).
- Bases de datos pertinentes.
- Estado de la recuperación de costos.
- Lista de avisos “recibidos”.
- Lista de redes espaciales - SNL (trimestral).
- Herramientas de software necesarias para el manejo de las notificaciones del servicio espacial.

Al igual que la BR IFIC terrestre, el Prólogo es el punto de partida para familiarizarse con la BR IFIC (servicios espaciales). Contiene introducción y referencias que deberían ser útiles para cualquier usuario que se inicie en el uso de la BR IFIC (servicios espaciales) y sus partes asociadas, bases de datos y componentes de software. La última versión del Prólogo, en español, está disponible en la siguiente dirección: http://www.itu.int/ITU-R/space/preface/pdf/preface_s.pdf.

Nótese que una de las condiciones favorables para encontrar las asignaciones de las estaciones terrenas con respecto al No. 11.32 del RR, es que las correspondientes asignaciones de la estación espacial deben estar registradas en el MIFR con una conclusión favorable. Por lo tanto, esto implica que el procedimiento de notificación de una estación terrena debe iniciarse solo después de que el procedimiento de notificación de la estación espacial asociada ha comenzado o terminado.

Con el fin de ayudar al proceso de notificación para los servicios espaciales, la BR ha desarrollado muchas herramientas pertinentes, que podrían ser encontradas en el sitio web de la UIT, en virtud de los títulos de menú: [www.itu.int radiocomunicaciones](http://www.itu.int/radiocomunicaciones) (ITU-R) servicios espaciales soporte espacial.

Las notificaciones “en forma de recibidas” de las administraciones se ponen a disposición de la BR en el IFIC (Servicios Espaciales) durante los 30 días siguientes a la recepción, y también en la página web de la UIT. Después de eso, se inicia el proceso de tramitación de las notificaciones por parte de la BR, con el seguimiento de registros de las notificaciones a través de diferentes partes del IFIC, de manera similar a como se describe en las notificaciones de los servicios terrestres.

Es importante que la administración que tiene la participación en las comunicaciones espaciales siempre revise cuidadosamente la información publicada en la Parte IS y Parte IIS del IFIC, ya que los requisitos de coordinación que son verificados por la BR se basan solo en la información de las casillas A5/A6 del formulario de notificación proporcionado por la administración notificante.



CAPÍTULO 11

PRINCIPIOS Y MEDIOS PARA HACER ASIGNACIONES NEUTRALES DE TECNOLOGÍA PARA USO FLEXIBLE DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

Este capítulo describe los principios más importantes y diversos aspectos prácticos relacionados con la aplicación del principio de flexibilidad y neutralidad de la tecnología en la gestión del espectro. La primera sección describe los principios generales, mientras que las dos secciones siguientes consideran ejemplos de cómo estos principios se podrían aplicar, respectivamente, a las aplicaciones de los servicios móvil y fijo y bandas de frecuencia.

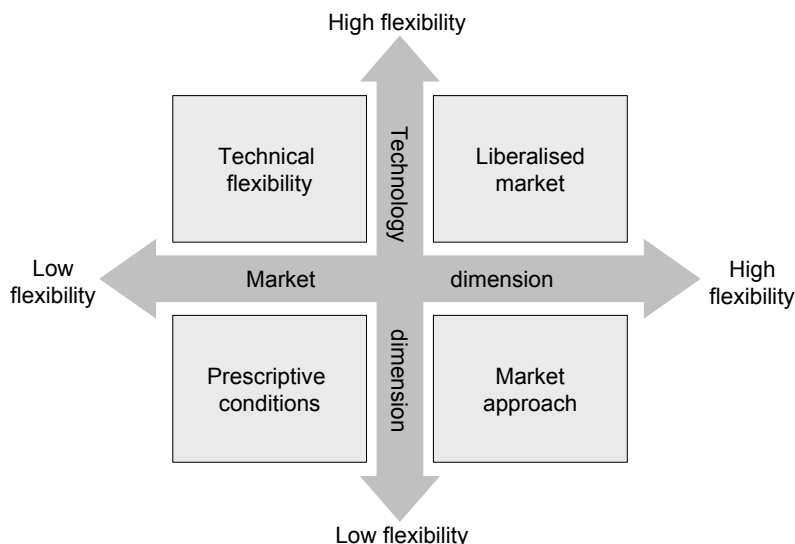
11.1 Principios generales

Cuando se trata de la introducción de flexibilidad en la gestión del espectro radioeléctrico, es importante tener en cuenta varias dimensiones de flexibilidad aplicadas al negocio de las radiocomunicaciones en su conjunto [87]. La idea principal es que no es posible definir el grado técnico óptimo y el grado de flexibilidad, puesto que no es posible poner un simple indicador en el difícil y contradictorio proceso que se adelanta en el mercado. Sin embargo, dos ejes principales se podrían distinguir para describir las directrices generales para la introducción de la flexibilidad: “la flexibilidad del mercado” y la “flexibilidad tecnológica”.

Los extremos de los ejes de “flexibilidad del mercado” tienen las siguientes características:

FIGURA 47

Dimensiones de flexibilidad en la gestión del espectro radioeléctrico



- La baja flexibilidad del mercado se caracteriza por la certidumbre en inversiones, altas barreras de entrada, el estricto mercado y las definiciones de servicios, los mercados oligopolísticos y servicios restrictivos, y la definición de los mercados.
- La alta flexibilidad del mercado se caracteriza por la libre competencia en los servicios, las bajas barreras de entrada, la ausencia de definiciones de servicios y del mercado.

Los extremos de los ejes de “flexibilidad tecnológica” tienen las siguientes características:

- La baja flexibilidad tecnológica se caracteriza por la seguridad para las inversiones, la escasez de espectro, muchas restricciones, la armonización tecnológica, la toma de decisiones basada en consenso, la base de no interferencia, procesos de cambio más largos y complejos.
- La alta flexibilidad tecnológica se caracteriza por un mínimo de restricciones, condiciones de fronteras, el cambio de tecnología, la reconfiguración, baja armonización y mayor probabilidad de interferencia.

De acuerdo con la visión propuesta en la Figura 47, los diferentes escenarios para la introducción de flexibilidad se podría prever en [87]. Todos los escenarios tienen ventajas y

desventajas, y tendrán un impacto diferente en el mercado. Ningún escenario se puede considerar que sea aplicable a todas las bandas de frecuencia, sino que podría ser aplicable a un caso específico o incluso a una combinación determinada de casos.

Escenario de condiciones prescriptivas

El escenario de condiciones prescriptivas se basa en una baja flexibilidad tecnológica y de mercado. Las características de este escenario son la armonización nacional e internacional de tecnología y servicios, las restricciones y obligaciones nacionales en la tecnología y servicios, así como un enfoque banda por banda, servicio por servicio. Los ejemplos en el escenario de condiciones prescriptivas son los sistemas GSM (sistemas 2G), los sistemas de radiodifusión y cualquier otro caso similar donde la interoperabilidad y la armonización sean los principales objetivos.

El escenario de las condiciones de prescripción puede permitir la competencia entre servicios basados en la misma tecnología (por ejemplo, GSM).

Escenario de flexibilidad técnica

El escenario de flexibilidad técnica se basa en la eliminación de restricciones técnicas innecesarias. Ejemplos de la libertad de elección de tecnología son la introducción de GPRS, EDGE, HSDPA, HSUPA y otras mejoras a las tecnologías existentes (GSM, CDMA, etc.), lo que permite soluciones GSM y UMTS en las mismas bandas, la libertad de utilizar la tecnología fija o móvil en una banda específica. En cierta medida, el desarrollo de aplicaciones subyacentes (sistemas de ultra ancho de banda, radio cognitiva) también aporta flexibilidad técnica.

Las herramientas para lograr flexibilidad técnica incluyen la eliminación de restricciones innecesarias y compartición innovadora.

El escenario de flexibilidad técnica puede hacer que las nuevas tecnologías sean posibles y llevar a la innovación. También permite la competencia entre diferentes tecnologías dentro de un mercado definido.

Escenario de enfoque de mercado

El escenario de enfoque de mercado se basa en la alta flexibilidad del mercado y baja flexibilidad tecnológica. Este escenario se caracteriza, en primer lugar, por crear un mercado para que el espectro sea utilizado por determinadas tecnologías, y en segundo lugar, por abrir ese mercado para que puedan competir varios servicios (consumidores). Algunos ejemplos permiten las aplicaciones públicas de telefonía móvil en las bandas de radio móvil profesional (en los casos en que se especifica la tecnología que se utilizará en la licencia) y aplicaciones inalámbricas fijas (Wireless Local Loop) en las bandas GSM.

El escenario de enfoque de mercado puede permitir la competencia entre tecnologías existentes que están convergiendo (por ejemplo, servicios de contenido móvil a través de 3G o redes DVB-H).

Escenario de mercado liberalizado

El escenario de mercado liberalizado se basa en un mercado con alta flexibilidad tecnológica y de mercado. El escenario se caracteriza por condiciones de licencia neutrales en cuanto a tecnologías y servicios, para dejar que el mercado ofrezca soluciones económica y técnicamente efectivas. Esto no impide la armonización de facto de las tecnologías y aplicaciones. Permite ofrecer una plataforma múltiple y servicios múltiples (de cualquier red, cualquier servicio). Ejemplos de ello son 3G en las bandas de 2G/GSM, BSS en las bandas de MSS y el servicio móvil en las bandas de servicio fijo.

Una de las consecuencias del escenario de mercado liberalizado, en las bandas, es que la gestión del espectro tendrá que preocuparse menos por la planificación anticipada de la utilización de frecuencias y más bien centrarse en una gestión de la interferencia a posteriori. El escenario puede permitir la innovación y, en general, aumentar la competencia entre tecnologías y aplicaciones.

Los escenarios descritos anteriormente para la futura gestión del espectro muestran una situación en la que diferentes bandas, aplicaciones y regímenes de gestión del espectro se pueden considerar y juzgar en términos de la posibilidad de una mayor flexibilidad. Con base en dicho análisis, la elección de un escenario de desarrollo adecuado (implementado a un grado bien evaluado de necesidad, o mediante la combinación de métodos de más de un escenario) debe hacerse como un ejercicio de planificación estratégica, por parte de la administración. Hay que recordar que el objetivo último de la introducción de flexibilidad es fomentar la innovación y fomentar la competencia en las bandas de frecuencia y servicios seleccionados para el beneficio de la administración, la industria de las radiocomunicaciones y, en general, del usuario final.

Como este Título II del Manual Nacional de Gestión del Espectro Radioeléctrico solo se ocupa de cuestiones técnicas, en la parte restante de este capítulo se tratarán los aspectos puramente técnicos de la flexibilidad, es decir, el cumplimiento de los principios del escenario de flexibilidad técnica ya descritos.

En la aplicación de la flexibilidad, los modelos principales a considerar son los siguientes:

Bandas flexibles

Este modelo se basa en licencias individuales, con un mínimo de restricciones técnicas y la ausencia de limitaciones al mercado.

La idea básica es establecer las condiciones en ciertas bandas de frecuencias, para la protección de los servicios que operan en las bandas vecinas, garantizar la seguridad y omitir cualquier parámetro adicional para el uso de la banda como tal. Las licencias son tecnológicamente neutrales y se pueden utilizar para ofrecer cualquier servicio electrónico de comunicaciones. Este tipo de licencia permite tecnologías flexibles y, puesto que el uso no se ha definido, no son necesarios los procedimientos administrativos en caso de cambio en el uso de la frecuencia. Pero puede haber necesidad de procedimientos para “despejar el sitio”, con el fin de coordinar los transmisores con más de cierta potencia o altura de antena.

Este enfoque presupone la definición de requisitos mínimos para asegurar la compatibilidad de una coexistencia compatible y eficiente de las bandas flexibles y bandas convencionales.

Además, con el fin de garantizar un grado máximo de flexibilidad para los nuevos desarrollos técnicos, no debe haber más especificaciones dentro de estos rangos de frecuencia. Si es necesario, sería posible incluir condiciones que garanticen la eficiente utilización de las frecuencias y evitar interferencias entre los diferentes titulares de las licencias dentro de una determinada banda o en las bandas vecinas (adyacentes).

A continuación se enlistan distintos aspectos que deben ser considerados cuidadosamente al establecer las bandas flexibles:

- Número de titulares de licencia.
- Condiciones para el uso eficiente de la banda.
- Condiciones de compatibilidad y coexistencia electromagnética y un marco de resolución de conflictos.
- Condiciones para la duración del uso de la banda.
- Máscara del espectro o máscara de borde del bloque (potencia radiada, máxima potencia interferente en los bordes de la banda).

Para garantizar la máxima libertad para el desarrollo de una nueva tecnología, las condiciones de uso para la protección de las bandas de frecuencias vecinas también deben limitarse al mínimo necesario.

La transición de una banda de frecuencia en una banda flexible puede ser facilitada por la negociación del espectro y de la interferencia, donde los diferentes operadores negocian condiciones de co-existencia que incluyen el pago de indemnizaciones en términos comerciales. La complejidad de esta transición dependerá de la diferencia entre el uso existente y previsto en términos de características técnicas.

En algunas zonas geográficas, en las fronteras de países vecinos, que no utilizan las bandas particulares en forma de bandas flexibles, las regulaciones adicionales se consideran implícitas para garantizar la coexistencia compatible de los servicios utilizados en los países vecinos. Estas condiciones específicas reducen los beneficios de las bandas flexibles y,

por lo tanto, es necesario fomentar y procurar que, en la medida de lo posible, los países utilicen un modelo de banda flexible. Sin embargo, este último punto no es un tema de gran preocupación para aquellos países cuyas fronteras están escasamente pobladas.

Régimen expedito de licencias

Un régimen expedito de licencias es una combinación de licencia de uso exento y de protección de los usuarios del espectro. Este modelo tiene la característica “primero en llegar, primero en ser atendido”, en virtud del cual el usuario notifica al regulador la posición y características de las estaciones. La base de datos de las estaciones instaladas, que contiene los parámetros técnicos apropiados (ubicación, frecuencia, potencia, antena, etc.), está disponible para el público y, por lo tanto, debe ser consultada antes de instalar nuevas estaciones.

Si el transmisor puede ser instalado sin afectar las estaciones ya registradas (es decir, sin exceder los criterios de interferencia predefinidos), la nueva estación se puede registrar en la base de datos. Un mecanismo sigue siendo necesario para habilitar un nuevo operador, para cuestionar si una estación ya registrada es en realidad utilizada o no. Los nuevos participantes deben ser capaces de llegar a un acuerdo con los usuarios existentes, en el caso de que se excedan los criterios de interferencia.

El régimen expedito de licencias puede conducir a un uso muy eficiente del espectro, donde solo los usuarios activos están protegidos y donde la interferencia es menos restrictiva (ver el ejemplo de aplicación en [88]). También puede permitir a la administración proteger un número limitado de lugares sensibles, favoreciendo una mayor flexibilidad en un lugar de lo que se podría sin la limitación geográfica.

La negociación del espectro

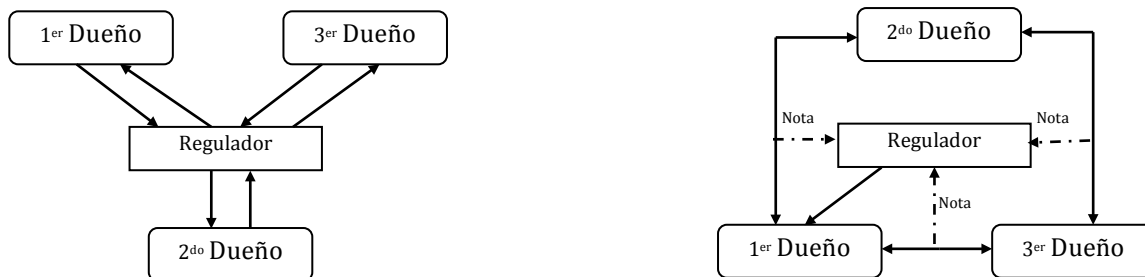
El régimen de negociación secundaria del espectro radioeléctrico (mercado secundario) es un régimen que permite la transferencia de derechos de uso de bloques de espectro licenciados (o canales de radiofrecuencia) directamente entre las empresas, sin la intermediación de un organismo regulador central (Figura 48) [91]. A veces esa negociación podría ser objeto de una autorización final por parte del regulador, pero aun así la decisión principal de negociar la tiene quien posee la licencia.

Los problemas y cuestiones relacionados con la negociación del espectro son muchos, sobre todo procedentes de la necesidad de combinar el principio de libre comercio con un reino técnico de múltiples sistemas de radiocomunicaciones convivientes, sensible al cambio.

Un estudio seminal de prácticas de gestión del espectro radioeléctrico en el Reino Unido [92] aboga fuertemente por la introducción de la negociación y ofrece muchas recomendaciones de carácter general sobre los posibles medios y formas para realizarla.

FIGURA 48

Mecanismos para la transferencia de los derechos de uso del espectro



(a) En un régimen centralizado de gestión del espectro

(b) Con la negociación del espectro

En general, los gestores del espectro deben abarcar dos objetivos principales, aunque contradictorios, al diseñar un régimen para la negociación del espectro, que trae a escena a la ingeniería del espectro:

- Hacer las negociaciones más ágiles y sencillas, para permitir que los mecanismos del mercado trabajen.
- Garantizar la no interferencia de los sistemas de radio.

Para alcanzar estos objetivos es necesario resolver las tres preguntas siguientes:

- 1) ¿Se debe permitir inicialmente el cambio de uso al momento de la transferencia de la licencia?
- 2) ¿Cómo debe ser definida una unidad negociable?
- 3) ¿Qué garantías de no interferencia deben ser vinculadas a la licencia negociable?

Parte del material de las secciones siguientes puede ser útil para abordar estas cuestiones y encontrar recomendaciones específicas.

11.2 Asignaciones flexibles de tecnología en las bandas de servicio móvil terrestre

Cuando se habla de las asignaciones neutrales en cuanto a tecnología en las bandas del servicio móvil terrestre se deben distinguir dos categorías de servicios de telefonía móvil:

- Los sistemas de radio móvil privada (PMR, por sus siglas en inglés), como los utilizados por las empresas de servicios públicos, los servicios de envío de taxis y similares.
- Sistemas públicos móviles terrestres (celulares) (PLMS).

La naturaleza distinta de estos servicios y las tecnologías de red involucradas exigen un tratamiento diferente de flexibilidad en la regulación.

PMR

Cuando se habla de PMR, incluidos los tipos de celulares más avanzados —acceso público de radio móvil (PAMR), también conocido como “sistema troncalizado”—, la introducción de la flexibilidad es relativamente sencilla, ya que normalmente se requieren medidas como la elección libre de la tecnología, en el mismo ancho de banda del canal. Sin embargo, se debe tener cuidado cuando se emplea una mezcla de diferentes tecnologías, ya que se requieren diferentes anchos de banda y requisitos de protección, como en el caso de tecnologías análogas vs. tecnologías TDMA vs. CDMA.

En el pasado, la PMR análoga utilizaba únicamente la modulación FM con 12.5 o 25 kHz de espaciamiento entre canales con una fuerte protección de canal adyacente. La planificación de frecuencias y la coordinación transfronteriza se basaron en esta simple situación [87].

Sin embargo, últimamente, el desarrollo de la tecnología digital PMR/PAMR y otros sistemas de telecomunicaciones han hecho necesario el desarrollo de nuevas restricciones técnicas, que se aplican a estas nuevas tecnologías digitales, con el fin de proteger a las PMR/PAMR análogas y otras tecnologías digitales, y la introducción de bandas de guarda que nunca habían sido introducidas para PMR. Además, las bandas de guarda fueron definidas en ocasiones para proteger otros sistemas y servicios en bandas adyacentes. Las bandas de guarda no son necesariamente residuales del espectro, pero aun así reducen la eficiencia de su utilización y limitan los planificadores de frecuencias.

Este enfoque de las bandas de guarda no impide la neutralidad y flexibilidad tecnológica, pero requiere que la administración sepa de antemano sobre el desarrollo de una nueva tecnología, con el fin de determinar las condiciones de operación que impidan interferencias perjudiciales con sistemas antiguos que ya han sido beneficiados. En este caso, la flexibilidad requiere una planificación cuidadosa y consume mucho tiempo.

PLMS

Cuando se habla de bandas PLMS, la situación se vuelve mucho más complicada, ya que estos servicios se realizan con redes muy densas y extensas, y, más aún, la planificación de frecuencias a menudo se les deja a los propios operadores.

Colombia ha tenido un buen historial en cuanto a permitir la flexibilidad en las bandas de PLMS. Desde que se empezó con la expedición de licencias, en 1994, las primeras concesiones para el uso de bloques de la banda de 850 MHz, para la telefonía celular, no era requisito elegir una tecnología en particular. Esto también se convirtió en un buen ejemplo de cómo las fuerzas del mercado conducen las decisiones de los operadores, como ahora: después de una serie de pruebas iniciales, los operadores PLMS colombianos se pusieron de acuerdo sobre el uso predominante de la tecnología GSM en sus bloques de frecuencias asignados 850 MHz y 1900 MHz, lo que ayuda a la armonización natural y más eficiente del uso del espectro PLMS. Recientemente, los operadores móviles titulares también comenzaron a introducir la tecnología UMTS, junto con GSM, ya que estas tecnologías se integran fácilmente al nivel de la red troncal.

Sin embargo, la experiencia con la autorregulación del mercado no puede proporcionar una base suficiente para situaciones futuras, porque si se asigna el espectro PLMS ahora, la elección de las tecnologías disponibles de PLMS es mucho más amplia y tecnológicamente más antagonica:

- Una feroz competencia tecnológica entre FDMA/TDMA vs. CDMA vs. OFDMA.
- Incluso dentro de la misma tecnología existen múltiples opciones de despliegue: separación dúplex diferente, ancho de canal diferente.

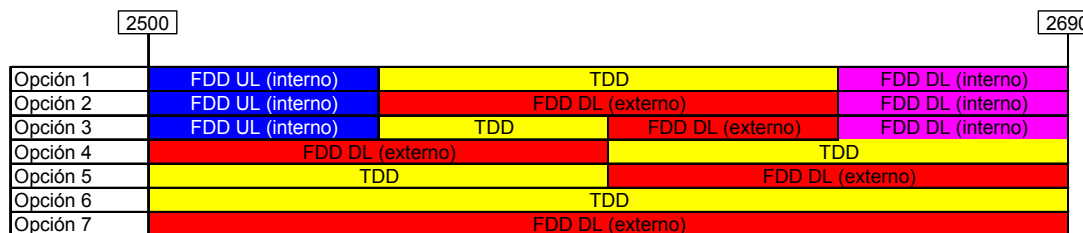
Consideremos un ejemplo, en la Figura 49, de las opciones consideradas para el uso de banda de 2500 MHz a través de las diferentes tecnologías de PLMS, basadas en las disposiciones de la Recomendación UIT-R M.1036 [113].

En consecuencia, algunos mecanismos más genéricos para evitar la interferencia se pueden requerir para evitar dicha interferencia entre redes a gran escala que puedan desplegar tecnologías muy diferentes. Las típicas medidas de ingeniería del espectro que se pueden utilizar en estos casos son:

- Puesta en marcha del plan armonizado de canales que incluya todas las tecnologías PLMS previstas.

FIGURA 49

Opciones de despliegue PLMS en 2500-2690 MHz

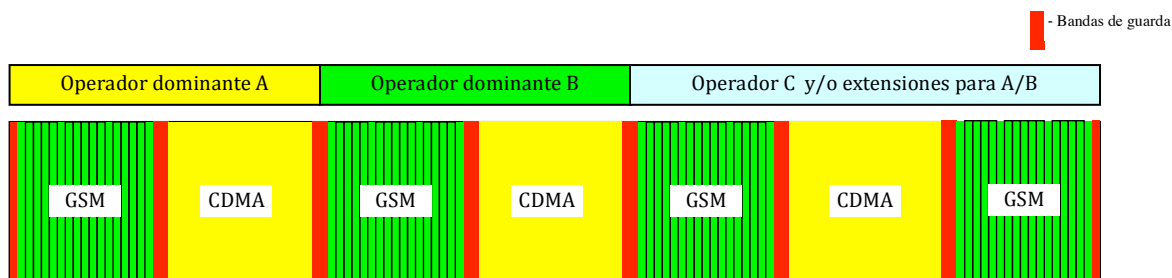


- Creación de máscaras en el borde del bloque.
- Creación de límites p.i.r.e dentro de la banda, que podrían ser aplicables a todo el bloque asignado, o solo a los canales cerca de los bordes del bloque.

También es importante tener en cuenta qué medios podrían ser útiles para la optimización general del uso de una frecuencia, cuando se emplean diferentes tecnologías de lado a lado. Por ejemplo, consideremos un ejemplo típico de cómo los operadores pueden desplegar múltiples tecnologías en la banda de 850/900 MHz, como se muestra en la Figura 50.

FIGURA 50

Ejemplo de partición fragmentada de banda GSM con diferentes tecnologías



La división fragmentada de banda entre los dos o tres operadores de telefonía móvil, como se ilustra en la Figura 50, por lo general se produce como resultado natural del desarrollo gradual histórico de las bandas de GSM: en primer lugar, la asignación de algunas porciones de bandas a los operadores con licencia inicialmente PLMS, y a continuación, la expedición de licencias adicionales y/o la asignación de las sub-bandas adicionales a los operadores originales. Cuando finalmente los operadores deseen desplegar tecnologías avanzadas (como 3G/CDMA) en los fragmentos disponibles de su banda, terminan seleccionando arbitrariamente algunos de sus bloques de despliegue de los canales de banda ancha 3G, los cuales, a su vez, requieren bandas de guarda más grandes para proteger sus canales adyacentes GSM de banda angosta. Como resultado de este despliegue no coordinado, un operador en particular a menudo tiene que adaptarse a varias bandas de guarda dentro de las tenencias de su espectro con los residuos combinados de hasta $2 \times 0.5 \dots 1$ MHz.

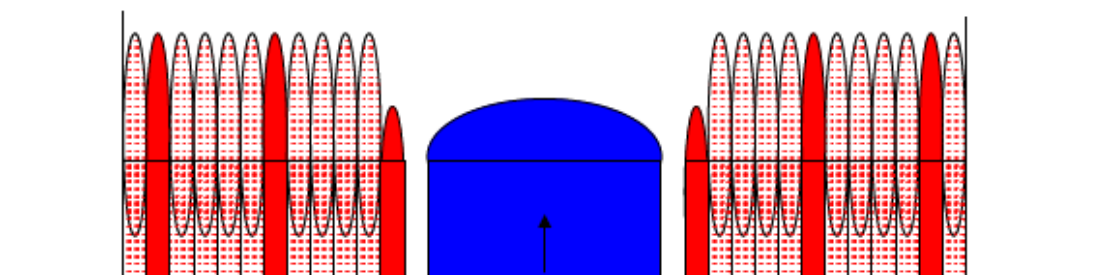
Por otra parte, si toda la banda de GSM se dividió entre los operadores en bloques contiguos, cada operador tendría que mantener no más de tres bandas de guarda: dos en los bordes del bloque asignado, además de una banda de guarda internamente para la separación de dos tecnologías diferentes, GSM y UMTS.

Sin embargo, la situación podría mejorar aún más. En primer lugar, los estudios internacionales anteriores [128] han demostrado que el bloque asignado a un operador podría ser

utilizado para las tecnologías GSM y UMTS de manera más eficiente si los operadores están obligados a utilizar el llamado “modelo sándwich”, es decir, con portadora UMTS “oculta” entre los dos conjuntos de canales GSM, ver Figura 51.

FIGURA 51

Despliegue de redes GSM y UMTS en el “modelo sándwich”

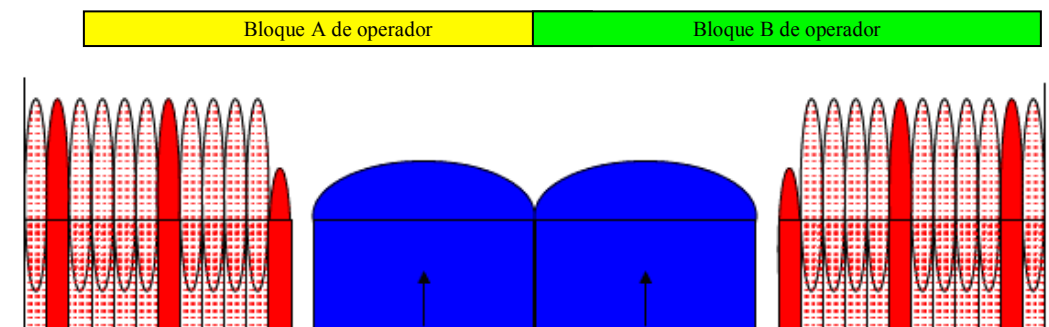


Un despliegue de este tipo reduce el número de bandas de guarda por operador a dos, ya que no se necesitan bandas de guarda en los bordes del bloque, pues hay co-existencia GSM a GSM en los bordes del bloque. Esas bandas de guarda internas podrían ser entonces utilizadas por el operador, por ejemplo, en los sitios que no utilizan portadora UMTS.

En segundo lugar, si los operadores vecinos de PLMS utilizan la misma combinación de tecnologías (como en el caso actual de Colombia, donde dos operadores titulares de PLMS usan la misma combinación de GSM y UMTS en la banda GSM-850), entonces el “modelo sándwich” puede ser llevado al siguiente nivel, en el cual las portadoras de ambos operadores son colocadas una junto a la otra, mientras sus respectivos canales ocupan las partes exteriores de los bloques combinados, ver Figura 52.

FIGURA 52

Dos bloques de los operadores desplegados en un “modelo sándwich” combinado



Nótese que en este caso solo quedará una banda de guarda interna manejable por operador. El análisis anterior muestra cómo la cuidadosa consideración de varias opciones de uso de frecuencias puede ayudar a reducir considerablemente la cantidad de espectro perdido: de cinco bandas de guarda a una por cada bloque del operador.

Una reciente regulación europea para el despliegue de la neutralidad tecnológica de redes 3G/4G fijas o móviles en la banda de 800 MHz podría proporcionar un ejemplo muy detallado y minucioso de la aplicación de dicho régimen [94].

11.3 Asignaciones flexibles de tecnología en las bandas de servicio fijo

La historia de la flexibilidad y la neutralidad de tecnología, en relación con las asignaciones de frecuencias en la banda de servicios de telefonía fija, comenzaron en un momento de despliegue de los sistemas de acceso fijo inalámbrico (FWA, por sus siglas en inglés) en diversas bandas de frecuencia. Dada la gran variedad de tecnologías compitiendo por el mercado de acceso fijo inalámbrico, y considerando ciertas dudas sobre la viabilidad del modelo de negocio del FWA, las administraciones optaron por la expedición de licencias que se basaron en los principios de neutralidad en la tecnología, otorgando una gran flexibilidad a los operadores para decidir sobre las escalas de implementación de su red, así como la definición de los servicios que ofrecerán a los clientes [87].

Sin embargo, los fabricantes y operadores siempre han expresado su preocupación por el asunto de la interferencia en los bordes del bloque y en la frontera de la cobertura. Apoyaron la necesidad de definir las limitaciones en cuanto a la p.i.r.e, el establecimiento de bandas de guarda y el establecimiento de distancias de coordinación, en el marco de una metodología de asignación basada en la reutilización de frecuencias y la neutralidad tecnológica. En Europa esto se tradujo en la adopción de una serie de documentos regulatorios que promueven la flexibilidad en el acceso fijo inalámbrico y los mercados relacionados con los servicios fijos, como por ejemplo [79, 81, 88, 89, 90].

En Colombia, la situación se perfilaba siguiendo el mismo patrón de Europa. La banda de frecuencias 3400-3600 MHz se designó para los sistemas de acceso fijo inalámbrico y varias licencias fueron emitidas:

- Año 2005: tres licencias nacionales.
- Año 2006: 55 licencias departamentales (licencias regionales).

Sin embargo, la motivación por el desarrollo de los sistemas FWA se vio seriamente obstaculizada por la evolución de las redes inalámbricas móviles, que no perdieron tiempo en introducir servicios móviles de datos, incluyendo banda ancha móvil 3G y conectividad

de datos. Mediante el despliegue de servicios 3G en la banda de 850 MHz junto con la cobertura de servicios 2G, los operadores de telefonía móvil han asegurado la cobertura más amplia posible de datos, incluyendo muchas zonas rurales remotas.

Como resultado de este licenciamiento FWA, la banda 3400-3600 MHz FWA se divide en varios bloques en la actualidad, como se muestra en la Tabla 27, cada uno de los cuales se destinan para diferentes tipos de licencia.

TABLA 27

Partición de banda de 3400-3600 MHz en Colombia

Bandas	Área de servicio	Ancho de banda
AA'	Nacional	2 x 21 MHz = 42 MHz
BB'	Nacional	2 x 21 MHz = 42 MHz
CC'	Nacional	2 x 21 MHz = 42 MHz
DD'	Departamental	2 x 14 MHz = 28 MHz
EE'	Departamental	2 x 14 MHz = 28 MHz
FF'	Banda reservada	2 x 8 MHz = 16 MHz

Se puede observar en esta tabla que los bloques asignados son de tamaño considerable, lo que, especialmente en el caso de las licencias a nivel nacional, podría permitir la implementación eficiente de las tecnologías de banda ancha, fijas y móviles, mediante la utilización de tecnologías modernas tales como WiMAX o LTE. Por lo tanto, es lógico sugerir que, dado el poco interés por el acceso fijo, las asignaciones FWA se deben convertir en asignaciones basadas en neutralidad tecnológica, que podrían ser luego utilizadas por los operadores para el desarrollo de uno o ambos servicios de tipo FWA y PLMS.

Algunos de los principios fundamentales que podrían ser considerados en las bandas del servicio fijo pueden resumirse de la siguiente manera [91].

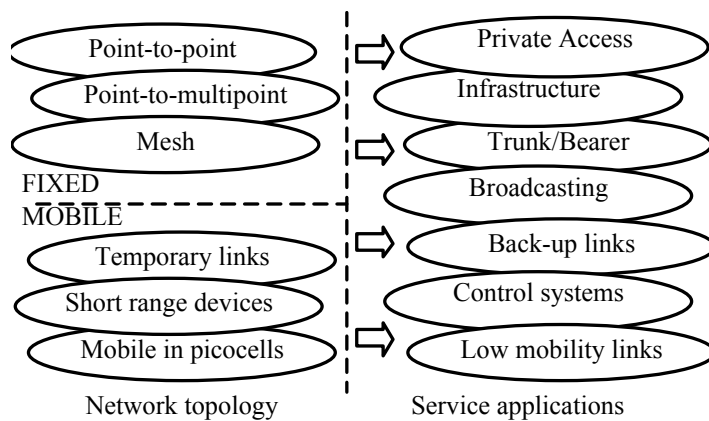
Permitir el cambio en el uso del espectro

Como punto de partida, el cambio de uso en las frecuencias asignadas (bloques de frecuencia) podría ser autorizado dentro de los límites establecidos por la definición regulatoria de los servicios fijos, de los cuales FWA es una de las aplicaciones.

De hecho, el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT describe el servicio fijo como un servicio de radiocomunicación entre puntos fijos determinados. Si los requerimientos de la licencia fueran flexibilizados solo para seguir la definición general de servicio fijo, inmediatamente permitiría el uso del espectro para muchas más configuraciones de red y aplicaciones de servicio (Figura 53).

FIGURA 53

Posibles topologías de red frente a las aplicaciones dentro de bandas del servicio fijo



Más aún, parece que para las bandas milimétricas FWA de 26/28/40 GHz debería ser razonable permitir el cambio de uso dentro de los límites no solo de los servicios fijos sino también móviles. Esto podría suceder en aquellas partes de las bandas donde se permiten un servicio fijo y móvil de manera compartida dentro de la banda en cuestión, de conformidad con las disposiciones pertinentes en el Artículo 5, tabla de atribuciones de RR de la UIT y el correspondiente Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias.

Debe ser posible utilizar los enlaces bajo la designación de servicios móviles debido a una atenuación de atmósfera significativa en estas frecuencias, lo que de todos modos hará necesario usar antenas de muy alta directividad (por lo tanto, asemejándose al servicio fijo, pero, por ejemplo, desde lugares sin especificar) o tener un alcance de comunicación muy limitado para dispositivos móviles con antenas no direccionales.

Por lo tanto, parece que permitir el uso tanto fijo como móvil dentro de las asignaciones de frecuencias en las bandas milimétricas, sujeto únicamente a los límites generales impuestos por las normas internacionales como el RR de la UIT, daría lugar a un conjunto aún limitado de redes y servicios prestados (ver Figura 53), controlando la interferencia potencial. Sin embargo, se daría la suficiente libertad a los propietarios y usuarios del espectro para explotar sus recursos hasta un punto técnicamente factible.

Límites de las emisiones en la máscara de borde de bloque y dentro de la banda

Al igual que en el caso de los sistemas móviles PLMS, el concepto de máscara del borde de bloque puede ser adecuado para la concesión de licencias en las bandas de servicio fijo, en especial las bandas de 3.4 GHz, originalmente previstas para el tipo de redes de acce-

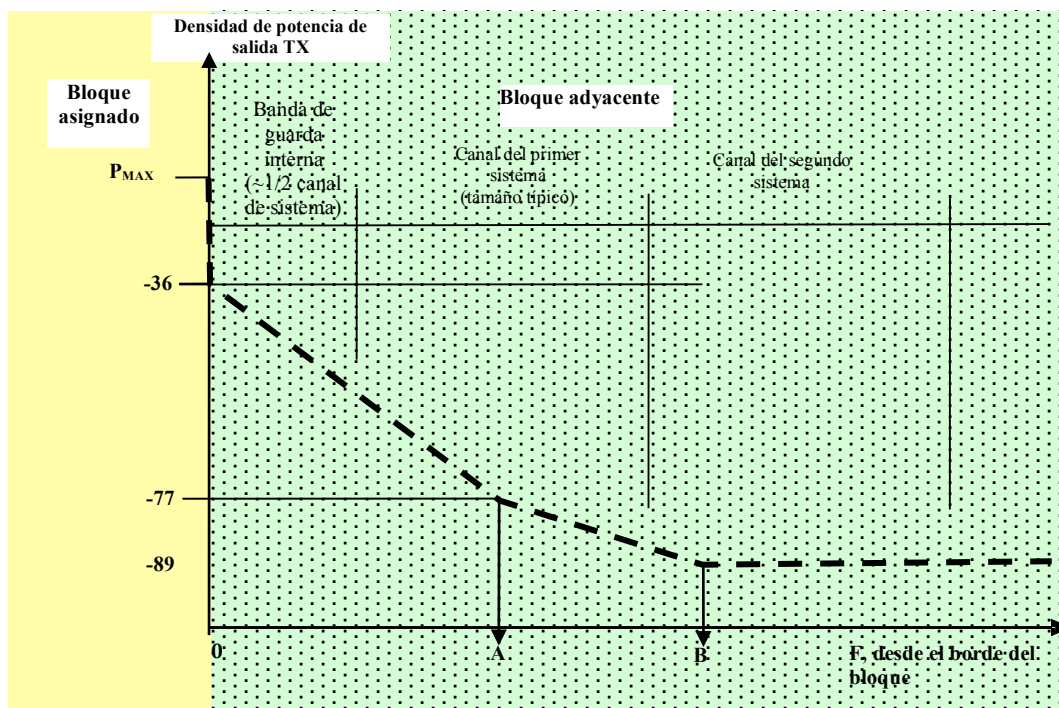
so fijo inalámbrico, pero que ahora se están considerando para el despliegue de tecnologías convergentes fijas-móviles, tales como IEEE 802.16 (WiMAX).

Un ejemplo de la neutralidad tecnológica de la regulación europea para la banda de 3.4 GHz FWA se puede encontrar en [79]. Un ejemplo particular de la máscara de borde de bloque para los transmisores de la estación base se reproducen a continuación en la Figura 54.

La máscara de borde del bloque presentada arriba da la suficiente libertad y flexibilidad a los operadores para tratar de acomodar el sistema de su elección, ya que el operador puede negociar entre el tamaño de los canales empleados y las respectivas emisiones fuera de banda, que determinarán qué tan cerca del borde de bloque asignado podrían ser colocados.

FIGURA 54

Máscara de borde de bloque de las estaciones base para sistemas en bandas 3.5 GHz



Puntos de quiebre de desplazamiento de frecuencia para la máscara CS	Definición (% del tamaño del bloque asignado, nota)
A	20%
B	35%

Nota: X% de los bloques adyacentes más pequeños, si los bloques son de diferente tamaño.

Consideraciones para FDD/TDD

Esta es una consideración importante en los sistemas tradicionales de FDD que ha sido cuestionada últimamente por los nuevos diseños de TDD, que ofrecen un mejor manejo dinámico de tráfico asimétrico arriba/abajo en los sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha. El enfoque para la posible regulación de este problema, utilizado en [79], es el de primero otorgar licencia para el par de bloques FDD, pero permitir a los operadores utilizar ya sea la tecnología FDD o la tecnología TDD (el potencial de interferencia diferente debe estar dentro de lo dispuesto en la máscara del borde del bloque de neutralidad tecnológica). Debido a que es posible el despliegue de TDD en dos pares de bloques de FDD, la asignación de bloques de FDD está abierta a una futura transición a TDD, mientras que si solo los bloques TDD fueran asignados desde el principio, esta apertura impediría la utilización de tecnologías FDD.

Por otra parte, se propone en [79] que si todos los operadores con licencia en una determinada banda eventualmente deciden la aplicación de tecnologías TDD, la administración les permitiría cambiar los respectivos pares de bloques de FDD entre sí, para formar los bloques monolíticos TDD de tamaño igual a la suma de dos pares de bloques originales FDD.

11.4 Bandas no licenciadas para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha

Además de las novedades que antes se consideraban con FWA en la banda de 3500 MHz, Colombia ha designado varias bandas no licenciadas para los sistemas de acceso inalámbrico (WAS, por sus siglas en inglés), de banda ancha, también conocidos como redes de área local inalámbrica (WLAN, por sus siglas en inglés).

La lista de bandas, designadas en Colombia para WAS/WLAN, mediante la Resolución Ministerial 2544 (2009), es la siguiente:

- 902 a 928 MHz
- 2400 a 2 483.5 MHz
- 5150 - 5250 MHz
- 5250 a 5 350 MHz
- 5470 - 5725 MHz
- 5725 - 5850 MHz

Estas bandas fueron designadas para el uso libre en el sentido de que los sistemas WAS/WLAN podrían ser desplegados libremente sin pedir una licencia por parte del regulador, con base en el principio de no interferencia y protección. Sin embargo, para ser ele-

gibles para el acceso no licenciado, los sistemas WAS/WLAN deben cumplir con una serie de “normas de etiqueta”, que se detallan en la Resolución 2455 de 2009. Ellos hacen uso de los medios típicos para garantizar condiciones de neutralidad tecnológica para el acceso al espectro en las bandas no licenciadas:

- Limitaciones en la potencia del transmisor y el total de la potencia radiada (p.i.r.e).
- Obligación de utilizar las técnicas de reducción de la interferencia, tales como:
 - Salto de frecuencia.
 - Espectro ensanchado.
 - Transmisor automático de control de potencia.
 - Selección dinámica de frecuencia.
- Requisitos para la antena de transmisión (provisiones de ganancia relativa, requerimientos para usar antenas integradas en algunas bandas).
- Límites a las emisiones no deseadas.

Utilizando las anteriores disposiciones en combinaciones mínimas (de banda específica), las combinaciones permiten establecer el grado mínimo de regulación que garantiza la igualdad de reglas de juego, en lugar de restringir el desarrollo y despliegue de nuevas tecnologías. Estos enfoques son cada vez más favorecidos en todo el mundo y algunas políticas van incluso tan lejos como para sugerir que la designación de una nueva banda debe primero considerar si tal designación es posible sobre una base no licenciada, y revertirla al uso tradicional con licencia solo si un análisis posterior muestra alguna evidencia importante de posibles interferencias insuperables en los escenarios considerados u otra justificación clara para las operaciones con licencia.



CAPÍTULO 12

ASPECTOS TÉCNICOS DE LA “REORGANIZACIÓN” DE LAS BANDAS DE FRECUENCIA

Este capítulo describe las diversas consideraciones técnicas involucradas con la “reorganización”⁴ de las bandas de las radiofrecuencias. La reorganización (también conocida como redistribución) de la banda de frecuencias es el proceso en el que los sistemas de radiocomunicaciones que utilizaron durante mucho tiempo la banda en cuestión están siendo eliminados de la banda, para que esté disponible para el despliegue de algunos de los nuevos servicios de radiocomunicación, que se presumen más valiosos socialmente y más eficientes espectralmente.

La primera sección describe el principio general de la reorganización y la segunda sección aborda uno de los ejemplos más recientes de reorganización. Como las partes de la banda previamente utilizadas para la radiodifusión podrían utilizarse para otros servicios, gracias al cambio en la radiodifusión hacia tecnologías digitales más eficientes espectralmente, se introduce el término “dividendo digital”.

12.1 Principios generales

Los principios generales de la reorganización de banda de frecuencias (redistribución) se describen en la Recomendación UIT-R SM.1603 [95], que ofrece la siguiente definición formal de este proceso:

⁴ En inglés pueden utilizarse dos términos diferentes “*spectrum redeployment*” y “*spectrum refarming*” de conformidad con la Recomendación UIT R SM. 1603, versión en español.

“Redistribución del espectro (reorganización del espectro) es una combinación de medidas de carácter administrativo, financiero y técnico destinadas a la eliminación de los usuarios o equipos de las asignaciones de frecuencias existentes, ya sea total o parcialmente a partir de una determinada banda de frecuencia. La banda de frecuencia puede entonces ser atribuida a un servicio igual o diferente (s). Estas medidas pueden ser implementadas a escalas de corto, mediano o largo plazo”.

La obligación de mover a los usuarios actuales del espectro puede surgir por una serie de razones, por ejemplo:

- a) Una atribución de espectro puede haber estado en funcionamiento durante un periodo considerable de tiempo y, en la actualidad, ya no se ajusta a las exigencias de los usuarios o a las capacidades de los sistemas modernos.
- b) Una atribución dentro de un rango específico de frecuencias se requiere para un servicio de radio nuevo y estas frecuencias están ocupadas por servicios con los cuales el nuevo servicio no puede compartir.
- c) Una decisión de la WRC (por sus siglas en inglés) para atribuir una banda de frecuencia actualmente ocupada por un servicio diferente a escala regional o global.

Entonces, el proceso de dividendo digital es un buen ejemplo de la razón (a) anteriormente expuesta. En el caso (b) puede que no siempre sea necesaria la reorganización total, sino que se podría encontrar una solución técnica de ingeniería del espectro con el fin de acomodar el nuevo servicio sobre una base de compartición, por ejemplo, mejorando la eficiencia espectral del servicio existente, que puede incluir la siguientes opciones:

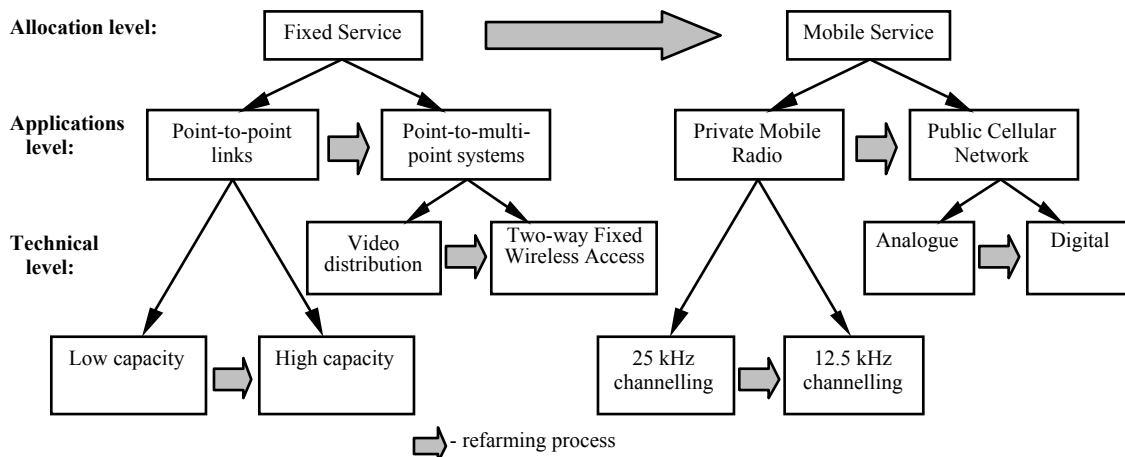
- Aumentar el nivel de repartición del espectro (es decir, el número de usuarios/estaciones en cada canal).
- La reducción del ancho de banda de canal para aumentar el número de canales.
- El cambio de técnicas de modulación más eficientes que permitan una mayor compartición.
- Reducir la distancia de re-uso de frecuencia.

Cualquiera de las opciones anteriores puede proporcionar el requisito para iniciar un amplio proceso de reorganización, con el fin de cambiar el equipo de usuarios actuales y/o sus asignaciones de frecuencias, a pesar de que cualquier cambio en la frecuencia puede ser limitado a la misma banda de frecuencia.

Cabe también señalar que la reorganización podría llevarse a cabo en los diferentes niveles en términos de estatus regulatorio de la banda en cuestión, por ejemplo, exigir un cambio en la atribución existente para un proceso más simple de sustitución de una aplicación de un servicio en particular, por otra (ver la Figura 55 [96]).

FIGURA 55

Diferentes niveles y grados de la reorganización de bandas de frecuencias



La mayoría de los procesos de reorganización, como se sugiere en la Figura 55, se llevan a cabo como una migración natural, por lo general de las viejas tecnologías obsoletas a las nuevas más avanzadas. En estos casos la reorganización corresponde al interés de los usuarios titulares de las bandas de frecuencia o de los usuarios que dejan la banda con la eliminación de sus antiguos sistemas (por ejemplo, tras el cese de la vigencia de las licencias en ausencia de una mayor demanda). En ambos casos la reorganización, por lo general, no causa problemas notables a las autoridades de gestión del espectro y, por lo tanto, el uso de incentivos u otras medidas de reorganización no es necesario en la mayoría de los casos.

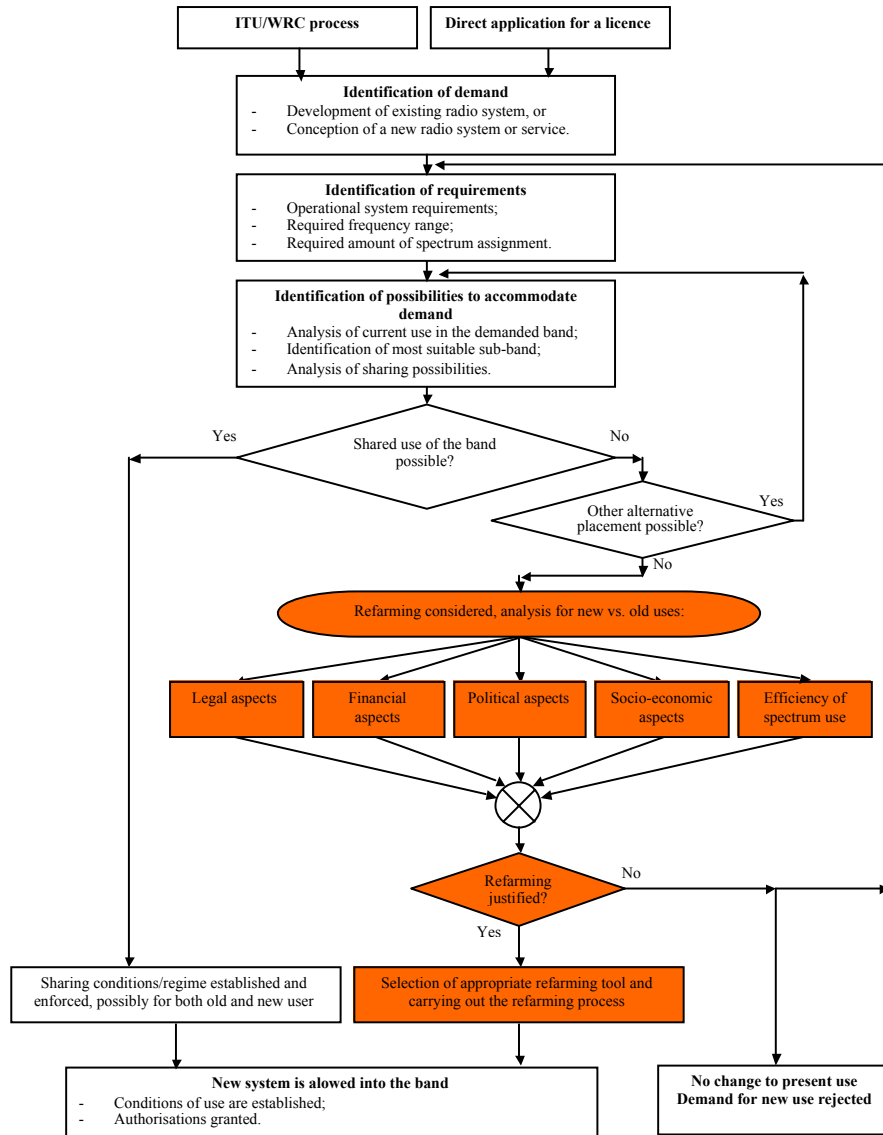
Cuando la reorganización implica cierto desplazamiento forzado de las asignaciones de frecuencias existentes, que no están en el interés del usuario en ejercicio, es que se torna problemática y requiere la aplicación de una serie de medidas específicas de reorganización, como los fondos de reorganización, incentivos en los precios, etc.

Hay que recordar que las actividades de gestión del espectro pueden ser simplistas, vistas como un conjunto de muchos proyectos paralelos, cada uno dirigido a la manera de encajar algún caso específico de demanda del espectro por parte de sistemas de radio en evolución, dentro de los planes actuales y previstos para el uso del espectro. Estos proyectos se desarrollan normalmente a través de una serie de medidas posteriores, que forman lo que podríamos llamar un ciclo de gestión del espectro. Un lugar de procesos de reorganización en un ciclo típico de gestión del espectro se ilustra en la Figura 56 (adaptado de [96]).

El ejemplo de la Figura 56 pone de manifiesto que a menudo la reorganización es un “último recurso” de la gestión del espectro, ya que es probable que establecerlo cause más problemas y, por lo general, es muy largo de implementar. Por lo tanto, la opción de compartir el espectro, que es la co-ubicación de antiguos y nuevos usos de sistemas de radio-comunicaciones en la misma banda de frecuencia, se percibe como una preferencia natural y siem-

FIGURA 56

Reorganización como parte de un ciclo total de gestión del espectro



pre será ampliamente considerada en primer lugar. Si no es viable en una primera instancia, puede ser re-examinada con la modificación de los requisitos operacionales y los parámetros del sistema.

Si la compartición de frecuencias no es posible, una solución puede encontrarse mediante la aplicación de algún tipo de separación de frecuencias, por ejemplo, utilizando los canales entrelazados para nuevos titulares y nuevos servicios PMR.

Sin embargo, la compartición no siempre es factible y la reorganización podría llegar a ser una opción. En tales casos, la administración del espectro tendrá que evaluar si la reorganización es absolutamente necesaria, por ejemplo, si la demanda de espectro identificada no puede ser alojada en otro lugar y si la introducción del uso de nuevas propuestas o sistemas de radio proporcionan beneficios suficientes para justificar la reorganización.

La perspectiva de tener la reorganización como un instrumento siempre presente en una “caja de herramientas” de gestión del espectro, también sugiere que otras decisiones de la gestión del espectro deban ser ponderadas en función de si la reorganización podría ser prevista para la banda en cuestión o no. Por ejemplo, si la reorganización de una banda en particular se esperara pronto, no sería prudente permitir el uso de la banda sin licencia mientras tanto. En tal caso, el uso exento de licencia significa que no habría registros en los transmisores de funcionamiento (su ubicación y número principal), lo que significaría más dificultades para la aplicación de la reorganización en una etapa posterior.

En resumen, los siguientes aspectos deben ser cuidadosamente considerados antes y durante el proceso de reorganización:

- Las escalas de tiempo adecuadas.
- Posibilidad de reubicación voluntaria por parte de los usuarios existentes.
- Varias opciones de reubicación forzada:
 - A la expiración del término de licencias actuales.
 - Al final de la vida útil de los equipos.
- Consideraciones especiales en el caso de reorganización de las bandas originales no licenciadas.
- Los costos de implementación, tanto para la administración como para los usuarios existentes.
- Establecimiento de mecanismos adecuados de compensación:
 - Proceso pagado por el nuevo usuario (s).
 - Creación de un fondo de reorganización.

Las diversas consideraciones que se realizan a la hora de decidir sobre estas cuestiones, incluido el ejemplo de implementación en particular, se describen en mayor detalle en [95], con material adicional que se puede encontrar en [96].

12.2 Dividendo digital

El término “dividendo digital” fue acuñado por los políticos, que convirtieron en un problema político importante las perspectivas de cambio de servicios de radiodifusión de la

antigua tecnología análoga a las tecnologías modernas de transmisión digital. La expectativa era que, debido a la eficiencia espectral de la tecnología digital, las cantidades de desechos de espectro serían liberados en las bandas “premium” de UHF, pudiendo ser utilizados por la popular tecnología de telefonía móvil celular y de redes de banda ancha de acceso inalámbrico. Los cálculos básicos de los políticos eran así: como el mismo canal de radio de televisión análoga podía acomodar un múltiplex digital, que podía llevar el equivalente a cuatro programas de televisión análoga, esto significaría que hasta tres cuartas partes de las bandas de TV podrían ser evacuadas y convertirse en vacantes como dividendo digital y serían rentables (por ejemplo, con la perspectiva posible de subasta del espectro liberado) y reutilizadas para otros servicios.

Consideraciones más detalladas sobre este tema revelaron que la cantidad del dividendo digital no sería tan dramática, solo por la simple circunstancia de la planificación técnica de la banda para servicios de radiodifusión digital. Además, los organismos de radiodifusión tendrían más canales de televisión de lo que era técnicamente posible originalmente, dentro de las restricciones de los planes de banda análogos, especialmente debido a la feroz competencia de las compañías de televisión por cable con paquetes de múltiples canales. Sin embargo, parte del espectro iba a ser liberado y las posibilidades de utilizarlo de manera ordenada fueron consideradas más a fondo, lo que resultó en la publicación de una serie de estudios [97-100].

Hasta hace poco, Colombia tenía una configuración especial de las bandas de televisión, porque, de acuerdo con la UIT notas RR 5.292 y 5.293, la parte de la banda de radiodifusión de televisión 470-512 MHz, se atribuye a los servicios fijos y móviles, principalmente. El resto de las bandas UHF de TV, hasta 806 MHz, se utilizan para proporcionar servicios de televisión bajo la dirección de la Autoridad Nacional de Televisión (anteriormente conocida como Comisión Nacional de Televisión, CNTV).

Sin embargo, desde el comienzo del dividendo digital, la atención de todos se centró en la liberación de la televisión en la parte superior de la banda de televisión V en UHF, que en la Región 2 de la UIT resultó primero en la identificación de la banda 746-806 MHz (canales de TV 60-69), para ser utilizada en las operaciones de protección pública y atención de desastres (PPDR, por sus siglas en inglés), de acuerdo con la Resolución 646 (WRC-03). Más tarde, toda la banda de 698-806 MHz (canales de TV 52-69) fue designada para servicios IMT, de acuerdo con la Resolución 224 (WRC-07). Estos acontecimientos ponen a Colombia en una situación de "reversa" muy especial, mientras que dar las bandas del dividendo digital para otros usos sería una desventaja para operaciones de TV, ya que las apretaría entre 512 y 698 MHz.

El MinTIC no está dispuesto a detener el progreso con una armonización a nivel regional y global de las bandas del dividendo digital, pero al mismo tiempo no desea poner en doble tensión las operaciones de transmisiones de televisión en el país, por lo cual ha tomado la decisión, consagrada en la Resolución 2623 (2009), para:

- Designar la banda de 698-806 MHz a los servicios terrestres de telecomunicaciones fijos y móviles (PPDR e IMT).
- Y, al mismo tiempo, retirar la asignación alternativa anterior de la banda 470-512 MHz y devolver esta banda a la radiodifusión de televisión.

Además de la decisión de reatribución de las bandas de frecuencia, la Resolución 2623 también proporcionó el plan y los plazos para las acciones de reorganización tales como:

- La banda de 698-806 MHz se liberaría de los servicios de radiodifusión de televisión hasta el 31 de junio de 2010 (31 de diciembre 2012 en algunas localidades).
- La banda de 470-482 MHz se liberaría en un plazo no superior a siete meses mediante la reubicación de los usuarios en la banda de 300-328.6 MHz y de 335.4-343 MHz.
- La banda 488-500 MHz se liberaría en un plazo no superior a diez meses.
- La banda de 482-488 MHz se liberaría en un plazo no superior a doce meses.
- La banda de 500-512 MHz se liberaría en un plazo no superior a dieciséis meses.

Por lo tanto, se puede concluir que el proceso de dividendo digital ya ha dado lugar a algunas medidas de regulación proactiva en Colombia, incluyendo la implementación de los procesos de reorganización, como se discutió en la sección 12.1.

Habiendo formulado dicha reorganización de las bandas, la siguiente pregunta que el organismo gestor enfrentará es qué condiciones técnicas se deben aplicar en el dividendo digital de la banda liberada. En el resto de esta sección se verá un ejemplo práctico de cómo esta cuestión podría abordarse, sobre la base de la experiencia y los principios adoptados en [94].

Para mantener la neutralidad tecnológica necesaria y la flexibilidad respecto a la introducción de carácter no obligatorio de redes de comunicaciones móviles/fijas en estas bandas, las máscaras de borde de bloque pueden ser desarrolladas sin asumir la ejecución total o parcial de los acuerdos de armonización (canalización) de la frecuencia.

Los siguientes principios pueden ser aplicados para definir las modalidades de frecuencia:

- 1) Definición de un régimen común de frecuencia (banda/canalización de los planes), siempre que sea posible, para facilitar la itinerancia, la coordinación de las fronteras y para lograr economías de escala para el equipo, manteniendo la flexibilidad para adaptarse a las circunstancias nacionales y la demanda del mercado.

- 2) Todos los métodos dúplex TDD, FDD full dúplex (FDD-FD) y FDD media dúplex (FDD-HD) deben ser considerados inicialmente con el objetivo de definir una solución para integrar el espectro para los operadores que desean utilizar diferentes tecnologías, prestando la debida atención a las cuestiones de convivencia y eficiencia del espectro.
- 3) El plazo para la disponibilidad de la banda para redes de comunicaciones móviles/fijas y la evolución de la tecnología del futuro deben ser tenidos en cuenta para definir la ubicación y el tamaño de la brecha dúplex.
- 4) Debe hacerse una cuidadosa evaluación a los tamaños de bloque para los planes de la banda.
- 5) Reconociendo las ventajas de una disposición única de frecuencias armonizada, la disposición de frecuencias preferida debe basarse en FDD. Los arreglos FDD podrían ser entonces puestos en servicio de TDD por los propios operadores, también los acuerdos de frecuencia TDD y otros métodos se pueden utilizar en el ámbito nacional.
- 6) La compensación entre el aumento de la separación de frecuencias en 790 MHz y la reducción de la brecha dúplex ha sido cuidadosamente estudiada. En la ponderación de esta compensación se ha decidido que la separación de frecuencia debe ser de 1 MHz y el espaciamiento dúplex de 11 MHz.
- 7) La aplicación de la disposición de frecuencias por parte de las administraciones nacionales tendrá que coordinarse con cualquier otra administración cuyos servicios de radiodifusión y/u otros servicios terrestres primarios se consideren afectados. Para la radiodifusión, el procedimiento de coordinación puede ser modelado bajo los principios del acuerdo de GE-06.

A modo de ejemplo, la siguiente organización de frecuencia armonizada se estableció en Europa para la banda 790-862 MHz (ver Figura 57), que se basa en secciones de 2 x 30 MHz con una separación dúplex de 11 MHz, basada en un bloque (canal) de 5 MHz, a la par y con dirección dúplex inversa, y una banda de guarda de 1 MHz a partir de 790 MHz. El enlace descendente FDD comienza en 791 MHz y el enlace ascendente FDD comienza en 832 MHz.

Además de lo anterior, los requisitos de tipo multi-componente de la máscara de borde de bloque (BEM, por sus siglas en inglés) se han consagrado en uno de los anexos de [94]. Cada componente arrojando emisiones para tipos particulares de estaciones/transceptores. Solo un ejemplo de los requisitos BEM se muestra en la Figura 58.

Nótese que el requisito básico A en la Figura 58 se aplica sistemáticamente a la protección de los canales digitales de radiodifusión terrestre en uso al momento del despliegue de las redes alternativas.

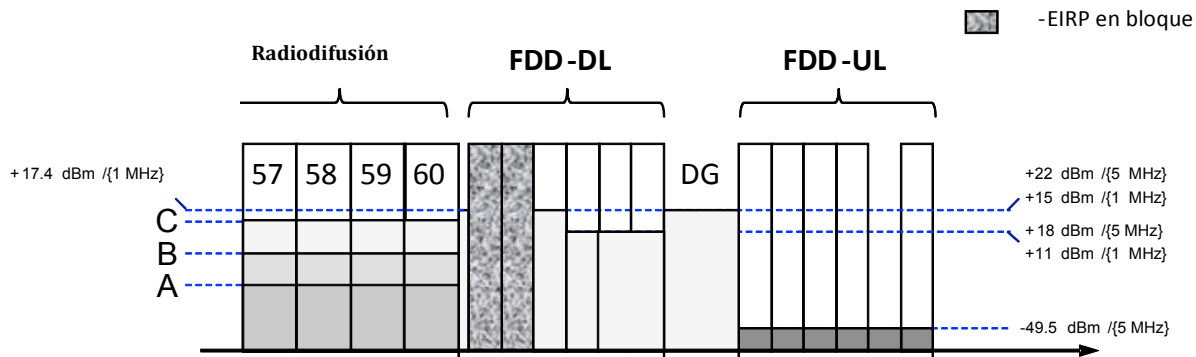
FIGURA 57

Disposición de frecuencias europea para la banda de dividendo digital 790-862 MHz

790-791	791-796	796-801	801-806	806-811	811-816	816-821	821-832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
Banda de guarda	Enlace descendente						Brecha dúplex	Enlace ascendente					
1 MHz	30 MHz (6 blocks of 5 MHz)						11 MHz	30 MHz (6 blocks of 5 MHz)					

FIGURA 58

Ejemplo de BS BEM para un operador FDD en la banda de dividendo digital



Para otros casos de máscaras de borde de bloque establecidas para la banda 790-862 MHz para el dividendo digital en Europa, favor referirse a los anexos de [94].

El ejemplo anterior muestra cómo el dividendo digital puede llevarse a la práctica mediante la creación de un marco técnico adecuado para el despliegue de redes alternativas en las bandas de frecuencia de reordenadas, utilizadas antes para la radiodifusión análoga.

TÉRMINOS Y DEFINICIONES EN INGLÉS

Term	Definition
ASMS	Automated Spectrum Management System
ATPC	Automatic Transmit Power Control System
BEM	Block Edge Mask
BER	Bit Error Ratio, measure of quality of digital signal transmission in a communications channel
BR	Radiocommunications Bureau of ITU
BSS	Broadcasting Satellite System
C/I	Carrier-to-Interference Ratio, similar to Signal-to-Noise ratio, comparing wanted and unwanted signals
CDMA	Code Division Multiple Access
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DFS	Dynamic Frequency Selection
EESS	Earth Exploration Satellite Service
EIRP/eirp	Effective Isotropically Radiated Power, i.e. transmitter output power plus gain of antenna
EMC	Electro-Magnetic Compatibility
EMF	Electro-Magnetic Field
EMI	Electro-Magnetic Interference
FD	Frequency-Distance (quantitative measure of separation between radio stations)
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDR	Frequency Dependant Rejection (the filtering function of radio receiver)
FEC	Forward Error Correction
FM	Frequency Modulated, type of modulation; “FM Radio” is a type of sound radiodifusión en 88-108 MHz
FS	Fixed Service
FSS	Fixed Satellite Service

Título II — Ingeniería del espectro radioeléctrico

FWA	Fixed Wireless Access
GIS	Geographic Information System
GSO	Geo-Stationary Orbit for Earth satellites
HF	High Frequency range, i.e. the frequency band 3–30 MHz
IF	Intermediate Frequency
IFIC	International Frequency Information Circular, a periodic publication by ITU BR
IM	Inter-Modulation Interference
IMT	International System for Mobile Communications (also IMT-2000), an ITU designator for future PLMS
ISM	Industrial Scientific Medical equipment, used in shared specially designated “ISM bands”
ITU	International Telecommunications Union
ITU-R	Radiocommunications sector of ITU
ITU-T	Telecommunications sector of ITU
LMS	Land Mobile Service
LOS	Line-of-Sight, i.e. the condition of direct unobstructed visibility between transmitting and receiving points
MCL	Minimum Coupling Loss, a method for interference evaluation
MSS	Mobile Satellite Service
MUF	Maximum Useable Frequencies, as relevant to propagation of radio waves in HF band
MW/MF	Medium Wave/Medium Frequency Broadcasting (sound)
N/I	Noise-to-Interference ratio
NFAT	National Frequency Allocation Table
NFD	Net Filter Discrimination
OCR	Off-Channel Rejection, the measure of reducing interfering signal in adjacent channels
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAMR	Public Access Mobile Radio, such as “trunking” systems
PFD	Power Flux Density
PLMS	Public Land Mobile System, i.e. cellular public telephony system
PMP	Point-to-Multipoint system (Fixed Service), linking single hub with multiple remote terminals
PMR	Private Mobile Radio
PMR	Private Mobile Radio
PP	Point-to-Point link (Fixed Service), also known as Radio Relay Link

PPDR	Public Protection and Disaster Relief emergency services
PSD	Power Spectral Density
RF	Radio Frequency (part), e.g. the modulation and transmission part of radio transmitter design
RFI	Radio Frequency Interference
RLAN	Radio Local Area Network, e.g. the implementation of IEEE 802.11 standard
RNSS	Radio Navigation Satellite Service
RR	ITU Radio Regulations, inter-governmental treaty governing the use of radiocommunications
S/(N+I)	Signal-to-Noise-and-Interference ratio
S/N	Signal-to-Noise ratio
SDMA	Space Division Multiple Access
SRD	Short Range Devices, i.e. device for radiocommunications over short distances (typically few meters)
SUE	Spectrum Use Efficiency (quantitative factor)
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TIN	Triangular Irregular Network, method for storing terrain height data
UHF	Ultra High Frequency range, i.e. the frequency band 300 MHz – 3 GHz
UTM	Universal Transverse Mercator, the reference system for projecting of contours to map coordinate system
VHF	Very High Frequency range, i.e. the frequency band 30 – 300 MHz
WAS	Wireless Access System
WLAN	Wireless Local Area Network, also known as RLAN – Radio Local Area Network
WRC	World Radiocommunications Conference
XPD	Cross-Polarization Discrimination

BIBLIOGRAFÍA PARA LECTURA ADICIONAL

1. Spectrum Management and Engineering. Ed. by Fredrick Matos. IEEE Press, 1985.
2. AMIT K. MAITRA. Wireless Spectrum Management: Policies, Practices and Conditioning Factors. McGraw-Hill Telecom Engineering series, 2004.
3. JEAN-MARC CHADUC, GÉRARD POGOREL. The Radio Spectrum: Managing a Strategic Resource. John Wiley, 2007.
4. DAVID J. WITHERS. Radio Spectrum Management: Management of the Spectrum and Regulation of Radio Services. IEE Telecommunications series, 1999.
5. M. CAVE, C. DOYLE, W. WEBB. Essentials of Modern Spectrum Management, 2007.

LISTA DE FUENTES DE REFERENCIA UIT-R UTILIZADAS EN ESTE TÍTULO

Nótese que las recomendaciones del UIT-R y los informes se actualizan periódicamente, por lo tanto, la última versión del documento debe ser consultada en www.itu.int

Titulo	Tema
Series de radiodifusión (sonora y de televisión)	
BS.139	Antenas de transmisión de radiodifusión sonora en la Zona Tropical
BS.412	Estándares de planificación de radiodifusión sonora terrestre FM en VHF
BS.560	Relaciones de protección de radiofrecuencia en radiodifusión LF, MF y HF
BS.1386	Características de las antenas de transmisión LF y MF y diagramas
BS.1698	Evaluación de los campos de sistemas terrestres de transmisión de radiodifusión que operan en bandas de frecuencia para evaluar la exposición a las radiaciones no ionizantes
BT.655	Relaciones de protección de radiofrecuencia para los sistemas AM de televisión terrestre de banda lateral vestigial interferida por señales de visión análogas no deseadas y sus señales de sonido asociadas
BT.1123	Métodos de planificación para la televisión terrestre de 625 líneas terrestres en bandas VHF/UHF
Series de servicios fijos	
F.746	Disposiciones de radiofrecuencia para sistemas de servicio fijo
F.1094	Error máximo permitido en el rendimiento y disponibilidad de sistemas fijos inalámbricos digitales, que se pudieran derivar de radio interferencias de emisiones y radiaciones de otras fuentes
F.1095	Procedimiento para determinar el área de coordinación entre las estaciones de radioenlaces de servicio fijo
F.1096	Métodos de cálculo de línea de vista de interferencia en los sistemas de radioenlaces para dar cuenta de la dispersión del terreno

F.1488	Disposiciones de bloques de frecuencia para sistemas fijos de acceso inalámbrico en el rango de 3 400-3 800 MHz
F.1671	Directrices para un proceso de abordar el despliegue de los sistemas fijos inalámbricos con licencia que operan en países vecinos
Series de servicios móviles	
M.1036	Disposiciones de frecuencias para la implementación del componente terrestre de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales-2000 (IMT 2000, por sus siglas en inglés) en las bandas 806-960 MHz, 1 710-2 025 MHz, 2 110-2 200 MHz y 2 500-2 690 MHz
Series de propagación	
P.368	Curvas de propagación por onda de superficie, para frecuencias entre 10 kHz y 30 MHz: modelamiento de propagación por el modo de onda de superficie
P.372	Ruido de radio: describe el concepto y la evaluación de ruido de radio
P.452	Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia de microondas entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias superiores a unos 0.7 GHz
P.453	Índice de refracción de radio: su fórmula y los datos de refracción: estos datos de referencia se necesitan para el modelamiento de propagación en enlaces punto a punto
P.525	Cálculo de atenuación en espacio libre: el método de cálculo de los valores fundamentales (mínimo teórico) valor de la pérdida de propagación en las trayectorias sin obstáculos
P.526	Propagación por difracción: recomendación que describe el efecto y cálculo de la difracción de ondas de radio
P.530	Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrestres de líneas de vista: describe el modelado de la propagación de ondas de radio en los sistemas punto a punto como enlaces de microondas de relevador radioeléctrico
P.531	Datos de propagación ionosférica y métodos de predicción necesarios para el diseño de servicios y sistemas por satélite
P.533	Método para la predicción del rendimiento de circuitos de alta frecuencia: método de predicción de propagación que se puede utilizar para analizar el rendimiento de los enlaces en banda de HF
P.534	Método de cálculo esporádico de la intensidad de campo-E: método de cálculo de las reflexiones esporádicas de los campos E en la atmósfera, que se utiliza para algunos casos de evaluación de la interferencia
P.581	El concepto de “peor mes”: describe el concepto de “peor mes”, y es necesario en la evaluación de la propagación de ondas de radio a fin de establecer la disponibilidad (fiabilidad) y el objetivo de los enlaces de radio

P.617	Técnicas de predicción de propagación y datos necesarios para el diseño de radioenlaces a lo largo del horizonte: describe el modelado de propagación por difracción y dispersión troposférica
P.618	Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra a espacio
P.679	Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de radiodifusión por satélite
P.680	Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas marítimos móviles de telecomunicación Tierra a espacio
P.681	Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas móviles terrestres de telecomunicación Tierra a espacio
P.682	Datos de propagación necesarios para el diseño de los sistemas aeronáuticos móviles de telecomunicación Tierra a espacio
P.832	Atlas Mundial de la conductividad del suelo: los datos de referencia necesarios para el modelamiento de la propagación de ondas de radio en rangos de muy baja frecuencia
P.834	Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de ondas de radio: describe los efectos de propagación observados debido a la ocurrencia de súper-refracción en áreas de la atmósfera, que se utiliza en la evaluación de la interferencia
P.836	El vapor de agua: densidad en la superficie y el contenido total de columnas: los datos de referencia necesarios para el modelamiento de propagación en los enlaces punto a punto a frecuencias de microondas
P.837	Características de precipitación para el modelamiento de propagación: se utiliza para la modelación de la propagación en los rangos de frecuencia más alta, como las bandas de microondas por encima de 10 GHz
P.838	Modelo de atenuación específica para la lluvia para su uso en métodos de predicción: se utiliza para el modelamiento de propagación en los rangos de frecuencia más alta, como las bandas de microondas por encima de 10 GHz
P.841	La conversión de las estadísticas anuales a estadísticas del peor mes: describe las transformaciones de datos estadísticos para llegar a la estimación uniforme de confiabilidad del enlace expresado por mes significativo (véase la Recomendación P.581 arriba)
P.1058	Bases de datos digitales topográficos para los estudios de propagación: se describen los requisitos para la composición y el mantenimiento de los mapas digitales del terreno
P.1144	Guía para la aplicación de los métodos de propagación del Grupo de Estudio de Radiocomunicaciones 3: la tabla principal figura en este documento como la Tabla No. 2
P.1147	Predicción de intensidad del campo de onda celeste en frecuencias entre 150 y 700 1 kHz: describe la modelación de la propagación de la onda de radio por las reflexiones de la onda celeste

P.1239	Características ionosféricas UIT-R de referencia: datos de referencia necesarios para la modelación de la propagación de las ondas de radio en las bandas de frecuencia más bajas
P.1240	Métodos UIT-R de MUF básica, MUF operacional y predicción de trayectoria de rayos: métodos empleados en la predicción de la propagación y decisión sobre la frecuencia máxima utilizable (MUF) para comunicaciones de banda HF
P.1546	Método para la predicción de punto a zona para servicios terrestres en el rango de frecuencias de 30 MHz a 3 000 MHz: el método de predicción de la propagación más utilizado para los servicios de radiodifusión, y también para otros servicios terrestres
Series compartición entre FS y FSS	
SF.1006	Determinación del potencial de interferencia entre las estaciones terrenas del servicio fijo por satélite y las estaciones del servicio fijo
Series de gestión del espectro	
SM.328	Espectros y ancho de banda de las emisiones: la recomendación que describe las definiciones relativas a las características espectrales de la señal de radio
SM.329	Las emisiones no deseadas en el dominio espurio: da los límites para las emisiones no espurias
SM.851	La compartición entre el servicio de radiodifusión y los servicios fijo y/o móvil en las bandas VHF y UHF
SM.1009	Compatibilidad entre el servicio de radiodifusión sonora en la banda de unos 87-108 MHz y los servicios aeronáuticos en la banda 108-137 MHz
SM.1046	Definición del uso del espectro y la eficiencia de un sistema de radio
SM.1048	Pautas para el diseño de un sistema básico automatizado de gestión del espectro (BASMS)
SM.1049	Un método de gestión del espectro que se utiliza para ayudar en la asignación de frecuencias para los servicios terrestres en zonas fronterizas
SM.1055	El uso de técnicas de espectro ensanchado
SM.1056	Limitación de la radiación de equipos industriales, científicos y médicos (ISM)
SM.1132	Principios generales y métodos para la compartición entre servicios de radiocomunicaciones o entre estaciones de radio
SM.1134	Cálculos de la interferencia de intermodulación en el servicio móvil terrestre
SM.1271	Utilización eficiente del espectro usando métodos probabilísticos
SM.1370	Directrices de diseño para el desarrollo de sistemas avanzados automatizados de gestión del espectro

SM.1448	Determinación de la zona de coordinación alrededor de una estación terrena en las bandas de frecuencia entre 100 MHz y 105 GHz
SM.1537	Automatización e integración de sistemas de monitoreo del espectro, con gestión automatizada del espectro
SM.1603	Reorganización del espectro como método de gestión nacional del espectro
SM.2028	Informe: Metodología Monte Carlo de simulación para el uso en estudios de compartición y compatibilidad entre diferentes sistemas o servicios de radio
Series de servicios de radiodifusión	
BT.417	Intensidades del campo mínimas para las cuales puede solicitarse protección en la planificación de un servicio de televisión análoga terrestre
BS.599	Directividad de las antenas para la recepción de radiodifusión sonora en la banda 8 (VHF)

REFERENCIAS

La lista de referencias refleja la versión y la fecha de su publicación como disponibles al momento en que fue publicado este documento; por lo tanto una actualización de esta lista debe realizarse en futuras revisiones de este título.

1. Handbook on National Spectrum Management, ITU, Geneva, 2005.
2. Recommendation ITU-R P.526-10. Propagation by diffraction (2007).
3. Recommendation ITU-R P.617-1. Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems (1992).
4. Recommendation ITU-R P.530-12. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems (2007).
5. Recommendation ITU-R P.1147-4. Prediction of sky-wave field strength at frequencies between about 150 and 1 700 kHz (2007).
6. Recommendation ITU-R P.368-9. Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz (2007).
7. Recommendation ITU-R P.832-2. World Atlas of ground conductivities (1992).
8. Recommendation ITU-R P.1239-1. ITU-R reference ionospheric characteristics (2007).
9. Recommendation ITU-R P.1240-1. ITU-R methods of basic MUF, operational MUF and ray-path prediction (2007).
10. Recommendation ITU-R P.533-9. Method for the prediction of the performance of HF circuits (2007).
11. Recommendation ITU-R P.525-2. Calculation of free-space attenuation (1994).
12. Recommendation ITU-R P.1546-3. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz (2007).
13. Recommendation ITU-R P.534-4. Method for calculating sporadic-E field strength (1999).
14. Recommendation ITU-R P.834-6. Effects of tropospheric refraction on radio wave propagation (2007).
15. Recommendation ITU-R P.452-13. Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz (2007).
16. Recommendation ITU-R P.837-5. Characteristics of precipitation for propagation modeling (2007).
17. Recommendation ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods (2005).
18. Recommendation ITU-R P.453-9. The radio refractive index: its formula and refractivity data (2003).

19. Recommendation ITU-R P.836-3. Water vapour: surface density and total columnar content (2001).
20. Recommendation ITU-R P.679-3. Propagation data required for the design of broadcasting-satellite systems (2001).
21. Recommendation ITU-R P.680-3. Propagation data required for the design of Earth-space maritime mobile telecommunication systems (1999).
22. Recommendation ITU-R P.681-6. Propagation data required for the design of Earth-space land mobile telecommunication systems (2003).
23. Recommendation ITU-R P.682-2. Propagation data required for the design of Earth-space aeronautical mobile telecommunication systems (2007).
24. Recommendation ITU-R P.618-9. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems (2007).
25. Recommendation ITU-R P.531-9. Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems (2007).
26. Recommendation ITU-R P.581-2. The concept of "worst month" (1990).
27. Recommendation ITU-R P.841-4. Conversion of annual statistics to worst-month statistics (2005).
28. Recommendation ITU-R P.1144-4. Guide to the application of the propagation methods of Radio-communication Study Group 3 (2007).
29. Y. OKUMURA, E. OHMORI, T. KAWANO, and K. FUKUDA. "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service," Rev. Elec. Comm. Lab., vol. 16, No. 9-10, pp. 825-873, 1968.
30. M. HATA. "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 29, No. 3, pp. 317-325, 1980.
31. Recommendation ITU-R P.1058-2. Digital topographic databases for propagation studies (1999).
32. Recommendation ITU-R P.372-9. Radio noise (2007).
33. HAINES, R. H. An innovative technique for quantifying and mapping spectrum use. 1989 IC&C Executive Forum, Washington, D.C., USA.
34. Recommendation ITU-R SM.1046-2. Definition of spectrum use and efficiency of a radio system (2006).
35. Handbook on Computer Aided Techniques for Spectrum Management, ITU, Geneva, 2005.
36. Recommendation ITU-R SM.1134-1. Intermodulation interference calculations in the land-mobile service (2007).
37. Recommendation ITU-R SM.328-11. Spectra and bandwidth of emissions (2006)
38. Recommendation ITU-R SM.329-10. Unwanted emissions in the spurious domain (2003).
39. COST 231: Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800MHz bands (rev. 2), Den Haag, COST 231 TD (90)119 Rev. 2, 1991.
40. GARCÍA, A. P., ORTEGA, H., NAVARRO, A. and RODRÍGUEZ, H.. Effect of Terrain on Electromagnetic Propagation in Urban Environments on the Andean Region, Using the COST 231- Wal-fisch-Ikegami Model and GIS Planning Tools. En: Twelfth International Conference On Antennas And Propagation (ICAP 2003), University of Exeter, (2003: Exeter-UK).

41. A. PAOLO GARCÍA A. y RAMIRO BAUTISTA P., “Factores que Afectan la Planificación de Sistemas Móviles en los Entornos Actuales y Herramientas GIS Como Alternativa de un Futuro Inalámbrico”, Universidad Industrial de Santander, E3T, Seminario “Convergencia: El Nuevo Escenario de las Telecomunicaciones”, Bucaramanga, marzo 22 y 23 de 2002.
42. V. ERCEG et al. An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, No. 7, July 1999.
43. V. ERCEG, K. V. S. HARI, et al., “Channel models for fixed wireless applications,” tech. rep., IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, January 2001.
44. CEPT⁵ ERC Report 101. A Comparison Of The Minimum Coupling Loss Method, Enhanced Minimum Coupling Loss Method, And The Monte-Carlo Simulation (Menton, 1999), published by European Communications Office at www.erodocdb.dk.
45. SEAMCAT User Manual. For the latest version, see online Wiki help database through www.ero.dk/seamcat.
46. Report ITU-R SM.2028-1. Monte Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems (2002).
47. SEAMCAT software download page, see: www.seamcat.org
48. Recommendation ITU-R SM.1132-2. General principles and methods for sharing between radio-communication services or between radio stations (2001).
49. Recommendation ITU-R BT.417-5. Minimum field strengths for which protection may be sought in planning an analogue terrestrial television service (2002)
50. Recommendation ITU-R BS.599. Directivity of antennas for the reception of sound broadcasting in band 8 (VHF) (1982).
51. Recommendation ITU-R SM.851-1. Sharing between the broadcasting service and the fixed and/or mobile services in the VHF and UHF bands (1993).
52. Recommendation ITU-R SM.1055. The use of spread spectrum techniques (1994).
53. HATCH, W., HINKLE, R. and MAYHER, R. Modelling of pulse interference in amplitude modulated receivers, IEEE International Electromagnetic Compatibility Symposium Proceedings, USA, 1971.
54. See website of IEC/CISPR at: <http://www.iec.ch/zone/emc/>
55. Recommendation ITU-R SM.1056-1. Limitation of radiation from industrial, scientific and medical (ISM) equipment (2007).
56. Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz). International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (1998). Available online at: <http://www.icnirp.de/PubEMF.htm>
57. Recommendation ITU-T K.52. Guidance on complying with limits for human exposure to electromagnetic fields (2004).
58. Recommendation ITU-R SM.337-6. Frequency and distance separations (2008).
59. Recommendation ITU-R F.746-9. Radio-frequency arrangements for fixed service systems (2007).

⁵ Todos los documentos referenciados de CEPT están disponibles para descargar en: <http://www.erodocdb.dk/>

60. Recommendation ITU-R F.1094-2. Maximum allowable error performance and availability degradations to digital fixed wireless systems arising from radio interference from emissions and radiations from other sources (2007).
61. AGREEMENT between the Administrations of Austria, Belgium, ... and Switzerland on the co-ordination of frequencies between 29.7 MHz and 39.5 GHz for the fixed service and the land mobile service (HCM Agreement), Vilnius, 12 October 2005. Available from ECO (www.ero.dk) or at HCM web site at: http://hcm.bundesnetzagentur.de/http/englisch/verwaltung/index_europakarte.htm
62. ITU Handbook on Digital Radio Relay Systems, Geneva, 1996.
63. Recommendation ITU-R F.1096. Methods of calculating line-of-sight interference into radio-relay systems to account for terrain scattering (1994).
64. Recommendation ITU-R SM.1448. Determination of the coordination area around an earth station in the frequency bands between 100 MHz and 105 GHz (2000).
65. Recommendation ITU-R SF.1006. Determination of the interference potential between earth stations of the fixed-satellite service and stations in the fixed service (1993).
66. Recommendation ITU-R SM.1049-1. A method of spectrum management to be used for aiding frequency assignment for terrestrial services in border areas (1995).
67. Regional Radiocommunication Conference 2006 for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06), see: <http://www.itu.int/ITU-R/conferences/rrc/rrc-06/index.asp>
68. J. FONTEYNE. Terrestrial broadcasting plans in LF/MF/HF/VHF/UHF bands. Presentation at the ITU Radiocommunication Seminar, La Habana, Cuba (19-23 april 1999).
69. Recommendation ITU-T K.61. Guidance to measurement and numerical prediction of electromagnetic fields for compliance with human exposure limits for telecommunication installations (2003);
70. Recommendation ITU-T K.70. Mitigation techniques to limit human exposure to EMFs in the vicinity of radiocommunication stations (2007-2009).
71. Harmonised European Norm (ETSI Standard⁶) EN 300 279. Electromagnetic Compatibility standard for Private Land Mobile Radios and ancillary equipment (ETSI, 1999).
72. Harmonised European Norm (ETSI Standard) EN 301 489. Electromagnetic Compatibility standard for radio equipment and services (multi-part standard where different parts deal with separate radio systems).
73. CEPT Recommendation T/R 25-08. Planning criteria and coordination of frequencies in the Land Mobile Service in the range 29.7 – 921 MHz (2008).
74. CEPT Recommendation ECC REC(05)08. Frequency planning and frequency coordination for the GSM 900, GSM 1800, Extended-GSM and GSM-Railways Land Mobile Systems (2005).
75. CEPT Recommendation ERC REC(01)01. Border coordination of UMTS (2007).
76. CEPT Recommendation ECC REC(08)02. Frequency planning and frequency coordination for the GSM 900 (including E-GSM)/UMTS 900, GSM 1800/UMTS 1800 Land Mobile Systems (2008).

⁶ Todos los estándares de ETSI referenciados están disponibles para descargar en: <http://pda.etsi.org/pda/queryform.asp>

77. Recommendation ITU-R F.1095. A procedure for determining coordination area between radio-relay stations of the fixed service (1994).
78. Recommendation ITU-R F.1488. Frequency block arrangements for fixed wireless access systems in the range 3 400-3 800 MHz (2000).
79. CEPT Recommendation ECC REC(04)05. Guidelines for accommodation and assignment of Multi-point Fixed Wireless systems in frequency bands 3.4-3-6 GHz and 3.6-3-8 GHz (2006).
80. Recommendation ITU-R F.1671. Guidelines for a process to address the deployment of area-licensed fixed wireless systems operating in neighbouring countries (2004).
81. CEPT ECC Report 76. Cross-Border coordination of Multipoint Fixed Wireless Systems in frequency bands from 3.4 GHz to 33.4 GHz (2006).
82. Recommendation ITU-R SM.1271. Efficient spectrum utilization using probabilistic methods (1997).
83. CEPT ERC Report 51. Principles for sharing between military and civil radio services (1997).
84. N. VASSILIEV. BR IFIC (Terrestrial services). Presentation material, ITU Radiocommunications Regional Seminar, Abu Dhabi, 22-26 April 2007. Available from: <http://www.itu.int/ITU-R/go/seminars/en>
85. A. MATAS. BR IFIC (Space services). Presentation material, ITU Radiocommunications Regional Seminar, Abu Dhabi, 22-26 April 2007. Available from: <http://www.itu.int/ITU-R/go/seminars/en>
86. M. SAKAMOTO. Coordination of satellite networks. Presentation material, ITU Radiocommunications Regional Seminar, Abu Dhabi, 22-26 April 2007. Available from: <http://www.itu.int/ITU-R/go/seminars/en>
87. CEPT ECC Report 80. Enhancing harmonisation and introducing flexibility in the spectrum regulatory framework, 2006.
88. CEPT ERC Recommendation 12-09. Radio frequency channel arrangement for Fixed Service systems operating in the band 57.0 - 59.0 GHz.
89. CEPT ECC Recommendation (06)04. Use of the band 5725-5875 MHz for Broadband Fixed Wireless Access (BFWA), 2006.
90. CEPT ECC Recommendation (05)07. Radio frequency channel arrangements for Fixed Service Systems operating in the bands 71 - 76 GHz and 81 - 86 GHz, 2005.
91. A. MEDEISIS. Novel Spectrum Management for Liberalised Markets: Broadband Wireless Access Case. Proc. Of IEEE International Engineering Management Conference (IEMC-2002), 18-20 August 2002, Cambridge (UK).
92. Review of Radio Spectrum Management, Study by Prof. M. Cave for DTI & HM Treasury, UK, March 2002.
93. M. WHITTAKER. Shortcut to harmonization with Australian spectrum licensing. IEEE Comm. Mag., Jan. 2002.
94. CEPT ECC Decision (09)03. Harmonised conditions for mobile/fixed communications networks (MFCN) operating in the band 790 - 862 MHz (2009).
95. Recommendation ITU-R SM.1603. Spectrum redeployment as a method of national spectrum management (2003).

96. CEPT ECC Report 16. Refarming and secondary trading in a changing radiocommunications world (2002).
97. CEPT Report 24. A preliminary assessment of the feasibility of fitting new/future applications/services into non-harmonised spectrum of the digital dividend (namely the so-called "white spaces" between allotments) (2008).
98. CEPT Report 25. Technical Roadmap proposing relevant technical options and scenarios to optimise the Digital Dividend, including steps required during the transition period before analogue switch-off (2008).
99. CEPT Report 30. The identification of common and minimal (least restrictive) technical conditions for 790 - 862 MHz for the digital dividend in the European Union (2009).
100. CEPT Report 31. Technical considerations regarding harmonisation options for the digital dividend in the European Union: Frequency (channelling) arrangements for the 790-862 MHz band (2009).
101. ITU-R Recommendation SM.1048. Design guidelines for a basic automated spectrum management system (BASMS) (1994).
102. ITU-R Recommendation SM.1370-1. Design guidelines for developing advanced automated spectrum management systems (2001).
103. ITU-R Recommendation SM.1537. Automation and integration of spectrum monitoring systems with automated spectrum management (2001).
104. D. LA DE VEGA, S. LÓPEZ, et al. Irregular Terrain Attenuation in the Medium Frequency Band: Planning for Digital Radio Systems. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 56, No. 8, August 2008.
105. ITU Handbook on Terrestrial land mobile radiowave propagation in the VHF/UHF bands. Edition 2002.
106. NTIA⁷ Report 99-368. Medium Frequency Propagation Prediction Techniques and Antenna Modeling for Intelligent Transportation Systems (ITS) Broadcast Applications. August 1999.
107. NTIA Report 88-237. MF Broadcasting System Performance Model. August 1988.
108. Recommendation ITU-R BS.412-9. Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF (1998).
109. Recommendation ITU-R SM.1009-1. Compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87-108 MHz and the aeronautical services in the band 108-137 MHz (1995).
110. Recommendation ITU-R BS.139-3. Transmitting antennas for sound broadcasting in the Tropical Zone (1990).
111. Recommendation ITU-R BS.1386-1. LF and MF transmitting antennas characteristics and diagrams (2001).
112. Recommendation ITU-R BS.1698. Evaluating fields from terrestrial broadcasting transmitting systems operating in any frequency band for assessing exposure to non-ionizing radiation (2005).

⁷ Todos los informes NTIA referenciados están disponibles para descargar en: <http://www.its.bldrdoc.gov/>

113. Recommendation ITU-R M.1036-3. Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT 2000) in the bands 806-960 MHz, 1 710-2 025 MHz, 2 110-2 200 MHz and 2 500-2 690 MHz (2007)
114. Technical publications and white papers by LBA Group, Inc., available through URL: <http://www.lbagroup.com/associates/am-wireless-colocation.php>
115. Application Note 15. LBA Group Inc, available at URL: <http://www.lbagroup.com/technology/app15.php>
116. ITU Handbook on LF/MF system design (2001)
117. M. JORDAN. EMC at transmitter sites. IEE Colloquium on EMC in Broadcasting, March 1996.
118. BELROSE, J.S., WHITE, S. Modelling real practical antennas - guidelines and tips from code users' notebooks. 12th Intl. Conf. on Antennas and Propagation, 2003 (ICAP 2003)
119. ITU-R Report BT.2140 on Transition from analogue to digital broadcasting (2009)
120. Guidelines for the transition from analogue to digital broadcasting, ITU-BDT (2010). Available online at: <http://www.itu.int/publ/D-HDB-GUIDELINES.01-2010/en>
121. SRIVASTAVA B.P. FM Broadcasting in India. IETE Technical Review Vol. 24, No 6, November-December 2007
122. ITU-R Report BS.944. Theoretical network planning (1982).
123. Recommendation ITU-R BT.655-7 Radio-frequency protection ratios for AM vestigial sideband terrestrial television systems interfered with by unwanted analogue vision signals and their associated sound signals (2004)
124. Recommendation ITU-R BT.1123. Planning methods for 625-line terrestrial television in VHF/UHF bands (1994)
125. FCC Rules Part 73: Broadcast Radio Stations, available online from <http://www.gpo.gov/>
126. EBU Technical Note 3254. Planning Parameters & Methods for Terrestrial TV in the VHF/UHF Bands (1988), available online from <http://tech.ebu.ch/>
127. Technical Planning Parameters and Methods for Terrestrial Broadcasting. Australian Broadcasting Authority (2004). Available online from www.acma.gov.au
128. CEPT ECC Report 82. Compatibility study for UMTS operating within the GSM 900 and GSM 1800 frequency bands (2006).
129. High Frequency Co-ordination Conference, see web site at: <http://www.hfcc.org/>
130. República de Colombia - Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. National technical AM broadcasting plan.
131. República de Colombia - Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. National technical FM broadcasting plan.
132. Recommendation ITU-R BS.560-4. Radio-frequency protection ratios in LF, MF and HF broadcasting (1997).

© República de Colombia – Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y Agencia Nacional del Espectro, 2012

Este documento, así como los derechos patrimoniales derivados del mismo, son de propiedad del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) y de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), quienes podrán utilizarlo, divulgarlo o reproducirlo en la forma y para los fines que estimen convenientes, en la República de Colombia.

Primera edición: 31 de diciembre de 2012

ACERCA DE LOS AUTORES

El Título II fue desarrollado como resultado del Acuerdo de Cooperación Técnica 1/1997 celebrado entre la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia (Anexo No. 3 – Acuerdo de 2009 y Anexo No. 4 de 2010), con la asistencia y participación de Tovar Fajardo & Asociados Abogados Ltda.

Participaron en la elaboración del Título II los siguientes consultores:

ASUNTOS TÉCNICOS

ARTURAS MEDEISIS

Experto consultor UIT

JOSÉ GENALDO CÉSPEDES CLAVIJO

GERMAN MAURICIO FAJARDO MURIEL

ASUNTOS JURÍDICOS

ALFREDO FAJARDO MURIEL

FELIPE TOVAR DE ANDREIS