Métodos de planificación de frecuencias en el servicio de radiodifusión (sonora y de televisión)

ÍNDICE

1. Introducción
2. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)
3. Necesidad de la planificación radioeléctrica
   3.1 Parámetros de un plan de adjudicación de frecuencias
   3.2 Parámetros de un plan de asignación de frecuencias
4. Proceso general de planificación radioeléctrica de los servicios audiovisuales
5. Servicios de radiodifusión
   5.1 Radiodifusión sonora en onda media (OM)
   5.2 Radiodifusión sonora en frecuencia modulada (FM)
   5.3 Radiodifusión sonora digital en onda media (DRM)
   5.4 Radiodifusión sonora digital terrenal (T-DAB)
   5.5 Televisión digital terrenal (DVB-T)
6. Evaluación de la intensidad de campo eléctrico
   6.1 Propagación en ondas hectométricas
   6.2 Propagación en ondas métricas y decimétricas
7. Intensidad de campo eléctrico perturbador
8. Evaluación de la interferencia múltiple
   8.1 Método de la suma cuadrática
   8.2 Método de la multiplicación simplificada
9. Métodos de planificación radioeléctrica
   9.1 Procedimiento de las distancias límite
   9.2 Planificación de frecuencias al trasluz
   9.3 Establecimiento de una retícula teórica
   9.4 Planificación heurísticamente óptima
   9.5 Generación de adjudicaciones de frecuencias
10. Coordinación internacional de frecuencias
11. Referencias

Métodos de planificación de frecuencias en el servicio de radiodifusión (sonora y de televisión)

1. Introducción

La Constitución Española (CE) determina que las telecomunicaciones y, en particular, las radiocomunicaciones, son competencia exclusiva del Estado.

La Ley General de Telecomunicaciones (LGTel) establece que la titularidad (propiedad) y administración del espectro radioeléctrico corresponden al Estado. Además, califica al espectro radioeléctrico como bien de dominio público; es decir, está destinado al uso público y la propiedad nunca puede extinguirse ni puede transmitirse ni puede embargarse. En los textos jurídicos se utilizan indistintamente los conceptos espectro radioeléctrico y dominio público radioeléctrico.

La administración del espectro consiste en establecer los planes de utilización, en gestionar su utilización eficaz y eficiente, en controlar las emisiones, en su caso eliminando las interferencias perjudiciales, y en aplicar el régimen sancionador por su uso irregular o indebido. Las condiciones para la adecuada administración del espectro se encuentran recogidas en el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico (RUER).

Esa administración debe hacerse en conformidad con los tratados y acuerdos internacionales firmados por España, atendiendo a la normativa aplicable en la Unión Europea (UE), disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) y a las resoluciones y recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y de otros organismos internacionales, como la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT).

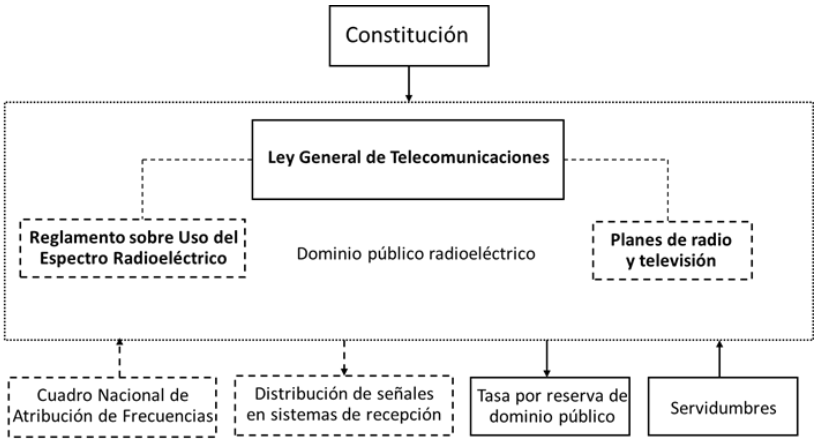


Fig. 1. Esquema que interrelaciona la normativa que afecta al espectro radioeléctrico

Las funciones de administración del espectro radioeléctrico se realizan por la Administración General del Estado (AGE) a través de la Secretaría de Estado competente en telecomunicaciones. En particular, la AGE elabora las propuestas de planes de utilización del espectro cuya aprobación corresponde al Gobierno. Los planes de utilización del espectro son el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) y los Planes Técnicos Nacionales de radiodifusión sonora y de televisión. En la Fig. 1 se muestra la interrelación entre la normativa que afecta al espectro radioeléctrico.

Otras competencias de la AGE son las siguientes:

- Habilitar a las entidades públicas para prestar los servicios de radio y televisión.
- Otorgar los derechos de uso del dominio público radioeléctrico.
- Recaudar la tasa de reserva por los derechos de uso del espectro.
- Aprobar los proyectos técnicos de las instalaciones.
- Realizar el reconocimiento técnico de las instalaciones.
- Realizar la comprobación técnica de emisiones.
- Verificar los niveles de emisiones para protección del público.
- Inspeccionar la prestación de los servicios.
- Resolver los casos de interferencias perjudiciales.
- Sancionar las infracciones de su competencia.

2. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)

El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), que deriva del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, contiene los siguientes elementos:

- Define todos los servicios de radiocomunicaciones.
- Diferencia entre atribución, adjudicación y asignación.
- Determina la categoría de los servicios y de las atribuciones.
- Realiza la división del espectro radioeléctrico en bandas de frecuencias.
- Atribuye las bandas de frecuencias a los servicios de radiocomunicaciones.
- Relaciona los usos del espectro (común, especial, privativo).
- Dispone las utilizaciones nacionales en cada banda de frecuencias.
- Establece la canalización de algunas bandas de frecuencias.
- Condiciona los usos temporales y experimentales no previstos.

El CNAF determina los servicios de radiocomunicaciones atribuidos en España a cada banda de frecuencias y, en su caso, las condiciones de explotación mediante las notas de Utilización Nacional (UN).

En particular, el CNAF identifica las bandas de frecuencias cuya utilización debe realizarse en conformidad con un Plan Técnico Nacional (Tabla 1).

Banda	Ondas	CNAF	Rango frecuencias	Plan	Denominación
MF	Hectométricas	UN-1	526,5-1606,5 kHz	OM	Onda media
VHF	Métricas	UN-17	87,5-108 MHz	FM	Frecuencia modulada
VHF	Métricas	UN-96	195-223 MHz	RD	Radio digital
UHF	Decimétricas	UN-36	470-694 MHz	TDT	Televisión digital

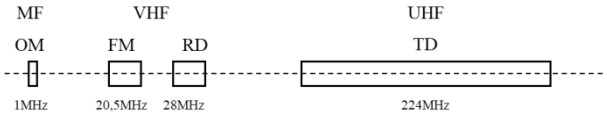


Tabla 1. Bandas de frecuencias atribuidas al servicio de radiodifusión

Esas bandas de frecuencias se encuentran atribuidas a los servicios de radiodifusión sonora y de televisión, que son servicios punto-zona; es decir, desde un punto de emisión, en el que se encuentra situada la estación radioeléctrica, hasta su zona de servicio. Otros servicios de radiocomunicaciones utilizan el espectro radioeléctrico sin una planificación previa o, al menos, sin que exista un Plan Técnico Nacional. No obstante, en las bandas de frecuencias atribuidas al servicio fijo existe una canalización que determina las frecuencias utilizables y las condiciones de

utilización, y en algunas bandas atribuidas al servicio móvil los propios operadores realizan la planificación del espectro adjudicado.

Existen otras bandas atribuidas al servicio de radiodifusión en ondas decamétricas (HF); es decir, onda corta, cuya propagación se realiza principalmente por onda ionosférica, alcanzando una cobertura a grandes distancias, normalmente más allá de las fronteras de un país. Las características de propagación en ondas decamétricas varían en función de las características de la capa ionosférica de la atmósfera que dependen de la estación del año. La capa ionosférica está ionizada por efecto de la radiación solar; es decir, contiene cargas eléctricas (iones), y en ella se reflejan las ondas radioeléctricas. En estas bandas de frecuencias se establecen los Horarios Estacionales entre las Administraciones de los diferentes Estados a través de la UIT. En los Horarios Estacionales se determinan las franjas horarias de emisión en cada frecuencia que corresponden a cada Administración.

3. Necesidad de la planificación radioeléctrica

El espectro radioeléctrico es el conjunto de ondas electromagnéticas con frecuencia inferior a 3.000 GHz, que se propagan por el espacio sin guía artificial.

El espectro radioeléctrico presenta las siguientes características:

- Recurso natural limitado
- Recurso con contenido económico
- En algunas bandas o zonas está congestionado

Como las bandas de frecuencias atribuidas al servicio de radiodifusión, sonora y de televisión, son reducidas y se utilizan por numerosas estaciones de radio y televisión, pero también por otros servicios de radiocomunicaciones que comparten las mismas bandas (normalmente, servicios móviles) o utilizan las bandas adyacentes (como el servicio de radionavegación aeronáutica por encima de 108 MHz), debe realizarse una planificación radioeléctrica de canales que permita realizar un aprovechamiento racional, óptimo y eficaz del espectro de frecuencias que, garantizando una calidad de servicio satisfactoria, evite las interferencias sobre otras estaciones.

Existen dos tipos de planes:

- Planes de adjudicación de frecuencias, en el que las frecuencias se adjudican a las zonas de servicio (Fig. 2).

Fig. 2. Ejemplo de un plan de adjudicación de frecuencias

- Planes de asignación de frecuencias, en el que las frecuencias se asignan a las estaciones radioeléctricas (Fig. 3).

Fig. 3. Ejemplo de un plan de asignación de frecuencias

3.1 Parámetros de un plan de adjudicación de frecuencias

Los parámetros que definen un plan de adjudicación de frecuencias son los siguientes:

- Las zonas de servicio, identificadas por su denominación o por su contorno geográfico.
- El rango de frecuencias, que pueden ser las frecuencias o los canales radioeléctricos o los bloques de frecuencias utilizables.
- La red de referencia, constituida por la configuración de red con las características de la estación de referencia (altura de la antena, potencia de emisión, polarización de las emisiones y diagrama de atenuaciones de la antena).

Una red es un conjunto de estaciones de radiocomunicación.

Las configuraciones de red son las siguientes:

- Red de frecuencia única (SFN) es la red constituida por estaciones que difunden los mismos programas por la misma frecuencia.
- Red multifrecuencia (MFN) es la red constituida por estaciones que utilizan más de una frecuencia.
- Red de transmisor único es la red constituida por una única estación.

3.2 Parámetros de un plan de asignación de frecuencias

Los parámetros que definen un plan de asignación de frecuencias son los siguientes:

- Los emplazamientos de las estaciones, identificados por su denominación o por sus coordenadas geográficas (longitud, latitud y cota) y la longitud o la altura de la antena.
- Las frecuencias o canales de emisión, incluyendo la anchura de banda, el sistema de modulación, la estabilidad de frecuencia, etc.
- Las potencias de emisión, incluyendo el valor máximo de la potencia, el diagrama de atenuaciones de la antena y la polarización de las emisiones.

4. Proceso general de planificación radioeléctrica de los servicios audiovisuales

En España, los servicios de radiodifusión sonora y de televisión, denominados audiovisuales, tienen una normativa jurídica muy singular por existir competencias compartidas entre el Estado y las Comunidades Autónomas.

Corresponde al Estado, entre otros, el establecimiento y desarrollo de la normativa jurídica básica, como son los Planes Técnicos Nacionales, así como la adjudicación de licencias audiovisuales de ámbito estatal, y corresponde a las Comunidades Autónomas la adjudicación de licencias audiovisuales, con ámbito igual o inferior al autonómico, para la explotación de estaciones en conformidad con los Planes Técnicos Nacionales, excepto en el caso del Plan Técnico Nacional de Onda Media (Plan OM), cuya adjudicación de licencias es también competencia del Estado.

Por lo tanto, en todo proceso de planificación, salvo en el caso del Plan OM, las Comunidades Autónomas son consultadas sobre sus necesidades de frecuencias o servicios a planificar. Estas necesidades pueden conllevar limitaciones técnicas derivadas de la congestión del espectro radioeléctrico para prestar servicios con calidad satisfactoria, conforme a los estándares establecidos en la UIT.

Los derechos de uso del dominio público radioeléctrico (espectro radioeléctrico) se otorgan siempre por la Administración General del Estado. En radio y televisión, únicamente se otorga el derecho de uso a quien disponga de licencia audiovisual para prestar estos servicios y será siempre conforme a los Planes Técnicos Nacionales.

El proceso general de planificación radioeléctrica de los servicios audiovisuales se realiza en las siguientes etapas (Fig. 4):

1. Obtención de la información inicial necesaria mediante el establecimiento de los principios de planificación (directrices y criterios, bases técnicas e hipótesis) y el planteamiento de las necesidades (zonas de servicio a cubrir y número de frecuencias por zona).
2. Definición de los parámetros técnicos para el análisis de frecuencias (frecuencias localmente incompatibles, generación de productos de intermodulación y determinación de las frecuencias utilizables) y el establecimiento de parámetros (definición de características técnicas, y preservación de las servidumbres radioeléctricas).
3. Realización de los análisis de compatibilidad (análisis del perfil del terreno, análisis de interferencias, zona de cobertura) y de la coordinación radioeléctrica internacional (examen de la necesidad de coordinación e identificación de países afectados).

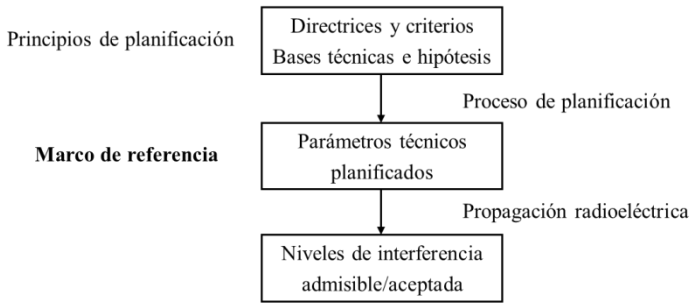


Fig. 4. Proceso general de planificación de los servicios audiovisuales

Los parámetros técnicos planificados para cada estación radioeléctrica; básicamente, las coordenadas geográficas genéricas del emplazamiento, la frecuencia de emisión, la potencia máxima, el diagrama de radiación de la antena y la polarización, constituyen el marco de referencia de la planificación. En la práctica, el emplazamiento concreto de la estación radioeléctrica puede suponer una reducción en la potencia o una modificación del diagrama de antena, pero la frecuencia permanecerá invariable.

El esquema general para la elaboración de los Planes Técnicos Nacionales de radiodifusión, sonora y de televisión, es el siguiente:

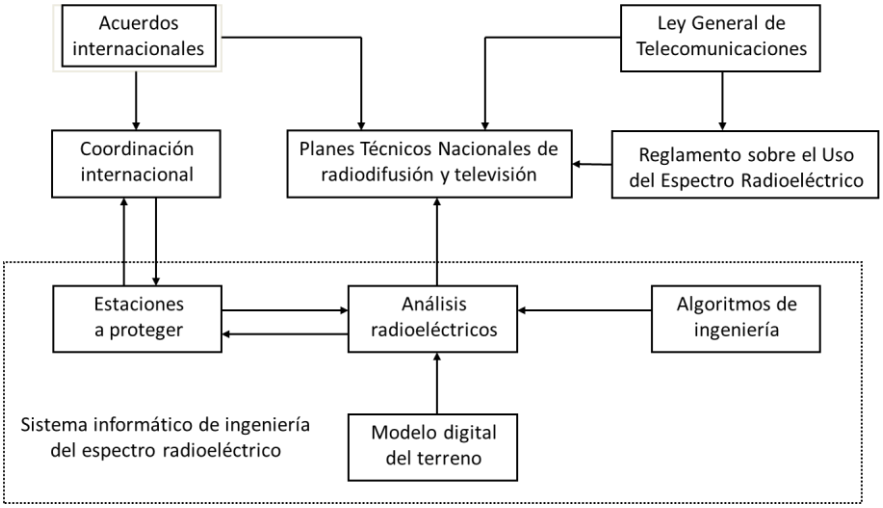


Fig. 5. Esquema general de elaboración de los Planes Técnicos Nacionales

En el sistema informático de ingeniería del espectro radioeléctrico, sobre la base del modelo digital del terreno y considerando los algoritmos de ingeniería, se realizan los análisis de compatibilidad radioeléctrica, teniendo en cuenta las estaciones a proteger, para determinar las frecuencias utilizables. Los análisis de compatibilidad radioeléctrica incluyen también la protección de otros servicios de radiocomunicaciones que utilizan las bandas adyacentes, como el servicio de radionavegación aeronáutica por encima de 108 MHz, pero no incluyen a los servicios móviles que comparten, con carácter secundario, las mismas bandas de frecuencias atribuidas al servicio de radiodifusión, que tiene carácter primario. Los servicios secundarios no pueden causar interferencias a los servicios primarios, ni pueden reclamar protección frente a la interferencia procedente de los servicios primarios.

En conformidad con los Acuerdos internacionales suscritos por España, las estaciones planificadas deben coordinarse con los países vecinos al objeto de obtener la protección y el reconocimiento internacional. Una vez obtenida la coordinación internacional, el Plan Técnico Nacional será aprobado por el Gobierno, según establece la Ley General de Telecomunicaciones, y se publicará en el Boletín Oficial del Estado.

Las estaciones inscritas en un Plan Técnico Nacional quedan protegidas frente a posteriores modificaciones del plan. De la misma manera, las estaciones que han obtenido el acuerdo favorable de coordinación con los países vecinos serán inscritas en el correspondiente Plan Internacional de la UIT y obtendrán el reconocimiento internacional para el uso de la frecuencia y la protección internacional frente a interferencias de otras estaciones (Fig. 6).

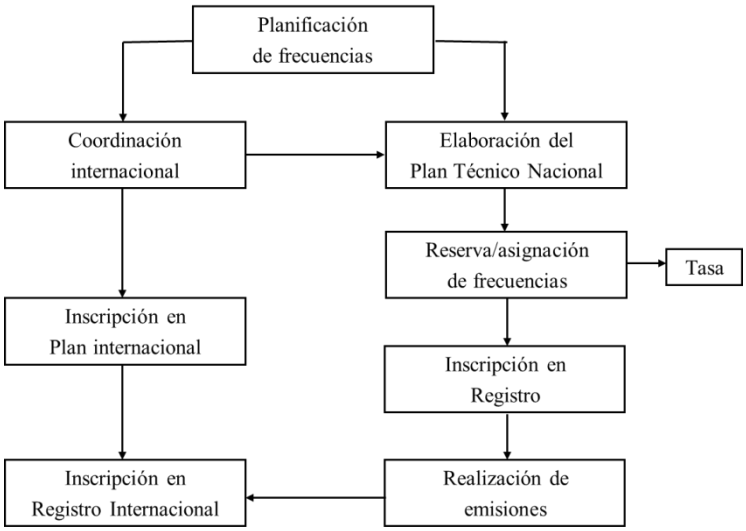


Fig. 6. Proceso global para la explotación de estaciones de radio y televisión planificadas

Cada estación planificada será explotada por el operador que disponga de la correspondiente licencia audiovisual, que obtenga la aprobación del proyecto técnico, y que supere satisfactoriamente el reconocimiento técnico de las instalaciones efectuado por la Jefatura de Inspección de Telecomunicaciones; momento a partir del cual recibirá la autorización para la puesta en servicio de la estación y se inscriben en el Registro Internacional de la UIT notificando la fecha de puesta en servicio. Anualmente, el operador deberá abonar una tasa por reserva del dominio público radioeléctrico; es decir, no por el uso de la frecuencia o el canal asignado.

Los parámetros técnicos planificados constituyen el marco de referencia. En la práctica, las estaciones radioeléctricas autorizadas, conformes a las características del proyecto técnico aprobado, se inscribirán en el Registro Nacional de Frecuencias con parámetros que no tienen que ser necesariamente idénticos a los establecidos en el correspondiente Plan Técnico Nacional, pero en cualquier caso el nivel de interferencias con las características autorizadas tendrá que ser inferior al nivel de interferencias previsto en el plan (Fig. 7).

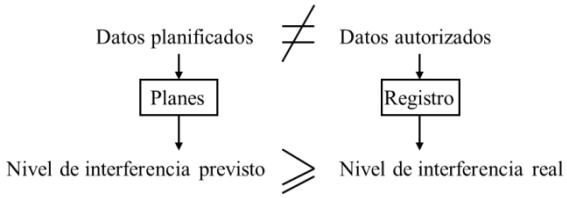


Fig. 7. Relación entre los parámetros técnicos planificados y los parámetros autorizados

5. Servicios de radiodifusión

El servicio de radiodifusión (sonora y de televisión) es el servicio de radiocomunicación cuyas emisiones se destinan a ser recibidas directamente por el público en general, y tiene las siguientes características:

- Utiliza el espectro radioeléctrico.
- Se transmite en una única dirección.
- Se recibe en una zona de cobertura.

En el servicio de radiodifusión se distingue entre zona de servicio y zona de cobertura (Fig. 8). La zona de servicio es el área donde la Administración asegura una calidad de servicio satisfactoria con los parámetros autorizados; mientras que la zona de cobertura es el área donde la señal deseada supera el efecto combinado de las señales interferentes debidas a otras estaciones y al ruido radioeléctrico (natural y artificial).

Fig. 8. Diferencia entre zona de servicio y zona de cobertura de una estación de radiodifusión

En una planificación de frecuencias correcta, la zona de cobertura debe abarcar toda la zona de servicio. En la zona de cobertura fuera de la zona de servicio no se garantiza una calidad de servicio satisfactoria en cualquier momento.

Los tipos de zonas de servicio que se contempla en la planificación de estaciones de radio y televisión son de ámbito estatal (todo el territorio español), de ámbito autonómico (territorios de cada comunidad autónoma) y de ámbito local (casco urbano de la localidad, núcleo principal de población de la localidad, término municipal o un conjunto de localidades según se establezca en el correspondiente Plan Técnico Nacional).

En general, en una banda de frecuencias no todas las frecuencias se pueden asignar a una estación de radiocomunicación. Las bandas de frecuencias se dividen en canales radioeléctricos (canalización) para mejorar la utilización de espectro radioeléctrico, como ocurre en todas las bandas de frecuencias atribuidas al servicio de radiodifusión. La canalización no tiene por qué coincidir con la anchura de banda de las señales a transmitir.

5.1 Radiodifusión sonora en onda media (OM)

En conformidad con la nota de utilización nacional UN-1 del CNAF, la banda de frecuencias 526,5-1606,5 kHz se utiliza exclusivamente por las entidades habilitadas para la prestación de los servicios de radiodifusión sonora en onda media, y siempre de acuerdo con el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Ondas Medias (hectométricas).

La banda de frecuencias 526,5-1606,5 kHz está canalizada a 9 kHz, y solo pueden utilizarse las frecuencias que son múltiplos de 9 kHz; es decir, 531 kHz, 540 kHz,… y 1602 kHz (Fig. 9).

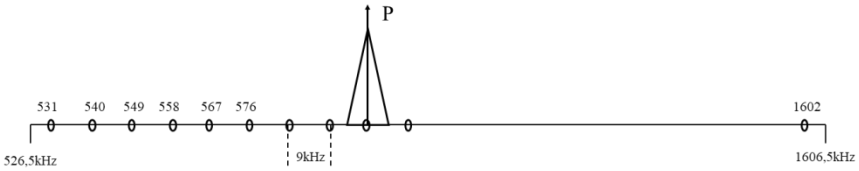


Fig. 9. Canalización de la banda utilizada por las estaciones de radiodifusión sonora en onda media

La radiodifusión sonora en onda media (OM) utiliza modulación de amplitud (AM), con anchura de banda de 9kHz, y cada frecuencia tiene capacidad para un único programa de sonido de baja calidad.

El Plan OM se ha elaborado para su utilización por estaciones con tecnología analógica; no obstante, la nota UN-1 permite que puedan autorizarse emisiones con tecnología digital en esta banda de frecuencias siempre que el nivel de interferencia en el mismo canal o en los canales adyacentes no sea superior al que se produciría con modulación en doble banda lateral y portadora completa.

5.2 Radiodifusión sonora en frecuencia modulada (FM)

En conformidad con la nota de utilización nacional UN-17 del CNAF, la banda de frecuencias 87,5-108 MHz se utiliza exclusivamente por las entidades habilitadas para la prestación de los servicios de radiodifusión sonora en ondas métricas con modulación de frecuencia, y siempre de acuerdo con el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Ondas Métricas con modulación de frecuencia (Plan FM).

La banda de frecuencias 87,5 a 108 MHz está canalizada a 100 kHz, y solo pueden utilizarse las frecuencias 87,7 MHz, 87,8 MHz,… y 107,9 MHz. En España, el último megahercio de la banda; es decir, las 10 frecuencias entre 107,0 MHz y hasta 107,9 MHz se han reservado a las estaciones municipales (Fig. 10).

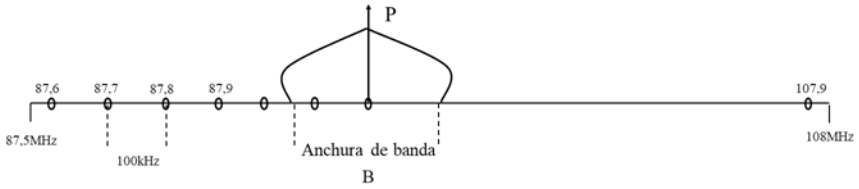


Fig. 10. Canalización de la banda utilizada por las estaciones de radiodifusión sonora en frecuencia modulada

La radiodifusión sonora en esta banda utiliza el sistema de modulación en frecuencia (FM) con la frecuencia piloto a 19 kHz, adoptado en Europa Occidental.

Cada frecuencia tiene capacidad para un único programa principal de sonido (monofónico o estereofónico) y señales suplementarias (sistema de difusión de datos RDS y música funcional).

La anchura de banda de la señal monofónica es de 180 kHz y de la señal estereofónica es de 256 kHz, pero puede alcanzar 300 kHz cuando se incluye el sistema de radiodifusión de datos (RDS) y programas monofónicos suplementarios.

<u>Señal monofónica FM en banda de base</u> (Fig. 11)

Fig. 11. Banda de base de la señal monofónica en frecuencia modulada

La anchura de banda se calcula conforme a B = 2 (M + $D_{máx}$), siendo la desviación máxima de frecuencia $D_{máx}$ = 75 kHz, y la frecuencia máxima de modulación M = 15 kHz. Por lo tanto, la anchura de banda de la señal monofónica FM es B = 180 kHz.

Señal estereofónica FM en banda de base (Fig. 12)

Fig. 12. Banda de base de la señal estereofónica en frecuencia modulada

En las figuras, Canal D y Canal I son, respectivamente, el canal de sonido derecho y el canal de sonido izquierdo.

La anchura de banda se calcula conforme a B = 2 (M + $D_{máx}$), siendo la desviación máxima de frecuencia $D_{máx}$ = 75 kHz, y la frecuencia máxima de modulación M = 53 kHz. Por lo tanto, la anchura de banda de la señal estereofónica FM es B = 256 kHz.

Señal compuesta FM en banda de base (Fig. 13)

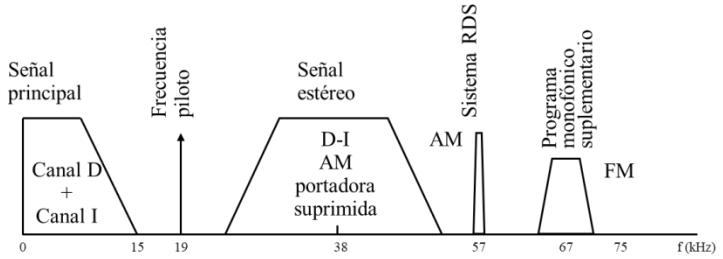


Fig. 13. Banda de base de la señal estereofónica en frecuencia modulada con servicios adicionales

La anchura de banda se calcula conforme a B = 2 (M + $D_{máx}$), siendo la desviación máxima de frecuencia $D_{máx}$ = 75 kHz y la frecuencia máxima de modulación M < 75 kHz. Por lo tanto, la anchura de banda B de la señal compuesta FM puede alcanzar hasta 300 kHz.

5.3 Radiodifusión sonora digital en onda media (DRM)

El sistema DRM, adoptado en España para la radiodifusión digital de sonido en ondas hectométricas, utiliza modulación por división de frecuencias ortogonales (OFDM).

Cada frecuencia, con anchura de banda B de 9kHz, tiene capacidad para un único programa, con mejor calidad de sonido que en amplitud modulada, y servicios adicionales de datos (Fig. 14).

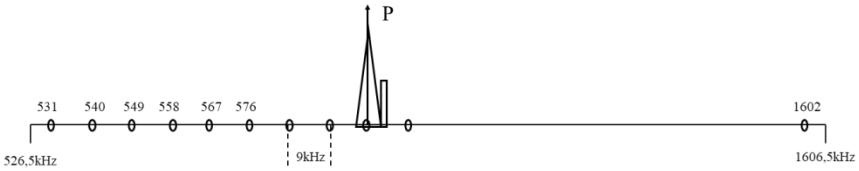


Fig. 14. Espectro de radiodifusión sonora en onda media que incorpora el sistema DRM

5.4 Radiodifusión sonora digital terrenal (T-DAB)

El sistema T-DAB, adoptado en Europa para la radiodifusión digital (RD) de sonido en ondas métricas, utiliza modulación por división de frecuencias ortogonales (OFDM).

Cada bloque de frecuencias RD (Fig. 15), con anchura de banda B de 1536kHz, tiene capacidad para varios programas de sonido, función de la calidad técnica (monofonía, estereofonía, etc.), y servicios adicionales de datos.

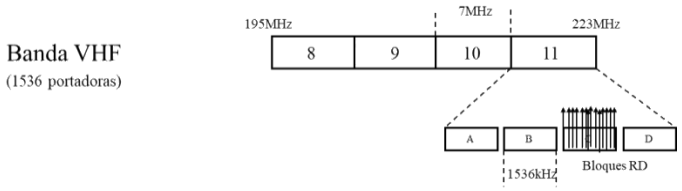


Fig. 15. Canalización de la banda utilizada por las estaciones de radiodifusión sonora digital terrenal en VHF

5.5 Televisión digital terrenal (DVB-T)

El sistema DVB-T, adoptado en Europa para la radiodifusión digital de televisión en ondas decimétricas, utiliza modulación por división de frecuencias ortogonales (OFDM).

Cada canal radioeléctrico, con anchura de 8MHz (Fig. 16), tiene capacidad para varios programas de televisión (canales digitales) y servicios adicionales de datos (múltiple digital). El número de canales digitales de televisión en cada canal radioeléctrico es función de la calidad técnica (estándar, alta definición, ultra alta definición, etc.).

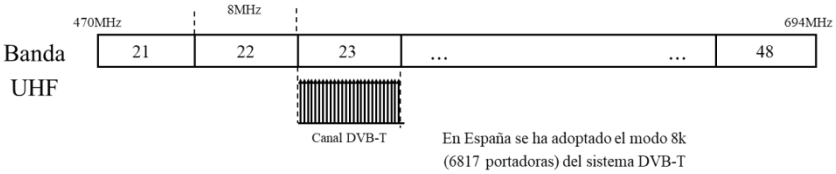


Fig. 16. Canalización de la banda utilizada por las estaciones de televisión digital terrenal en UHF

6. Evaluación de la intensidad de campo eléctrico

Existen diferentes métodos para realizar una estimación de la intensidad de campo eléctrico (E) en un punto a partir de las características radioeléctricas de la estación, de las características de propagación de las ondas radioeléctricas en la banda de frecuencias considerada, y de las características del trayecto de propagación [1].

La atmósfera terrestre tiene varias capas. La capa más próxima al suelo se llama troposfera y entre 50 km y 2.000 km por encima del suelo existe otra capa que se llama ionosfera. La capa ionosférica está ionizada por efecto de la radiación solar; es decir, contiene cargas eléctricas

(iones), y en ella se reflejan las ondas radioeléctricas. La capa troposférica se caracteriza por una temperatura que disminuye a medida que aumenta la distancia sobre el suelo.

La propagación radioeléctrica en cada banda depende de su frecuencia:

- Las ondas hectométricas se propagan, principalmente, por onda ionosférica durante la noche y por onda de superficie durante el día y la noche.
- Las ondas decamétricas se propagan por onda ionosférica.
- Las ondas métricas y las ondas decimétricas se propagan por onda troposférica (visibilidad directa y propagación por reflexión y difracción).

6.1 Propagación en ondas hectométricas

En la banda de ondas hectométricas (MF), la propagación radioeléctrica tiene dos componentes, la propagación por onda de superficie a distancias relativamente cortas y la propagación por onda ionosférica a largas distancias. En la propagación por onda de superficie, las características del terreno (conductividad y permitividad) son esenciales, mientras que en la propagación por onda ionosférica influyen decisivamente las características de la capa ionosférica de la atmósfera, que varían considerablemente a lo largo del día, siendo despreciable durante las horas de sol e intensa durante las horas nocturnas.

La Tierra es conductora para la propagación de las ondas radioeléctricas. La conductividad de la Tierra depende de sus características geológicas. El agua de mar (salada) es buena conductora, pero el agua de ríos y lagos (dulce) es muy mala conductora. La propagación de las ondas por el suelo depende de la frecuencia.

En la propagación por onda de superficie, la estimación de la intensidad de campo E se realiza con el método de la Recomendación UIT-R P.368, que contiene las curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz. A partir de la frecuencia de emisión y de las características de conductividad y permitividad del suelo, se predice, a una cierta distancia, la intensidad de campo E_0 (dBμV/m) para una potencia radiada de 1 kW. Si la potencia de la estación radioeléctrica es P (dBK), la estimación resultante de la intensidad de campo será la siguiente:

$$E\ (\text{dB}\mu\text{V/m}) = E_0\ (\text{dB}\mu\text{V/m}) + P\ (\text{dBK})$$

En la propagación por onda ionosférica, la estimación de la intensidad de campo E se realiza con el método de la Recomendación UIT-R P.1147, que contiene el método de predicción de la intensidad de campo de la onda ionosférica en frecuencias comprendidas entre 150 kHz y 1.700 kHz. A partir de la frecuencia de emisión, la potencia radiada, las coordenadas geográficas de la estación y del punto de recepción, así como del número de manchas solares, se predice la intensidad de campo eléctrico E.

Estos métodos de predicción se encuentran digitalizados para su utilización en sistemas informatizados.

6.2 Propagación en ondas métricas y decimétricas

En las bandas de ondas métricas (VHF) y decimétricas (UHF), la propagación radioeléctrica tiene lugar a través de la capa troposférica de la atmósfera, en la que influyen las características orográficas del terreno a lo largo del trayecto de propagación (ondulación del terreno, características de los obstáculos intermedios, etc.).

Existen varios métodos para realizar la estimación de la intensidad de campo eléctrico, cuya utilización dependerá del grado de detalle que se tenga sobre la orografía del terreno.

Cuando se dispone de un conocimiento limitado de las características de terreno (ondulación, alturas efectivas de la antena de emisión, ángulo de despejamiento en el punto de recepción, etc.), se utiliza el método de predicción de la Recomendación UIT-R P.1546, que contiene las curvas de propagación para frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 3.000 MHz. La predicción se realiza para porcentajes de recepción de la señal entre 1% y 50% del tiempo, y para porcentajes entre 1% y 99% de cobertura de los puntos de la zona de servicio. Estas curvas de propagación se encuentran digitalizadas para su utilización en sistemas informatizados.

Cuando se evalúa la interferencia esporádica en un punto, la intensidad de campo interferente (E_{int}) se estima durante el 1% del tiempo; es decir, se contempla que pueda existir interferencia durante no más del 1% del tiempo; mientras que, cuando se evalúa una interferencia continua, la estimación de la intensidad de campo interferente (E_{int}) se realiza para el 50% del tiempo.

En los sistemas analógicos, la intensidad de campo se estima en el 50% de los puntos de la zona de servicio; mientras que en los sistemas digitales la evaluación se realiza en el 99% de los puntos de la zona de servicio para evitar la pérdida de señal entre puntos próximos.

Cuando se dispone de un conocimiento detallado de las características del terreno; por ejemplo, cuando se dispone del modelo digital del terreno, resulta particularmente útil el método de predicción de la Recomendación UIT-R P.526, que contiene los elementos de cálculo para estimar la propagación por difracción en obstáculos (aristas en filo de cuchillo, formas redondeadas, cilindros múltiples, etc.). Este método de predicción también se encuentra digitalizado para su utilización en sistemas informatizados.

7. Intensidad de campo eléctrico perturbador

En la evaluación de interferencias se utiliza la noción de intensidad de campo eléctrico perturbador (E_{per}) para tener en cuenta la separación en frecuencias entre la señal deseada y la señal interferente a través de la relación de protección (RP), en la siguiente forma:

$$E_{per}\ (\text{dB}\mu\text{V/m}) = E_{int}\ (\text{dB}\mu\text{V/m}) + \text{RP}\ (\text{dB})$$

Las relaciones de protección dependen del servicio deseado y del servicio interferente, de la separación en frecuencia entre la señal deseada y la señal interferente, de la calidad en la recepción del servicio deseado, etc. [2], [3].

En los servicios de radiodifusión sonora y de televisión, objeto de los Planes Técnicos Nacionales (PTN), las relaciones de protección se encuentran en las correspondientes Recomendaciones UIT-R (Tabla 2).

Plan	Denominación	Relaciones de protección
OM	PTN Onda Media	Rec. UIT-R BS.560
FM	PTN Frecuencia Modulada	Rec. UIT-R BS.412
RD	PTN Radio Digital Terrenal	Rec. UIT-R BS.1660
TDT	PTN Televisión Digital Terrenal	Rec. UIT-R BT.1368[1]

Tabla 2. Relaciones de protección para los servicios de radiodifusión (sonora y de televisión)

[1] Las relaciones de protección para la norma DVB-T2 se encuentran en la Recomendación UIT-R BT.2033.

8. Evaluación de la interferencia múltiple

En la planificación radioeléctrica de estaciones de radiodifusión sonora y de televisión resulta necesario evaluar la interferencia múltiple que causan otras estaciones en la zona de servicio de la estación deseada a planificar. La intensidad de campo de la estación deseada debe superar, en su zona de servicio, el efecto combinado de todas las intensidades de campo perturbadoras del resto de estaciones, así como el ruido natural y el ruido artificial.

La zona de cobertura de la estación deseada podría verse afectada por interferencias en diferentes zonas; sin embargo, solo las interferencias que afectan a la zona de servicio son las que deben resolverse (Fig. 17).

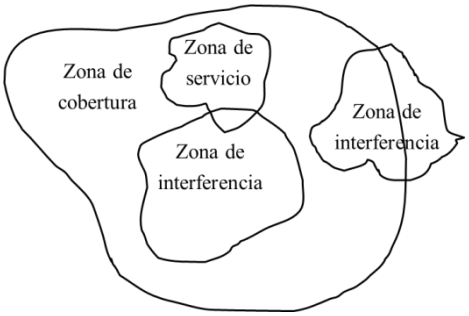


Fig. 17. Zonas de interferencia que afectan a la zona de cobertura y a la zona de servicio

El valor mínimo de la intensidad de campo que permite una recepción satisfactoria en la zona de servicio, en presencia de ruidos e interferencias procedentes de otras estaciones, se denomina intensidad de campo utilizable. Este valor es independientemente de las características de la estación deseada, y puede ser diferente en distintos lugares de la zona de servicio.

Existen diferentes métodos para evaluar el efecto combinado de las señales interferentes, pero en los servicios de radiodifusión sonora y de televisión se utilizan, principalmente, el método de la suma cuadrática y el método de la multiplicación simplificada.

8.1 Método de la suma cuadrática

En el método de la suma cuadrática [4], la intensidad de campo utilizable (E_u) de la estación deseada en un punto de su zona de servicio se calcula fácilmente, sin tener en cuenta una eventual discriminación de la antena receptora, con la siguiente expresión:

$$E_u = [(E_{mín})^2 + \Sigma_i(E_{per\ i})^2]^{1/2}$$

Siendo $E_{mín}$ la intensidad de campo mínima utilizable en ausencia de señales interferentes; es decir, debida únicamente al ruido, y $E_{per\ i}$ la intensidad de campo perturbadora de cada señal interferente en el punto de evaluación. Todas las intensidades de campo expresadas en μV/m.

El método de la suma cuadrática para la evaluación de la interferencia múltiple se aplica cuando no existe ninguna correlación entre las señales interferentes y la señal deseada como ocurre, por ejemplo, en ondas hectométricas (onda media).

8.2 Método de la multiplicación simplificada

En el método de la multiplicación simplificada [4] se considera que la intensidad de campo de la estación deseada es estable (no se dispersa en el tiempo) en comparación con las señales interferentes, y que en el punto de la zona de servicio donde se calcula domina una de las señales interferentes. Además, se considera que las intensidades de campo, expresadas en dB(μV/m), siguen una distribución normal, de manera que puede estimarse la intensidad de campo utilizable (E_u) de la estación deseada en un punto de su zona de servicio por interacción, para una determinada probabilidad de cobertura de los puntos de la zona de servicio y en un porcentaje de tiempo determinado, sin tener en cuenta una eventual discriminación de la antena receptora, mediante la siguiente expresión:

$$p_c = \Pi_i\, L(x_i),\ \text{con}\ x_i = (E_u - E_{per\,i})/\sigma$$

Siendo p_c la probabilidad de cobertura deseada de la zona de servicio, L(x) la integral de probabilidad para una distribución normal, y σ la desviación típica de las intensidades de campo interferentes σ_n y deseado σ_s, de manera que si $\sigma_n = \sigma_s$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_s^2} = \sigma_n\sqrt{2}$$

Y la integral de probabilidad de una distribución normal:

$$L(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} [\exp(-t^2/2)]\, dt$$

Siendo x la diferencia entre los niveles de la intensidad de campo utilizable y de campo perturbador, dividida por la desviación típica.

El método de la multiplicación simplificada para la evaluación de la interferencia múltiple se aplica en las bandas de ondas métricas (σ_n = 8,3dB) y decimétricas ($\sigma_n \geq$ 9,5 dB).

Típicamente, la probabilidad de cobertura p_c es del 50% de los puntos de la zona de servicio en FM y del 95% a 99% en los servicios de radiodifusión digital (RD y TD). El proceso iterativo se repite hasta que se alcanza el valor de la intensidad de campo utilizable E_u para la que se obtiene la probabilidad de cobertura deseada.

9. Métodos de planificación radioeléctrica

En España, los métodos de planificación de frecuencias que se han venido utilizando para la elaboración de los Planes Técnicos Nacionales de radiodifusión (sonora y de televisión) son los siguientes:

- Procedimiento convencional (distancias límite): En un ambiente radioeléctrico existente, se calcula la distancia mínima a la que pueden situarse las estaciones en función de sus características de emisión y de factores geográficos y atmosféricos, de manera que resulten compatibles y proporcionen una calidad técnica satisfactoria en sus respectivas zonas de servicio. Este método se ha utilizado en la planificación de la radiodifusión sonora en frecuencia modulada, en la radio digital local y en la televisión digital local.

- Planificación de frecuencias al trasluz: En hojas de papel traslucidas con la silueta de España se sitúan las estaciones que comparten la misma frecuencia. Cada hoja corresponde a una frecuencia diferente. Solapando las hojas y visualizando al trasluz varias frecuencias adyacentes, se puede analizar la proximidad geográfica entre estaciones, en función de su potencia y de su separación en frecuencia. Este método se ha utilizado

en la planificación de la radiodifusión sonora en onda media para asegurar la compatibilidad a nivel estatal.

- Establecimiento de una retícula teórica: En una banda no utilizada y en un territorio uniforme, se determinan los parámetros técnicos de una malla regular cuyos nodos corresponden a los emplazamientos de las estaciones y definen sus frecuencias. El método se basa en la consideración de características genéricas idénticas de todas las estaciones distribuidas regularmente en un territorio uniforme. Este método se ha utilizado en la planificación de las estaciones municipales de radiodifusión sonora en frecuencia modulada y en la planificación de la televisión analógica.

- Planificación heurísticamente óptima: En la planificación simultánea de muchas estaciones o zonas geográficas, con una gran multiplicidad de soluciones, se establece una matriz de compatibilidad radioeléctrica y se desarrolla un algoritmo que minimice una función de penalizaciones en un plazo de tiempo razonable y determinado. El algoritmo se ejecuta por ordenador y, finalizado el tiempo de ejecución programado, se presenta la mejor solución obtenida en ese tiempo. Quizás no sea la mejor solución, que requeriría un tiempo de ejecución inabordable, pero será la solución heurísticamente óptima. Este método se ha utilizado en la planificación de la televisión digital en redes de frecuencia única de ámbitos autonómico y estatal.

- Generación de adjudicaciones de frecuencias: Procedimiento gráfico en el que las zonas geográficas a planificar son representadas por un diagrama de bolas. Las bolas están enlazadas cuando existe adyacencia radioeléctrica entre las zonas; es decir, cuando no pueden compartir la misma frecuencia. Cuando el número de zonas geográficas o de frecuencias a adjudicar es elevado, se requiere la ayuda de un ordenador. Este método se ha utilizado en la planificación de la televisión digital y de la radio digital en redes de frecuencia única de ámbitos autonómico y estatal.

9.1 Procedimiento de las distancias límite

Este método se utiliza cuando en la zona de planificación ya existen otras estaciones radioeléctricas que conforman el ambiente radioeléctrico. La planificación de nuevas estaciones en ese ambiente requiere determinar las distancias mínimas a las que deben encontrarse las estaciones que utilizan la misma frecuencia o las frecuencias adyacentes para asegurar la compatibilidad, y una calidad técnicamente satisfactoria en sus zonas de servicio, en función de sus características radioeléctricas (potencia, polarización, diagrama de antena, relaciones de protección, etc.), así como factores geográficos (emplazamiento, conductividad del suelo, relieve del terreno, etc.) y atmosféricos (troposfera, ionosfera, etc.).

En la práctica, el método se aplica calculando, en toda la banda disponible y en diferentes puntos de la zona de servicio a cubrir, el diagrama de intensidad de campo utilizable en función de la frecuencia (E_u/f), Fig. 18. En la elaboración de este diagrama se tienen en cuenta las características radioeléctricas de las estaciones existentes, pero no de la estación objeto de planificación; es decir, este diagrama determina cuál sería la intensidad de campo utilizable para la estación a planificar en cada frecuencia de la banda disponible.

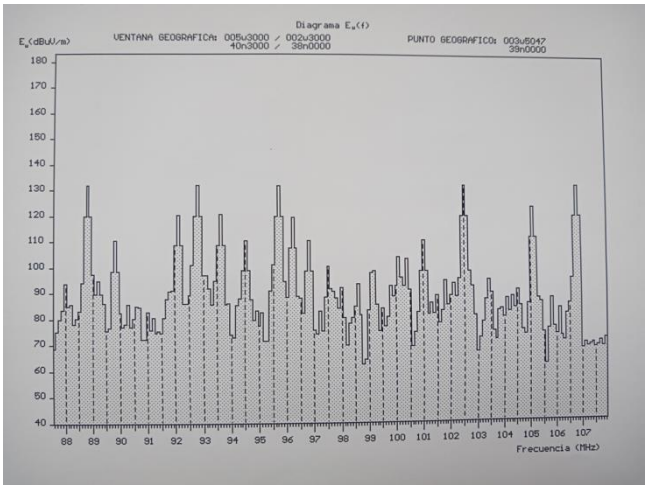


Fig. 18. Diagrama de intensidad de campo utilizable en función de la frecuencia de una estación FM

Las frecuencias candidatas para la estación radioeléctrica objeto de planificación serán las que presenten una intensidad de campo utilizable más baja; es decir, las que reciban menor interferencia.

Ahora bien, la estación objeto de planificación, considerando sus características radioeléctricas, también puede ser causa de provocar interferencias perjudiciales a las estaciones existentes y; por lo tanto, será necesario efectuar los correspondientes análisis de compatibilidad radioeléctrica en las frecuencias candidatas (Fig. 19).

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

Nombre: Barcelona
p.r.a.: 20.000 kW **hef:** 510 m

f: 91.0 MHz
Eu: 106.0 dBµV/m
r: 1.1 km

INTERFERENTES

Nombre	Frec.	Ep
BARCELONA	91.0	101.3
S VICENÇ HORTS	90.9	89.1
IGUALADA	90.9	87.5
TARRAGONA	91.0	82.3
MOLINS REI	91.2	65.9
GAVA	91.2	54.5

INTERFERIDOS

Nombre	Frec.	Ep
BARCELONA	91.0	148.6
S VICENÇ HORTS	90.9	132.6
MOLINS REI	91.2	107.7
IGUALADA	90.9	103.1
TARRAGONA	91.0	101.5
GAVA	91.2	99.3

f: 91.1 MHz
Eu: 99.9 dBµV/m
r: 2.3 km

INTERFERENTES

Nombre	Frec.	Ep
MOLINS REI	91.2	91.6
BARCELONA	91.0	89.3
GAVA	91.2	79.0
MONTORNES VALLES	91.2	77.3
TARRAGONA	91.0	70.3
RIPOLLET	91.3	65.8

INTERFERIDOS

Nombre	Frec.	Ep
BARCELONA	91.0	136.6
MOLINS REI	91.2	133.7
GAVA	91.2	124.5
MONTORNES VALLES	91.2	123.2
RIPOLLET	91.3	107.7
ARENYS MAR	91.2	107.2

f: 91.2 MHz
Eu: 109.1 dBµV/m
r: 0.8 km

INTERFERENTES

Nombre	Frec.	Ep
MOLINS REI	91.2	103.6
RIPOLLET	91.3	91.5
GAVA	91.2	91.0
MONTORNES VALLES	91.2	89.3
ARENYS MAR	91.2	71.8
CASTELLON	91.2	65.5

INTERFERIDOS

Nombre	Frec.	Ep
MOLINS REI	91.2	145.7
GAVA	91.2	136.5
MONTORNES VALLES	91.2	135.2
RIPOLLET	91.3	133.7
ARENYS MAR	91.2	119.2
PIERA	91.3	111.5

Fig. 19. Análisis de estaciones interferentes e interferidas

Esta planificación de asignaciones se realiza con la ayuda de un sistema informático integrado que contiene todos los algoritmos necesarios de ingeniería del espectro de frecuencias, el modelo digital del terreno de España y de los países vecinos, y las bases de datos que contiene todas las estaciones españolas y extranjeras, que han sido internacionalmente coordinadas.

9.2 Planificación de frecuencias al trasluz

Este método de planificación radioeléctrica fue ideado para ser utilizado en la banda de ondas hectométricas, 526,5-1606,5 kHz, también denominada banda de ondas medias.

Esta banda de frecuencias presenta unas condiciones de propagación radioeléctrica muy peculiares: propagación por onda de superficie (señal estable) y propagación por onda inosférica (señal inestable o fluctuante).

La propagación radioeléctrica por onda de superficie depende de la conductividad del terreno debida a sus características geológicas. La conductividad del terreno es mejor en frecuencias bajas. Típicamente, y en función de la potencia de la estación, se alcanzan distancias inferiores a unas pocas decenas de kilómetros (corto alcance). La señal de onda de superficie predomina durante el día, y proporciona una zona de cobertura con calidad satisfactoria.

La propagación radioeléctrica por onda ionosférica depende de la densidad en la atmósfera de cargas eléctricas (iones) debidas al efecto de la radiación solar. En esa capa de la atmósfera (ionosfera) se reflejan las ondas de radio. Típicamente, y en función de la potencia de la estación, se alcanzan distancias de cientos de kilómetros (largo alcance). La señal de onda ionosférica es mucho más intensa de noche que de día, proporcionando zonas de cobertura donde la calidad de servicio no suele ser satisfactoria.

La propagación por onda ionosférica es la causa principal de las interferencias entre estaciones de onda media, reduciendo sensiblemente, durante la noche, la cobertura proporcionada por la onda de superficie.

La orografía, el relieve, y la rugosidad del terreno, no tienen trascendencia en la banda de ondas medias.

La planificación de asignaciones de frecuencias destinadas a estaciones de onda media se realiza en tres niveles territoriales: local, estatal e internacional.

A nivel local debe considerarse la proximidad en frecuencia y la generación de productos de intermodulación entre frecuencias a utilizar en la misma localidad. Considerando la selectividad de los receptores, la mínima separación en frecuencia de dos estaciones de onda media que cubran total, o parcialmente, la misma zona de servicio es 27 kHz bajo ciertas condiciones de potencia; es decir, 3 canales de 9 kHz. En la práctica, la mínima separación en frecuencia utilizada en España es de 36 kHz en la misma localidad. Por otra parte, si dos frecuencias utilizan la misma antena deben separarse más de 150 kHz. Los productos de intermodulación a tener en cuenta en esta banda son de segundo orden $2f_1$, y $f_1 \pm f_2$ y de tercer orden $2f_1 - f_2$. En la práctica, únicamente se presentan interferencias por esta causa en circunstancias singulares (proximidad de los sistemas radiantes, saturación de receptores próximos, etc.).

A nivel estatal se analiza la influencia mutua entre las estaciones españolas de onda media cuyas frecuencias se encuentren a menos de 27 kHz, en función de su proximidad geográfica y asegurando su compatibilidad radioeléctrica tanto de día como, sobre todo, durante la noche.

A nivel internacional se estudia la compatibilidad radioeléctrica con las estaciones de onda media de los países vecinos; es decir, que no se reciba interferencia procedente de esas estaciones, ni se cause interferencia a esas estaciones, ni de día ni de noche. En este estudio se realiza una estimación de las dificultades que puedan presentarse en la coordinación con los países vecinos para obtener el reconocimiento internacional del uso de la frecuencia y la protección internacional frente a interferencias. En el caso de la banda de ondas medias, puede considerarse que son países vecinos todos los que se encuentren a menos de 3.000 km de España.

Cuando se elaboró el Plan de estaciones de radiodifusión sonora en onda media había un ambiente radioeléctrico muy congestionado durante la noche, tanto debido a estaciones españolas como a estaciones extranjeras.

Al objeto de mejorar la calidad del servicio era necesario identificar nuevas frecuencias utilizables inferiores a 1.000 kHz, porque en esas frecuencias la propagación por onda de superficie es mejor. Por lo tanto, el criterio general fue intentar desplazar al mayor número posible de estaciones a frecuencias más bajas.

Las estaciones españolas de radiodifusión sonora en onda media se dividen en estaciones estatales y estaciones privadas. Las estaciones estatales, con la emisión de dos programas, eran las únicas que funcionaban en redes sincronizadas para reducir la interferencia mutua en la misma frecuencia. Sin embargo, también pueden compartir la misma frecuencia las estaciones privadas que, por estar asociadas entre sí, transmiten el mismo programa durante la noche, de manera que se reduce el efecto de la interferencia mutua aunque esas estaciones no se encuentren sincronizadas.

En aquella época, en la que no existían herramientas informáticas eficaces de ayuda, la planificación radioeléctrica tenía una gran componente artesanal. Se disponía de algunas herramientas informáticas rudimentarias, todavía no integradas en un único sistema informático, que permitían calcular los productos de intermodulación, realizar estimaciones de la intensidad de campo de la onda ionosférica, y calcular el efecto combinado de la interferencia múltiple por el método de la suma cuadrática de potencias.

Con las escasas herramientas informáticas disponibles, se identificaron las nuevas frecuencias que podrían utilizarse en España, sin causar interferencia perjudicial a las estaciones extranjeras. De esta manera, se superaba el nivel de planificación internacional.

En el nivel de planificación territorial estatal, se utilizó la planificación de frecuencias al trasluz [5]. En este método se dibuja la silueta de España en hojas traslucidas. Cada hoja corresponde a una frecuencia y en ellas se marca con un punto la ubicación de las estaciones previstas en cada frecuencia (Fig. 20).

Fig. 20. Hojas-frecuencias con la ubicación de las estaciones de onda media

Visualizando al trasluz (Fig. 21) hasta un máximo de 3 hojas (separación en frecuencia inferior a 27 kHz) se analiza la proximidad geográfica entre estaciones, desplazando algunas estaciones de unas hojas a otras, en una estrategia de ensayo y error, si se considera que dos estaciones están demasiado cerca en función de su potencia y de su separación en frecuencia, teniendo en cuenta, también, la compatibilidad a nivel local.

Fig. 21. Solapamiento de tres hojas-frecuencias

9.3 Establecimiento de una retícula teórica

Este método se basa en la teoría de redes de estaciones con características idénticas (potencia, antena no directiva, altura de antena, etc.), donde la zona de planificación es plana y cualquier frecuencia de la banda objeto de planificación puede ser utilizada [6].

Bajo esas condiciones, la mejor y más eficaz estructura es una red regular formada por una malla de triángulos equiláteros (retícula) cuyos vértices (nodos) son los emplazamientos de las estaciones y definen la frecuencia compatible. En esa malla las frecuencias cocanal describen rombos.

No existe una red regular para cualquier número de frecuencias disponibles, sino solamente para aquellos números enteros p y q, distintos de cero, sin ningún divisor común entre sí ni con N, que cumplen $p^2+pq+q^2=N$, siendo N el número de frecuencias disponibles, también denominado número rómbico. Si p=3 y q=1, entonces N=13 es el número rómbico (Fig. 22).

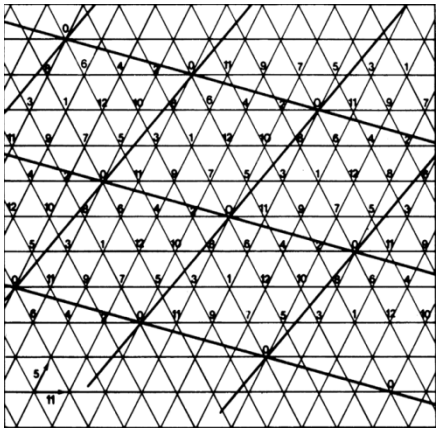


Fig. 22. Red regular para 13 frecuencias

Este método se ha utilizado para la planificación de asignaciones de frecuencias destinadas a estaciones municipales de radiodifusión sonora en frecuencia modulada (FM). En España, el último megahercio de la banda 87,5-108 MHz; es decir, las 10 frecuencias entre 107,0 MHz y hasta 107,9 MHz se han reservado a las estaciones municipales. El número 10 no es un número rómbico, pero puede utilizarse la malla del número rómbico 13 descartando 3 frecuencias (Fig. 23). En la práctica, teniendo en cuenta que la zona de planificación no es plana, esto concede un mayor grado de libertad al asignar frecuencias.

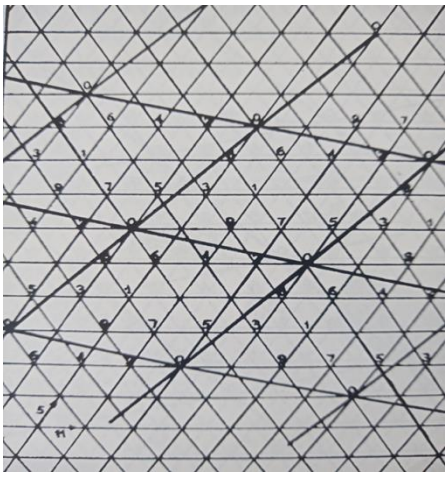


Fig. 23. Red regular para 13-3 frecuencias

Existen tres tipos de estaciones municipales en función de la población censada, y a cada tipo corresponde una potencia radiada aparente (p.r.a.) de referencia (Tabla 3).

Tipo	Población censada	$p.r.a._{ref}$
A	Más de 50.000 habitantes	500 W
B	Entre 10.000 y 50.000 habitantes	150 W
C	Menos de 10.000 habitantes	50 W

Tabla 3. Tipos de estaciones municipales en radiodifusión FM

Los valores de las potencias radiadas aparentes de referencia son los valores máximos de potencia que se utilizan en la planificación y, en la práctica, no podrán ser superados nunca. Por otra parte, independientemente de la polarización de la emisión, la potencia radiada aparente de referencia es la potencia radiada aparente total, suma de las potencias radiadas en cada plano de polarización. Por lo tanto, en el caso particular de polarización circular, la potencia radiada aparente en cada plano de polarización será la mitad de la potencia radiada aparente de referencia.

En general, la potencia radiada que debe corresponder a una estación es función de la extensión de su zona de servicio y de las características orográficas de su entorno. Debido al elevado número de municipios que existen en España (más de 8.000), y por razones de homogeneidad, se puede suponer, a grandes rasgos, que un municipio es más extenso cuando más población tiene.

Por otra parte, la consideración sobre las características orográficas del entorno se tiene en cuenta en el parámetro altura efectiva de la antena que, independientemente del tipo de estación, se ha limitado a 37,5 m. En consecuencia, la cobertura de la zona de servicio, fijada la altura efectiva de la antena, será más o menos amplia en función de la mayor o menor potencia radiada de la

estación y, por tanto, de la población censada. La altura efectiva de la antena, en una dirección determinada, se define como la altura entre el centro eléctrico de la antena y el nivel medio del terreno, entre las distancias de 3 km y 15 km, en esa dirección. Como, en general, el relieve del terreno es distinto en cada dirección existirá una altura efectiva diferente para cada dirección.

Las estaciones municipales deben estar situadas dentro del casco urbano de la población a la que sirven, mientras no causen interferencias a otros servicios de radiocomunicaciones. Debido al carácter verdaderamente local de estas estaciones, y a sus características restringidas de potencia y altura efectiva, es lógico que se sitúen dentro del casco urbano con el fin de limitar su zona de cobertura y de no causar perturbaciones a otras estaciones próximas. Sin embargo, en ocasiones, la presencia de una estación de radiodifusión en el interior de zonas habitadas es causa de interferencias a otros servicios de radiocomunicaciones, generalmente debidas a la saturación de los receptores próximos. Este efecto depende directamente de los niveles de potencia radiada de la estación y de la sensibilidad de los receptores. En tal caso, las estaciones municipales deben estar situadas fuera del casco urbano, pero lo más próximas posible al núcleo de población y emplear antenas con características de radiación directivas de manera que se eviten las interferencias sobre las zonas de servicio de otras estaciones.

Para posibilitar la planificación del mayor número de estaciones municipales, se ha fijado la relación de protección cocanal en 28 dB que garantiza una calidad de servicio monofónica satisfactoria. Esta relación de protección cocanal corresponde a una anchura de banda necesaria de las emisiones de 180 kHz, con excursión máxima de frecuencia de ±75 kHz, y estimación de que la interferencia será de origen troposférico.

La utilización de una retícula de 13 frecuencias, basada en las características técnicas de las estaciones municipales tipo B, donde siempre tendrán cabida las estaciones de tipo C, de menor potencia, y las de tipo A sólo en zonas no congestionadas, determina una distancia de reutilización cocanal de 25 km y una distancia entre nodos de 7 km.

La retícula se superpone a un mapa geográfico de escala apropiada en el que estén representados todos los posibles emplazamientos deseados para situar cada estación; en este caso, los emplazamientos se suponen en el centro geográfico de las poblaciones. El procedimiento general de planificación consiste en la asignación a cada población de la frecuencia que se encuentre más próxima al nodo de la estructura reticular.

Aunque la banda de frecuencias 107,0-107,9 MHz se ha reservado exclusivamente para las estaciones municipales, dicha banda no puede ser utilizada en la proximidad de aeropuertos (a menos de 30 km) debido a que las instalaciones aeronáuticas de aterrizaje sin instrumentos (ILS), del servicio de radionavegación aeronáutica por encima de 108 MHz, podrían ser interferidas perjudicialmente.

Tampoco se puede utilizar dicha banda cuando exista riesgo de interferencias a otros servicios de radiocomunicaciones. Por ejemplo, el canal conjugado de las estaciones que operan en la banda 107,0-107,9 MHz se produce en la banda 96,3-97,2 MHz. Por lo tanto, aquellos municipios en los que exista una estación de radiodifusión en la banda 96,3-97,2 MHz no deben utilizar la banda 107,0-107,9 MHz.

Obviamente, la distribución de poblaciones en España no sigue la geometría de la retícula. Existen rombos de la retícula sin poblaciones y, por el contrario, otros rombos incluyen varias poblaciones. Además, teniendo en cuenta el entorno geográfico (densidad de población, proximidad de aeropuertos, etc.) y el entorno radioeléctrico, existirán zonas geográficas congestionadas donde será prácticamente imposible la aplicación directa del método reticular para la asignación de frecuencias. Cuando no es posible asignar una frecuencia de la retícula debe

determinarse otra frecuencia, fuera de la banda reservada a las estaciones municipales, mediante otros métodos de planificación, tal como el método de las distancias límite.

El método de planificación de la retícula teórica permite determinar en cualquier momento la frecuencia que le corresponderá a cada municipio y, por lo tanto, facilita la asignación posterior de nuevas frecuencias a estaciones municipales.

Este método también fue utilizado para la planificación de frecuencias a estaciones de televisión analógica en la banda de ondas decimétricas 470-830 MHz que, con una anchura de 8 MHz por canal, contaba con 45 canales numerados del 21 al 65. Con este método se diseñó una malla regular que establecía que en cada nodo se asignaban tres canales que seguían la secuencia n, n+3, n+6, denominada terna.

9.4 Planificación heurísticamente óptima

El proceso de transición de la televisión analógica hacia la televisión digital se realizó en varias fases. Inicialmente, la televisión analógica ocupaba toda la banda 470-830 MHz, en los canales 21 a 65, con unas 13.000 estaciones radioeléctricas, siendo la inmensa mayoría re-emisores de baja o muy baja potencia, que reciben la señal de una estación principal en un canal y la retransmiten por otro canal. En la primera fase, se introdujo la televisión digital en los canales 57 a 65 (9 canales), y las estaciones de televisión analógica que utilizaban esos canales fueron desplazadas paulatinamente a otros canales en la parte baja de la banda en un largo proceso. Durante ese proceso, esta parte de la banda estuvo compartida por estaciones de televisión analógica y digital.

La introducción de la televisión digital terrenal en los canales 57 a 65 (banda 758-830 MHz), en un ambiente radioeléctrico muy congestionado por la existencia de numerosas estaciones de televisión analógica, se realizó con el método de planificación heurísticamente óptima [7] para los ámbitos de cobertura estatal (integrada por los territorios autonómicos) y autonómica (integrada por los territorios provinciales), procurando no causar un gran impacto sobre la televisión analógica existente y con la ventaja de poder aprovechar gran parte de las infraestructuras existentes tanto en transmisión como en recepción.

Una de las ventajas y una de las características más importantes de la televisión digital terrenal consiste en la posibilidad de instalar estaciones en el mismo canal radioeléctrico, difundiendo la misma programación a una determinada zona geográfica, sin que se produzcan interferencias mutuas. El conjunto de esas estaciones se denomina red de frecuencia única (SFN). La zona geográfica puede tener el tamaño de una demarcación local, o una provincia, o una Comunidad Autónoma, o el territorio de todo el Estado. Por lo tanto, con la tecnología digital es posible realizar una gran economía de canales radioeléctricos utilizando estaciones de televisión en red de frecuencia única para cubrir amplias extensiones de territorio que, de otra forma, con tecnología analógica, requeriría un mayor consumo de frecuencias.

Por otra parte, los servicios de radiocomunicaciones de los países vecinos pueden limitar el desarrollo completo de las redes de frecuencia única si no se obtienen los correspondientes acuerdos de coordinación internacional que garanticen la compatibilidad radioeléctrica mutua.

La planificación radioeléctrica de redes de frecuencia única, por ejemplo, de ámbito provincial o de ámbito territorial autonómico, es un problema similar al de pintar un mapa geográfico de manera que dos zonas adyacentes no tengan el mismo color. La banda 758-830 MHz, correspondiente a los nueve canales numerados 57 a 65, fue seleccionada para el establecimiento de redes de frecuencia única en cada una de las Ciudades (2) o Comunidades Autónomas (17) y en cada una de las provincias (52). Por lo tanto, se trataba de pintar 71 zonas geográficas con 9

colores (canales), pero el número de estaciones de televisión analógica que tuvieran que cambiar de canal tendría que ser el menor posible y afectar a la menor población posible.

Al objeto de asegurar el menor impacto sobre las estaciones de televisión analógica, se implementó un método automático por ordenador para la adjudicación de canales a zonas geográficas basado en un sistema que permite obtener una solución heurísticamente óptima con vistas a minimizar el número total de estaciones de televisión analógica que tendrían que cambiar de canal. Dicha herramienta informática se aplica simultáneamente a un total de 71 zonas geográficas a las cuales se debe adjudicar un canal (plan de adjudicaciones), y sólo uno, comprendido entre 57 y 65 (9 canales a adjudicar), teniendo en cuenta la penalización (número de estaciones de televisión analógica afectadas) correspondiente a cada canal en cada zona geográfica, y considerando que dos zonas radioeléctricamente adyacentes no pueden tener adjudicado el mismo canal.

Las zonas geográficamente adyacentes también lo son radioeléctricamente pero, algunas zonas que no son geográficamente adyacentes lo pueden ser radioeléctricamente en función de las condiciones de propagación de las ondas y de los criterios de protección radioeléctrica.

La matriz de penalizaciones en cada canal y en cada zona (matriz de 71 zonas por 9 canales) también consideraba que son canales prohibidos; es decir, que no pueden ser adjudicados a una zona, aquellos canales utilizados por las estaciones principales que prestan servicio a las grandes ciudades y a las capitales de provincia o autonómicas que se encuentren en esa zona, así como aquellos canales que son utilizados en las zonas fronterizas o costeras por las estaciones principales de los países vecinos (Tabla 4).

	57	58	59	60	61	62	63	64	65
CAL	49	999	999	999	999	999	999	999	999
VA	4	0	2	6	1	1	7	1	1
SG	1	5	1	1	5	1	0	3	1
SO	4	2	3	2	1	3	3	2	3
BU	16	999	14	20	11	13	17	999	13
P	4	999	999	2	999	1	1	4	999
LE	7	8	999	5	7	999	6	5	2
ZA	2	999	0	3	999	999	3	999	999
SA	5	3	2	999	5	2	999	5	1
AV	6	6	999	6	5	999	3	3	999
CAM	999	999	19	999	999	999	999	999	999
CR	3	999	1	2	999	1	2	1	1
AB	4	8	5	5	6	999	4	5	999
CU	999	3	10	999	1	9	999	2	8
GU	2	2	2	2	999	2	1	999	0
TO	3	4	1	3	2	0	999	4	1
ARA	999	999	10	999	5	9	999	999	11
TE	8	4	6	6	4	6	4	3	7
Z	999	1	3	999	0	2	0	1	3
HU	0	999	1	999	1	1	999	999	1
AND	39	999	999	999	999	999	999	999	999
SE	4	1	2	999	1	2	999	1	2
CO	4	999	999	4	999	999	4	999	999
J	999	999	5	999	999	5	999	999	5
GR	6	5	999	999	5	999	999	5	999
AL	6	999	2	6	999	2	6	999	2
MA	7	999	999	7	999	999	7	999	999
CA	6	999	6	999	999	6	999	999	6
H	2	5	999	999	5	999	999	5	999
VAL	999	14	999	999	999	999	999	999	999
CS	2	999	999	0	999	999	1	999	999
V	2	7	5	4	9	4	2	8	5
A	999	4	2	999	999	2	999	999	2
PVA	21	999	999	999	999	999	17	999	999
BI	6	4	999	999	1	999	1	2	999
SS	9	999	999	3	999	999	9	999	999
VI	6	2	3	5	6	2	7	2	2
NAV	999	999	7	999	999	3	999	8	999
NA	999	999	7	999	999	3	999	8	999
RIO	3	5	999	2	4	2	4	2	999
LO	3	5	999	2	4	2	4	2	999
MUR	1	3	999	0	3	999	1	3	999
MU	1	3	999	0	3	999	1	3	999
CAT	999	999	999	999	34	999	999	31	999
GI	999	10	999	4	999	999	999	999	999
L	999	7	999	9	999	999	8	999	999
T	999	999	1	999	999	1	999	999	2
B	999	999	999	999	13	999	999	11	999
BAL	999	999	999	3	999	999	2	999	1
PM	999	999	999	3	999	999	2	999	1
EXT	999	999	999	999	5	999	3	999	999
CC	999	5	999	999	3	999	1	5	999
BA	5	999	0	4	2	0	2	999	0
AST	18	22	24	7	15	17	9	14	19
O	18	22	24	7	15	17	9	14	19
CAN	5	6	5	999	5	4	999	6	4
S	5	6	5	999	5	4	999	6	4
GAL	999	11	999	999	999	999	8	999	999
C	5	3	999	6	1	999	3	1	999
LU	999	999	4	999	999	4	0	999	5
PO	3	0	1	3	999	999	2	999	999
OR	999	999	2	999	999	1	999	999	2
MAD	9	4	999	4	4	999	2	4	999
M	9	4	999	4	4	999	2	4	999
CEU	1	999	0	999	999	0	1	999	0
CE	1	999	0	999	999	0	1	999	0
MEL	1	0	999	1	0	999	1	0	999
ML	1	0	999	1	0	999	1	0	999
CNR	999	16	999	7	23	11	999	18	10
TF	999	13	7	3	16	7	999	13	8
GC	7	3	999	4	7	4	5	5	2

999: Canal prohibido

Tabla 4. Matriz de penalizaciones de 71 zonas x 9 canales

Por otra parte, teniendo en cuenta que dos zonas geográficas radioeléctricamente adyacentes no pueden tener adjudicado el mismo canal, se estableció una matriz de incompatibilidades por adyacencia radioeléctrica (matriz simétrica, cuadrada de 71 zonas por 71 zonas, y binaria de ceros y unos) para indicar cuando dos zonas son compatibles en el mismo canal (0) y cuando son incompatibles en el mismo canal (1), Tabla 5. Obviamente, se considera que las provincias son incompatibles en el mismo canal con la comunidad autónoma a la que pertenecen.

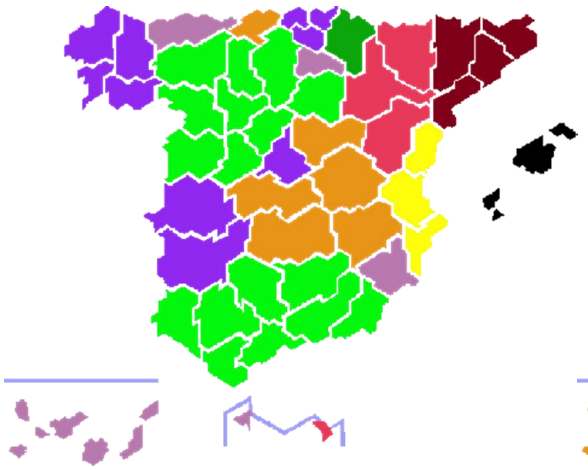
Zonas geográficas: 19 Comunidades Autónomas
52 Provincias

Matriz cuadrada de 71 filas y 71 columnas, simétrica respecto de la diagonal principal

0 : Zonas geográficas compatibles en el mismo canal
1 : Zonas geográficas incompatibles en el mismo canal

Tabla 5. Matriz de incompatibilidades por adyacencia radioeléctrica de 71 zonas x 71 zonas

La aplicación informática descarta todas las combinaciones incompatibles, selecciona la que va acumulando una penalización global menor, y presenta la mejor solución en un tiempo de ejecución razonable.



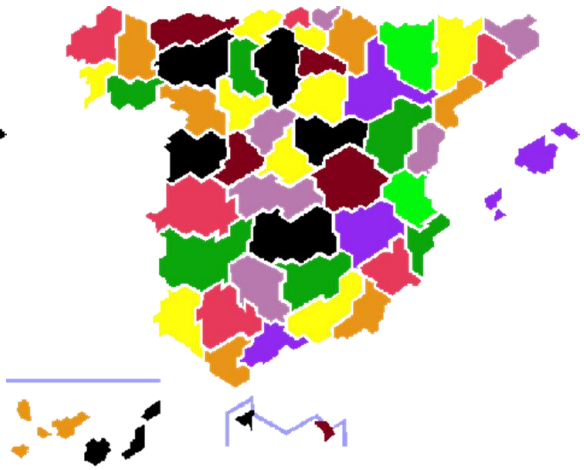


Fig. 24. Cobertura estatal, desconexiones autonómicas Fig. 25. Coberturas autonómicas, desconexiones provinciales

El mapa de la Fig. 24 representa el ámbito de cobertura estatal, que permite efectuar desconexiones territoriales autonómicas, y el mapa de la Fig. 25 representa el ámbito de cobertura autonómica, que permite efectuar desconexiones territoriales provinciales. Cada color representa un canal diferente. Ambos mapas utilizan los mismos 9 colores (canales). Las zonas radioeléctricamente adyacentes no tienen el mismo color. El solapamiento de ambos mapas

tampoco utiliza el mismo color en el mismo territorio ni en los radioeléctricamente adyacentes son, por lo tanto, compatibles.

En resumen, en la banda 758-830MHz (canales 57 a 65), compartida con la televisión analógica, se elaboró un plan de frecuencias para dos redes con capacidad para efectuar desconexiones regionales. Una de esas redes, constituida por diferentes SFNs en cada una de las Ciudades (2) y Comunidades Autónomas (17), permite efectuar desconexiones de ámbito autonómico, y la otra red, constituida por una SFN en cada provincia (52), permite efectuar desconexiones de ámbito provincial. En la elaboración de este plan se trataba de pintar 71 zonas geográficas (provincias y autonomías) con 9 colores (canales radioeléctricos) minimizando una función de penalizaciones. Se implementó un método automático por ordenador para la adjudicación de canales a zonas geográficas, basado en un algoritmo que permite obtener una solución heurísticamente óptima con vistas a minimizar la población afectada por cambios de canal en las estaciones de televisión analógica.

9.5 Generación de adjudicaciones de frecuencias

La televisión digital terrenal requiere menos espectro radioeléctrico que la televisión analógica para difundir mayor número de canales de televisión. En cada canal radioeléctrico podía transmitirse un único canal de televisión analógica. Con la tecnología digital, en cada canal radioeléctrico pueden transmitirse varios canales de televisión cuyo número depende de la calidad tecnológica (vídeo, convencional, mejorada, alta definición, ultra alta definición, tridimensional, etc.).

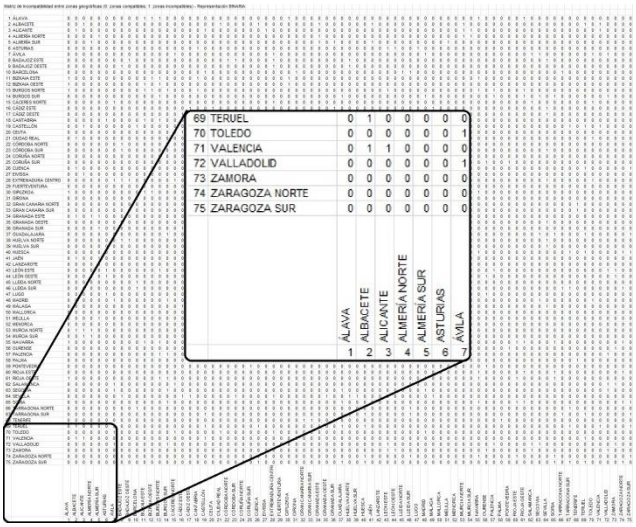
En las siguientes fases del proceso de transición de la televisión analógica hacia la televisión digital fueron cesando las emisiones en las estaciones de televisión analógica, y la televisión digital se desplazó a la banda 470-694 MHz, canales 21 a 48 (28 canales radioeléctricos). En esta banda fue necesario realizar una nueva planificación radioeléctrica teniendo en cuenta los diferentes tipos de desconexión territorial, procurando minimizar el impacto sobre el usuario final mediante el aprovechamiento de las infraestructuras existentes, y obteniendo el acuerdo de coordinación internacional con los países vecinos para garantizar la compatibilidad radioeléctrica mutua.

Las desconexiones territoriales, en realidad, no coinciden exactamente con los territorios administrativos (provincias y comunidades) sino con las zonas de difusión. La zona de cobertura global obtenida por una estación principal y todas sus estaciones re-emisoras se denomina zona de difusión. En España hay 75 zonas de difusión (Fig. 26).

Fig. 26. Mapa con las zonas de difusión

Por lo tanto, para la planificación de la banda 470-694 MHz se contaba con 75 zonas de difusión y 28 canales radioeléctricos, y se ideó un nuevo método para la generación de adjudicaciones de canales a cada zona de difusión (plan de adjudicaciones).

Una red de frecuencia única (SFN) puede abarcar varias zonas de difusión. La cobertura de ámbito estatal es el conjunto de todas sus zonas de difusión. A partir de las características radioeléctricas genéricas de las estaciones que constituyen cada SFN, y en función de las condiciones de propagación de las ondas y de los criterios de protección radioeléctrica, se construye una matriz de incompatibilidades radioeléctricas (MIR), binaria, cuadrada y simétrica de 75 zonas x 75 zonas, que representa con "1" la incompatibilidad en el mismo canal y con "0" la compatibilidad en el mismo canal de las zonas de difusión (Tabla 6). Se considera que las zonas de difusión de diferentes múltiples son radioeléctricamente adyacentes cuando resultan incompatibles en el mismo canal radioeléctrico. Por lo tanto, una MIR proporciona información sobre las zonas de difusión radioeléctricamente adyacentes.



	ÁLAVA 1	ALBACETE 2	ALICANTE 3	ALMERÍA NORTE 4	ALMERÍA SUR 5	ASTURIAS 6	ÁVILA 7
69 TERUEL	0	1	0	0	0	0	0
70 TOLEDO	0	0	0	0	0	0	1
71 VALENCIA	0	1	1	0	0	0	0
72 VALLADOLID	0	0	0	0	0	0	1
73 ZAMORA	0	0	0	0	0	0	0
74 ZARAGOZA NORTE	0	0	0	0	0	0	0
75 ZARAGOZA SUR	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6. Matriz de incompatibilidades radioeléctricas (MIR) de 75 zonas x 75 zonas

A partir de la MIR, se construye el diagrama de adyacencia radioeléctrica (DAR) de la televisión digital en España. En este diagrama, cada zona de difusión se representa por un círculo y las zonas que son radioeléctricamente adyacentes se unen con una línea (Fig. 27).

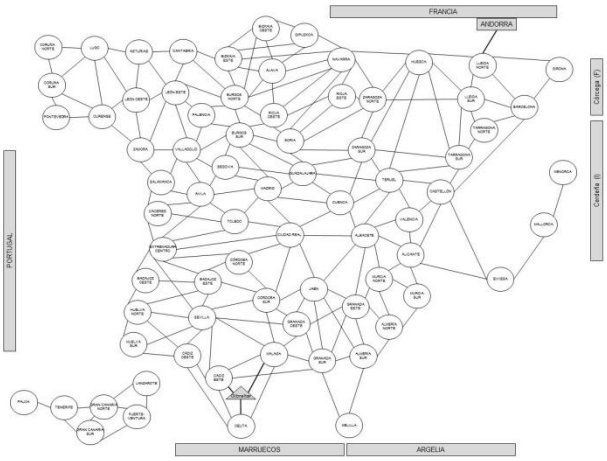


Fig. 27. Diagrama de adyacencia radioeléctrica (DAR)

A cada zona de difusión de un múltiple se le adjudica un canal y todas las estaciones situadas en esa zona tendrán asignado el mismo canal (red de frecuencia única). En principio, cada zona de difusión podría recibir cualquier canal, pero las condiciones de contorno (canales en servicio, antiguos canales analógicos, servicios de los países vecinos, desconexiones territoriales, etc.) hacen preferibles algunos canales antes que otros. Sin embargo, únicamente serán válidas las soluciones que aseguren que, en las zonas radioeléctricamente adyacentes, el mismo canal no es utilizado por otras redes, según los criterios de desconexión territorial de las diferentes redes.

Para facilitar la planificación de los canales radioeléctricos y garantizar la inexistencia de errores, incoherencias o incompatibilidades, se desarrolló una herramienta informática para la generación de las adjudicaciones que implementa un conjunto de diagramas de adyacencia radioeléctrica, tanto por canales radioeléctricos como por redes. En estos diagramas basta con señalar el canal o el múltiple que se desea estudiar y, automáticamente, se representa la información de forma gráfica.

La planificación de adjudicaciones con este método [8] es un proceso semiautomático de ensayo y error en el que se adjudican los canales a las distintas zonas de difusión de las diferentes redes de cobertura estatal y autonómica y, cuando se produce una incompatibilidad por adyacencia radioeléctrica, la herramienta informática avisa del error. Este método de planificación es dinámico y facilita la coordinación internacional de frecuencias al permitir probar alternativas de canal instantáneamente.

10. Coordinación internacional de frecuencias

La planificación de frecuencias tiene una importante repercusión internacional debido a que las ondas radioeléctricas no se detienen en las fronteras, y se propagan más allá de los límites administrativos de los países, pudiendo provocar interferencias si no se coordinan técnicamente las frecuencias y los canales que utilizan tanto las estaciones de radio y televisión como las estaciones de otros servicios de radiocomunicaciones.

La coordinación radioeléctrica internacional tiene por objeto obtener

- el reconocimiento internacional derivado del acuerdo con otras Administraciones para utilizar las frecuencias en unas determinadas condiciones, y
- la protección internacional frente a interferencias perjudiciales debidas a la utilización de otras frecuencias.

La coordinación se realiza mediante consulta directa con las Administraciones de otros Estados o, en su caso, a través de la UIT. En ocasiones se celebran reuniones bilaterales o multilaterales de coordinación de frecuencias para acelerar la obtención de los acuerdos.

Cuando se alcanza un acuerdo, el resultado de la coordinación suele ser la imposición de limitaciones de potencia en determinadas direcciones para asegurar la compatibilidad radioeléctrica con las estaciones de otros países.

11. Referencias

[1] *"Propagación de las ondas radioeléctricas"*, Recomendaciones UIT-R P. https://www.itu.int/rec/R-REC-P/es

[2] *"Servicio de radiodifusión sonora"*, Recomendaciones UIT-R BS. https://www.itu.int/rec/R-REC-BS/es

[3] *"Servicio de radiodifusión de televisión"*, Recomendaciones UIT-R BT.
https://www.itu.int/rec/R-REC-BT/es

[4] *"Métodos para el cálculo de múltiples interferencias"*, UIT-R, Informe 945 (1990)
https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BS.945-2-1990-PDF-S.pdf

[5] *"Planificación de frecuencias al trasluz"*, J. R. Camblor (2008)
https://forohistorico.coit.es/index.php/sendas/tecnologica-en-espana/item/planificacion-de-frecuencias-al-trasluz

[6] *"Planificación de una red teórica"*, UIT-R, Informe 944 (1982)
https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-BS.944-1982-PDF-S.pdf

[7] *"Proceso de elaboración del plan de la televisión digital terrenal"* (pags. 462 y 463 en Detrás de la cámara), J. R. Camblor y R. Alvariño (2008)
https://forohistorico.coit.es/index.php/biblioteca/libros-electronicos/item/detras-de-la-camara-historia-de-la-television-y-de-sus-cincuenta-anos-en-espana-2008

[8] *"Métodos de planificación radioeléctrica de la televisión digital"*, J. R. Camblor y J. L. Sánchez (2014)
https://www.coit.es/archivo-bit/octubre-2014/metodos-de-planificacion-radioelectrica-de-la-television-digital