

# Fundamento Teórico

---

Una vez hemos definido el alcance y los objetivos marcados en la elaboración del proyecto, se dedica este segundo capítulo a realizar una introducción teórica de todos los conceptos de los que se hace uso en el proyecto y que son necesarios para una mejor comprensión de los procedimientos o el escenario sobre el que se desarrollan los trabajos.

La base teórica que se requiere para el proyecto que nos ocupa es muy amplia, dado que se han de aunar conocimientos referentes, entre otros,

- De *teoría de la señal*, para comprender los pormenores de la señal utilizada para la transmisión de televisión digital, incluyendo aspectos de modulación y sobre todo de recepción.
- De aspectos de *radiodifusión*, para conocer los efectos de la interferencia, así como de los elementos que componen el sistema radiante o un centro de emisión, para discernir los casos en los que las discrepancias entre los valores obtenidos de los estudios de simulación y los medidos en campo puedan ser causados por malfuncionamiento de alguno de los componentes del transmisor.
- De *planificación y topología de redes*, en tanto es necesario comprender los despliegues de red existentes y la interacción entre los distintos centros de emisión y sus respectivas áreas de cobertura.
- Del *marco regulador* actual, con especial énfasis en los problemas que provoca, a nivel de porcentaje no cubierto, los fenómenos de autointerferencia no controlados,

- De las diferentes *aplicaciones de simulación* informática utilizadas para los estudios radioeléctricos, desde los referentes al diseño de sistemas radiantes, modelos de propagación y otros.
- De las lecturas que se extraen del *instrumental de medida* profesional, el significado de los parámetros que se miden y las equivalencias con los obtenidos en las aplicaciones de simulación.

No es objeto del Proyecto el realizar una exposición exhaustiva de la teoría subyacente en cada uno de los aspectos anteriormente mencionados, pero sí se hará una introducción a los puntos fundamentales que se utilicen de alguna manera a lo largo del trabajo. En tanto se tratan de áreas diferentes entre sí pero con aspectos que se entrelazan, resulta complicado el realizar una ordenación de los contenidos a desarrollar de forma que no se necesiten conceptos no explicados previamente. No obstante, se propone la siguiente

1. En primer lugar, en la sección 2.1, *Aspectos generales de la TDT* se tratarán aspectos generales de la TDT, se expondrán las ventajas e inconvenientes frente a la televisión analógica tradicional y se expondrán los diferentes estándares de televisión digital y su presencia a nivel mundial.
2. A continuación, en la sección 2.2, *La situación en España* se explicará tanto la evolución histórica de la televisión digital terrestre en España, el marco regulador estatal y conceptos de planificación o relativos a la división geográfica del territorio que son necesarios para entender mejor el escenario técnico que se describe en la normativa. Asimismo se realizará un resumen de los aspectos más importantes del Plan de Transición y el Plan Técnico Nacional. Se comentarán las entidades habilitadas para la prestación de servicios, la ocupación del espectro radioeléctrico y se finalizará la sección con un estudio de los indicadores de consumo y despliegue justo antes del apagado analógico, analizando los resultados e interpretándolos.
3. Posteriormente, la sección 2.3, *La señal TDT* abordará los conceptos fundamentales de las señales TDT, el sistema DVB-T y sus características, así como aspectos de modulación, transmisión y recepción de la señal.

4. La sección 2.4, *Las redes de TDT* se centrará en el estudio de los fundamentos de las distintas redes desplegadas en España, sus características y los parámetros de planificación. También se expondrán los conceptos sobre las redes de frecuencia única y autointerferencia que no hayan sido explicados en anteriores secciones.
5. Por último, se cerrará el capítulo con la sección 2.5, *La suite de simulación radioeléctrica Sirenet* en la que se presentará la suite de simulación utilizada en el proyecto para realizar los diferentes estudios radioeléctricos. Se describirá su funcionamiento y las distintas posibilidades que ofrece la aplicación.

## 2.1. Aspectos generales de la TDT

### 2.1.1. La televisión digital terrestre y sus distintos estándares

La televisión digital terrestre es el resultado de la aplicación de las tecnologías digitales de procesado de la información a la señal de televisión, la cual es posteriormente transmitida por medio de ondas hercianas terrestres, es decir, que se transmiten por la atmósfera sin necesidad de cable o satélite y se reciben por medio de antenas de televisión UHF convencionales.

Al igual que está ocurriendo con otros sectores tecnológicos, la adopción de una tecnología común de forma casi simultánea en prácticamente todo el mundo no ha sido sinónimo de homogenización de estándares. Actualmente, DVB-T (europeo), ATSC (americano) e ISDB-T (japonés), además del ahora escogido por China, DTMB, son los que más representación tienen a nivel mundial. Esta guerra de estándares tiene como objetivo crear grandes economías de escala. En cuanto a características técnicas, algunos informes apuntan al ISDB-T como el mejor de todos.

Pasemos a comentar brevemente cada uno de ellos.

#### ■ ATSC

El Advanced Television Systems Committee (ATSC) se creó en Estados Unidos en 1982 como una asociación privada compuesta por empresas, asociaciones y centros educati-

vos.

Este estándar se diseñó principalmente para la transmisión de alta definición en una canalización de 6MHz (la utilizada en todo el continente americano), pudiendo llegar hasta 19,4 Mbps con dicha canalización y utilizando una modulación en banda lateral vestigial (VSB), pudiendo de este modo operar en 8-VSB o 16-VSB.

### ■ DVB

El DVB-T forma parte del Proyecto de Emisión de Vídeo Digital (DVB), consorcio industrial compuesto por unos 270 radiodifusores, fabricantes, operadores de redes, desarrolladores de software y cuerpos reguladores de 35 países comprometidos con el diseño de estándares globales para el despliegue de servicios de televisión digital y datos. Fue diseñado para ser utilizado mundialmente -de la misma manera que otros estándares de su familia- y con esa filosofía se diseñó pudiéndose adaptar en canalizaciones de 6, 7 y 8 MHz, para tener proyección global.

DVB-T no tiene una tasa de transmisión fija, ya que ésta va en función de la personalización del propio estándar, definida por diferentes parámetros (modulación, intervalos de guarda, canalización, etc). En este sentido, para una canalización de 6MHz se podrían obtener hasta 23,75 Mbps. El sistema de transmisión se basa en la utilización de la modulación COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex). La figura 2.1 muestra un esquema con las posibles tasas que se pueden conseguir combinando los diferentes parámetros de configuración.

### ■ ISDB-T

La *Association of Radio Industries and Businesses* (ARIB) es el organismo japonés para el desarrollo de la Industria Radio y fue establecido el 15 de Mayo de 1995. Este organismo trabaja sobre las competencias del Ministerio de Relaciones Internas y Comunicaciones, contando actualmente con 269 miembros y desarrolló el actual estándar ISDB- T (Integrated Services Digital Broadcasting) para transmisión de Televisión Di-

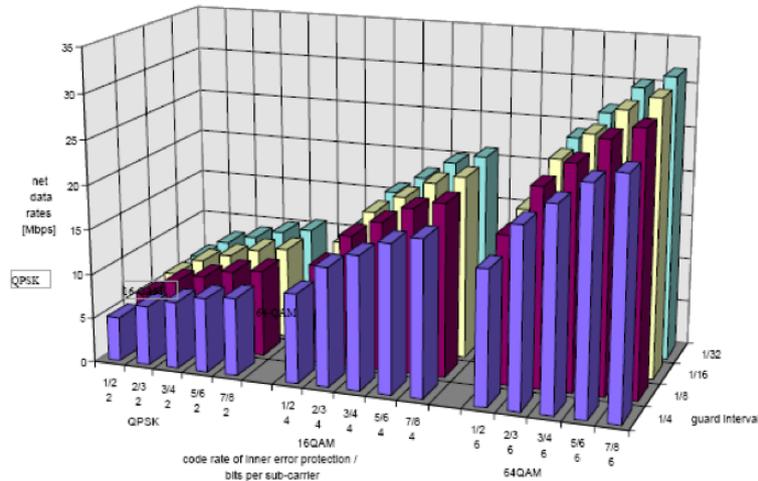


Figura 2.1: Diferentes tasas binarias contempladas en estándar DVB-T

gital Terrestre.

El estándar utiliza modulación Band Segmented Transmission (BST) OFDM, que consiste en dividir la banda de frecuencia de un canal en trece segmentos y donde el emisor puede seleccionar qué combinación de los segmentos a utilizar; esta opción de la estructura del segmento permite flexibilidad del servicio. Cada segmento puede contemplar su propio esquema de protección, tanto de codificación (intervalo de guarda, etc.) como de modulación (QPSK, DQPSK, 16-QAM o 64 QAM). A pesar de que el sistema fue diseñado para canalizaciones de 6MHz, puede utilizarse en 7MHz y 8MHz, llegando a tasas de 23,23Mbps en canalizaciones de 6MHz.

- **DTMB**

La transmisión de datos es implementada mediante el estándar TDS-OFDM, el cual es capaz de transmitir calidades *aceptables* de señal para receptores HDTV moviéndose a velocidades de hasta 200 Km/h, por lo que se apuesta por los servicios de movilidad.

La norma también cuenta con el apoyo del servicio móvil de televisión digital en dispo-

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

sitivos móviles, ausente en las implementaciones típicas de televisión digital en Europa (Considerando sólo DVB-T) y América. El radio de la zona con cobertura de la señal utilizando el estándar DTMB es de 10 km más largo que con DVB-T, aunque no especifican con qué modo de configuración.

### 2.1.2. Situación de la TDT a nivel mundial

La digitalización de la televisión se está llevando a cabo de manera casi simultánea en todos los continentes. La figura 2.2 muestra, a fecha de Abril de 2010, los países en los que ya se ha realizado la digitalización y aquellos que lo han planificado, junto al estándar que se adopta. En la figura se muestra Japón como un país con varios estándares, siendo mayoritario el ISDB-T.

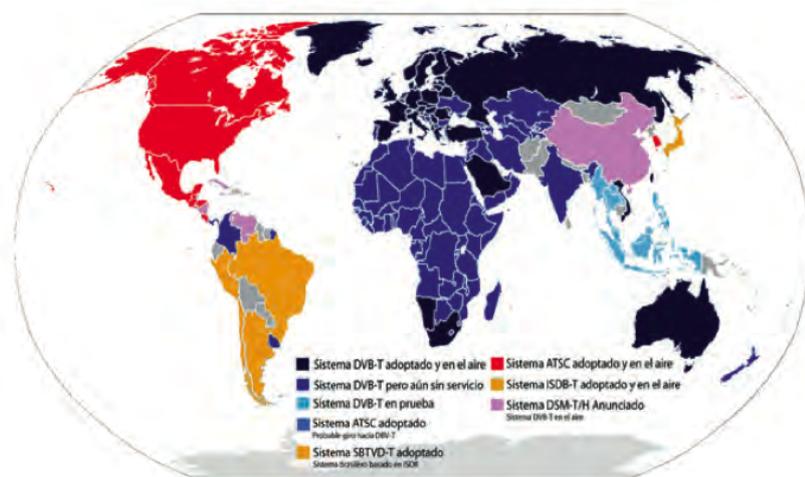


Figura 2.2: Presencia de distintos estándares en el mundo

Se describe a continuación, de manera muy resumida, la situación por zona geográfica.

#### Europa

En Europa, los países de la Unión Europea se encuentran coordinados internacionalmente e inscritos en el Plan de Ginebra 2006, integrado en el Acuerdo de la Conferencia Regional de Radiocomunicaciones (CRR-2006) adoptado en Ginebra (Suiza) en Junio

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

de 2006. Se adopta un calendario común que desemboca en el cese de toda emisión analógica en la zona para 2012.

El estándar utilizado es DVB-T, si bien se permiten distintas configuraciones de red y la posibilidad de privatización y servicios de difusión de contenidos con acceso condicional.

### **América del Norte y central**

Estados Unidos adopta el estándar ATSC, y las emisiones analógicas cesaron en 2009. México y Canadá, por su parte, también adoptan el estándar ATSC, motivados fundamentalmente por estrategia comercial con los EEUU. México cuenta con un calendario de implantación a largo plazo con final en 2021, mientras que Canadá finalizará las emisiones analógicas en 2011.

El resto de países de la zona, o bien están aún estudiando las distintas opciones o adoptan el estándar norteamericano.

### **Sudamérica**

El fenómeno de la transición a la TDT en Latinoamérica está siendo particular, ya que la decisión del estándar se está haciendo de manera totalmente heterogénea, haciendo que pueda haber diferencias notables e incompatibilidades. Menos del 20 % de la población de Latinoamérica queda pendiente de decisión de una estándar de TDT, el resto ya adoptaron una norma.

ISDB-T (o mejor dicho su versión brasileña, que es una modificación del estándar usando MPEG-4) es la que mejor evolución ha tenido; desde que Brasil se decidiera en 2006 por esta norma (el país más poblado de Latinoamérica) se han unido algunos de los más importantes, como por son Argentina, Chile y Perú. Esto hace que tenga una penetración del 51 % de la población latinoamericana. Finalmente, DVB-T, con un 9 % de penetración a pesar de su evolución en los últimos años (sobre todo con la entrada en Colombia) se perfila como un estándar minoritario.

### África

Los países que han estudiado la transición a digital (Kenia, Namibia, Sudáfrica Egipto, Libia, Túnez, Marruecos, Benin y Ghana) han adoptado el estándar DVB-T.

### Asia

China, como se ha mencionado ya, desarrolla su propio estándar, DTMB, también adoptado por Hong-Kong y Macao. Iraq, Siria y Malasia están estudiando aceptarlo. Japón también desarrolla estándar propio, ISDB-T aunque posee redes desplegadas con otros estándares. El resto de los países adoptan DVB-T, con especial mención a India.

### Oceanía

Oceanía ha adoptado masivamente el estándar DVB-T, siendo Australia, además, uno de los países pioneros en la digitalización.

### 2.1.3. Ventajas y desventajas de la TDT

La nueva tecnología de televisión digital terrestre además de solucionar ciertos inconvenientes de la tecnología analógica, presenta múltiples alicientes, pero también conlleva la aparición de nuevos problemas. En esta sección se tratarán de exponer unas y otras, teniendo en cuenta los diferentes actores que forman parte del *escenario digital*, es decir, no sólo debemos de considerar las mejoras o desventajas reportadas al usuario final, sino también a los operadores de red, instaladores u otros organismos.

#### Ventajas más representativas de la TDT

Comenzaremos describiendo las ventajas más representativas del nuevo sistema.

- **Mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico**

Las nuevas modulaciones digitales permiten aumentar el número de programas a transmitir por canal radioeléctrico, mientras que la no necesidad de incluir canales de guarda para evitar interferencias, como sucedía en las emisiones analógicas, permite ofrecer un mayor número de servicios utilizando un menor número de recursos del espectro. La

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

tecnología utilizada en TDT se traduce en la capacidad para transmitir entre 4 ó 5 programas por cada canal UHF, donde sólo es viable transmitir un único programa analógico. Se muestra un ejemplo en la figura 2.3

Cada uno estos programas, además, puede proceder de entidades o concesionarios diferentes lo que puede complicar su gestión técnica pero facilita la introducción de nuevos operadores de servicios.

Además, las redes SFN permiten minimizar el número de canales necesarios para despliegues de gran extensión, aunque, como se verá en los inconvenientes, el despliegue de redes de este tipo conlleva controlar de manera muy precisa la sincronización.

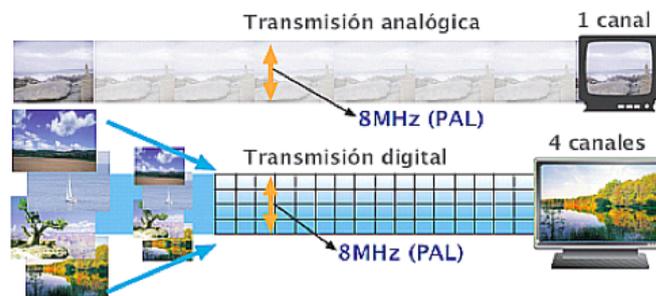


Figura 2.3: Comparativa del número de programas por canal radioeléctrico

### ■ Mejora de la calidad de imagen y sonido

Una de las principales ventajas de utilizar técnicas digitales es que éstas presentan una mayor robustez que las analógicas frente a interferencias. De esta forma, aumenta la capacidad para emitir contenidos de mejor calidad, tanto de imagen como de sonido.

A diferencia de una señal analógica en donde la imagen se degrada progresivamente a medida que la se ve afectada en su camino por ruido, interferencia o distorsión, la imagen que produce una señal digital puede verse perfectamente hasta el punto en que las perturbaciones afecten tanto a la señal que ésta ya no pueda ser regenerada mediante

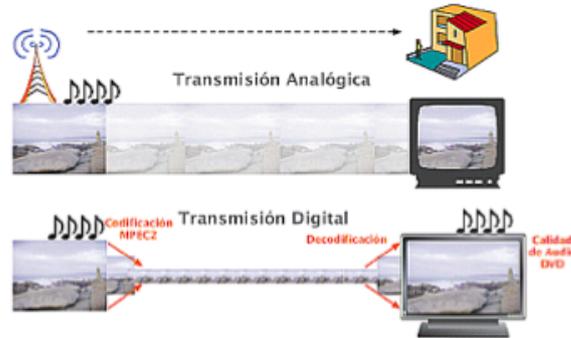


Figura 2.4: Comparativa de la calidad de audio de TDT frente a la televisión analógica

la aplicación de las técnicas de corrección de errores que constituyen una parte esencial de la televisión digital terrestre.

De esta forma, algunos canales podrán transmitir en formato panorámico 16:9 en lugar del habitual 4:3, acercándose al formato de las proyecciones cinematográficas, y el sonido podrá mejorarse mediante compresiones digitales, permitiendo entre otros, disponer de varias cadenas de audio con varios idiomas para un mismo contenido o sonido Surround 5.1. Un esquema del cambio se aprecia en la figura 2.4

### ■ **Aparición de los servicios interactivos**

La televisión analógica ya se iniciaba en los primeros pasos hacia la interactividad del usuario, mediante la inclusión del teletexto en los televisores más modernos. Sin embargo la tecnología digital ofrecerá un salto cualitativo, sobre todo, cuando se incluyan canales de retorno que permitan al usuario navegar por Internet, realizar su compra semanal o acceder a juegos y concursos a través de su propio televisor.

Entre las principales aplicaciones que incluyen servicios interactivos destacan las guías electrónicas de programación o *EPG*, subtítulos y elección entre varias cadenas de audio para distintos idiomas.

### ■ **Menores costes de distribución y recepción**

Pese a que los operadores asumen los costes derivados de la sustitución y modernización de los equipos, el hecho de que se requieran equipos de menor potencia y en gran medida homogeneizados minimiza los costes de mantenimiento de las infraestructuras. Para el usuario final, las adaptaciones de equipos y antena no supone un coste significativo.

### ■ **Radiodifusión robusta que solventa problemas de la televisión analógica**

Al hilo de las mejoras sobre la calidad de la imagen comentadas anteriormente, la nueva tecnología soluciona ciertos problemas específicos de la televisión analógica, como

- ***Doble imagen*** causadas por rebotes en la señal o falta de visión directa entre transmisor y receptor.
- ***Efecto persiana*** debido a las interferencias por otras emisiones analógicas.
- ***Nieve*** debida a un nivel de recepción insuficiente.

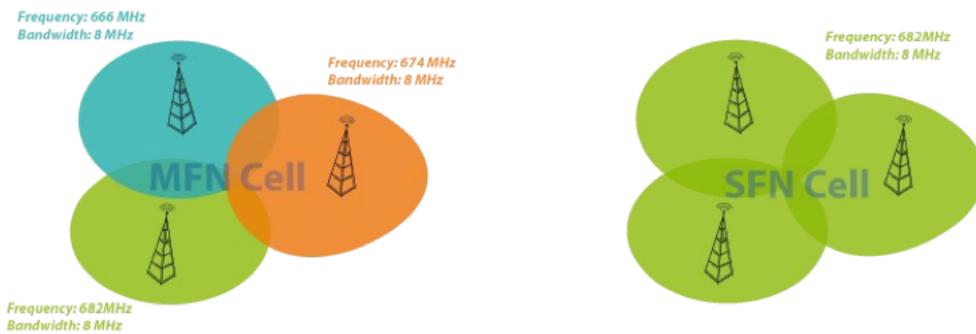


Figura 2.6: Diferencia entre redes MFN y SFN desde el punto de vista de coste espectral

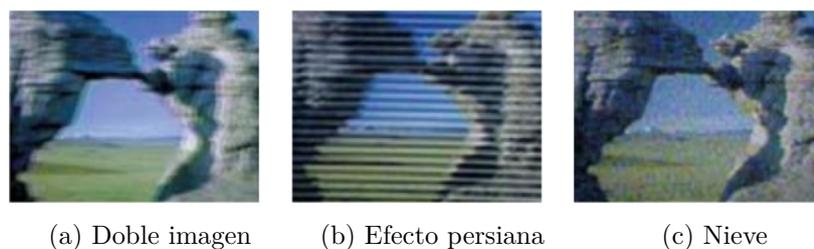


Figura 2.5: Problemas con la imagen en televisión analógica

- **Posibilidad de despliegue de redes de frecuencia única**

La red de difusión de televisión analógica tradicional utiliza un esquema MFN<sup>1</sup> en el que los centros de emisión que pueden crear una zona de solape de cobertura han de emplear frecuencias de emisión distintas, en el caso de la televisión digital terrestre es posible desplegar también redes de frecuencia única (Redes SFN) en las que todos los centros de emisión que difunden un determinado programa, lo hacen a la misma frecuencia<sup>2</sup> y con sincronización temporal, no sólo optimizando el uso de espectro, sino permitiendo además aprovechar la posible recepción multirayecto gracias a las características de modulación empleadas. En la figura 2.6 se aprecia la diferencia del coste de espectro entre las redes MFN y SFN, para una misma zona a cubrir.

- **Soporte de acceso condicional**

<sup>1</sup>Red de frecuencias múltiples

<sup>2</sup>Salvo casos excepcionales, por ejemplo, de regulación internacional

La nueva televisión digital terrestre permite la difusión de contenidos *premium* en los que se requiera de una suscripción por parte del usuario.

### Desventajas de la TDT frente a la TVA

No todo son ventajas en este cambio de tecnología. Pasamos a enumerar los inconvenientes más significativos.

- **Necesidad de márgenes de protección adicionales**

Como el sistema DVB-T es un sistema robusto que requiere unas tasas de protección menores que las del servicio analógico tradicional, podría esperarse que se necesitase menos canales. Sin embargo, debido al comportamiento de la transmisión digital que evoluciona bruscamente del estado de recepción perfecta a una recepción con gran cantidad de errores, a la hora de planificar es necesario tener en cuenta márgenes de protección adicionales, no incluidos en los servicios de televisión analógicos. Los niveles de protección adicionales se detallarán en la sección 2.3.1.

- **Necesidad de sincronización en redes SFN**

Es uno de los problemas más importantes y uno de los que más repercusión tiene. Una red SFN necesita que todos los transmisores de la misma emitan el mismo contenido y en el mismo instante de tiempo. Que esto no sea así ocasionará que tengamos recepciones multitrayecto potencialmente importantes fuera del intervalo de guarda que nos ofrece la modulación con el consiguiente aumento de la interferencia.

Relacionada también con la necesidad de sincronización se debe hacer notar que, para lograrla, se requiere de dispositivos GPS en los centros de emisión, por lo que añadimos un nuevo componente que es necesario tener controlado y libre de errores para evitar problemas.

- **Dependencia con el comportamiento del receptor**

En una determinada zona de cobertura, por ejemplo un núcleo poblacional, con niveles de recepción aceptables, se puede dar la circunstancia de que existan usuarios que

aseguren no disponer de esas calidades de señal, en las mismas condiciones orográficas y de instalación que otros vecinos. Este hecho, que como hemos comentado ya genera una batería de pruebas, puede, no obstante, ser fruto de problemas del decodificador.

No existe una normativa cerrada al respecto de los decodificadores, y esto ocasiona que distintos fabricantes opten por distintos algoritmos para la correcta decodificación de la señal. Por tanto, al igual que en el punto anterior, estamos añadiendo un nuevo equipo que puede ocasionar problemas de recepción al usuario final. La televisión analógica tradicional, sin embargo, no dependía de procesos de decodificación.

### ■ **Dependencia con la señalización en los centros de multiplexado**

Al igual que en el punto anterior, pueden existir incompatibilidades en algunos casos con respecto a la señalización introducida en los centros de multiplexado, que conllevará problemas de recepción. Este hecho tampoco se daba en la televisión analógica.

### ■ **Necesidad de adaptación de la instalación del usuario**

Es posible que se requiera la adaptación a la nueva tecnología de amplificadores, renovación del cableado de la red de distribución si éste introdujese demasiadas pérdidas, tomas de antena e incluso las propias antenas en caso de no estar preparadas para la recepción de la banda más alta de frecuencias.

### ■ **Dificultades de recepción en condiciones degradadas**

Es necesario extremar el cuidado y la calidad de las instalaciones ya que la TDT no permite la recepción en condiciones degradadas y especialmente en las bandas de frecuencia altas que utiliza, siendo muy sensible a las condiciones de entorno. De lo contrario podemos tener una recepción de TDT con pixelaciones, congelaciones o cortes, mientras que la recepción de la analógica no se ve tan afectada pues puede seguir visualizándose incluso en situaciones de recepción degradada.

### ■ **Apuntamiento y desapuntamiento de antenas**

En algunos casos, si las antenas de los usuarios no están orientadas al centro del que mejor nivel recibe, se puede provocar una reducción del margen o incluso una recepción

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

degradada de la señal.

La nueva planificación de la red de televisión produjo una reducción en la potencia nominal de emisión de los centros dadas las nuevas características del sistema digital. En algunos casos incluso se han variado drásticamente los niveles relativos de recepción en algunas zonas respecto dos o más centros emisores, cambiando, por tanto, el *mejor servidor* de señal en la misma, requiriéndose en estos casos un cambio en la *antención* de los usuarios de la zona.

La recepción analógica no sufría esta problemática pues es la emisión histórica sobre la que se han orientado las antenas existentes.

En las instalaciones de TDT, por lo general, se debe optimizar el apuntamiento de las antenas, teniendo en cuenta que en algunos lugares los *mejores servidores* de TDT no son los mismos que los de TVA.

Para finalizar con la casuística de problemas con las antenas, hemos de mencionar que la presencia de trayectos múltiples puede requerir, en algunas ocasiones, el *desapuntamiento* respecto del trayecto principal, para optimizar la tasa de error final, aún a costa de perder nivel de señal, como se refleja en la figura 2.7, en la que un desapuntamiento controlado de la antena respecto del mejor servidor consigue que se sigan obteniendo niveles aceptables de señal, y, a la vez, eliminemos una fuente interferente al degradar su recepción con el nuevo apuntamiento. Este aspecto se complementa con los explicados más adelante en esta misma sección al respecto de la MER y su importancia en la recepción y escenarios con multitrayecto.

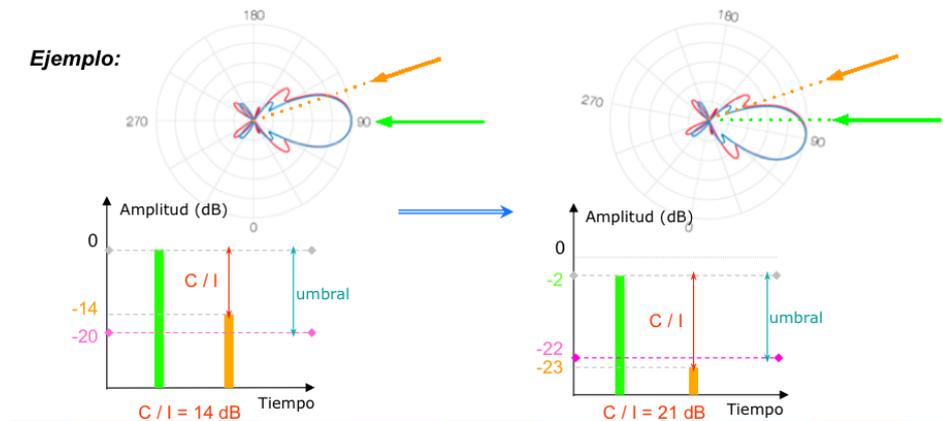


Figura 2.7: Efectos de un desajustamiento controlado de antena de recepción en escenarios multitrayecto

- **Retardo de procesamiento** La etapa de decodificación de la señal introduce un cierto retardo de procesamiento previo a la muestra de la señal recibida. Este retardo dependerá de las características del decodificador comercial y puede variar de forma significativa. Este retardo no se daba con el modelo analógico. Por ejemplo, para cambiar de canal en televisión digital, el retardo oscila entre 2 y 4 segundos, por los procesos implicados en el cambio. En televisión analógica, la conmutación era más rápida, por lo que la experiencia de usuario empeora en este caso con el cambio de tecnología.
- **Complejidad de diseño y planificación de redes SFN extensas** A efectos de planificación de la red, resulta más complejo diseñar una red de frecuencia única y extensión estatal que una red MFN en la que transmisores que comparten área de influencia siempre utilizan canales distintos, dado que ahora tenemos que tener en cuenta los retardos de propagación y las autointerferencias.

Para el número de centros implicados es casi inviable la planificación óptima en la que no esté presente en ningún momento el fenómeno de autointerferencia. Este es uno de los factores que han influido de manera notable a la hora de la decisión de volver al escenario de redes multifrecuencia tanto para operadores públicos como privados.

- **Fuerte dependencia con la tasa de error de modulación** La tasa de error de modulación (MER) se define según la ecuación 2.1 y es un parámetro a tener muy en cuenta en aquellas localizaciones en las que se tenga recepción de señal desde dos centros distintos, y el nivel de señal recibida sea aproximadamente del mismo orden  $\pm 0,5$  dB. En estas circunstancias se comprueba empíricamente un descenso de aproximadamente 3 dB en la MER que obliga a trabajar con un margen de respaldo de esa magnitud a efectos de evitar degradaciones en la recepción.

$$MER = \frac{\text{Potencia media símbolo caso ideal}}{\text{Potencia media de error}} \quad (2.1)$$

La MER muestra la tendencia de degradación de la señal, cuando la BER (tasa de error de bit) es aún aceptable. En el diagrama de constelación se puede evaluar la calidad de la señal recibida, y en este caso la MER da idea de la exactitud de la constelación, y, por tanto, de la tasa de error.

En la figura 2.8 se presenta un caso de medición real en el que se puede observar la importancia de la MER. La primera de las gráficas se corresponde a un escenario en el que se recibe la señal principal más un eco. Con un nivel de señal de  $43.3 \text{ dB}\mu$  (valor encuadrado en color rojo) se tiene una MER de 24.0 dB, que permite una correcta demodulación. Sin embargo, en la gráfica inferior, correspondiente al escenario con la señal principal más dos ecos, obtenemos según el instrumental profesional un nivel de señal de  $43.9 \text{ dB}\mu$ , mayor que el caso anterior, y en principio más favorable, pero con una MER de 23.2 dB, que ya no garantiza una correcta demodulación. Esto se debe a la presencia del segundo eco.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

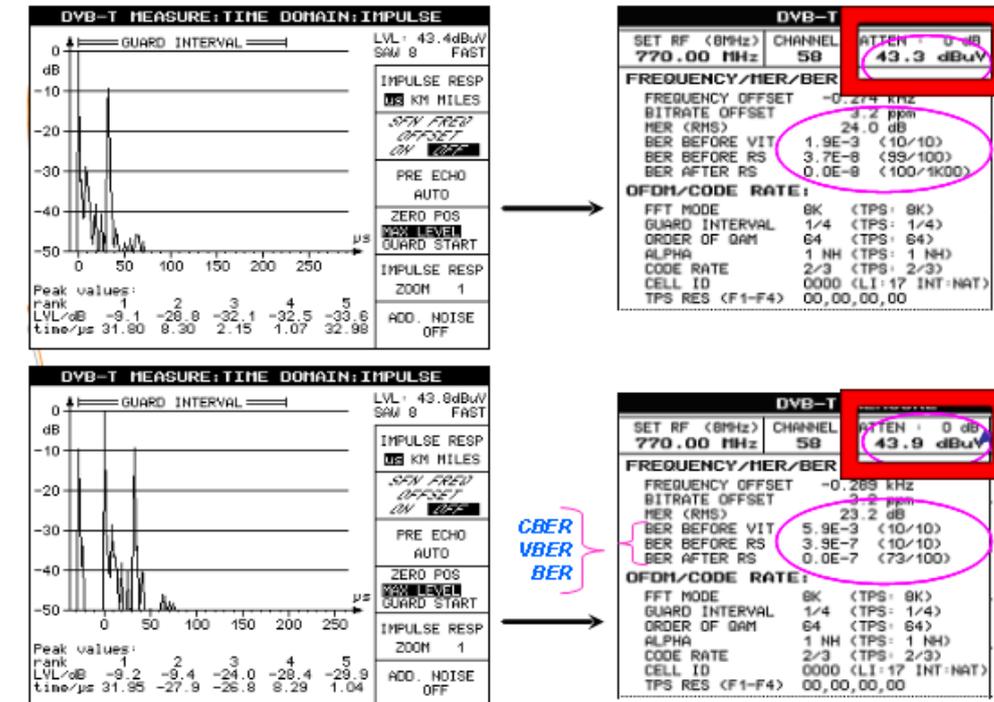


Figura 2.8: Ejemplo de caso real con afectaciones por MER

Del ejemplo anterior podemos extraer dos conclusiones importantes. Por un lado, podemos afirmar que *no siempre un mayor nivel de señal implica una mejor recepción* puesto que intervienen también otros factores que pueden llegar a ser incluso críticos, como en este caso la MER.

La segunda de las conclusiones, que afecta a la planificación de la propia red SFN, nos lleva a pensar que si en escenarios con múltiples recepciones, aún con desfase entre ellos tal que no se exceda el margen del intervalo de guarda, existe una degradación de la recepción a consecuencia de la MER, y será necesario una muy estricta planificación de la red, pues el añadir nuevos centros de emisión para reforzar la recepción en zonas difíciles de cubrir puede tener consecuencias negativas en la recepción en otras zonas solapadas.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Es decir, aunque ganamos, gracias al intervalo de guarda y la modulación OFDM, cierta capacidad para evitar autointerferencias, se ha de tener mucha precacución con los niveles de MER, especialmente en los casos en los que su degradación es abrupta y con consecuencias especialmente negativas para la demodulación, es decir, cuando se producen recepciones en los extremos del intervalo de guarda.

Una tabla visual del comportamiento del sistema con respecto a la MER es mostrado en la figura 2.9

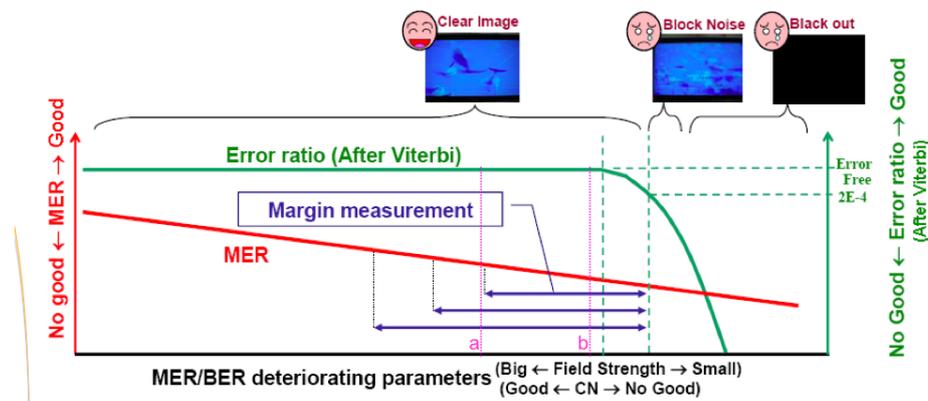


Figura 2.9: Consecuencias de los niveles de MER en la recepción

## 2.2. La situación en España

### 2.2.1. Recorrido Histórico

A nivel gubernamental, el primer documento donde se plantea la utilización de una nueva tecnología para la difusión de la televisión es el Real Decreto 2169/1998 por el que se aprueba el **Plan Técnico Nacional de la Televisión Digital Terrenal (PTNTDT)**, por el que se establecen los canales de cobertura nacional: Dos programas para el operador público RTVE y tres canales de concesión privada para emisoras de televisión con cobertura nacional. También se reservan dos programas autonómicos. El resto de canales se asignarán por concurso público. Se establece para el momento de cese de las emisiones analógicas el 3

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

de Abril de 2010.

El Consejo de Ministros, en su sesión celebrada el 30 de diciembre de 2004, anunció un Plan de Impulso a la Televisión Digital Terrestre, apostando decididamente por su impulso y desarrollo. Como parte de este Plan, aprobó un Anteproyecto de Ley de Medidas Urgentes para el Impulso de la TDT, con el objeto de disponer de un marco legal adecuado. En base a dicho acuerdo del Consejo de Ministros, en los meses de junio y julio de 2005, se aprobó un paquete legislativo formado por las siguientes leyes, reales decretos y órdenes ministeriales.

- **Ley 10/2005, de 14 de Junio, de medidas urgentes para el impulso de la televisión digital terrestre, de liberalización de la televisión por cable y de fomento del pluralismo.** Esta Ley introdujo una serie de modificaciones en la legislación existente para favorecer el desarrollo de la TDT y constituyó el punto de arranque para la promulgación por el Gobierno de la normativa que facilitase la puesta en marcha de todas las actuaciones necesarias.
- **Real Decreto 944/2005, de 29 de Julio, por el que se aprueba el Plan técnico nacional de la televisión digital terrestre** Este Real Decreto dio lugar al relanzamiento de la TDT en España y adelantó el cese de las emisiones de la televisión analógica al 3 de abril de 2010 (recordemos que el compromiso en Europa se fijaba para el 2012). Asimismo, estableció el escenario durante el periodo de transición a la TDT, realizando un reparto y ampliación de los canales digitales a los radiodifusores, a la par que definió el escenario resultante tras el cese de emisiones de la TV analógica.
- **Real Decreto 945/2005, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento general de prestación del servicio de televisión digital terrestre** Este Real Decreto estableció las condiciones administrativas básicas para la concesión de las licencias para la prestación del servicio TDT.
- **Orden ITC/2476/2005, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento Técnico y de prestación del servicio de televisión digital terrestre** En esta Orden se detallaron las condiciones técnicas y las características de prestación del servicio TDT.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Posteriormente, el **Real Decreto 920/2006, de 28 de julio**, por el que se aprueba el **Reglamento general de prestación del servicio de difusión de radio y televisión por cable** incluyó una disposición adicional en la que se establecen nuevos hitos para el despliegue de la televisión digital terrestre con porcentajes intermedios de cobertura de población, con el objetivo de conseguir un avance progresivo en la cobertura de la TDT (85 % de la población el 31 de Julio de 2007; 87 % de la población el 31 de Julio de 2008; 90 % de la población el 31 de Diciembre de 2008; 93 % de la población el 31 de Julio de 2009; 96 % de la población el 3 de Abril 2010 para las televisiones privadas y el 98 % de la población para las televisiones públicas).

Los porcentajes de cobertura no son puestos ni mucho menos al azar. El primer objetivo era que la población cubierta con tecnología digital fuera, al menos, el mismo porcentaje que en analógico. La figura 2.10 muestra ciertas relaciones interesantes que pasamos a detallar.

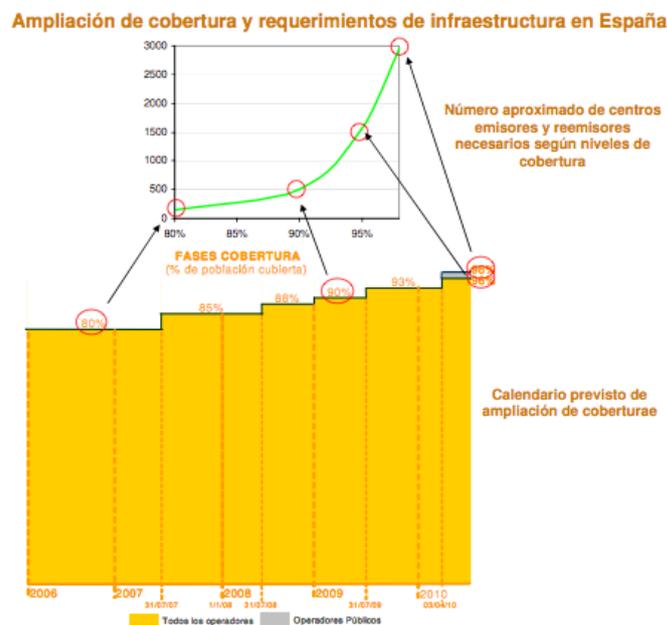


Figura 2.10: Relación entre porcentaje de cobertura y número de centros necesarios

- El número de centros de emisión necesarios para alcanzar el 80% de la población es relativamente bajo. Esto se debe a que estos centros son los de mayor potencia

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

de emisión, alcanzando una extensión importante y cubriendo las grandes ciudades y capitales autonómicas, en las que se concentran los porcentajes más altos de población.

- Aumentando el número de centros en una cantidad moderada se consiguen unos porcentajes de aproximadamente el 90 %. Los centros añadidos en este tramo son centros de una potencia menor, pero aún considerable, y que cubren a ciudades de tamaño medio.
- A partir del 90 % de población cubierta, hasta un 95 % el número de centros necesario para añadir porcentaje crece exponencialmente, debido a que los centros de este tramo son de baja potencia, destinados a cubrir poblaciones objetivo, con condiciones orográficas no especialmente desfavorables.
- Por último, a partir del 95 % de la población, el coste en centros (y por tanto en inversión en infraestructura) crece aún más acusadamente. Esto es consecuencia de la necesidad de instalar centros nuevos en áreas especialmente inaccesibles, como por ejemplo de alta montaña, en las que es realmente difícil que un único centro de servicio a más de un núcleo poblacional (que además suele ser de pocos habitantes) por lo duro de las condiciones orográficas, por lo que se añade muy poco porcentaje de población.
- El porcentaje que no se cubre una vez finalizado el despliegue no queda sin recepción, dado que en la mayoría de casos, la SETSI ofrece una solución basada en la recepción satelital de los contenidos. Será en estos casos necesario un receptor especial.

Además, y para impulsar la adecuación de las instalaciones de antenas colectivas receptoras a la televisión digital terrestre, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio aprobó la **Orden ITC/1077/2006, de 6 de abril, por la que se establece el procedimiento a seguir en las instalaciones colectivas de recepción de televisión en el proceso de adecuación para la recepción de la televisión digital terrestre** y se modifican determinados aspectos administrativos y técnicos de las infraestructuras comunes de telecomunicación en el interior de los edificios.

Posteriormente se aprueba el **Real Decreto-ley 11/2009, de 13 de agosto, por el que se regula, para las concesiones de ámbito estatal, la prestación del servicio de televisión digital terrestre de pago mediante acceso condicional**, por el que cada operador con concesión de programas en los múltiples desplegados de televisión digital terrestre tiene potestad para ofrecer uno de los canales de los que es concesionario en modalidad de pago.

Por último, en el Boletín Oficial del Estado del 3 de Abril de 2010 se publica el **Real Decreto 365/2010, de 26 de marzo, por el que se regula la asignación de los múltiples de la Televisión Digital Terrestre tras el cese de las emisiones de televisión terrestre con tecnología analógica**. En él se establecen los criterios por los que los distintos operadores pueden acceder a la gestión y explotación de un múltiplex completo, y se aprueba la liberación a partir de Enero de 2015 de la banda 790-862 MHz (denominada a raíz de esto *dividendo digital*), en la que se disponían las redes de frecuencia única de los operadores privados hasta la fecha, para destinarla a uso armonizado con aplicaciones de comunicaciones electrónicas avanzadas en la Unión Europea.

### 2.2.2. Entidades habilitadas para la prestación de servicios

La utilización de las bandas licenciadas para el servicio de televisión digital terrestre está regulada conforme a los Planes Técnicos Nacionales, y las entidades habilitadas para la prestación de los servicios de difusión televisión con tecnología digital son

- La corporación de Radio y Televisión Española (TVE)
- Las sociedades anónimas mediante concesión administrativa otorgada por el Estado para la explotación en gestión indirecta en una red de cobertura estatal (TVP)
  - Antena 3 de Televisión, S.A (A3TV)
  - Sogecable, S.A (CUATRO)
  - Gestevisión-Telecinco, S.A. (TELE5)
  - Gestora de Inversiones Audiovisuales La Sexta (LA SEXTA)

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

- Gestora de Televisión Net TV, S.A. (NET TV)
- Veo Televisión, S.A. (VEO TV)
  
- Los Entes Públicos con competencia en la materia de las Comunidades Autónomas que han obtenido la concesión para la gestión directa de la televisión en un múltiple digital de ámbito territorial autonómico (TDTA).
  
- Las personas físicas o jurídicas mediante concesión administrativa otorgada por los órganos competentes de las Comunidades Autónomas para la explotación en gestión indirecta en un múltiple digital de cobertura territorial autonómica (TDTA)
  
- Los municipios y las organizaciones territoriales insulares mediante concesión administrativa otorgada por los órganos competentes de las Comunidades Autónomas para la explotación en gestión indirecta en una demarcación de cobertura local (TDTL)
  
- Las personas físicas o jurídicas mediante concesión administrativa otorgada por los órganos competentes de las Comunidades Autónomas para la explotación en gestión indirecta en una demarcación de cobertura local (TDTL)

### **2.2.3. La ocupación del espectro radioeléctrico**

Tal como se ha adelantado en la sección 2.2.1, se definen dos escenarios en la migración de los sistemas de difusión de televisión al modelo digital.

- El primero de ellos, que cronológicamente comprende el período desde la firma del Real Decreto 944/2005 hasta el cese de emisiones analógicas del 3 de Abril de 2010, se caracteriza por la coexistencia de varias redes de distinta naturaleza. La primera de ellas (RGE) es de frecuencia múltiple y está gestionada íntegramente por el Ente Público. La segunda, gestionada por los operadores privados, es de frecuencia única (SFN) en todo el territorio nacional y comprende los canales radioeléctricos 66 al 69. También se contempla en este escenario la gestión de un múltiple autonómico por cada comunidad (hasta un total de 19), en modalidad de red MFN, y por último se definen hasta 281 múltiplex destinadas a redes locales.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

- El segundo escenario, definido por el Real Decreto 365/2010, define una nueva reorganización del espectro, además de un cambio en la titularidad y modo de gestión de los múltiplex. El Real Decreto establece dos fases en este proceso. La fase 1, que previsiblemente puede comenzar en junio de 2010 y prolongarse hasta marzo de 2011, está referida a la situación tras el cese de las emisiones de televisión terrestre con tecnología analógica. En cuanto a la fase 2, tiene como objetivo que, antes del 1 de enero de 2015, la subbanda de frecuencias de 790 a 862 MHz pueda quedar reservada principalmente para la prestación de servicios avanzados de comunicaciones electrónicas, en línea con los usos armonizados que se acuerden en la Unión Europea

En la fase 1, con carácter transitorio, cada una de las sociedades concesionarias accederá, si han acreditado que han cumplido las condiciones establecidas relacionadas con el impulso y desarrollo de la TDT, a la capacidad equivalente de un múltiple digital de cobertura estatal. Para ello, se planificarán tres nuevos múltiples digitales de cobertura estatal, planificación que estará basada en los canales radioeléctricos que conforman el canal analógico que vienen explotando Antena3, Telecinco y Sogecable.

El Real Decreto establece que la capacidad de los múltiples digitales de cobertura estatal, tanto de los ya existentes como de los nuevos, deberá ser objeto de explotación compartida por las sociedades concesionarias, de manera que exista equidad entre todas ellas durante todo el proceso. La planificación de los dos múltiples digitales de la Corporación de Radio y Televisión Española estará basada, respectivamente, en los dos canales analógicos y en el múltiple con capacidad para efectuar desconexiones territoriales de ámbito autonómico que viene explotando. Asimismo, la planificación de los dos múltiples digitales reservados a las Comunidades Autónomas estará basada, respectivamente, en el canal analógico de televisión de cobertura autonómica que la mayoría de ellas explota y en el múltiple digital que tienen asignado actualmente. En todos los casos, la planificación tiene el objetivo de reducir en lo posible el impacto sobre los usuarios y de garantizar el uso eficiente del espectro radioeléctrico.

En la segunda fase se planificarán nuevos múltiples digitales y se establecerán ajustes en los múltiples digitales a los que se refiere la fase anterior, con el objetivo de que antes del 1 de enero de 2015 la subbanda de frecuencias de 790 a 862 MHz pueda quedar reservada para otros usos y servicios, de manera que los canales radioeléctricos 61 a 69, que vienen siendo utilizados por los múltiples digitales de la fase anterior, puedan en esta fase ser sustituidos por otros situados por debajo de la citada subbanda. Esta fase concluye antes del 1 de enero de 2015 con la asignación de los múltiples definitivos a cada una de las entidades habilitadas, de manera que finaliza la explotación compartida de la capacidad de los múltiples por parte de las sociedades concesionarias, y con el cese de emisiones de televisión en los canales que se venían utilizando dentro de la subbanda de frecuencias 790-862 MHz.

### **2.2.4. El Plan Técnico Nacional y el Plan de Transición**

Los dos documentos más importantes de todo el marco regulador de la transición a la televisión digital en España son, tal como se ha apuntado en secciones anteriores, el Plan Técnico Nacional, que fija los aspectos técnicos de la migración a los nuevos servicios y el escenario final, y el Plan de Transición, que establece una serie de conceptos, metodologías y calendario para el escenario de transición.

#### **2.2.4.1. El Plan Técnico Nacional**

El Plan Técnico Nacional es aprobado, como se ha mencionado anteriormente, por el Real Decreto 944/2005, y contiene tanto la regulación aplicable como un conjunto de medidas que vienen a actualizar las tomadas previamente a la aprobación del Real Decreto al respecto del calendario de migración. Entre ellas ha de destacarse el adelanto del cese de las emisiones analógicas al 3 de Abril de 2010, así como la definición de un escenario de transición.

De entre los artículos y disposiciones que componen el Plan, cuya disección está fuera del alcance del presente Proyecto, se deben extraer los siguientes aspectos de interés.

### **Definición de las bandas de frecuencias de explotación**

El servicio de televisión digital terrestre se explotará en las siguientes bandas de frecuencias

- Los múltiples digitales de la banda de frecuencias 470 a 758 MHz se destinan al establecimiento de redes de televisión digital.
- Los múltiples digitales de la banda de frecuencias 758 a 830 MHz se destinan, principalmente, al establecimiento de redes de frecuencia única de ámbito territorial autonómico y provincial.
- Los múltiples digitales de la banda de frecuencias 830 a 862 MHz se destinan al establecimiento de redes de frecuencia única de ámbito estatal

### **Objetivos de cobertura**

Con el objetivo de alcanzar la mayor cobertura estatal, se explotarán:

- Cada uno de los canales radioeléctricos 66, 67, 68 y 69, formando cuatro múltiples digitales en redes de frecuencia única.
- Los canales radioeléctricos 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64 y 65, con los que se formará un múltiple digital estatal con posibilidad de efectuar desconexiones territoriales de ámbito autonómico.
- Con el objetivo de alcanzar la mayor cobertura autonómica, se explotarán los canales radioeléctricos 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64 y 65, con los que se formarán redes de cobertura territorial autonómica con posibilidad de efectuar desconexiones territoriales.

### **Fases de cobertura**

La cobertura a alcanzar por el servicio de televisión digital terrestre se realizará en las siguientes fases:

- El Ente Público Radiotelevisión Española y las entidades públicas creadas, reguladora del tercer canal de televisión, deberán alcanzar en su ámbito territorial, al

menos, una cobertura del 80 por ciento de la población antes del 31 de diciembre de 2005, 90 por ciento de la población antes del 31 de diciembre de 2008 y 98 por ciento de la población antes del 3 de abril de 2010.

- Las sociedades concesionarias del servicio público de televisión de ámbito estatal existentes a la entrada en vigor del real decreto, deberán alcanzar en su ámbito territorial, al menos, una cobertura del 80 por ciento de la población antes del 31 de diciembre de 2005, 90 por ciento de la población antes del 31 de diciembre de 2008 y 95 por ciento de la población antes del 3 de abril de 2010.

### Imposición de las redes desplegadas

Se impone la banda donde se desarrollarán los servicios y el tipo de redes (ámbito de cobertura y tipo de desconexión permitida) que se podrán poner en funcionamiento. En base a las diferentes emisiones permitidas, se constituyen los siguientes tipos de red:

- **SFN:** Se pueden constituir redes de frecuencia única con una cobertura estatal y sin capacidad para realizar desconexiones territoriales de ningún tipo. Actualmente, España dispone de 4 de estas redes (SFN66, SFN67, SFN68 y SFN69), emitiendo en las frecuencias más altas de la banda permitida y difundiendo los programas de las cadenas privadas.
- **RGE:** Se pueden constituir redes de frecuencia única con una cobertura autonómica y sin ningún tipo de desconexiones territoriales. Actualmente, en España, se dispone de una red (RGE), que emite en los canales comprendidos entre el 57 y el 65, difundiendo los programas de las cadenas públicas.
- **TDTA:** Hace referencia al punto 3 del apartado “Bandas de frecuencias”. Se pueden formar redes multifrecuencia (MFN – “Multiple Frequency Network”) con una cobertura autonómica y capacidad para realizar desconexiones territoriales. Actualmente, existen en España uno o dos canales autonómicos para cada Comunidad Autónoma.
- **TDTL:** Se pueden formar redes de televisión digital, sin posibilidad para realizar desconexiones. Este grupo está formado por emisiones de cobertura local,

difundiendo sus servicios en los canales más bajos del espectro (lo comprendidos entre los canales 21 al 57). Actualmente, en España, existen reservas digitales para albergar 274 programas locales.

### Aspectos Técnicos

Además de los capítulos reservados a la banda de frecuencias y a las fases y objetivos de cobertura, en el Plan Técnico Nacional también se incluye importante información sobre diferentes aspectos técnicos sobre cómo implantar la tecnología digital en España.

- **Número de canales -programas- en cada múltiple digital:** Cada múltiple digital de cobertura estatal o autonómica integrará, inicialmente, al menos cuatro canales digitales, susceptibles de ser explotados las 24 horas del día.
- **Servicios Adicionales:** Capacidad de transmisión del múltiple digital se podrá utilizar para prestar servicios adicionales distintos del de difusión de televisión, como los de transmisión de ficheros de datos y aplicaciones, actualizaciones de software para equipos, entre otros, si bien, en ningún caso, se podrá utilizar más del 20 por ciento de esa capacidad de transmisión para la prestación de dichos servicios.
- **Transmisores de TDT:** Las especificaciones técnicas de los transmisores de las estaciones de televisión digital terrestre serán conformes con el modo 8k de la norma europea de telecomunicaciones EN 300 744.

#### 2.2.4.2. El Plan de Transición

Como se ha mencionado en secciones anteriores, el Plan de Transición tienen como objeto establecer una serie de metodologías, procedimientos y definiciones que homogenicen y estructuren un paso del escenario analógico al digital.

El Plan toma como referencia básica, tal como se menciona en la disposición adicional primera del Real Decreto 944/2005, el *concepto de área técnica*, que en el mismo está definida como la zona del territorio cubierta desde el punto de vista radioeléctrico por el centro principal de difusión, los centros secundarios que tomen señal primaria de dicho centro y los

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

centros de menor entidad que no tomen señal primaria del centro principal pero tengan cobertura solapada con él o con alguno de sus centros secundarios. Se han identificado 73 áreas técnicas, cada una de las cuales viene caracterizada por su correspondiente centro principal de difusión. La media de población bajo el área de influencia oscila entre los cien mil y el millón de habitantes.

Otra definición importante es la de *unidad de apagado y encendido (UAE)* que son aquellas partes del árbol de área técnica que se puede considerar autónoma en el sentido que su cese de emisiones en analógico no afectará a la recepción de la televisión analógica en otras partes del árbol. Dichas UAE pueden formar parte de un Área Técnica singular o ser creadas combinando las áreas de cobertura de centros emisores pertenecientes a diferentes áreas técnicas.

Así llegamos al concepto de *unidades de gestión*, que son por lo general agrupaciones de unidades de apagado y encendido con una serie de criterios añadidos como los tamaños de población o proximidad social. Se encajan en el calendario global de transición.

Otro aspecto importante que define el documento es que se priorizan los Proyectos de transición en función de criterios temporales (aquellos que requieran mayor número de emplazamientos digitales a desplegar se pondrán a la cola de aquellos que requieran de pocos centros), criterios de población (aquellos con mayor población irán a la cola) o técnicos (mayor número de instalaciones colectivas que habrán de ser adaptadas, afectaciones de la señal causadas por los centros digitales sobre los canales analógicos existentes), con lo que se establece un calendario y mapa de apagados simultáneos con entidad y basado en criterios lógicos. Sobre la base de esta premisa, y partiendo de un pormenorizado análisis de las Áreas Técnicas identificadas para los diferentes radiodifusores, públicos y privados, se determinan e integran en el Plan Nacional de Transición a la TDT un total de 73 Áreas Técnicas y un total de 90 Proyectos de Transición para todo el territorio nacional.

Las fases de apagado se establecen bajo el siguiente calendario

- **Fase I:** 32 Proyectos con fecha límite de apagado el 30 de Junio de 2009.
- **Fase II:** 25 Proyectos con fecha límite de apagado el 31 de Diciembre de 2009.
- **Fase III:** 32 Proyectos con fecha límite de apagado el 4 de Abril de 2010.

### 2.2.5. Indicadores de implantación de Marzo de 2010

Es interesante, una vez se ha presentado la situación en España desde el punto de vista legislativo, mostrar los datos que arroja el observatorio de indicadores del consorcio *Impulsa TDT* del mes de marzo de 2010.

Impulsa TDT es el nombre comercial de la Asociación para la Implantación y el Desarrollo de la Televisión Digital Terrestre en España, que se constituyó a finales de 2005 por los radiodifusores de ámbito nacional y autonómico y el principal operador de la red de difusión, con la finalidad de promover la televisión digital terrestre (TDT) y el proceso de transición hacia la TDT en España, en colaboración, directa y permanente, con la Administración del Estado, así como con Administraciones Públicas de ámbito autonómico y local.

En este sentido, el 7 de Junio de 2006, Impulsa TDT firmó un convenio de colaboración con el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, con el objeto de establecer un marco que permita la ejecución de actuaciones conjuntas o coordinadas para el impulso de la Televisión Digital Terrestre en España.

Se presentan los datos relativos acumulados a Marzo de 2010 debido a lo interesante de la fecha, pues es el último de los informes mensuales previos al cese definitivo de las emisiones analógicas. Los datos dan una muestra de la penetración del nuevo sistema y el grado de utilización con anterioridad a que se convierta en una obligación.

#### Cobertura

Se desprende del estudio que la población con cobertura TDT de canales de ámbito

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

nacional se sitúa en el **98.24 %**<sup>3</sup> mientras que el objetivo marcado por el Plan Nacional de Transición para Julio de 2009<sup>4</sup> era del 93 %.

### Edificios con antena colectiva preparada

El último dato que presenta FENITEL<sup>5</sup> eleva al **80.5 %** el porcentaje de edificios *adaptados* el cuarto trimestre de 2009. Aún no se disponen, a fecha del informe, de los datos relativos al primer trimestre del año en curso.

### Equipamiento

Según Gfk<sup>6</sup>, el número de sintonizadores TDT vendidos entre Marzo de 2003 y Febrero de 2010 se eleva a más de 28 millones. Con datos actualizados al mes de febrero de 2010, se estima una venta acumulada de decodificadores TDT externos de más de 588.000 unidades, más de 504.000 televisores con TDT (lo que supone un 99.4 % de los vendidos en el año 2009) y casi 123.000 DVDs con TDT integrado.

### Penetración

La estimación de hogares conectados a la TDT con fecha Marzo de 2010, según la consultora *Kantar Media* es del **89.3 %**

### Audiencia

Respecto a la audiencia, los datos sitúan a la TDT con una cuota de pantalla del **69.8 %** durante el mes de Marzo de 2010, lo cual, a menos de un mes del cese analógico muestra que en más de 3 de cada 10 hogares se requerirá un cambio de hábito. Por otro lado, establece que más de 26.6 millones de individuos tienen contacto diario con la TDT, y que el consumo diario de TDT se eleva a una media de **163 minutos**.

El informe, que es accesible desde la web del Instituto, muestra por último datos no actualizados acerca de la percepción de los usuarios y el nivel de conocimiento sobre el proceso de transición.

---

<sup>3</sup>Fuente: Abertis Telecom

<sup>4</sup>Se utiliza este umbral pues es el más próximo, sin cumplirse, de los establecidos en el Plan de Transición.

<sup>5</sup>Federación de Instaladores de Telecomunicaciones

<sup>6</sup>Gfk es una reconocida empresa dedicada al análisis de mercado

### **2.3. La señal TDT**

Una vez se han estudiado los aspectos más generales relativos al sistema de televisión digital terrestre y su situación en España, pasamos a analizar con más detalle los relacionados con la señal de TDT como tal, de forma que se obtenga una visión más amplia de las características de la misma.

Comenzaremos presentando el conjunto de especificaciones que rigen la señal de televisión terrestre nacional, y veremos las ventajas del sistema DVB-T de cara a la planificación de la red, por la presencia de múltiples parámetros configurables en el estándar. Estudiaremos el significado de estos parámetros, la influencia final en la red y los valores que toman en el caso de España, justificándolos. Posteriormente nos centraremos en los aspectos relativos al esquema de modulación utilizado, y se explicará en que consiste la modulación OFDM, sus aspectos fundamentales así como los posibles problemas a tener en cuenta. Por último se mostrará el proceso de decodificación de la señal en el receptor, con especial interés en los distintos algoritmos de alineamiento de la FFT dada su importancia en las simulaciones, como explicaremos convenientemente.

Es necesario hacer notar que no se analizará en detalle cada uno de los bloques de los que se compone el transmisor y el receptor pues los objetivos marcados para el Proyecto se acercan más a la comprensión del fenómeno concreto de la autointerferencia y su evaluación en casos reales que a exponer de forma exhaustiva los distintos componentes de los equipos implicados en el proceso de transmisión y recepción.

#### **2.3.1. El sistema DVB-T**

La especificación por la que se rige la televisión digital terrenal es la DVB-T o Digital video Broadcasting en su modalidad Terrestrial. Es una norma abierta y flexible que permite la elección de diversos parámetros fundamentales del sistema, los cuales van a configurar el modelo que va a regir en un determinado país o región.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

Dependiendo de estos parámetros, se van a poder configurar redes con topologías muy diferentes y se va a determinar la capacidad máxima de información que se puede transferir en un canal radioeléctrico. De ahí la importancia de realizar una correcta elección de los mismos, para definir y concretar un modelo de televisión digital que permita un desarrollo óptimo, tanto desde el punto de vista de la capacidad de información como del aprovechamiento del espectro radioeléctrico, muy saturado por la TV analógica y otros servicios.

El sistema de modulación establecido por la norma es el llamado COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Modulation), que se ha adoptado por ser un sistema idóneo para dar una respuesta satisfactoria a las características concretas del canal radio tales como la propagación multitrayecto, el ruido o la interferencia cocanal.

Por su parte, para la codificación de la señal de vídeo y audio se ha optado por el sistema MPEG-2 (Moving Pictures Experts Group 2), el cual es capaz de transportar audio y video digital a través de medios impredecibles e inestables, como en el caso de las transmisiones televisivas.

El sistema DVB puede definirse como aquel bloque funcional capaz de adaptar la señal de televisión en banda base, procedente de la salida del multiplexor MPEG-2, a las características del canal terrestre. En dicho proceso, se llevan a cabo las siguientes acciones sobre el flujo de datos generado:

- Adaptación y aleatorización de la señal para dispersar su energía.
- Aplicación de diversos procesos de codificación y entrelazado.
- Mapeado y modulación de la señal base.
- Transmisión por OFDM de la señal resultante.

Pese a ser importante en el esquema, pasaremos por alto el estudio del proceso de codificación de la señal, para centrarnos en la modulación OFDM, cuya comprensión es fundamental para los objetivos del Proyecto.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

La modulación por multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), descrita por el estándar ETSI EN 300 744 V1.5.1, que envía un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias, moduladas a su vez en QAM o PSK, donde cada una de ellas transporta unidades pequeñas de información, es la elegida en el estándar principalmente por su robustez frente al multitrayecto, además de por la buena eficiencia espectral, que, como hemos mencionado en múltiples ocasiones a lo largo de la memoria, son dos de los más importantes objetivos a cubrir por el nuevo sistema de televisión. Esta modulación, unida a la inserción de intervalo de guarda y el uso de codificación de canal son los tres mecanismos provistos para mitigar los posibles efectos negativos del canal radio terrestre y asegurar la protección necesaria contra los altos niveles de interferencia cocanal y de canal adyacente que puedan surgir como consecuencia de la presencia de otras emisiones o servicios. La funcionalidad de una red de televisión digital terrestre en red de frecuencia única viene descrita en la norma del DVB TS 101 191 V1.1.1, 1997-04

A fin de cubrir estos requerimientos se implementa un sistema OFDM con una codificación de corrección de errores concatenada (Coded OFDM). Para lograr la máxima eficiencia espectral se establece el compromiso entre la topología de red y eficiencia, a partir de la presencia de un intervalo de guarda adaptable, que permitirá establecer diferentes topologías de red que hacen un uso más o menos eficiente de las posibilidades del espectro.

El principio básico de la modulación OFDM, como hemos adelantado ya, consiste en dividir la información a transmitir entre un gran número de portadoras independientes de más baja velocidad, que se suman de forma ortogonal, es decir, cada subportadora tiene un cero en la frecuencia de la subportadora adyacente. Cada una de ellas está modulada con uno de los tipos de modulación posibles, desde QPSK hasta 64-QAM. La separación de frecuencias de subportadoras es exactamente el inverso de la duración de los símbolos de baja velocidad. A diferencia de otros sistemas que modulan en una sola frecuencia portadora con una tasa muy alta de símbolos, en el sistema COFDM cada portadora lleva una tasa de símbolos muy baja. Tener una menor tasa de símbolos por portadora se traduce en un periodo de símbolo más grande, lo que proporciona protección contra los ecos producidos por los múltiples cami-

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

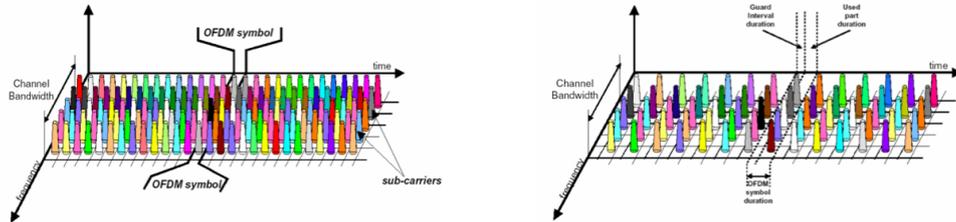


Figura 2.11: Estructura de flujo OFDM con y sin intervalo de guarda

nos que toma la señal en su propagación, sobre todo en ámbitos urbanos como consecuencia de las reflexiones producidas en edificios. La aptitud frente a recepciones multirrayecto nos va a permitir desplegar redes de frecuencia única. En la figura 2.11 se muestra, de forma esquemática, la estructura en tiempo y frecuencia de la señal OFDM, con y sin intervalo de guarda.

Otra de las características, fruto de la utilización de un alto número de portadoras es la protección contra interferencias cocanal, ya que si se pierde la información de una portadora debido a la interferencia se pierde una pequeña porción de información que no tiene porque ser relevante para la calidad de la transmisión. Esta señal también se caracteriza por tener una fuerte caída del espectro fuera de su ancho de banda. Esto hace que la utilización de esta modulación sea muy conveniente ya que permite eliminar las emisiones fuera de la frecuencia del canal lo que permite no interferir en canales adyacentes. La figura 2.12 muestra los espectros teórico y real de una señal DVB-T en la que se puede apreciar la abrupta caída del espectro real fuera de su ancho de banda.

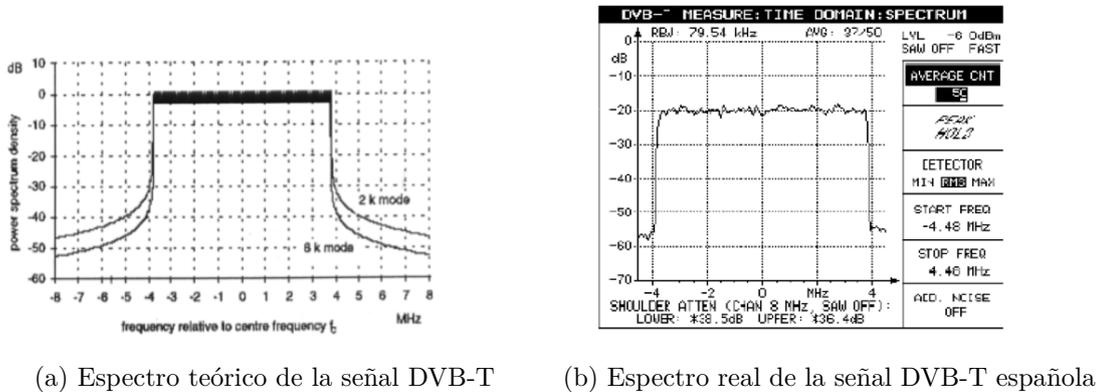


Figura 2.12: Espectros teórico y real de la señal DVB-T

Por otro lado, la inclusión del intervalo de guarda conlleva evidentemente un pequeño (o no tan pequeño, según la relación de su longitud frente a la longitud de símbolo) descenso en la tasa de bits, dado que no todo el símbolo transmite ahora información útil. El espectro de salida de la señal es en España de 8Mhz (7,61 Mhz de información).

También hemos de hacer notar que, gracias al uso de la FFT, se permite una sencilla implementación, pues pasamos de  $N^2$  operaciones a  $N * \log_2 N$ , lo que supone un gran avance tecnológico. Como ejemplo, si requerimos 8000 operaciones por símbolo en el proceso de modulación, pasaríamos de los 64 millones de operaciones a sólo 33600.

Como aspectos negativos podemos notar la alta sensibilidad al offset en frecuencia o el alto PAPR (peak to average power ratio, es decir, algunas señales pueden tener unos valores de pico muy diferentes al valor de la potencia media de la señal, que provocará una distorsión para la intermodulación). También la aparición de productos de intermodulación (por tanto, depende de los niveles de los ecos) y picos de alta potencia provocan la aparición de señal en los canales adyacentes, comúnmente llamadas hombreras. Miles de subportadoras con comportamiento semejante al de un ruido gaussiano provocan picos de muy alta potencia aunque se produzca en porcentajes limitados de tiempo. Minimizar el PAPR permite que se pueda transmitir una potencia media mayor para una potencia de pico dada, con la consiguiente mejora en la relación señal a ruido del receptor. Los mecanismos para conseguir esta mejora

pasan por la utilización de amplificadores con muy alta linealidad, precorrectores y filtrados adicionales.

La *profundidad* de los valles de las hombreras viene determinada por el nivel de los ecos. La distancia entre los valles, por otro lado, depende del retardo relativo entre los ecos. Cuanto mayor sea el retardo entre ecos, menor será la distancia entre valles. Para terminar con la explicación de los rizados, aunque el espectro parezca plano en la parte central, en realidad existe un cierto rizado (que se ve muy bien si se aplica zoom a la misma) , debido a que al incluir el intervalo de guarda, el período de símbolo es superior al inverso del lóbulo principal de la subportadora. Esto, a efectos del espectro, hace que el lóbulo principal del espectro de cada subportadora sea más estrecho que el doble de separación entre ellas, dando lugar a una densidad espectral no constante dentro de la anchura de banda nominal. Por último, también se utilizan filtros a la salida del transmisor para encajar el espectro de emisión al ancho de banda de canal. Esto reduce aún más la interferencia cocanal.

### 2.3.1.1. Parámetros de sistema DVB-T

El estándar DVB-T, como se ha adelantado en secciones anteriores, permite la elección de varios parámetros en función de las especificaciones o requerimientos de la red que se desee diseñar, posibilitando diversos esquemas. Pasamos a enumerar y explicar cuáles son, las implicaciones de la elección y los valores que toman en el caso de la red TDT española.

#### Tipo de modulación

Para modular cada subportadora con los datos de entrada se pueden elegir entre esquemas QPSK, 16-QAM y 64-QAM. A su vez la modulación QAM se puede combinar con un mapeado uniforme o no uniforme dando lugar a modulaciones jerárquicas o no jerárquicas. La elección del tipo de modulación va a influir en la robustez de la señal, es decir en el área de cobertura, y en el flujo binario útil, es decir en la capacidad del sistema. El uso de código Gray facilitará que el sistema de detección y corrección de errores pueda realizar su función de forma más eficaz.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

La elección del tipo de modulación va íntimamente ligada con la elección de la tasa de codificación del canal. Una vez elegido el modo de operación (concepto que abordaremos más adelante en esta misma sección) y el intervalo de guarda, la capacidad y el comportamiento del sistema dependen del efecto combinado de la tasa de codificación y el esquema de modulación. La elección de uno u otro tiene influencias en la relación portadora a ruido ( $C/N$ ) necesaria en recepción para una decodificación libre de errores.

Por ejemplo, para el caso de una tasa de codificación de  $1/2$ , y evaluando los resultados obtenidos por simulación para un canal gaussiano (rayo directo + ruido, es decir, un entorno de laboratorio), se comprueba que la relación  $C/N$  más pequeña corresponde al tipo QPSK (3,1 dB), mientras que la  $C/N$  más grande corresponde al 64-QAM (14,4 dB), es decir hay una diferencia de 11,3 dB manteniendo fijos todos los parámetros del sistema y modificando tan sólo el tipo de modulación. La razón se debe a la diferencia entre las constelaciones de cada uno de los esquemas. Suponiendo en todos la misma energía media, para la modulación QPSK los puntos de dicha constelación se encuentran más alejados los unos de los otros, lo cual ofrece una mayor inmunidad frente a cualquier tipo de interferencias, como pueda ser el ruido. La modulación 64-QAM, por el contrario, presenta una menor distancia entre puntos, haciéndose más sensibles a interferencias, y necesitando por lo tanto una  $C/N$  mayor. Conforme las condiciones de recepción empeoran, la diferencia entre usar uno u otro esquema de modulación aumentan.

Esta característica de menor nivel de  $C/N$  para el tipo QPSK que para el tipo 64-QAM tiene por el contrario un efecto negativo que es la menor capacidad de poder enviar información. Si se compara el régimen binario útil que se puede conseguir con un tipo de modulación u otro, manteniendo fijos el resto de parámetros del sistema, se comprueba que para el esquema 64-QAM es tres veces superior al esquema QPSK. Tomando como ejemplo el modo 8k, con una tasa de codificación de  $2/3$  y un intervalo de guarda de  $1/4$ , el flujo binario para 64 QAM es de 19,91 Mbps mientras que para QPSK es de 6,64 Mbps.

El tipo de modulación elegido para la Televisión Digital Terrestre con funcionamiento en red de frecuencia única es el 64-QAM no jerárquico.

### Modo de operación

El modo de operación viene determinado por el número de subportadoras entre las que se reparte la información. En OFDM se ha de elegir un número alto para que el tiempo de símbolo de cada subportadora sea muy superior al retardo del eco.

El estándar distingue dos modos de operación: El modo 2k, que dispone de 1705 portadoras separadas 4.464 KHz, y el modo 8k, con 6817 portadoras separadas 1.116 KHz. Teóricamente el modo 8K podría generar 8182 subportadoras, pero en la práctica, un símbolo OFDM está compuesto sólo por 6817 subportadoras, de las cuales se utilizan 6048 para la información y las restantes para tramas de sincronización y señalización.

Por tanto, la tasa neta de símbolo es de 6.75 Msps ( $6048 \cdot 1116$ ). Para obtener el régimen binario neto habrá que conocer qué tipo de modulación tienen los símbolos. Por ejemplo en caso de usar una QPSK tendremos un  $R_b = 13.5$  Mbps.

En realidad la capacidad real será menor debido a la inserción de periodos de guarda y nunca se utilizará esta capacidad máxima. Además, existen 769 subportadoras para señalización, de tres clases:

- **Portadoras Piloto Continuas (Continual Pilots)** Para sincronización del receptor en frecuencia y en fase.
- **Portadoras Piloto Dispersas (Scattered Pilots):** Para regeneración del canal en módulo y fase en el receptor y ecualización de canal.
- **Portadoras TPS (Transmission Parameter Signals)** Aportan información del modo transmitido (modo de transmisión, modulación, código interno, intervalo de guarda,...

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

La modulación de las portadoras piloto es diferente a la de las subportadoras de datos, siendo BPSK. Los niveles de potencia también difieren respecto a las portadoras de datos. En la figura 2.13 se muestran las portadoras piloto y su ubicación en la trama. Por su parte, la figura 2.14 refleja la ubicación de las piloto en la constelación, desde un punto de vista teórico y real, respectivamente.

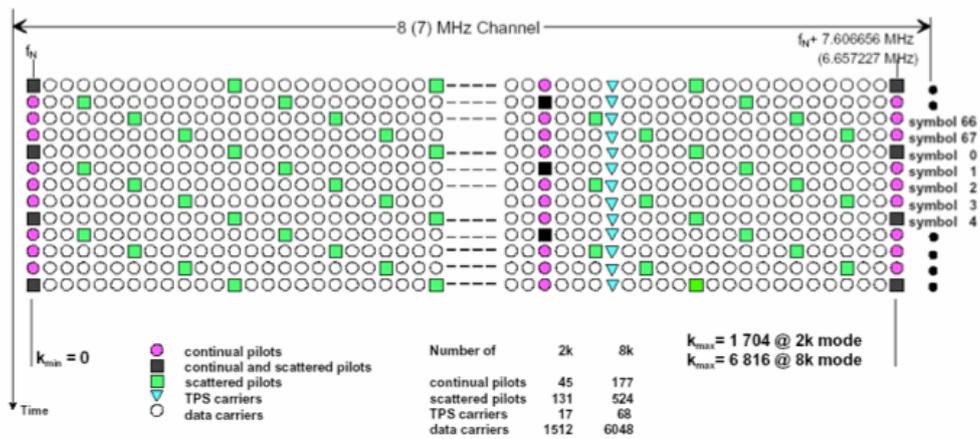
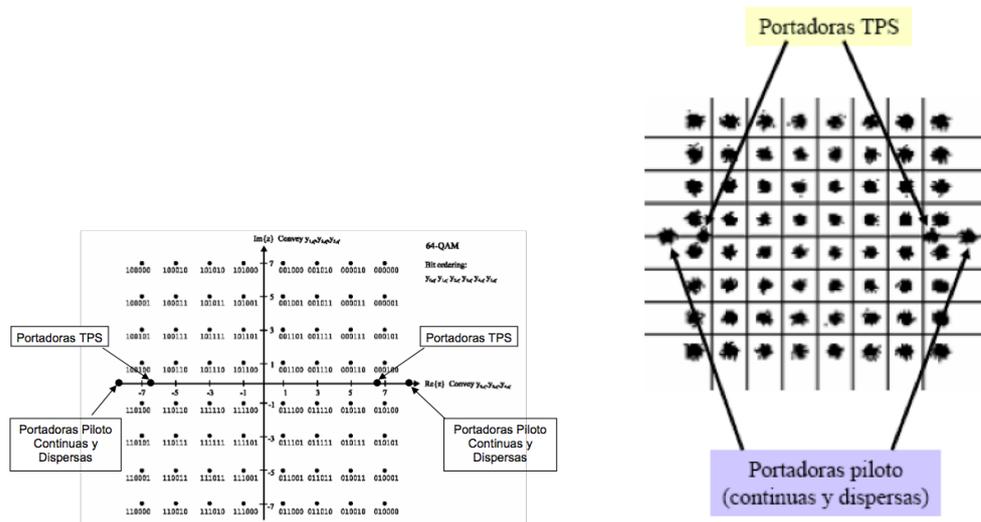


Figura 2.13: Ubicación de las portadoras piloto en la trama



(a) Ubicación teórica de las portadoras piloto en la constelación

(b) Ubicación real

Figura 2.14: Ubicación de las portadoras piloto en la constelación

Además, la incorporación de estas portadoras piloto en número y distribución adecuadas exige organizar la señal transmitida en tramas. Cada trama consiste en 68 símbolos OFDM, numerados del 0 al 67. A su vez se genera una *súper-trama* cada cuatro tramas, independientemente del modo de operación. Una vez definidas las *súper-tramas*, formamos *mega-tramas* cada 32 tramas en caso de modo 2k, u 8 tramas en caso del 8k.

### Intervalo de guarda

Como se ha avanzado en secciones anteriores de esta memoria, la duración total de un símbolo OFDM está compuesto por el tiempo útil del símbolo  $T_u$ , que está determinado por el modo de operación, más un tiempo  $\Delta$  *inútil* desde el punto de vista de transmisión de información denominado intervalo de guarda, de acuerdo a la siguiente fórmula

$$T_s = T_u + \Delta$$

La especificación define la longitud de un intervalo de guarda como una fracción del

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

intervalo de tiempo útil del símbolo OFDM. Se definen cuatro valores:  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$  y  $1/32$ . Cuanto mayor sea el intervalo de guarda, mayor será la capacidad para compensar ecos de larga duración, aunque por contra aumentará el tiempo total de duración de un símbolo y con ello disminuirá la tasa de información útil que se puede enviar, ya que el intervalo de guarda no contribuye a la parte útil de la señal OFDM.

Así, por ejemplo, si se considera una modulación QPSK con tasa de codificación de  $1/2$ , se comprueba que el régimen binario es de 4,98 Mbps para el caso de relación intervalo de guarda/período útil de símbolo =  $1/4$ , mientras que para el caso de  $1/32$  se obtiene un flujo neto de 6,03 Mbps. Ahora bien, el aumento del flujo neto también tiene como contrapartida una menor protección contra interferencia de símbolos anteriores. Si se desea mantener la redundancia en un nivel bajo, se debería escoger un intervalo de guarda lo más corto posible en comparación con el intervalo de tiempo útil.

De todos los valores posibles, el intervalo de guarda mayor es el correspondiente al modo 8k y al valor de  $1/4$  y tiene una duración de  $224 \mu s$ . Este intervalo es lo suficientemente grande para evitar interferencias de cualquier tipo de ecos, así como de cualquier transmisor que, emitiendo en la misma frecuencia, esté separado una distancia considerable (alrededor de 67 kilómetros). El intervalo de guarda más pequeño, el correspondiente al modo 2k e intervalo  $1/32$ , tiene una duración de  $7 \mu s$  y es suficiente para proteger la señal de ecos naturales, excepto casos excepcionales, como zonas montañosas, en las que los ecos pueden ser mayores.

La elección del número de portadoras va íntimamente ligada con la elección del intervalo de guarda. La elección de estos dos parámetros va a depender del tipo de red que se desee implantar. Si la red va a ser de tipo local o de tipo convencional, es decir, redes multifrecuencia, son válidos los intervalos de guarda más pequeños ( $1/32$  ó  $1/16$ ), tanto para el modo 2k como el 8k. Ahora bien, si se trata de establecer redes de frecuencia única con grandes áreas de cobertura, el parámetro que va a imponer tanto el intervalo de guarda como el modo de operación es la máxima separación necesaria entre

los transmisores de la red. El modo 8k es capaz de funcionar con cualquiera de esas situaciones en SFN. Sin embargo, el 2k sólo es capaz de soportar el funcionamiento si la separación entre transmisores es lo suficientemente pequeña.

Por último, en cuanto al número de portadoras, cabe decir que para un determinado intervalo de guarda el modo 8k proporciona la tasa de bits más alta. La elección entre los dos modos de operación depende tanto de la configuración como del coste y disponibilidad de los receptores. En este sentido es importante señalar que los receptores preparados para el modo 2k sólo serán capaces de recibir este tipo de emisiones, no las del modo 8k. Por su parte los receptores para 8k dispondrán de la posibilidad de recepción dual, tanto del modo 2k como del 8k.

### **Modulaciones jerárquicas y parámetro alfa**

Otra característica definida en la especificación DVB-T es la posibilidad de utilización de modulaciones jerárquicas.

Mientras que para la señal analógica la calidad decrece gradualmente conforme nos alejamos del área de cobertura, las técnicas de transmisión digital preservan la calidad hasta un cierto punto a partir del cual cae abruptamente. Para superar este problema, los datos transmitidos pueden dividirse en dos partes: una versión con baja tasa de transmisión de bit pero alto grado de robustez y otra versión menos robusta pero con una velocidad de transmisión superior. Esta segunda parte puede destinarse, asimismo, a dos objetivos: aprovecharse para la transmisión de otros programas o para la transmisión del mismo servicio pero con un significativo aumento de la calidad (emisión simultánea o Simulcast).

Dentro del concepto de modulación jerárquica, es especialmente relevante el parámetro  $\alpha$ . Se define como la relación de la distancia existente entre dos puntos vecinos, pertenecientes a un cuadrante distinto cada uno, y la distancia existente entre dos puntos vecinos dentro de un mismo cuadrante. La especificación DVB-T define tres valores

para este parámetro:  $\alpha=1, 2$  y  $4$ . En el modo de transmisión no jerárquico, todos los paquetes MPEG son procesados y codificados de la misma forma, lo cual conlleva a un grado de protección único para todos los programas presentes en ese flujo, y no resulta beneficioso tener un  $\alpha \neq 1$ .

Sin entrar en detalles, el estándar define dos modalidades de emisión, a saber

- **Emisión simultánea:** Se transmiten dos flujos con diferente prioridad, que serán mejor recibidos en función de las condiciones del medio.
- **Emisión multiprograma:** Los programas de los dos flujos son distintos, pudiendo dar contenidos adicionales al de baja prioridad.

Existen, no obstante, aunque permite evitar la degradación abrupta de la recepción, existen ciertos inconvenientes en la modulación jerárquica que en muchas ocasiones provocan su no utilización. Entre ellos podemos destacar

- Necesidad de mayor capacidad de procesado que la modulación no jerárquica.
- Necesidad de un *splitter* a la salida del codificador MPEG-2.
- Duplicado del codificador de canal, con diferente mapeado para cada uno de los flujos.
- Elevado coste de equipamiento.

### 2.3.2. Recepción y sincronización de OFDM

Una vez hemos detallado tanto la modulación OFDM como el esquema DVB-T, es importante estudiar los procesos de recepción de la señal, y más específicamente los mecanismos de sincronización de la ventana FFT, dada la importancia que tendrá no sólo en la demodulación, sino también a la hora de planificar y realizar correctamente las simulaciones de los estudios. Conviene recordar lo que ya adelantamos en el capítulo introductorio: es necesario un correcto modelado del receptor en términos de sincronización e ISI para tener estimaciones reales de cobertura. No sirve de nada suponer un comportamiento de los receptores para

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

afirmar niveles de cobertura si en realidad los fabricantes no aseguran ese comportamiento. De hecho, los simuladores, por lo general, predicen la cobertura usando modelos de dos dimensiones, teniendo solo en cuenta la aportación por el camino directo, pero ésto es inviable en escenarios SFN en el sentido que el concepto “camino directo” no es tal, dado que como sabemos ya, se reciben varias aportaciones. En modelados de tres dimensiones, arquitecturas MFN y SFN son igual de complicadas.

En primer lugar, el funcionamiento del receptor es muy dependiente de la manera en que se coloca la ventana de FFT en relación a las varias señales recibidas que pueden estar presentes en un entorno de múltiples direcciones de recepción o en una red SFN. La posición de la ventana de FFT afecta el comportamiento del receptor en lo que respecta a la interferencia intersímbolo (ISI).

En segundo lugar, el modelo del comportamiento del receptor en simulaciones de cobertura de la red tiene que estar en línea con las estrategias de la sincronización y el tratamiento de interferencia intersímbolo de los receptores, para dar predicciones fiables de la cobertura. Sin embargo, las estrategias de sincronización de los fabricantes individuales son temas comercialmente sensibles y por tanto no disponibles públicamente. Por lo tanto, las predicciones tienen que ser realizadas en base a supuestos.

La sincronización de un receptor OFDM se realiza en dos etapas:

1. Sincronización inicial en la cual el receptor se alinea con la tasa de símbolo, y
2. Sincronización secundaria en la cual el receptor coloca la ventana de FFT para demodular la señal.

La sincronización inicial se realiza normalmente mediante la correlación de muestras separadas  $T_u$  en tiempo. Cuando la forma de onda se repite, la salida del correlador excede un valor de umbral. Entonces el receptor puede detectar el comienzo de un nuevo período del símbolo. La figura 2.15 muestra esquemáticamente cómo se realiza la sincronización.

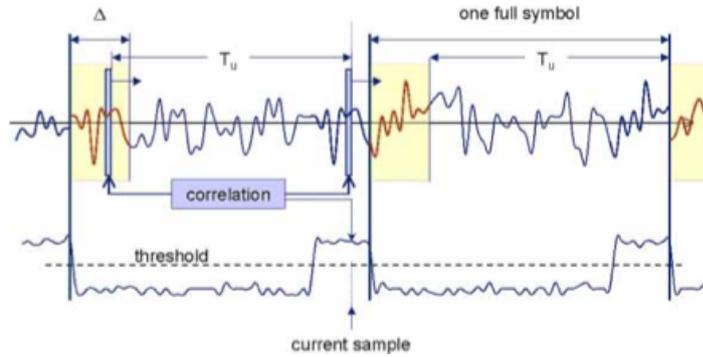


Figura 2.15: Sincronización del receptor. Fase I - Sincronización gruesa

La sincronización secundaria es la que determinará en gran parte el comportamiento del receptor frente a los ecos y recepciones desde distintas fuentes. Por tanto, una mala sincronización secundaria conllevará una tasa elevada de ISI, dado que al alinear mal la ventana FFT, puede que recibamos símbolos distintos de cada fuente.

Idealmente, en ausencias de ecos u otras aportaciones, el receptor posicionaría la ventana FFT coincidiendo con el período de símbolo y no es necesario intervalo de guarda. Sin embargo, cuando hay más recepciones la situación se complica. Si tenemos, por ejemplo dos aportes, con un retraso entre ellos, entonces el posicionar la ventana FFT en una de ellas conlleva inherente un solape con el símbolo anterior o posterior de la otra aportación (si la ventana FFT tiene la misma longitud que el símbolo, es decir, sin intervalo de guarda), generándose la ISI que esto conlleva, tal como se aprecia en la figura 2.16.

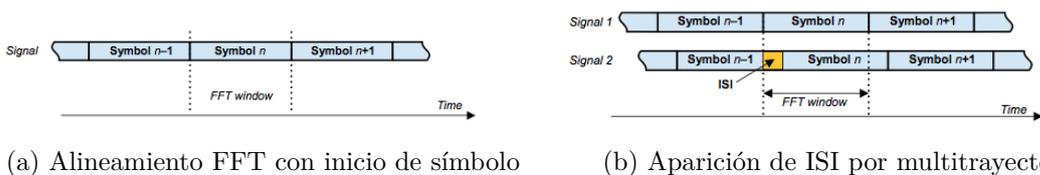


Figura 2.16: Alineamiento de la ventana FFT en receptor

A la vista de lo anterior, si se copia el inicio del símbolo justo al final del mismo, incre-

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

mentando el tiempo de símbolo en una cantidad igual al intervalo de guarda  $\Delta$ , a la hora de posicionar la ventana de la FFT, como ésta tiene longitud igual a la de símbolo (sin contar el incremento debido al intervalo de guarda), la situación mejora puesto que se podrá (si no hay mucho desfase entre la recepción de los símbolos desde las diferentes fuentes) posicionarla de forma que en la ventana solo se tenga el mismo símbolo desde las dos fuentes. De esta forma se evita la ISI y se obtiene cierto rango de movilidad de la ventana para que los aportes de todas las fuentes posibles mantengan el mismo símbolo en el interior de la ventana en un instante concreto. En la figura 2.17 se aprecia la situación en la que se alinea la ventana de tal forma que los aportes de las dos fuentes mantienen el mismo símbolo en la ventana FFT. Esquemáticamente, en la figura 2.18 se refleja el efecto del intervalo de guarda, y de cómo gracias a éste se elimina la ISI.

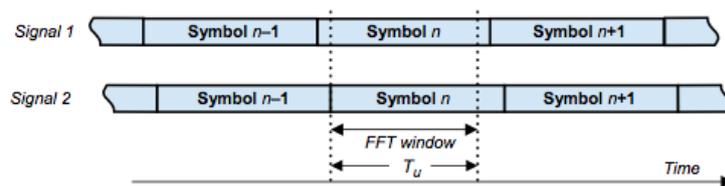


Figura 2.17: Alineamiento de la ventana FFT con varias fuentes

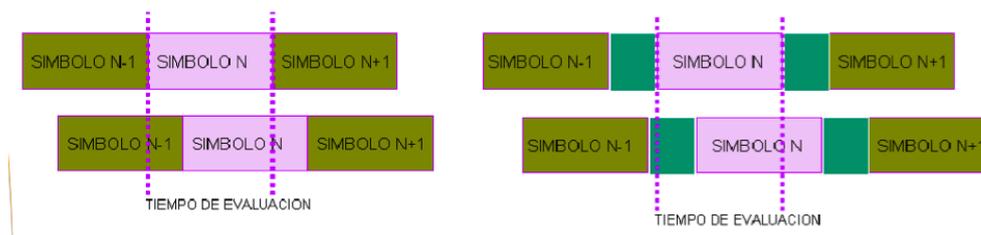


Figura 2.18: Ejemplo de eliminación de ISI gracias al intervalo de guarda

Al hablar de aportes de señal en un receptor tenemos que considerarlos de dos tipos. Por un lado catalogaremos los ocasionados por recepción multitrayecto de una misma fuente, es decir, causado por ejemplo por rebotes en accidentes orográficos cercanos, edificios u otras

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

características del terreno. Esta señal rebotada, por lo general, se caracteriza por un desfase pequeño respecto a la señal principal y una magnitud que puede ser considerable. Por otro lado existirá aporte de señal por parte de otros centros emisores distintos al transmisor que consideramos inicialmente como principal. En este caso, es lógico pensar que el desfase entre ambas señales sea considerable, en tanto esperamos que el transmisor secundario se encuentre a una distancia significativa del receptor, y una atenuación notable frente a la señal principal, si ambos centros emisores transmiten una misma PRA.

Es este último tipo de aporte el que tendrá más importancia cara al estudio de autointerferencia. El desfase entre diferentes señales es teóricamente imposible de eliminar en tanto el punto de recepción no esté exactamente a la misma distancia de ambas fuentes. La propia propagación de la señal introduce un retraso que debemos tener controlado. La necesidad de este control la encontramos, como ya hemos argumentado anteriormente, en que si este desfase es mayor que el cubierto por el intervalo de guarda, será imposible un alineamiento de la ventana FFT sin que el aporte *lejano* no se deba considerar interferente.

No obstante, existen varias técnicas para minimizar el impacto de estas interferencias. Un primer mecanismo, fundamental, es lograr un alineamiento óptimo de la ventana FFT de forma que consigamos disminuir en lo posible el número de transmisores cuya recepción será interferente, e intentar que la magnitud de la interferencia sufrida sea la menor posible.

Antes de pasar a estudiar las diferentes técnicas de alineamiento de la ventana, es necesario hacer notar algunas consideraciones

- Que la ausencia de normativa al respecto de cómo afrontar este posicionamiento provoca que cada fabricante aporte su propia solución, lo cual tiene implicaciones negativas desde el punto de vista de la planificación, impidiendo tener un escenario modelo sobre el que optimizar el diseño.
- Que ninguno de los métodos que presentaremos es óptimo.
- Que la sincronización es aún más importante en escenarios de recepción móvil, en la

que el canal sufre fuertes variaciones rápidamente, y además se producen pre-ecos y post-ecos.

Pasamos ya a estudiar las diferentes estrategias de sincronización. Cada estrategia determina cuál de los picos de amplitud (en el dominio temporal) se utiliza para sincronizar, y cómo se posiciona la ventana FFT respecto a ese pico.

Se va a suponer un único escenario para explicar las diferencias entre las estrategias, en el que al receptor llegan cuatro señales DVB-T, idénticas, desde cuatro localizaciones distintas, con un orden de llegada y unas magnitudes determinadas, como se detallan en la figura 2.19.

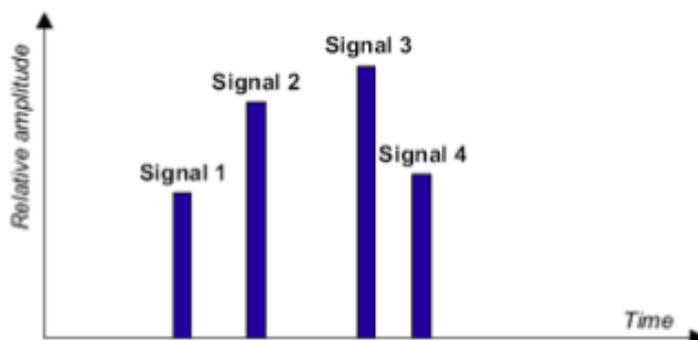


Figura 2.19: Escenario modelo para las diferentes estrategias de sincronización

### Señal más fuerte

Se toma como pico para sincronizar el de mayor magnitud. Respecto a la forma de posicionar la ventana frente al pico, lo más usual es que si es factible que puedan existir pre-ecos, se posicione el centro de la ventana en el pico recibido. Variaciones más complejas permiten posicionar no solo el centro de la ventana, en función de los retrasos del resto de los aportes. La ventana FFT quedaría alineada según se muestra en la figura 2.20.

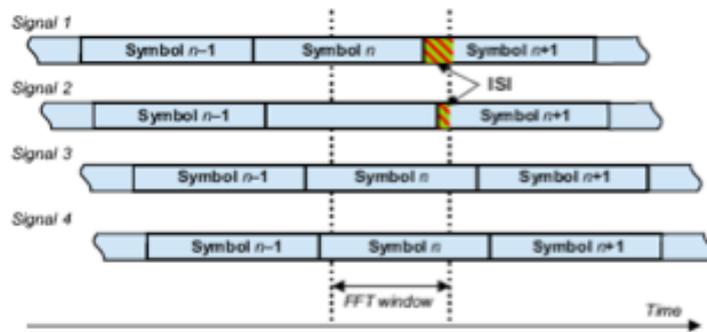


Figura 2.20: Estrategia alineamiento con señal más fuerte

### Primera señal por encima de un umbral

Esta estrategia toma la primera señal en superar un determinado umbral como referencia para posicionar la ventana FFT. Por tanto, una buena elección de este umbral es crítico en términos de rendimiento.

Normalmente, el umbral se sitúa en una cantidad de 6 ó 10 dB por debajo de la señal más fuerte o en términos del campo mínimo necesario. Es el que se usará en las simulaciones y el que sugiere la EBU (European Broadcasting Union). En la figura 2.21 se muestra el escenario modelo con la representación del umbral.

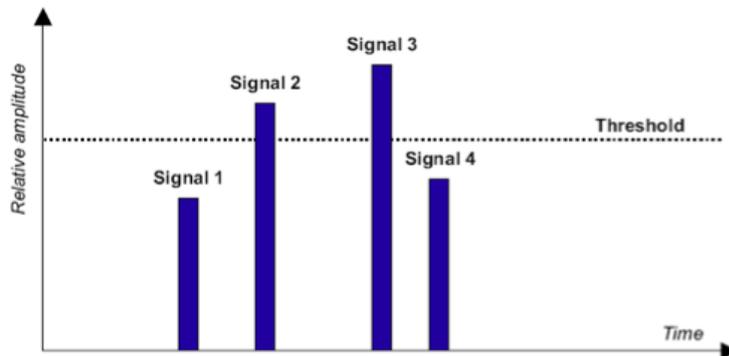


Figura 2.21: Escenario modelo con umbral

Por lo general, se alinea el final de la ventana con el final del símbolo tomado como referencia. El resultado es el mostrado en la figura 2.22

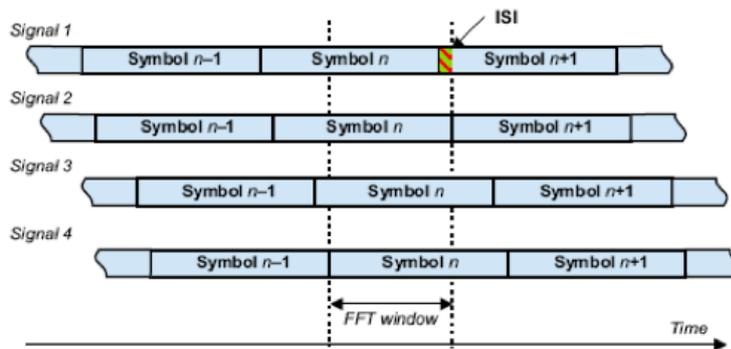


Figura 2.22: Estrategia de alineamiento de primera señal por encima de umbral

Esta es la estrategia más utilizada por los fabricantes, ratificado por la asociación DigitalEurope<sup>7</sup> y recomendada por la EBU<sup>8</sup>. Por tanto será el método utilizado en los

<sup>7</sup>La asociación DigitalEurope (antigua EICTA), formada por compañías del sector, indicó que esta estrategia es, efectivamente, la más implementada por los fabricantes de receptores y la que da los mejores resultados con un compromiso de velocidad de procesamiento.

<sup>8</sup>La European Broadcasting Union es un organismo que agrupa a 23 organizaciones de radiodifusores de Europa y Regiones Africanas del Mediterráneo.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

estudios del Proyecto y se va a profundizar un poco más en el funcionamiento de este mecanismo de elección de alineamiento de la ventana.

Para ello, nos ayudaremos de la figura 2.23. Para tratar de comprender el mecanismo de funcionamiento, se ha simplificado un poco, de forma que nos centraremos en una de las 6817 portadoras viendo qué pasa cuando se reciben varias señales. Se han dibujado sólo tres símbolos, el que nos interesa, y los símbolos anterior y posterior al mismo.

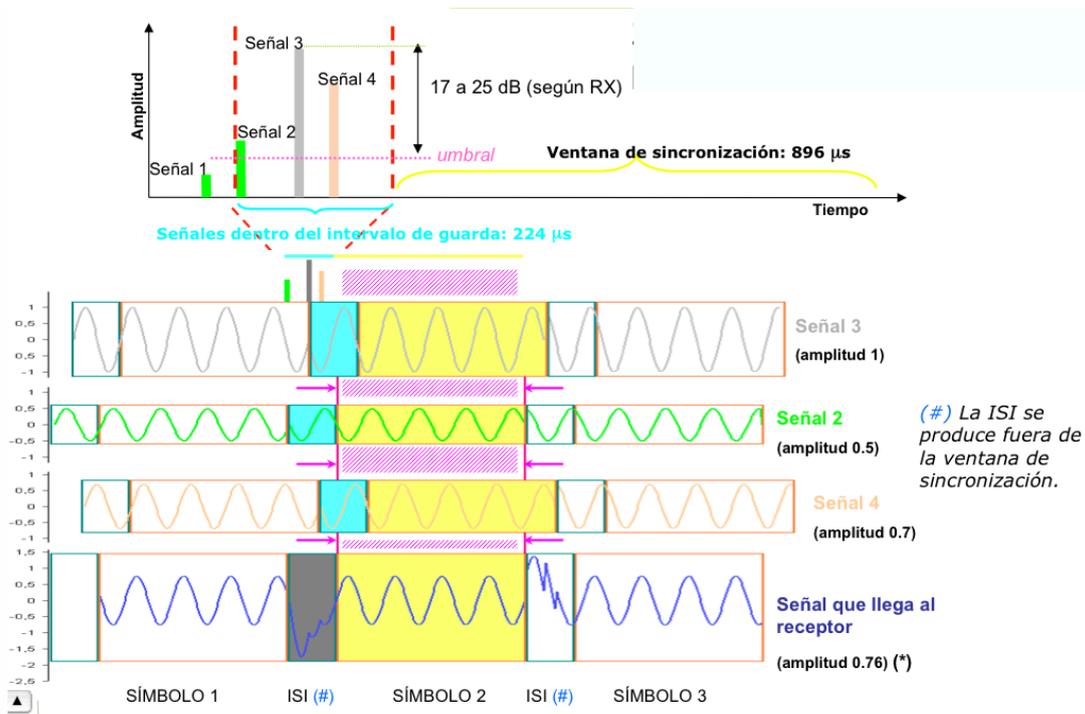


Figura 2.23: Mecanismo de sincronización mediante la primera señal por encima de un umbral

La señal de mayor nivel va a ser la señal principal. A las que llegan antes de la principal se las llama pre-ecos, y a las que llegan después, ecos. Para referirnos a todas en conjunto, hablamos simplemente de ecos. La señal principal va a marcar un umbral de interferencia, de manera que las señales con un nivel por debajo de dicho umbral no van a ser relevantes en el proceso de sincronización.

El proceso simplificado de recepción es el siguiente

- La señal de mayor nivel determina el umbral de interferencia. En nuestro ejemplo es la señal 3.
- Las señales por debajo de este umbral prácticamente no influyen. En nuestro ejemplo, la señal 1.
- El primer pre-eco por encima del umbral determina el comienzo de la ventana de guarda. En nuestro ejemplo, la señal 2.
- Las señales que lleguen por encima del umbral y dentro de la ventana de guarda, no van a producir interferencia entre símbolos. En nuestro ejemplo son las señales 2, 3 y 4.
- Las señales que lleguen por encima del umbral y fuera de la ventana de guarda, van a producir interferencia entre símbolos. En nuestro ejemplo no hay.

El receptor va a *ver* todas estas señales como una sola, que es la suma de todas ellas, pero es una suma vectorial, no escalar, lo que significa que no solo se tiene en cuenta el valor absoluto de las señales, sino también el retardo (desfase) entre ellas, y habrá ecos que contribuyan positivamente al balance total, y otros negativamente.

En el ejemplo podemos ver que las amplitudes relativas de las 3 señales que llegan son 1 , 0.5 y 0.7, y el nivel de la suma de todas ellas es 0.76, es decir, menor incluso que la señal principal. Esta es una característica típica de los canales de transmisión afectados por multitrayecto.

En nuestro ejemplo podemos comprobar que en la señal que llega al receptor la ISI está limitada al intervalo de guarda (que cumple perfectamente la función encomendada), y que los tres símbolos representados se reciben correctamente.

Conviene no obstante resaltar que, en general, la presencia de ecos no beneficia la recepción, sino que la degrada. La existencia de ecos es inevitable, y **la modulación COFDM se ha diseñado para tolerar los multitrayectos, no para beneficiarse de ellos.**

### Centro de gravedad

En esta estrategia se posiciona el centro de la ventana FFT en el *centro de gravedad*, que se define según la ecuación 2.2

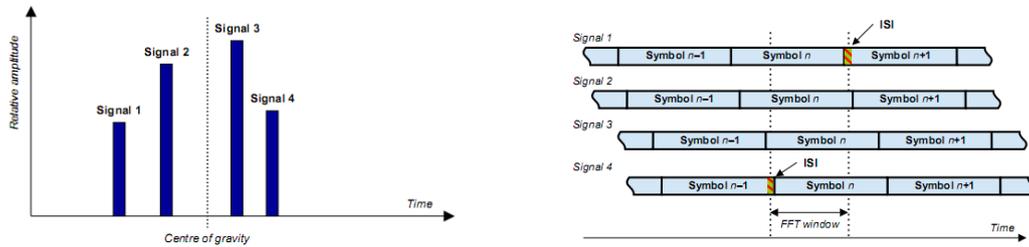
$$t_c = \frac{\sum_i p_i t_i}{\sum_i p_i} \quad (2.2)$$

donde  $t_c$  representa el centro de gravedad,  $p_i$  la potencia de la respuesta al impulso de la señal  $i$ -ésima y  $t_i$  el tiempo de la respuesta al impulso de la señal  $i$ -ésima. Por tanto, es una relación que pondera las potencias de cada aportación con respecto al total.

Esta estrategia se comporta muy bien en situaciones en las que tenemos pre-ecos y señales retrasadas de amplitud similar, ya que no fija la posición de la FFT en función de ninguna señal, sino que considera una respuesta promediada de la respuesta impulsiva del canal. Por otro lado, puede provocar la aparición de ISI en escenarios en los que otras estrategias no las provocaría. Por ejemplo, casos en los que tenemos dos ecos, separados por una longitud igual o muy similar al intervalo de guarda provocará dificultades en esta estrategia, a menos que las dos aportaciones tengan amplitudes similares.

En la figura 2.24 se muestra tanto la ubicación del centro de gravedad en el ejemplo considerado como la ISI que queda con el alineamiento de la ventana FFT en el mismo.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO



(a) Alineamiento de la ventana FFT con el centro de gravedad  
 (b) ISI por alineamiento con el centro de gravedad

Figura 2.24: Estrategia de alineamiento con el centro de gravedad

### Estrategia cuasi-óptima

Esta estrategia se describe mediante el diagrama de flujo de la figura 2.25.

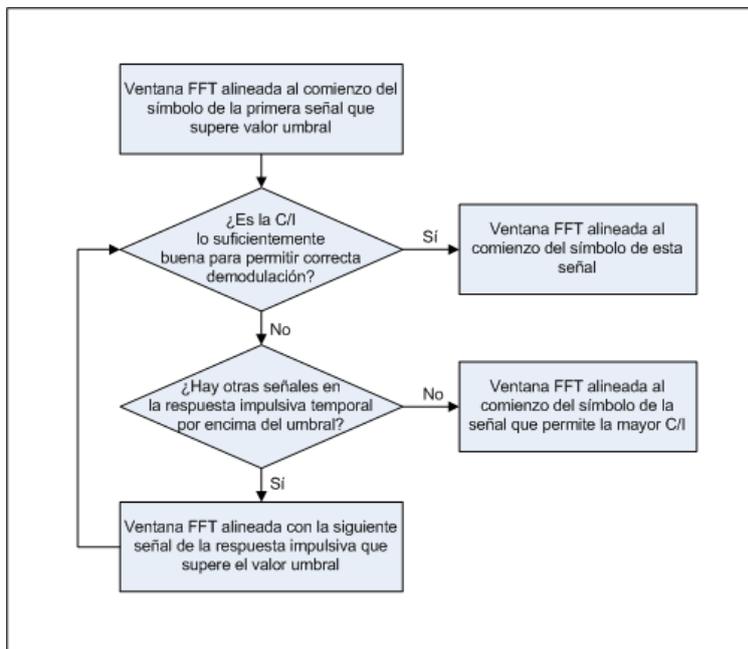


Figura 2.25: Algoritmo de la estrategia cuasi-óptima

Comienza considerando como señal potencial con la que alinear la FFT la primera por encima de un determinado umbral. Si la  $C/I$  es suficientemente buena (paso 1) como

para permitir la demodulación, alinea el comienzo de la FFT con con el comienzo del símbolo que se ha tomado como potencial. En caso que la C/I no sea suficientemente buena, se busca si hay alguna otra señal en la respuesta impulsiva por encima del umbral. En caso negativo, se alinea la FFT con el comienzo del símbolo de señal que conlleva la máxima C/I. En caso afirmativo, se comprueba la C/I (paso 1) con la dicha señal, y se continua con el proceso hasta que se de con alguna señal que sí “provoque” una C/I suficiente.

Hay que recalcar que esta estrategia no busca el alineamiento de FFT tal que tengamos la mejor C/I, sino que busca una posición suficientemente buena que permita la demodulación y decodificación con una tasa de error aceptable.

### **Estrategia de alineamiento con máxima C/I**

Las estrategias anteriores tienen como objetivo el encontrar una buena posición para el alineamiento de la ventana FFT, y por tanto una buena sincronización, pero la elección óptima para posicionarla es realmente aquella posición en la que C/I efectiva se maximice. Ésta es difícil de calcular, pero sobre todo, conlleva un tiempo excesivo en ser calculado, por lo que el caso más extendido es adoptar una o varias de las estrategias anteriores.

Este proceder queda además justificado cuando se demuestra que la C/I tiene un máximo relativamente plano, por lo que no se comete un error de consideración si en vez del máximo tomamos una aproximación al mismo.

Una estrategia aún más compleja de encontrar la posición que maximiza la C/I se basa en la observación de que en dicha posición se encuentra siempre con un alineamiento de ventana con el principio o el final de uno de los símbolos de las diferentes fuentes recibidas. Realizar la comprobación correspondiente en un escenario de N fuentes de señal conlleva 2N evaluaciones, que se refleja en un coste computacional doble o triple con respecto a cualquiera de las estrategias anteriores, y, por lo general y salvo equipos

profesionales, no se encuentra muy extendida.

Sin embargo, existen escenarios en los que esta estrategia es la única que elimina la ISI. Uno de ellos, que en este Proyecto se da en algún caso, es aquel en el que tenemos dos fuentes, cuya diferencia temporal es muy próxima al intervalo de guarda.

### **2.4. Las redes de TDT**

Llegados a este punto, aunque iniciemos una nueva sección dedicada a las redes de TDT desplegadas en España, la realidad es que la mayoría de los conceptos referentes a las redes han sido ya explicados en apartados anteriores, para introducir o justificar otros. No obstante, servirá este bloque para recordar los más importantes y explicar con más detalle aquellos que solo fueron introducidos.

#### **2.4.1. La cadena de transmisión**

Uno de los aspectos por los que se ha pasado por alto ha sido la composición de la cadena de transmisión de la señal digital. No es objeto del Proyecto el profundizar en cada uno de los componentes de la cadena, si bien si se considera importante el tener al menos una visión general de los procesos implicados desde la generación de los contenidos de los programas hasta la recepción en el hogar de la señal. El esquema de la cadena de transmisión se muestra en las imágenes de la figura 2.26.

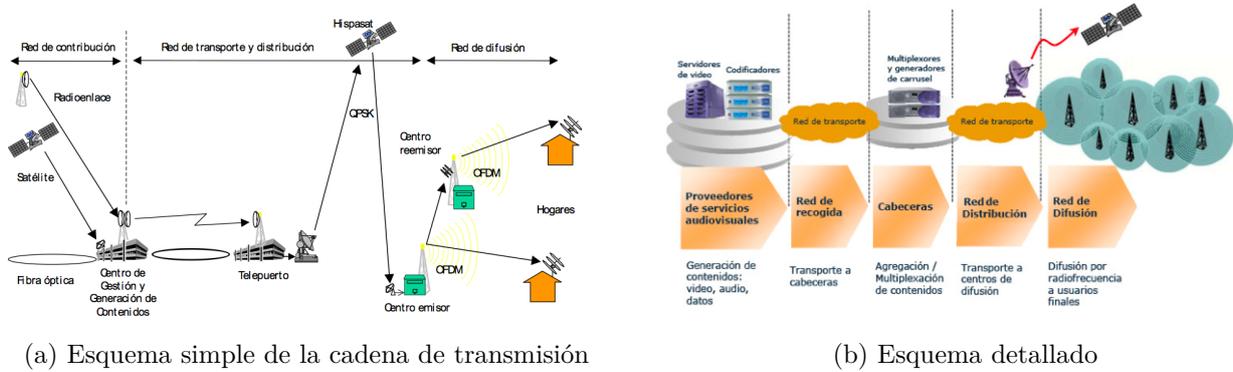


Figura 2.26: Cadena de transmisión de la Televisión Digital Terrestre

Las señales o programas se deben de transmitir en primer lugar desde los puntos en que se generan hasta la cabecera, donde serán ensamblados (multiplexados). Para este propósito se utiliza la red de contribución. Una vez generados esta señal múltiplex en la cabecera, se transportan desde ésta hasta los centros de difusión para ser radiodifundidos. Para este propósito se diseña e implanta la red de transmisión y distribución primaria. En el centro de multiplexado se inyectan también los paquetes MIP de inicialización de megatrama.

Una vez llega la señal a los centros emisores, se difunden utilizando los canales radio-eléctricos asignados en la banda de UHF. Dichos centros constituyen la red de difusión primaria. Las zonas de sombra que pudiesen quedar de los centros emisores se cubren utilizando reemisores, que toman la señal de los centros emisores de difusión anteriores y los redifunden a la misma frecuencia (denominándose gapfillers en su acepción inglesa). Estos gapfiller constituirán la red de difusión secundaria.

Todos los transmisores y reemisores de la red constituida pueden operar en modo de red de frecuencia única, es decir, es necesario un sistema de sincronización. La red de sincronización utilizada se basa en el empleo de un sistema de GPS que actúa como base de tiempo y emite a su vez una serie de pulsos a intervalos regulares, que se utiliza en los transmisores para fijar los instantes de emisión de símbolo. Esta referencia se genera al realizar la Multiplexación del Transport Stream.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

El sistema de adaptación a red de frecuencia única consiste en un equipo insertador de paquete MIP (Megaframe Initialization Packet) en el Transport Stream MPEG-2; el paquete MIP es necesario para la sincronización de los moduladores OFDM que componen la red de difusión. El paquete MIP permite también el control de los diferentes moduladores para una aplicación uniforme del modo de transmisión en los puntos de difusión. Este equipo insertador de MIP se sincroniza en tiempo con una referencia de una fuente de sincronización controlada por GPS (Global Positioning System). Se muestra un ejemplo en la figura 2.27

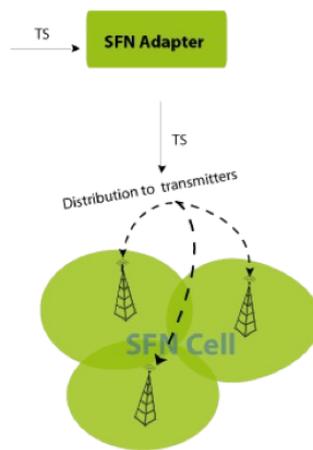


Figura 2.27: Referencia de sincronización en la Transport Stream y adaptador SFN

Un Sistema de Gestión centralizado es capaz de monitorizar, telesupervisar y telecontrolar todos y cada uno de los elementos que componen las redes de Televisión Digital Terrestre.

No está de más comentar los problemas potenciales en cada una de las etapas de la cadena y recepción.

### ■ Problemas potenciales en la cabecera

- Incidencias en equipamiento

- Fallos de señal en producción
- Fallos de señalización
- **Problemas potenciales en difusión**
  - Incidencias en el transmisor
  - Autointerferencias de red
  - Interferencias cocanal
  - Señales dentro del intervalo de guarda con nivel similar ( $\pm 1$  dB)
  - Señales cercanas en el tiempo
- **Problemas potenciales en recepción**
  - Instalación inadecuada
  - Apuntamiento de antenas a mejor servidor o desapuntamiento
  - Diferencias estrategias de enganche (Alineamiento FFT) del receptor
  - Diferencias de nivel entre los múltiplex

### 2.4.2. Resumen de parámetros de planificación

Se resume en esta sección los parámetros más importantes relativos a la señal, tanto los referentes a DVB-T como otros importantes para las simulaciones o convenios a la hora de establecer niveles umbral.

#### Modo de Operación

Se utilizará el modo 8k, con duración de intervalo de guarda de 224  $\mu$ segundos (es decir, 1/4 de símbolo), modulación de portadoras 64-QAM, y FEC o código de protección de 2/3, quedando un bitrate de 19.91 Mbps. El método de compresión utilizado es MPEG-2.

### Modelo de propagación

Se ha utilizado ITU R526 para tener en cuenta características del terreno, en vez de usar la recomendada ITU R370. Asimismo, se ha cumplido la recomendación ITU-R P.1546, sobre los métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3000 MHz. Por tanto, como modelo de propagación, para todas las simulaciones realizadas, se ha utilizado el modelo estandarizado por la ITU-R P.526.

### Relaciones C/N mínimas

La relación C/N mínima para unas determinadas condiciones de recepción se define como aquel valor de relación portadora/ruido que provoca una BER de  $2 \cdot 10^{-4}$  después de Viterbi, referencia considerada válida para un buen nivel de calidad.

En principio, la relación C/N requerida para la recepción de un servicio en el sistema TDT es una variable aleatoria dependiente de las características del canal (composición de ecos en una red SFN, *fadings*, etc.), del modo de transmisión seleccionado y de los códigos de protección empleados. De cara a planificación se considera un entorno urbano y una recepción fija (es decir utilizando antenas fijas sobre tejado). En dicha situación, se puede considerar que la relación C/N mínima, según indica la documentación disponible y comprobada en diversas pruebas de campo, a partir de la cual la señal DVB-T se degrada considerablemente es 20 dB.

### Cobertura para C/N con canal gaussiano y para C/N con canal Rayleigh

Para modelar la recepción de televisión, la ITU define tres canales: Gaussiano, Rice y Rayleigh. Recordemos las características de estos canales: El canal Gaussiano es ideal, equivale a una transmisión libre de perturbaciones y se usa para evaluar equipos y en laboratorio. El canal Rice modela la recepción directa de la señal con algún rebote y equivale a la recepción exterior fija. Finalmente, el canal Rayleigh modela la recepción de rebotes, sin una señal directa y equivale a la recepción portátil interior.

La ITU, en la recomendación EN 101 190, define las relaciones C/N mínimas necesarias

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

para la correcta recepción de señal DVB-T para recepción exterior fija, portátil exterior y portátil interior, equivalentes a los canales Rice y Rayleigh. Para la configuración de señal empleada, 8K 64-QAM 2/3, se comprueba, en la figura adjunta, que la relación C/N necesaria para recepción en canal Rice es de 17.1 dB mientras que, para canal Rayleigh, es de 19.3 dB. Estos valores también se pueden comprobar con la gráfica mostrada por la figura 2.28

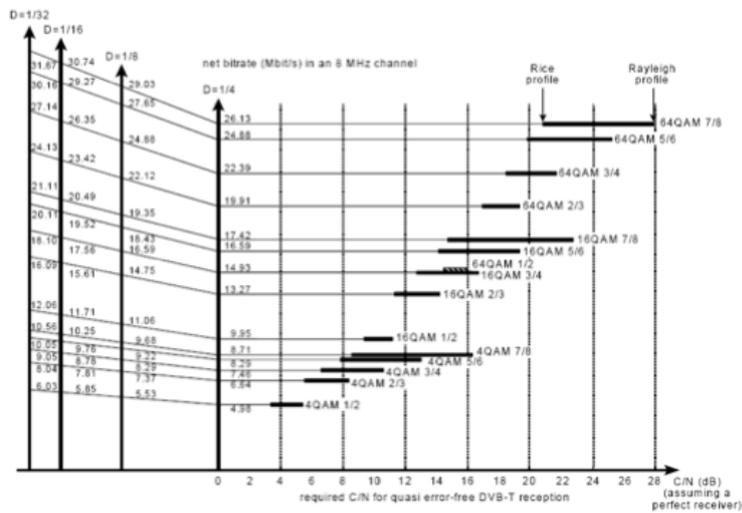


Figura 2.28: Cálculo de relaciones C/N en señales DVB-T

Estas relaciones C/N determinan el nivel de campo necesario para asegurar la cobertura en las zonas de servicio. A partir de la relación señal a ruido mínima necesaria en el receptor para asegurar la condición de tasa máxima de error descrita, teniendo en cuenta todas las pérdidas de transmisión, se concluye en el nivel de campo usado en planificación y descrito en el apartados anterior. En este caso, se ha planificado la red para obtener cobertura exterior fija.

En la figura 2.29 se muestran las máscaras de los tres canales.

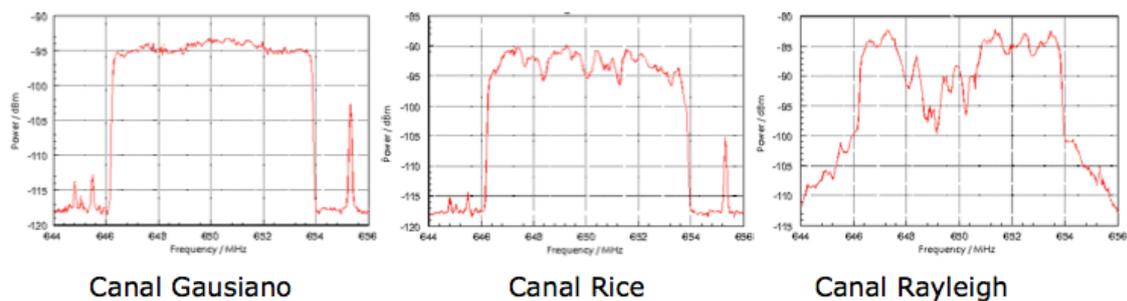


Figura 2.29: Representación de canales gaussianos, Rice y Rayleigh

### Antenas de recepción

La directividad de las antenas de recepción utilizadas en la planificación realizada es la especificada en la Rec. UIT-R 419. El valor de la ganancia, usado en la determinación de los valores de campo mínimo mediano es de 10-12 dB.

### Tanto por ciento de calidad del sistema

Se considera que para obtener una calidad de servicio como la normalmente prevista para el servicio de difusión de televisión en entornos de recepción fija, es necesaria una protección para el 99 % del tiempo y el 95 % de los emplazamientos.

### Continuidad de servicio

Se garantiza una disponibilidad media de 99,75 %, entendida como la permanencia de señal con la calidad y el nivel adecuados para su recepción y demodulación correctas por los receptores en todos y cada uno de los canales radioeléctricos y en todos los puntos de las zonas de cobertura, calculada sobre la base del estudio detallado de los tiempos medios entre fallos (MBTF) y las redundancias planteadas.

### Calidad de la señal de imagen y de sonido

Se garantiza una tasa de error binario (BER) no superior a  $2 \cdot 10^{-4}$ , a la salida del decodificador Reed-Solomon del receptor, para la señal en todas las zonas de cobertura y en cada uno de los canales.

### Condiciones de recepción y calidad del servicio

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

La calidad requerida se obtiene siempre que se asegure un determinado nivel de campo útil dentro del área de servicio de la estación. Los valores apropiados son obtenidos a partir del Informe de Chester'97 y de la propia experiencia interna de la empresa basada en resultados previos.

Los requisitos básicos del sistema referidos a las condiciones de recepción establecen que, inicialmente, el servicio deberá ser accesible (con la calidad requerida, esto es, con el nivel de campo adecuado) del mismo modo que en la actualidad, es decir, recepción con antenas fijas situadas en las azoteas de los edificios o bien a una altura mínima de 10 metros. Esto se considerará válido para cualquier tipo de entorno, rural o urbano y en todo el área de cobertura, con una probabilidad del 95 %. En este caso, el canal de propagación es el canal Rice en general.

A medida que nuevos servicios y equipos receptores portátiles sean accesibles por los usuarios, las condiciones de recepción son más restrictivas. En este caso, se trata de recepción portátil exterior a una altura de 1,5 metros (Clase A) o interior (Clase B), esta última a diferentes niveles dentro del edificio. Los canales de propagación adecuados para el concepto de portabilidad son gaussiano, Rice y Rayleigh.

### **Niveles de campo**

El mínimo nivel de campo válido para que una población se considere cubierta (para cobertura fija exterior) es de  $54 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , en banda IV, y  $58 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , en banda V.

En la figura 2.30 se muestran estos y otros niveles de referencia que se requieren en la planificación.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

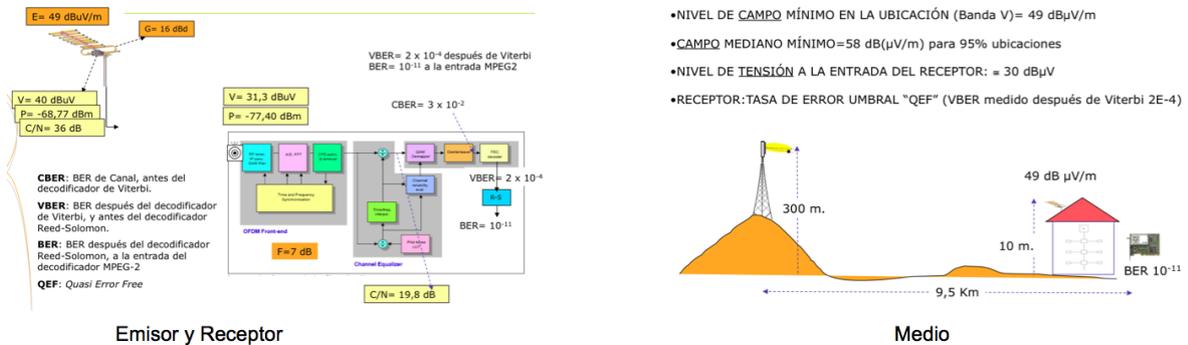


Figura 2.30: Niveles de referencia en planificación

Diversas pruebas efectuadas revelan que los niveles típicos de tensión mínimos de funcionamiento de los receptores domésticos de TDT (para el modo de trabajo utilizado actualmente: 64 QAM, FEC 2/3 e intervalo de guarda 1/4) son del orden de  $30 \text{ dB}\mu\text{V}$  cuando existe una única señal dentro de una red SFN. No obstante existen receptores en el mercado que funcionan con valores inferiores (del orden de  $25 \text{ dB}\mu\text{V}$ ), y otros que sin embargo necesitan valores superiores a  $30 \text{ dB}\mu\text{V}$ . Por tanto, la sensibilidad, así como la figura de ruido del propio receptor son factores importantes.

En el caso de recibir dos señales del mismo orden de nivel y solo en esa circunstancia, los valores mínimos de tensión necesarios son del orden de 3-4 dB superiores a los mínimos reseñados para una sola señal. El motivo de este margen adicional hay que buscarlo en la rápida degradación de la MER en estas condiciones. Recordar también que habrá que añadir otro margen responsable en los casos de recepción de señales desfasadas una separación igual a la longitud del intervalo de guarda.

### Relaciones de protección

Se utiliza la relación de protección para caracterizar la interacción de los diferentes servicios. Se define como la relación mínima necesaria entre la potencia de señal deseada y la potencia de señal interferente para un determinado grado de degradación de la señal deseada, bien sea objetiva o subjetiva.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

Este grado de degradación dependerá de la naturaleza de la interferencia, si ésta es continua o troposférica. Para interferencia continua las relaciones de protección se aplicarán el 50 % del tiempo, mientras que para la troposférica se aplicará sólo al 1 % del tiempo.

Estas relaciones de protección deben determinarse para todas las posibles combinaciones relevantes de señales. Normalmente se suele hablar de dos tipos de relaciones de protección: relaciones de protección cocanal y relaciones de protección en canales adyacentes.

Las relaciones de protección cocanal dependen principalmente del sistema, mientras que las adyacentes dependen mayoritariamente de las emisiones fuera de banda de la señal y el filtrado realizado en el receptor. La relación de protección dependerá de la robustez del modo seleccionado.

Al respecto de una interferente digital (DVB-T), las relaciones de protección se muestran en la figura 2.31, quedando un margen de 40 dB para los canales adyacentes y frecuencia imagen y 20 dB para el caso cocanal con recepción fija (22 dB se recepción portátil). En cuanto a interferentes analógicas, los niveles son de 34 dB respecto al canal adyacente inferior, 38 dB frente al adyacente superior, y 4 dB frente a interferentes cocanales. La protección frente a frecuencia imagen se fija en 46 dB.

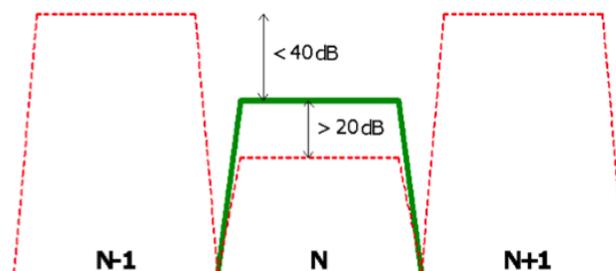


Figura 2.31: Relaciones de protección en DVB-T frente a interferente digital

### Método de estimación de las pérdidas de propagación

Para este proyecto, se realiza una planificación basada en el método ITU-R P.526, válido para todos los entornos y los tres tipos de escenarios de recepción salvo en el caso de urbano y recepción portátil exterior.

### 2.4.3. Tratamiento de las autointerferencias en redes SFN

Pese a que ya se han descrito la mayoría de los conceptos relativos a las autointerferencias, se va a tratar de sintetizar en esta sección tanto los aspectos más importantes como los mecanismos que se proponen en el Proyecto para minimizar los efectos nocivos de las mismas.

Un posible punto de partida es recordar el concepto de zona de solape en un escenario SFN con recepción desde varias fuentes. Se denomina zona de solape a aquella zona de cobertura en la que se reciben señales (misma frecuencia y mismo contenido) de diferentes transmisores o debidas a rebotes de la señal principal. La tecnología TDT, y en especial la modulación COFDM, permite que todas las señales que se reciben en un punto de la zona de cobertura con una diferencia de tiempo menor que el intervalo de guarda ( $224 \mu\text{s}$ ) sean señales útiles no interferentes.

La tecnología TDT permite retardar o adelantar el momento en el que se debe iniciar la emisión del TS con respecto a la base de tiempos ofrecida por el GPS en un transmisor para que en una zona de solape la diferencia de tiempo entre las señales que llegan desde diferentes transmisores esté dentro del intervalo de guarda. Este retardo se introduce en el modulador del transmisor, y se le denomina retardo estático de emisión. En los reemisores, el retardo estático se hereda del transmisor donante.

Supongamos ahora el escenario de la figura 2.32. En ella se muestra (columna derecha) una zona en la que dos transmisores Tx-A y Tx-B separados por una distancia considerable poseen diagramas de radiación y potencias de emisión tales que se produce una zona de solape en una región central. Concretamente el ejemplo nos indica que el desfase entre la recepción de ambas fuentes se cifra en  $240 \mu\text{s}$ . Este desfase, como sabemos ya, hará que

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

exista ISI en el receptor de la zona de solape estudiada (representada por una antena yagi), por lo que se dice que existe autointerferencia en la zona de solape. Dependiendo del caso, esta autointerferencia puede ser tan perjudicial que sea imposible realizar la demodulación correctamente, quedando esa zona sin cobertura.

Este hecho sabemos que es muy perjudicial para la recepción y habría que evitarlo a toda costa. Por lo que se ha comentado dos párrafos atrás, la tecnología TDT nos permite retardar la emisión desde un centro en concreto, gracias al adaptador SFN del que ya hemos hablado en otros puntos de la memoria. Pues bien, esta es la particularidad que se va a explotar en el objetivo de eliminar la autointerferencia.

Para ello, en este ejemplo concreto, podríamos actuar sobre el retardo estático del transmisor Tx-B, de forma que adelantemos la emisión un tiempo tal que, en la zona de solape estudiada, el retardo neto entre las recepciones de ambas fuentes pase de los  $240 \mu\text{s}$  iniciales a un valor inferior a los  $224 \mu\text{s}$  que disponemos de intervalo de guarda. Por ejemplo, adelantamos la emisión en una cantidad de  $16 \mu\text{s}$ . De esta forma nuestro escenario pasa a ser el de la fila inferior de la figura 2.32, en la que ambas aportaciones tienen un retardo neto entre ellas tal que en el alineamiento de la ventana FFT del receptor de la zona de solape no se produzcan autointerferencias. En caso de conseguirlo, la zona de solape pasa a ser zona de cobertura. Sin embargo, no debemos perder nunca de vista el hecho de que la autointerferencia, o si lo queremos ver de otro modo, el área de solape, no desaparece al eliminar el aporte de señal fuera del intervalo de guarda, sino que *se mueve* a otra zona geográfica.

Este hecho es muy importante, por dos motivos. El primero es que el uso de esta técnica nos obliga a tener presente el *movimiento* de la zona geográfica que sufrirá los problemas de interferencia, pues operaciones no controladas pueden hacer que simplemente desplacemos el problema, sin solucionarlo en ningún caso. El segundo motivo, enlazando con lo que se acaba de comentar, nos da una pista sobre qué hacer en estos casos. En caso de que la red SFN estudiada tenga carácter regional, se ha de intentar, siempre que sea posible, *desplazar* la zona potencialmente interferida fuera de los límites de la red. También se podrá utilizar el

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

mar, lagos o zonas débilmente pobladas como destino de esta zona. En uno de los estudios que se presentarán en el capítulo 3 se podrá observar el desplazamiento de las zonas interferidas.

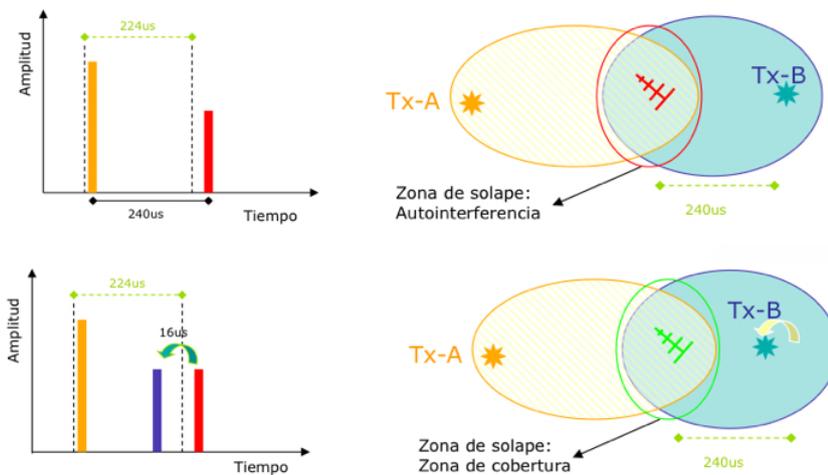


Figura 2.32: Situaciones posibles en zonas de solape y autointerferencias

No es difícil pensar en una red SFN de la envergadura de las desplegadas en estos momentos en España, es decir, de todo el territorio estatal, para darnos cuenta de lo extremadamente complejo que resulta una planificación de los retardos estáticos de todos los centros del país de forma que eliminemos las autointerferencias. Además de la complejidad inherente a la naturaleza de la red, pensemos además en la variedad de potencias utilizadas, las limitaciones impuestas, por ejemplo por regulaciones internacionales, falta de datos fiables de configuración de algunos centros, deficiencias en la transmisión por diagramas de radiación incorrectos, adición de nuevos centros a posteriori de la planificación y un sinfín de posibles problemas para ver hasta qué punto es difícil obtener un diseño final sin este tipo de complicaciones. De todas formas, existen una serie de directrices para la asignación inicial de retardos estáticos en todos los centros de la red, y las explicaremos más adelante en este mismo punto.

Analicemos ahora otro escenario, parecido al presentado anteriormente, con algo más detalle. Es el mostrado en la figura 2.33.

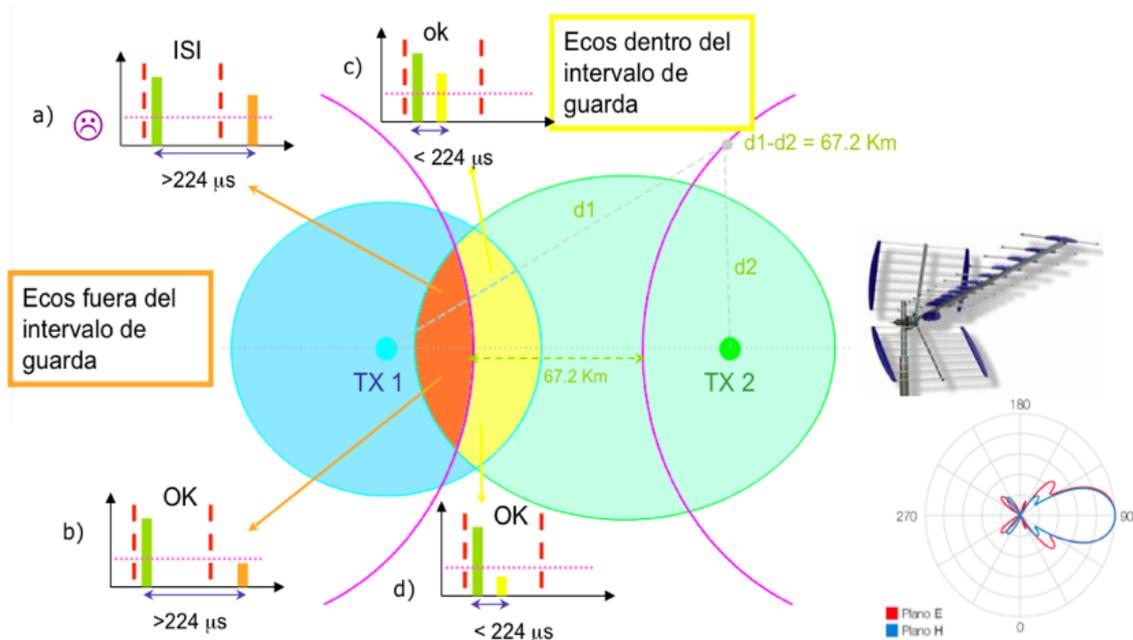


Figura 2.33: Escenario de estudio detallado de autointerferencias

El escenario en sí mismo es muy parecido al explicado anteriormente, pero introducimos dos nuevas consideraciones. En primer lugar, la diferencia de magnitud entre las recepciones de ambas fuentes en función de la zona que estemos considerando (más concretamente observamos que el transmisor TX 2 cubre regiones muy próximas al centro TX 1, pero no ocurre lo mismo al contrario), y por otro lado, que la distancia entre los transmisores puede ser tal que resulte imposible, mediante ajuste de retardos estáticos, eliminar la autointerferencia en algunas zonas.

Este último dato lo representamos en la figura por medio de las hipérbolas que marcan la región en la que la diferencia entre las distancias relativas a cada transmisor supera los 67.2 Kms (que es la distancia a la que se propaga una señal TDT de referencia en espacio libre durante el tiempo del período de guarda de la TDT en España, 224 µs).

Dentro de la zona de solape pueden distinguirse a su vez otras dos zonas, una en la que la

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

señal del TX 2 llega fuera del intervalo de guarda, y otra en la que está dentro. La primera es representada en color rojo, y la segunda en amarillo.

El cronograma de recepción que se obtendría en un receptor de la zona de solape roja es el representado por las subgráficas a) y b) del diagrama. En ambas, observamos, el retardo neto supera la longitud del intervalo de guarda. La diferencia entre ambas situaciones es el nivel de recepción del TX 2.

En el caso a) la magnitud de la señal recibida por parte del segundo transmisor es moderadamente alta. Si consideramos que en el receptor se utiliza la estrategia de alineamiento de la ventana con la primera señal por encima del umbral, con el umbral especificado en la figura, nos encontramos con una situación clásica de autointerferencia, es decir, con ISI acusada, y una correcta recepción no está ni mucho menos garantizada. De ahí que acompañe a la figura un usuario triste porque no puede ver correctamente su programa preferido.

Por otro lado, la subfigura b) representa la misma zona solapada, pero ahora supongamos que introducimos un desapuntamiento controlado de la antena receptora, intentando posicionarla lo suficientemente despuntada del mejor servidor para que sus niveles de señal estén por encima de los  $58 \text{ dB}\mu/\text{m}$  para que pueda considerarse buena, y a la vez la magnitud del TX 2 descienda de forma acusada. Con esto pretendemos conseguir que esté por debajo del umbral, de forma que no afecte a la demodulación. En este caso, la recepción es correcta y equivalente al caso sin autointerferencias. Lo hacemos notar en la figura por medio de un *OK* en mayúsculas, pues la mejor de las situaciones con la que nos podemos encontrar. Para comprender mejor lo que se consigue con el desapuntamiento de la antena, se remite al lector a la figura 2.7

Las zonas solapadas de color amarillo corresponden a aquellas regiones en las que el desfase neto entre la recepción de las aportaciones de los dos transmisores es menor que la longitud del intervalo de guarda, es decir, el eco cae dentro del intervalo de guarda, por lo que no va a existir interferencia entre símbolos. No obstante, la presencia del eco puede

degradar la calidad de la señal y reducir el margen de la instalación. Se puede mejorar la calidad de la señal reduciendo el nivel del eco, tal y como se muestra en la figura, donde la situación en d) es más favorable que en c), por medio del despuntamiento de la antena. Un caso especialmente desfavorable es la presencia de ecos con un nivel igual o muy similar al de la señal principal. En estos casos, la calidad puede degradarse profundamente. Para solucionarlo se debe tratar de atenuar una de las dos señales, de forma que la diferencia de nivel entre ellas sea lo mayor posible.

Una de las conclusiones que podemos extraer de este ejemplo es que, como ya hemos mencionado en otras ocasiones a lo largo de la memoria, el nivel de señal no ha de considerarse como parámetro de calidad en las instalaciones, sino que se ha de prestar especial cuidado con la MER o BER.

Podemos citar, al hilo de lo explicado en los párrafos anteriores, algunos mecanismos de reducción de las interferencias

- **Reducción potencia transmisor:** Si reducimos la potencia de emisión y no perdemos cobertura frente a la planificada, podemos reducir el solape de coberturas con otras emisiones cercanas, reduciendo por tanto la interferencia.
- **Reducción de la ganancia del sistema radiante:** El factor que se tiene realmente para medir interferencia es la PRA, que depende tanto de la potencia del transmisor como de la ganancia del sistema radiante. Por tanto, disminuir la ganancia del SR (reduciendo la potencia en dirección de máxima radiación) provoca el mismo efecto que reducir la potencia de transmisión.
- **Rediseño del diagrama de radiación:** Permitirá eliminar interferencias localizadas en un ácimut determinado o zona.
- **Cambio de polarización:** Mediante un cambio en la polarización se puede ganar una discriminación de unos 16 dB en UHF usando una yagi convencional. Sin embargo, sólo podremos argumentar el cambio de polarización respecto de la planificada en casos realmente justificados.

Si se nos presenta un escenario en el que existe una zona solapada con autointerferencias, sería lógico pensar en solucionar el problema, en caso de ser imposible el ajuste de retardos, mediante la instalación de un reemisor en las inmediaciones, de forma que se convirtiera en el mejor servidor en esa zona. Sin embargo, esta opción plantea varios inconvenientes, además del coste de la nueva infraestructura. El primero de ellos es que, siempre que se pueda, se ha de intentar mantener la antenización de los usuarios de la zona afectada. El segundo inconveniente, que hemos de tener siempre presente, es que el añadir nuevos centros a la red, además de solucionar los problemas de recepción en las zonas objetivo, puede generar solape en otras zonas con otros centros ya instalados.

Sobre este último concepto, hemos de al menos mencionar el concepto de *SFN error rate*, o SER, que es el incremento de BER causada por un sobredimensionamiento de la red. Recordemos que el abuso de centros reemisores, o el desplegar más centros de los estrictamente necesarios conllevará un incremento de la BER y la MER que pueden llegar a degradar la recepción. Por otro lado, otra bibliografía apunta a la definición de *ganancia de red SFN*, que es la diferencia de potencia requerida para cubrir una determinada área con la misma probabilidad, al sustituir los transmisores existentes de MFN a SFN.

### 2.4.4. Problemas específicos de las redes SFN

Para finalizar esta sección, se presentan los problemas técnicos específicos de las redes SFN que no se consideraron en el primer listado de la sección 2.1.3.

- **Averías de equipamiento asociado a la sincronización**
  - Adaptador de frecuencia única
  - GPS en centro de multiplexado o en centro de difusión
  - Transmisor
  - Modulador
  - Sistema Radiante
- **Ajuste incorrecto de la sincronización**

- Error en el cálculo de retardos
- **Variaciones de las condiciones de emisión**
  - Pueden ser, por ejemplo, las señales que llegan por propagación sobre el mar en verano, y que llegan fuera del intervalo de guarda
- **Complejidad de sincronización de la red en todos los puntos de cobertura**
  - Debido a que la planificación de la red se realiza para maximizar la cobertura y, aunque siempre se realiza intentando alcanzar el compromiso entre la maximización de cobertura y las interferencias, es imposible en algunos casos eliminarlas totalmente, es decir, no se podrá evitar que en algunas zonas de cobertura lleguen señales fuera del intervalo de guarda. No obstante, incluso en estas condiciones puede lograrse en algunos casos una recepción correcta, si se consigue reducir el efecto de las señales fuera del intervalo de guarda, mejorando la relación C/I.
- **Mala coordinación entre operadores**
  - En el caso de que un mismo múltiplex sea operado por operadores distintos sin que previamente se hayan coordinado las condiciones de emisión de ambos puede provocar zonas de interferencia.

### 2.5. La suite de simulación radioeléctrica Sirenet

Las simulaciones y estudios radioeléctricos del presente proyecto se realizan bajo la herramienta Sirenet. Sirenet es una herramienta de gestión del espectro radioeléctrico destinada a la planificación de redes radio y al estudio de elementos interferentes. La herramienta se basa en la simulación de entornos reales apoyándose en un avanzado sistema de información geográfica, en la reproducción exacta del comportamiento de los equipos radioeléctricos y en algoritmos avanzados para la predicción de la propagación en distintos entornos y para distintos servicios. Un listado de los servicios ya contemplados en la aplicación se muestra en la figura 2.34

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

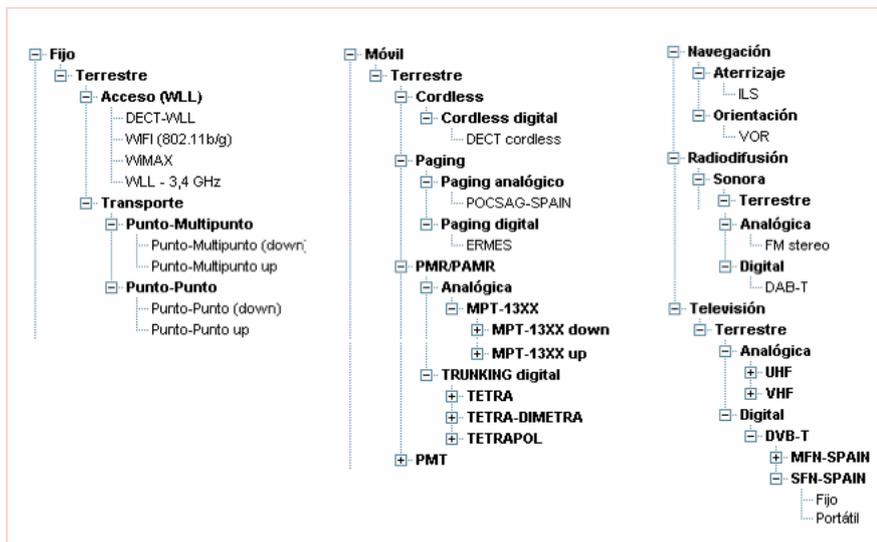


Figura 2.34: Listado de servicios contemplados en Sirenet

El sistema de información geográfica aporta una amplia funcionalidad a la aplicación desde el punto de vista tanto de gestión de los datos cartográficos de entrada a cualquier cálculo, como de representación gráfica de cualquier tipo de información vinculada a un emplazamiento físico. Podemos resaltar como puntos más relevantes

- Gestión de información de las características orográficas de la zona a tratar.
- Representación de mapas y representación virtual de las estaciones radioeléctricas y múltiples capas de información
  - Modelos digitales del terreno (altimetría).
  - Morfografía del terreno (clutter).
  - Demografía.
  - Administrativas (municipios, regiones, etc.).
- Base de datos abierta de sistemas de proyección y coordenadas, que permite utilizar cartografía en cualquier sistema.

- Representación gráfica de resultados de cálculos de propagación, degradaciones de cobertura y compatibilidad.
- Utilidades de dibujo y presentación de cara a informes.

Se estudian a continuación las características principales de la aplicación al respecto de los aspectos a valorar en una herramienta de simulación.

### 2.5.1. Cartografía

#### 2.5.1.1. Información cartográfica en Sirenet

Sirenet trabaja sobre un Sistema de Información Geográfica (GIS) denominado Intellimap. Este tipo de sistemas permite disponer de información de distinta temática con una característica común: se encuentra georeferenciada. De este modo, sobre una misma área geográfica es posible posicionar información de la orografía del terreno, contornos municipales, accidentes orográficos, distribución de la población, elementos de interés, estaciones radioeléctricas, etc. La información georeferenciada que emplea Sirenet se encuentra en dos formatos

- **Raster:** En este formato se encuentra toda la cartografía digital: altimetría, capas de visualización, morfografía, demografía y capas administrativas
- **Vectorial:** En este formato se almacenan las estaciones radioeléctricas, los gráficos generados en el *Modo Dibujo* y todos los elementos con carácter puntual que puede el usuario posicionar sobre el visor.

Sirenet, para modelar entornos reales en los estudios utiliza sistemas de coordenadas, capas de altimetría (MDT), capas de morfografía y capas de representación de la población (administrativas y demográficas).

Respecto a los **sistemas de coordenadas**, Sirenet puede trabajar con varios sistemas, y en los estudios se utilizará UTM30 basándose en el elipsoide de referencia que utiliza el datum ED-50. La pantalla de selección de sistemas de coordenadas se muestra en la figura 2.35

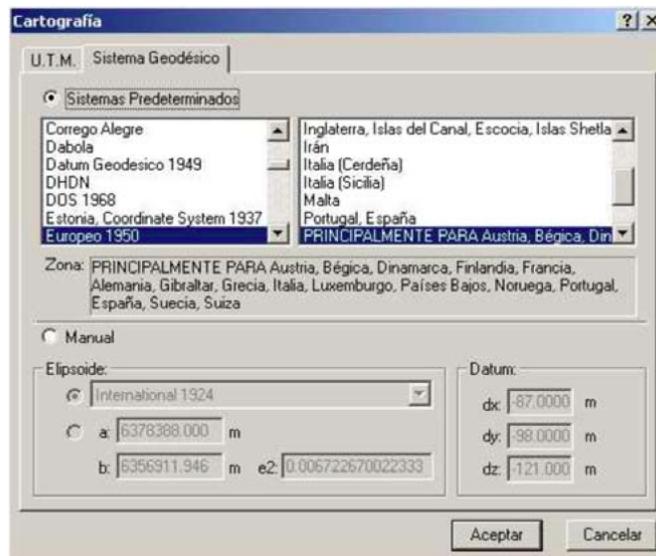


Figura 2.35: Pantalla de selección de sistema de coordenadas en Sirenet

### 2.5.1.2. Capas cartográficas en Sirenet

Sirenet dispone de un amplio catálogo de capas cartográficas y visuales. Las más representativas son:

#### Capas de altimetría (MDT)

El Modelo Digital del Terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Para los estudios se utilizará una capa de altimetría de España con una resolución de 50m x 50m. Esto significa que cada píxel de altimetría representado será de 50mx50m, y por ello los valores de cota irán variando cada 50mx50m.

#### Capas de visualización

Sirenet permite superponer *capas de visualización*, cuyo contenido carece de información cartográfica, no influyen en los cálculos y es puramente visual. Como ejemplo, podemos incluir mapas de diversa índole, para delimitar las zonas de estudio, las áreas técnicas, etcétera.

### Capas de morfografía

Las capas de morfografía indican las características del suelo en cada punto geográfico, y se utilizan estas informaciones en los cálculos de propagación radioeléctrica. Por ejemplo, se introducen en este tipo de capas las correcciones de cotas o las pérdidas adicionales a considerar en algunas zonas críticas. En los estudios del proyecto no se ha utilizado esta capa argumentando que la atenuación debida a los edificios se compensa en parte gracias a que los rebotes debidos a la recepción multicamino se suman constructivamente en el receptor si las aportaciones llegan dentro del intervalo de guarda, que es lo más normal en estas situaciones. Un ejemplo de gestión de capas de morfografía se muestra en la figura 2.36

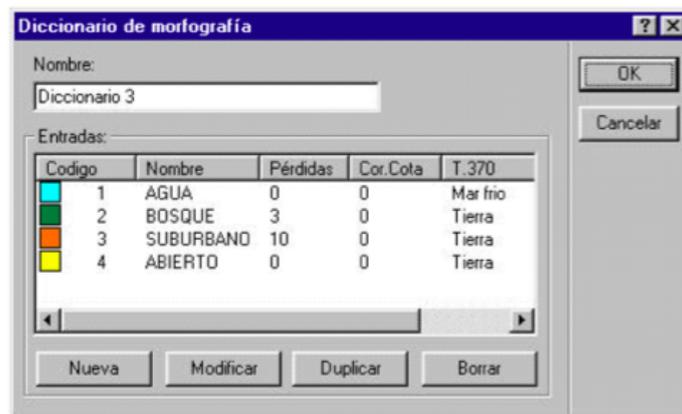


Figura 2.36: Ejemplo de capas de morfografía en Sirenet

### Capas de representación de población (administrativas y demográficas)

Gracias a estas capas podemos determinar el número de personas cubiertas o interferidas. La capa administrativa es una capa Raster formada por contornos de localidades. Cada contorno está formado por un grupo de píxeles, los cuales llevan un código asociado (código topónimo) a un diccionario de entidades administrativas, el cual importamos a Sirenet como archivo de texto. En el diccionario tenemos información sobre el nombre de la localidad y número de habitantes totales de la localidad. El diccionario utilizado está actualizado según los datos presentes en el Instituto Nacional de Estadística (INE).

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Cód. región	Cód. topónimo	Nombre de topó...	P Total	P<=58	P(%)>=58	S Total	S<=58
13026	13026000000	CABEZARRUE...	0.000000	0.000000	0.000000	1005900...	0.000000
13048	13048000000	HINOJOSAS DE ...	0.000000	0.000000	0.000000	1025200...	0.000000
13080	13080000000	SOLANA DEL PL...	0.000000	0.000000	0.000000	1800800...	0.000000
13055	13055000000	MESTANZA ("DL...	0.000000	0.000000	0.000000	3700000...	0.000000
13094	13094000000	VILLANUEVA D...	0.000000	0.000000	0.000000	1092500...	0.000000
13027	13027000000	CALZADA DE C...	0.000000	0.000000	0.000000	4109400...	0.000000
13098	13098000000	VISO DEL MAR...	0.000000	0.000000	0.000000	5332000...	7500.000
13084	13084000000	TORRE DE JUA...	0.000000	0.000000	0.000000	3987299...	0.000000
13033	13033000000	CASTELLAR DE...	0.000000	0.000000	0.000000	9550000...	0.000000
130011885	13033000100	CASTELLAR DE...	2209.0000	0.000000	0.000000	1530000...	0.000000
13090	13090000000	VILLAMANRIGU...	0.000000	0.000000	0.000000	3700000...	0.000000
130011969	13090000100	VILLAMANRIGUE	1500.0000	0.000000	0.000000	420000.00	0.000000
13069	13069000000	PUEBLA DEL PR...	0.000000	0.000000	0.000000	3387000...	0.000000
13057	13057000000	MONTI...	0.000000	0.000000	0.000000	7717896	0.000000

Figura 2.37: Ejemplo de informe administrativo en Sirenet

La capa demográfica da información sobre el número de habitantes por píxel. Esta capa da la información estadística del valor total de habitantes de cada uno de los píxeles a partir de la capa administrativa. Viene a ser parecido a un modelo digital del terreno donde en lugar de asociar a cada píxel un valor de cota asociamos un valor de habitantes. Si realizamos un estudio con la capa administrativa correspondiente, por ejemplo, a los censos de población, podremos utilizar los datos de la capa para estimaciones de cobertura en núcleos poblacionales concretos u otros datos de interés. Un ejemplo del informe administrativo, con el que se trabajará a lo largo de las simulaciones, se muestra en la figura 2.37

La introducción de los datos cartográficos (Sistemas de coordenadas, modelo digital del terreno y capas de visualización y auxiliares) se realiza a través de la pantalla que se muestra en la figura 2.38. En el capítulo 3 se realizará, no obstante, un ejemplo de configuración de los datos de un estudio completo.

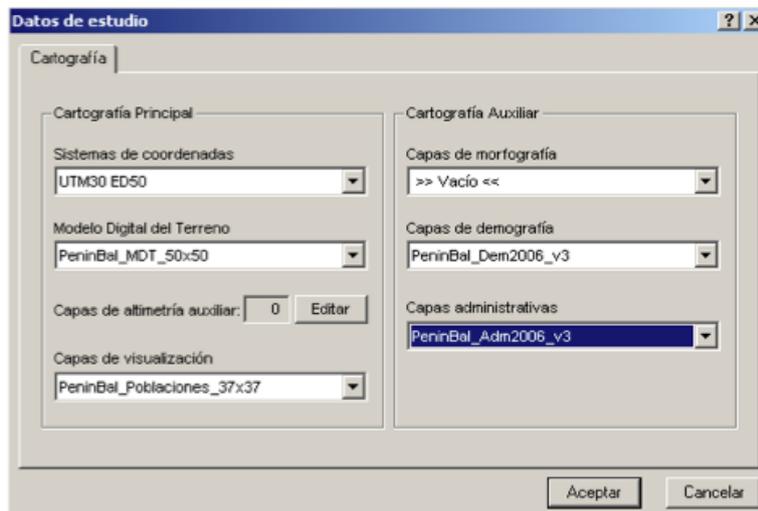


Figura 2.38: Introducción de datos cartográficos en Sirenet

### 2.5.2. Métodos de cálculo

Antes de realizar los estudios para llevar a cabo la planificación de la red se ha de elegir cual es el método de calculo adecuado, el cuál se va a emplear para estimar la propagación de las ondas en el espacio radioeléctrico. Los métodos de cálculo utilizados por Sirenet pueden ser de dos tipos:

- **Empíricos:** Basados en exhaustivas campañas de medidas, realizadas sobre determinadas situaciones canónicas, en las que la estaciones emisoras y receptoras presentan unas determinadas condiciones respecto al terreno. De este conjunto de medidas discretas se genera posteriormente un catálogo de curvas que permite extrapolar valores de propagación para un determinado rango de frecuencias, alturas de antenas, distancias, etc. Es recomendable su utilización cuando no se dispone de información cartográfica de calidad o para simulaciones de propagación por dispersión troposférica, en aquellos casos en que distancias excesivas hacen inexactos los métodos determinísticos.
- **Deterministas:** Se basan en la teórica óptica geométrica y tienen en cuenta básicamente los efectos de difracción y reflexión de los rayos sobre el terreno.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

De entre los primeros, *Sirenet* implementa el más representativo, que sigue la recomendación **ITU R-370**, basado en un grupo de medidas llevadas a cabo por diferentes frecuencias, tipo de suelo y climas, tomando como parámetro la altura efectiva del transmisor, que es constante a lo largo del radial. Esto significa que, por ejemplo, en algunos casos, incluso presentando un obstáculo muy dominante, la predicción de la fuerza de la señal puede casi ser la misma para receptores situados delante o detrás del obstáculo, especialmente si existe un segundo obstáculo entre el dominante y el receptor. El principal inconveniente que presenta es que no es muy preciso, especialmente en entornos montañosos. Sin embargo, se trata de un método muy rápido ya que interpola valores previamente almacenados. Este método queda descartado para el presente proyecto ya que se dispone de un modelo digital del terreno.

De los deterministas, que tienen en cuenta el MDT, *Sirenet* implementa una versión del modelo ITU-R 526 / Deygout, adaptado para el caso de ciertas circunstancias no contempladas en el modelo original.

Para las simulaciones del proyecto se usará ITU R526 para tener en cuenta características del terreno, en vez de usar la recomendada ITU R370. Asimismo, se ha cumplido la recomendación ITU-R P.1546, sobre los métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3000 MHz. Por tanto, como modelo de propagación, para todas las simulaciones realizadas, se ha utilizado el modelo estandarizado por la ITU-R P.526. Los parámetros específicos del modelo se han de completar en la pantalla que muestra la figura 2.39

Parámetros del cálculo

Nombre:

Factor K:

Resolución:  m/pixel

Método:

Gases  
Densidad vapor agua:  gr/m<sup>3</sup>

Reflexiones

Lluvia

Precipitaciones (R<sub>0.01%</sub>):  mm/h

Tiempo de rebasamiento:  %

Figura 2.39: Parámetros propios del modelo de propagación en Sirenet

Por último, la introducción de los parámetros de cálculo se realiza mediante la pantalla reflejada en la figura 2.40

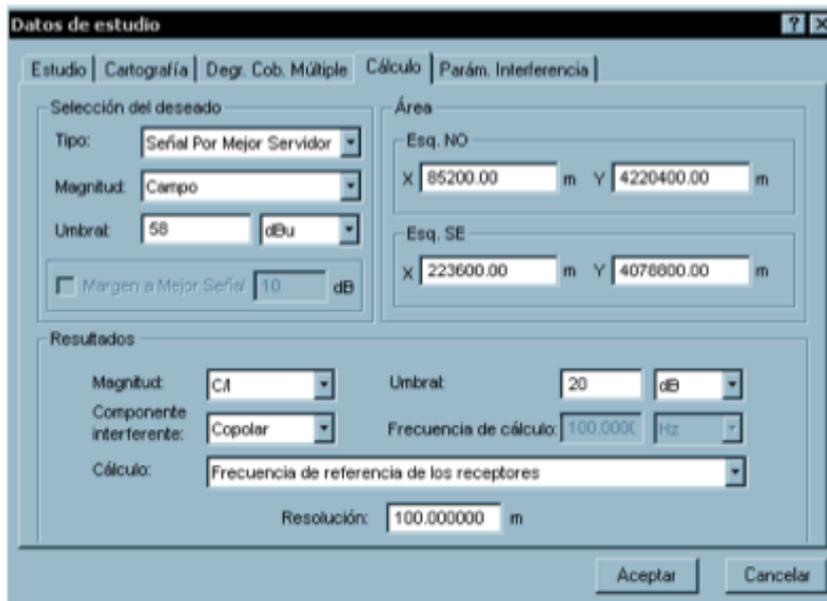


Figura 2.40: Selección de los parámetros de cálculo en Sirenet

### 2.5.3. Entidades de la Base de Datos

*Sirenet* posee una gran cantidad de entidades en su base de datos, aspecto que le confiere una gran potencia y versatilidad a la hora de establecer estudios radioeléctricos. A continuación se citan los más representativos.

- **Transmisor:** Los transmisores son entidades vinculadas a un emplazamiento determinado. Las coordenadas particulares pueden introducirse manualmente o referenciándolas a un emplazamiento, previamente creado. Además, habrá de constar de los siguientes parámetros para quedar completamente definido
  - Identificador
  - Parámetros radio
    - Servicio
    - Fase
    - Red

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

- Polarización
- Frecuencia
- Retardo
- Parámetros de antena
  - PRA
  - Potencia
  - Ganancia
  - Pérdidas
  - Antena
  - Orientación
  - Altura

No se muestra la pantalla de introducción de datos de transmisor pues será presentada en el ejemplo del capítulo 3.

- **Receptor:** El receptor tiene las mismas consideraciones que el transmisor, salvo por algunos aspectos de configuración. Los parámetros quedan, en este caso, como siguen
  - Identificador
  - Parámetros radio
    - Servicio
    - Fase
    - Red
    - Polarización
    - Frecuencia referencia
    - Campo Umbral
    - Pérdidas
    - Impedancia
    - C/N de protección

- Parámetros de antena
  - PRA
  - Potencia
  - Ganancia
  - Pérdidas
  - Antena
  - Orientación
  - Altura
- **Emplazamiento:** Un emplazamiento es un punto (par de coordenadas y su correspondiente cota) identificado por un nombre. Una vez creado un emplazamiento, se pueden crear otras entidades, transmisores y receptores, vinculando la posición espacial de estos al emplazamiento creado. Al igual que el transmisor, la pantalla de configuración de características será presentada en el capítulo 3.
- **Antena:** Una antena queda definida como la combinación de dos diagramas, copolar y contrapolar, que pueden diseñarse de forma independiente o dependiente, según la tecnología utilizada en la posterior planificación.
- **Diagrama de antena:** Los diagramas de antena se definen sin vínculos a una antena especificada. Con ello se genera la posibilidad de reutilizar un mismo diagrama en antenas o servicios diferentes. Los datos de antena se introducen por medio de vínculos con los modelos de radiación asociados realizados con otra aplicación, complementadas con los presentes en la figura 2.41.

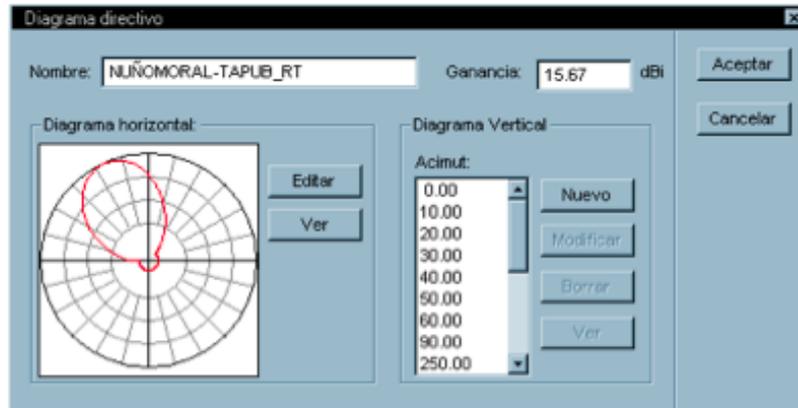


Figura 2.41: Parámetros de antena en Sirenet

- **Redes:** Esta opción permite organizar los elementos del estudio, transmisores y receptores, según el tipo de red de despliegue a la que pertenecen. De esta forma, al analizar las interferencias existentes, es posible determinar si el origen de éstas se debe a interferencias de la propia red o a otro diferente. En función del tipo de red que origine las afectaciones se evaluará los resultados según diferentes criterios de discriminación establecidos en la configuración de cada una de ellas.
- **Métodos de cálculo:** Como se ha mencionado ya, Sirenet permite definir los parámetros de diversos métodos de cálculo para estimar la propagación de ondas en distintos escenarios.
- **Factores de rechazo / Relaciones de protección:** La forma en la que un receptor se ve afectado por las interferencias depende del servicio del propio receptor así como del servicio de los transmisores interferentes. Con el objetivo de poder tener en cuenta la interferencia procedente de cualquier tipo de fuente, será necesario establecer un factor de rechazo interservicios, que defina los factores de rechazo y relaciones de protección cocanal, para cada relación Tx-Rx que pueda producirse durante el cálculo. Los datos referentes a los factores de rechazo se introducen en la pantalla mostrada por la figura 2.42.

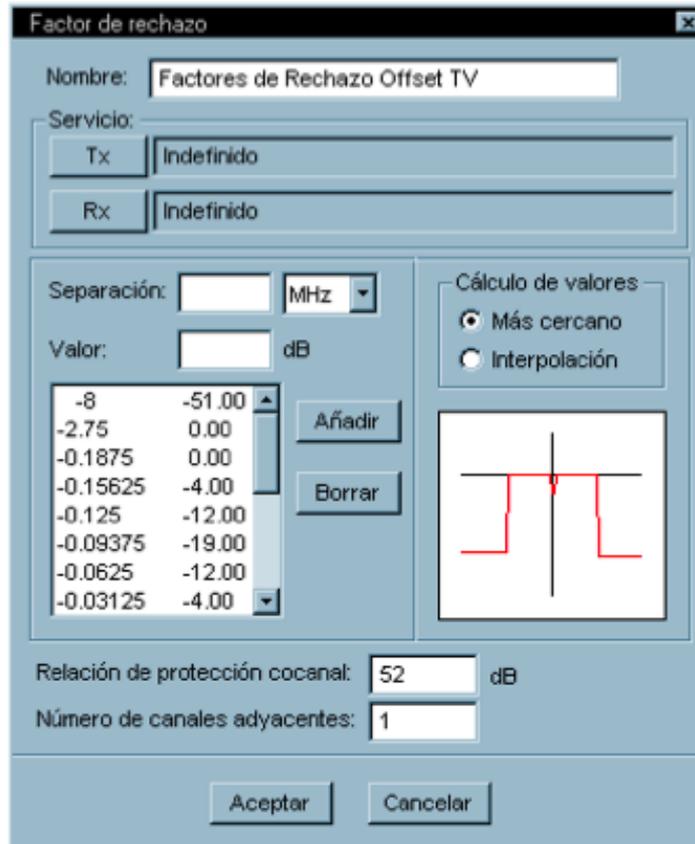


Figura 2.42: Introducción de factores de rechazo en Sirenet

#### 2.5.4. Estudios Radioeléctricos

La suite *Sirenet* fue desarrollada para permitir la realización de todas las simulaciones que se pueden requerir durante la planificación de la red o las estaciones de la misma. Comprende además tareas relativas a la red de transporte y difusión, facilitando además la inclusión de campaña de medidas reales para comparar con los teóricos y realizar análisis comparativos entre ellos.

Se listan a continuación los estudios más frecuentemente utilizados. La herramienta dispone de un catálogo más amplio de opciones, pero el uso no está tan extendido o los recursos de tiempo necesarios para obtener resultados que justifiquen su utilización son demasiado

altos. Tampoco se han requerido para el presente proyecto los estudios relativos a la red de transporte.

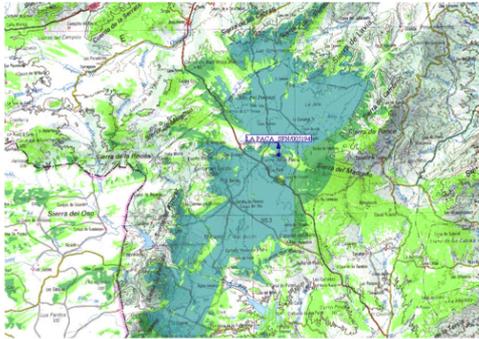
### 2.5.4.1. Estudios de cobertura

#### **Cobertura Simple:**

Este estudio representa valores de la señal impuesta por un transmisor, en campo eléctrico o potencia, en todos los puntos dentro del área seleccionada por el usuario, teniendo en cuenta el modelo de propagación elegido y las características del transmisor y el receptor. La mancha de resultados puede configurarse con distintos colores asignados a cada rango de medidas.

Se requieren para este estudio los datos de transmisor, receptor (entendiéndose como tal a los parámetros radio del receptor, no la ubicación geográfica, pues se realiza el estudio en todo el área de cobertura del transmisor.), método de cálculo y área de estudio. Una vez finalizado el cálculo de cobertura, se pueden realizar consultas de población cubierta por el transmisor, para ello se ha de disponer de las capas administrativas y demográficas. Los resultados de la capa demográfica y administrativa ofrecen un desglose de la población total cubierta por el transmisor, organizada según el municipio, provincia y comunidad a la que pertenecen.

Un ejemplo de la capa visual de los resultados se presenta en la figura 2.43, tanto en 2D como en tres dimensiones usando la exportación a *Google Earth*.



(a) Resultados de estudio de cobertura simple en 2D



(b) Resultados de estudio de cobertura simple en 3D

Figura 2.43: Resultados visuales de estudio de cobertura simple en Sirenet

### Cobertura Múltiple

Este estudio permite determinar la cobertura que alcanza una red de estaciones. Consiste en una combinación de estudios de cobertura individual.

En estudio con varios transmisores, *Sirenet* tiene en cuenta el concepto de *mejor servidor*, que no es más que establecer como fuente primaria de señal en un punto determinado a aquella que se muestra la mejor según el criterio que consideremos. Las posibles opciones para establecer el mejor servidor son:

- **Por nivel de señal:** Se asigna como mejor servidor de un punto a aquel transmisor desde el que se recibe mayor nivel de señal.
- **Por distancia:** Cobertura asignada al que se encuentra más próximo del punto estudiado.
- **Por prioridad:** Cobertura al que tiene más prioridad. Si las prioridades son iguales aplica nivel de señal. La prioridad de cada transmisor es ajustable de manera subjetiva en las propiedades del mismo.
- **Por retardo:** Cobertura asignada al transmisor cuyo aporte de señal es recibida antes.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

El resultado de un estudio multicobertura es especialmente útil para establecer la fuente dominante de señal en un punto y sugerir antenizaciones. Se presenta en la figura 2.44 una pantalla de la vista de trabajo de Sirenet en la que se está realizando un estudio de cobertura múltiple. Se puede apreciar la diferenciación por colores de los diferentes mejores servidores en cada zona.

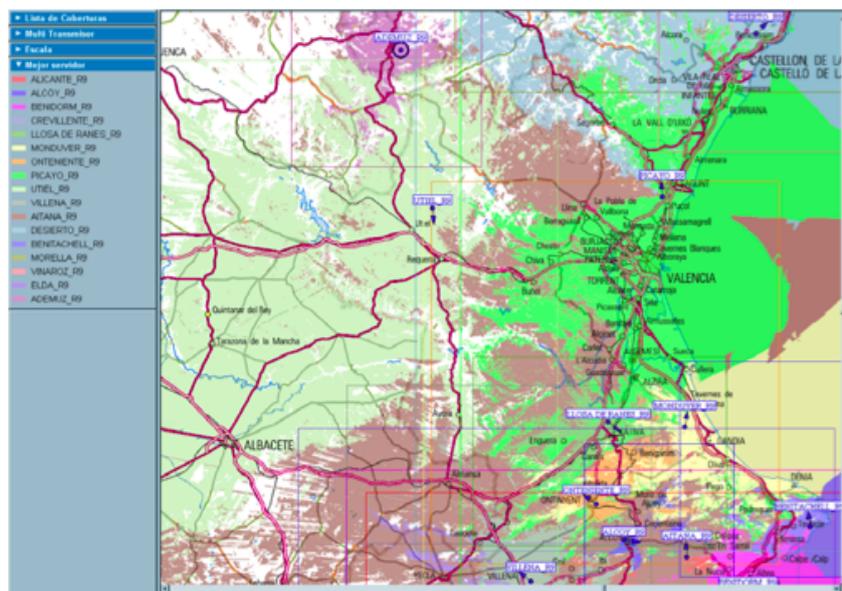


Figura 2.44: Estudio de cobertura múltiple en Sirenet

### 2.5.4.2. Estudios de interferencia

#### Degradación de cobertura simple

Las degradaciones de cobertura o estudios de interferencias simples permiten evaluar el impacto de uno o varios transmisores sobre una cobertura dada. Dichas simulaciones resultan especialmente útiles al instalar una nueva red, al poder predecir o estudiar la viabilidad de implantación de la misma en función de las interferencias que puede llegar a ocasionar sobre otros servicios actualmente en funcionamiento.

Para realizar el estudio, se necesitan los siguientes parámetros:

- **Datos cartográficos:** Se presentan los parámetros típicos de sistema de coordenadas a utilizar, Modelo Digital del Terreno (MDT) y capas visuales, morfográficas, demográficas y administrativas.
- **Parámetros de cobertura:** La pestaña *Degradación de cobertura* de los datos de estudio contiene el listado de los transmisores que se considerarán interferentes en la simulación. A estos transmisores, se les realiza un estudio de cobertura individual. Junto a la selección de transmisores es posible especificar la magnitud a representar, el umbral prefijado y las componentes de los transmisores interferentes a tener en cuenta (Copolar, Contrapolar o ambas)
- **Parámetros de interferencia:** Los parámetros a configurar son, entre otros el método de combinación de las interferencias y los métodos de propagación considerados. También habrá de hacerse la consideración de si las interferencias a estudiar son cocanal o de red, es decir, si las emisiones dentro del mismo canal son del mismo programa o no. Hablaremos de estos parámetros con más detalle en el capítulo 3.
- **Parámetros del receptor:** Será necesario detallar a Sirenet las características del receptor a considerar. La pantalla en la que se realiza la introducción de datos es la reflejada en la figura 2.45.

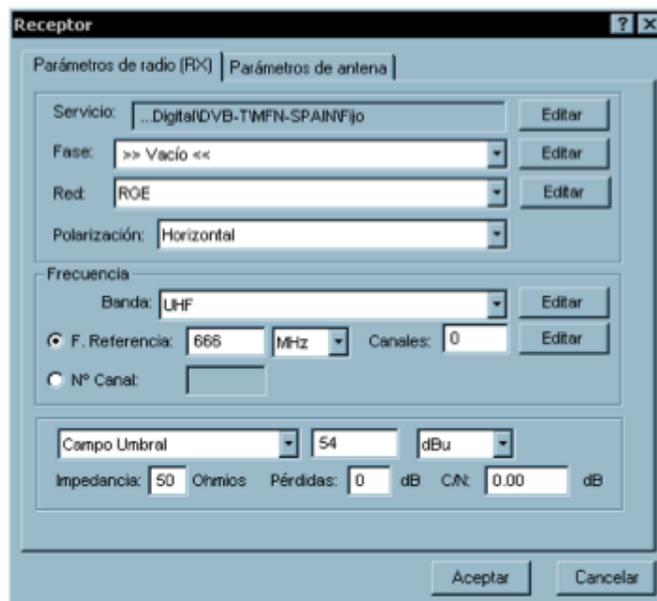


Figura 2.45: Introducción de datos de receptor en Sirenet

### Degradación de cobertura múltiple

Es una extensión del caso de degradación de cobertura simple, con la salvedad de permitir configurar el rango de PRA y distancia a partir de los cuales un interferente deja de ser considerado como tal en el estudio, lo cual es útil para ahorrar tiempo de simulación en estudios con un número considerable de transmisores.

Este tipo de estudios representan el grueso de las simulaciones realizadas y se estudiará con detalle tanto su funcionamiento como los parámetros de configuración a lo largo del capítulo 3.

#### 2.5.4.3. Estudios de resolución de perfiles

##### Perfil Simple

Un perfil analiza la disminución de señal eléctrica entre un transmisor y un receptor. Mediante este cálculo se puede verificar si existe visión directa entre el transmisor y el receptor, si está libre la primera zona de Fresnel o el nivel de señal recibido en todos

los puntos del trayecto, entre otros.

Es especialmente útil para determinar si un centro puede recibir señal primaria de otro centro donante. También puede utilizarse para establecer estrategias para salvar los obstáculos que la señal encuentra en su propagación a través del canal aire, es decir, determinar la altura de torre necesaria, del emisor o del receptor para que exista visión directa entre ambos.

En el proyecto que nos ocupa se partió de una serie de transmisores ya definidos, no se realizó este tipo de estudios, más propios de la red de transporte.

### **Perfil en ruta multitransmisor**

Este estudio pretende representar el nivel de señal que presentan determinados transmisores sobre una curva de puntos seleccionada por el usuario. El tipo de cálculo que se pueden visualizar serán los mismos que en los estudios de cobertura (mejor servidor de un transmisor en un punto) y multicobertura (recepción, mejor servidor y solapamiento), con la diferencia que, en este caso, se pretende enfrenar a todos los transmisores entre ellos, con el objetivo de determinar los niveles de recepción de cada uno sobre el conjunto de puntos propuesto.

Es un tipo de simulación que por lo general no se utiliza en la fase de diseño que trata el proyecto. No obstante, es de mucha utilidad en caso de disponer de datos de mediciones reales, y en tareas del área de explotación.

#### **2.5.4.4. Estudios de red de transporte**

Una vez se han presentados los estudios más representativos con trascendencia en la fase de planificación del nivel de difusión de redes de televisión digital, se citan a continuación aquellos de especial interés para el nivel de transporte.

### **Análisis de Vano Digital**

Con este estudio se realizan los cálculos específicos para analizar la viabilidad de un

enlace radioeléctrico de microondas para el servicio fijo. Para cada vano, se establece una relación lógica entre el transmisor y el receptor en la base de datos por medio de un objeto enlace. El enlace puede ser unidireccional o bidireccional en cuyo caso se analizarán ambos sentidos de la comunicación.

Los resultados del estudio incluyen el desglose de los distintos tipos de pérdidas (espacio libre, difracción, reflexiones, atenuación por lluvia, absorción por gases) y una estimación de los estadísticos de recepción en términos de calidad del enlace e indisponibilidad.

En este estudio, el método de cálculo empleado para estimar las pérdidas de propagación no es accesible por tratarse de un método específico de cálculo de radioenlaces digitales. La metodología empleada es la propuesta por la Rec. ITU-R F.530.

### **Multivano**

El análisis de multivano proporciona el resultado global de un enlace digital formado por varios tramos (vanos), de modo que desde el mismo se puede visualizar cada vano con los parámetros obtenidos en un análisis de radioenlace digital, así como obtener los resultados de viabilidad del enlace extremo a extremo. Es, por tanto, una extensión del estudio anterior al caso de más de un enlace.

### **Asignación de frecuencias**

Este estudio ofrece una propuesta automatizada de reutilización y asignación de frecuencias para los escenarios en los que la banda de frecuencias disponibles es menor que el número de transmisores en redes MFN. El usuario especifica los enlaces de red para los que necesita frecuencias y un conjunto de parámetros que describen el entorno radioeléctrico. A partir de ello, *Sirenet* propone automáticamente una serie de frecuencias que aseguran la ausencia de interferencias en todo el escenario.

Permite imponer todo tipo de limitaciones a la forma en que se proponen las frecuencias, por lo que la definición de los parámetros que componen el estudio tiene una

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

---

enorme importancia y el usuario debe prestar una especial atención a los mismos. El usuario puede forzar también que el patrón de frecuencias asignadas cumpla una determinada relación (distancia mínima entre portadoras, valores múltiplos de una separación concreta, etc), por lo que la versatilidad para adaptarse a todo tipo de escenarios es muy alta.

Recordar, llegados a este punto, que los anteriormente expuestos no conforman la totalidad de estudios disponibles en la aplicación. Se podría mencionar también la posibilidad de automatizar el ajuste de retardos estáticos de emisión de los transmisores de un escenario con interferencia de red (autointerferencia), pero los resultados arrojados tras una batería de pruebas en varios escenarios de diversa complejidad y número de transmisores no fueron del todo satisfactorios, además de suponer un tiempo de simulación excesivo en comparación del obtenido de un estudio de degradación de cobertura múltiple. Éste, además de que puede servir de buena aproximación para obtener los mismos resultados, permite, además, una rápida reconfiguración de los parámetros del estudio, funcionalidad no permitida en primer caso.

No obstante, sí se han presentado las familias de estudios que más se utilizan en la planificación de la red de difusión. En el capítulo 3 se explicará, de una forma más pormenorizada, los pasos a realizar y los aspectos a configurar para realizar un estudio de degradación de cobertura múltiple tipo, que es, a la postre, en el que se basa el presente proyecto para establecer los diferentes retardos estáticos y obtener una visión clara y precisa del escenario bajo estudio.