

Planificación de redes de TDT móvil DVB-H con *gap-fillers*

Autor: Salieta Tecles, Ariana

Director: Cardona Marcet, Narcís

Resumen — Este trabajo estudia la planificación de redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) móvil basadas en el estándar DVB-H, incidiendo en la utilización de repetidores o *gap-fillers*. La principal ventaja que presenta este tipo de emisores es que tienen un menor coste y complejidad que un transmisor sincronizado, ya que su equipamiento e instalación es mucho más sencilla. Sin embargo los *gap-fillers* son un sistema realimentado, por lo que la potencia máxima transmitida está limitada, e introducen una degradación en la calidad de la señal transmitida además de un retardo temporal adicional. En este trabajo se describe en detalle todas las características que presentan los *gap-fillers* y se propone un algoritmo de planificación con el objetivo de minimizar el coste del despliegue de red en función del nivel de cobertura que trabaja tanto con ambos tipos de emisores. Se presentan ejercicios de planificación de una red de TDT móvil DVB-H en el núcleo urbano de la ciudad de Valencia, en el que se demuestra la necesidad de utilizar transmisores sincronizados y *gap-fillers* en el despliegue de una red en una zona urbana ya que las configuraciones de red óptimas contienen tanto emplazamientos de baja potencia como de media y alta potencia. La utilización de un tipo de emisor u otro dependerá del emplazamiento en particular y del coste relativo entre éstos.

Abstract — This Master Thesis studies mobile Digital Terrestrial Television (DTT) network based on DVB-H planning, paying special attention to the utilization of *gap-fillers*. *Gap-fillers* are cheaper and less complex than synchronised transmitters. However, they are limited in power due to the risk of oscillation. Furthermore, they introduce a degradation and additional delay to the transmitted signal. This thesis describes the characteristics and technical considerations of *gap-fillers* and studies the utilization of a mathematical planning algorithm which minimizes network development costs. It works with both synchronised transmitters and *gap-fillers*. Finally, some planning exercises have been done in a real scenario, specifically in the city centre of Valencia. They demonstrate the need to use both types of transmitters because optimal configurations use high power as well as low power transmitters. The type of transmitter used depends on the particular site and the relative cost between them.

Autor: Salieta Tecles, Ariana, email: arsatec@iteam.upv.es

Director 1: Cardona Marcet, Narcís, email: ncardona@dcom.upv.es

Fecha de entrega: 03-12-07

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
II.	EL ESTÁNDAR DVB-H.....	6
II.1.	INTRODUCCIÓN	6
II.2.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	7
1)	Time-Slicing	7
2)	MPE-FEC.....	8
3)	Modo 4K y in-depth interleaving.....	9
III.	UTILIZACIÓN DE REPETIDORES EN REDES DVB-H	10
III.1.	TIPOS DE TRANSMISORES EN REDES DVB-H	10
III.2.	CARACTERIZACIÓN DE GAP-FILLERS EN REDES DVB-H	10
III.3.	PARÁMETROS DE CALIDAD	13
IV.	PLANIFICACIÓN DE REDES DE TDT MÓVIL DVB-H	15
IV.1.	CARACTERIZACIÓN DEL ESCENARIO DE DESPLIEGUE	15
1)	Datos cartográficos	15
2)	Frecuencia de despliegue	16
3)	Transmisores utilizados	16
4)	Antenas	16
5)	Balance de Potencias.....	17
6)	Modelo de Cobertura	18
7)	Modelo de Coste	19
IV.2.	MODO DE TRANSMISIÓN.....	20
IV.3.	PLANIFICACIÓN DE REDES DVB-H CON GAP-FILLERS.....	21
IV.4.	ALGORITMOS GENÉTICOS MULTI-OBJETIVO	23
IV.5.	ALGORITMO NSGA-II	25
V.	MODELO DE SISTEMA.....	27
V.1.	ESCENARIO DE DESPLIEGUE.....	27
V.2.	PARÁMETROS DEL SISTEMA	27
V.3.	CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN	29
V.4.	ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN	29
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	30
VI.1.	ESTUDIO DE COBERTURA DE LA TORRE DE TV.....	30
VI.2.	ESTUDIO DEL AISLAMIENTO DE LOS EMPLAZAMIENTOS CELULARES	30
VI.3.	ESTUDIO DE LOS EMPLAZAMIENTOS CELULARES	32
VI.4.	ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE GAP-FILLERS	37
	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	40
	AGRADECIMIENTOS.....	40
	BIBLIOGRAFÍA.....	40
	PUBLICACIONES	42

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Con la llegada de la tercera generación (3G), las redes de telefonía móvil se están transformando en redes de distribución de contenidos multimedia móviles. Dentro de las comunicaciones móviles multimedia, el máximo exponente a día de hoy es la TV móvil. Los teléfonos móviles actuales ya disponen de radio, reproductor de música, cámara digital y grabador de video, y la TV móvil será pronto una nueva característica. Recientes estudios de mercado han revelado un elevado interés por parte de los consumidores, y se prevé que la demanda de estos servicios explotará en el 2011, con más de medio billón de usuarios en todo el mundo [1]. Aunque será necesario adaptar los contenidos al entorno móvil, la TV móvil permitirá ofrecer un servicio mucho más rico y personalizado que la TV convencional, abriendo un abanico de nuevos servicios para los consumidores, y proporcionando nuevas vías de negocio para todos los agentes de la industria audiovisual y de telecomunicaciones. Estos servicios son además clave para el desarrollo de la Sociedad de la Información, ya que permiten el acceso universal a contenidos multimedia en cualquier lugar y momento.

Aunque los operadores de telefonía móvil han empezado recientemente a ofrecer servicios de TV móvil, el mayor potencial para proporcionar estos servicios lo representan las redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) diseñadas específicamente para servicios móviles (redes de TDT móvil). Sólo estas redes tienen las capacidades necesarias para soportar un consumo a gran escala de este tipo de servicios, ya que pueden distribuir servicios multimedia de banda ancha a grandes audiencias cubriendo extensas áreas sin limitación alguna en el número de usuarios que acceden al servicio de manera simultánea dentro del área de cobertura. Una de sus principales características es que permiten crear redes de frecuencia única SFN (*Single Frequency Network*), en la que todos los transmisores y repetidores transmiten la misma señal a la misma frecuencia, de tal modo que los terminales pueden recibir la señal proveniente de varios emplazamientos. La implementación de este tipo de redes es posible gracias a la modulación COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*), que proporciona gran robustez de la señal frente a la propagación multicamino y la Interferencia Entre Símbolos (IES).

El estándar europeo de TDT móvil se conoce como DVB-H (*Digital Video Broadcasting – Handhelds*), el cual es una evolución tecnológica del estándar de TDT, DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), adaptado para terminales móviles [2]. DVB-H permite la difusión de contenido multimedia IP a teléfonos móviles a altas velocidades de transmisión de datos sobre grandes áreas, sin limitación alguna en el número de usuarios que acceden al servicio de manera simultánea dentro del área de cobertura. Fue diseñado originariamente para trabajar en UHF y proporciona capacidades de 5 a 10 Mb/s en canales de 8 MHz. Mantiene la capa física de DVB-T, y añade nuevos elementos en la capa de enlace, siendo posible reutilizar la infraestructura de red

(transmisores, multiplexores etc.). Su principal característica es que emplea una técnica de transmisión discontinua en la que la información se transmite a ráfagas, la cual reduce considerablemente el consumo de potencia medio de los terminales. Además, añade un mecanismo de corrección de errores adicional, el cual proporciona una mayor robustez de la transmisión, sobre todo en situaciones de movilidad e interferencias.

Actualmente ya se ofrecen servicios comerciales DVB-H en Italia, Finlandia y Albania en Europa y en Vietnam, India y Filipinas en Asia. En España en concreto, el servicio de TDT móvil se encuentra en estos momentos en fase de definición y lanzamiento comercial. El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio realizó el pasado abril una consulta pública sobre la TDT móvil, y está planificando un nuevo múltiplex digital dedicado a estos servicios. El modelo de negocio previsto es un modelo colaborativo, en el cual un único proveedor de servicios DVB-H neutral alquila la capacidad del múltiplex de TDT móvil a los operadores de telefonía móvil. Este modelo soluciona el uso ineficiente de los recursos espectrales, ya que los operadores celulares comparten un paquete común de servicios, siendo también posible diferenciar hasta cierto punto su oferta de servicios. Este modelo también permite servicios totalmente interactivos, así como una factura única para los usuarios, ya que los operadores celulares cobrarían a sus usuarios por el servicio de TDT móvil.

Una de las mayores preocupaciones sobre DVB-H es la gran cantidad de infraestructura de red necesaria para proporcionar niveles aceptables de cobertura. Como las condiciones de recepción de DVB-H son mucho más severas que las de DVB-T, sobre todo para situaciones de recepción en interiores (*indoor*) y en automóviles (*vehicular*), DVB-H requiere mucha más infraestructura de red que la existente para DVB-T [3]. Esto es, mayores potencias de transmisión y, especialmente, un considerable mayor número de transmisores y repetidores (*gap-fillers*), formando redes de frecuencia única muy densas. Esta penalización es particularmente evidente para niveles de cobertura muy elevados (i.e., mayores que el 90%) [4]. Además, el coste del despliegue de red no sólo representa la mayor parte de los gastos de capital CAPEX (*capital expenditure*), sino que su mantenimiento representa una parte significativa de los gastos operativos OPEX (*operational expenditure*) [5]. Por lo tanto, realizar una planificación adecuada para minimizar el coste del despliegue de red es un aspecto crítico para no comprometer las posibilidades de DVB-H de proveer servicios de TDT móvil a bajo coste. Además, en redes SFN densas es especialmente importante una correcta planificación para tomar ventaja de la ganancia de diversidad debida al hecho de que muchos lugares reciben la señal procedente de varios emplazamientos.

Como la construcción de nuevos emplazamientos de radiodifusión es muy costosa, un aspecto clave para minimizar el coste del despliegue de red es reutilizar la infraestructura de los emplazamientos celulares existente [6]. De este modo, los emplazamientos celulares pueden ser utilizados como complemento de las grandes torres de TV y Radio para colocar transmisores sincronizados o *gap-fillers*. Mientras que los transmisores sincronizados reciben la señal en banda

base a través de una red independiente (enlace terrestre o red digital) para posteriormente modularla, amplificarla y transmitirla, los *gap-fillers* reciben la señal RF de emisores de la propia red, y la retransmiten en la misma frecuencia tras amplificarla. La principal ventaja de utilizar *gap-fillers* es que tienen menor coste y complejidad, ya que su equipamiento e instalación son más sencillos. Sin embargo, los *gap-fillers* presentan varias restricciones técnicas (acoplo entre la antena transmisora y la receptora, ecos en la señal amplificada, etc.), que se deben tener en cuenta para garantizar un correcto funcionamiento. Además, las potencias transmitidas son en general menores que las de los transmisores sincronizados (principalmente para evitar problemas de realimentación), por lo que son necesarios varios *gap-fillers* para obtener la misma cobertura que un transmisor sincronizado. Obviamente, la idoneidad de utilizar un transmisor sincronizado o un *gap-filler* dependerá del emplazamiento en particular, y en un despliegue en una zona urbana son necesarios ambos tipos de emisores.

En este trabajo se va a realizar la planificación de una red de TDT móvil DVB-H en un escenario real, concretamente en la ciudad de Valencia, reutilizando la infraestructura de difusión de TV y radio así como la infraestructura celular existente. Se contemplará la posibilidad de utilizar *gap-fillers* además de transmisores sincronizados, para lo cual se va a realizar un estudio previo de sus características técnicas y su influencia en la planificación. La planificación de la red se va a realizar utilizando un algoritmo genético multi-objetivo con el fin de maximizar la cobertura y minimizar el coste de despliegue de red.

El presente documento se estructura de la siguiente forma: el Capítulo 2 resume las principales características del estándar DVB-H. En el Capítulo 3 se describe los tipos de transmisores que se pueden utilizar en el despliegue de redes DVB-H y se justifica la elección de *gap-fillers* junto con transmisores sincronizados. Asimismo, se describe sus características técnicas y los aspectos que se debe tener en cuenta al utilizarlos en la planificación de redes de TDT móvil. El Capítulo 4 explica los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta para realizar la planificación de redes de TDT móvil DVB-H. Se introduce la necesidad de utilizar algoritmos de planificación, describiendo detalladamente el algoritmo utilizado. En el Capítulo 5 se explica el modelo del sistema, es decir, se explica las características del escenario de despliegue y los parámetros de la red. Tras la descripción completa del escenario de despliegue y de los parámetros del sistema, en el Capítulo 6 se muestra los resultados de una serie de ejercicios de planificación, que estudiarán la viabilidad de utilizar *gap-fillers*, cuyo coste es menor a costa de tener peores prestaciones, junto con transmisores sincronizados de alta potencia. Finalmente el Capítulo 7 resume los conceptos expuestos en este trabajo, así como las conclusiones más importantes que se extraen de él.

II. EL ESTÁNDAR DVB-H

II.1. INTRODUCCIÓN

DVB-H (Digital Video Broadcasting – Handheld) es el estándar europeo para la difusión de contenido digital a terminales móviles. DVB-H está basado en el estándar DVB-T añadiendo las características necesarias para satisfacer los nuevos requisitos del sistema. En primer lugar, el sistema debe ofrecer servicio de televisión digital a terminales móviles, por lo que se debe tener en cuenta las limitaciones de este tipo de dispositivos en cuanto a tamaño, peso y requerimientos de potencia. Además, en estos dispositivos no resulta viable utilizar ningún tipo de diversidad que requiera más de una antena con el fin de mejorar la calidad de la recepción. Por otra parte, las características del medio de transmisión son las propias de un canal de comunicaciones móviles, debiendo garantizar la transmisión de una tasa de hasta 10 Mb/s, mediante un canal selectivo en tiempo y frecuencia a un terminal incluso cuando éste realiza un cambio de celda. También se debe garantizar la recepción en diversos escenarios (*indoor, outdoor, vehicular*). Otro requisito que debe cumplir el sistema es la compatibilidad con DVB-T, es decir, las estructuras de las redes DVB-H y DVB-T deben ser compatibles para poder así utilizar las estructuras y equipos existentes.

Para hacer frente a los requerimientos anteriormente expuestos, el estándar DVB-H añade nuevos elementos a la capa de enlace y a la capa física. Los elementos añadidos a la capa de enlace son la transmisión discontinua (*time-slicing*) para posibilitar el ahorro de consumo de potencia en el terminal así como traspasos transparentes entre celdas (*seamless handovers*), la introducción de codificación opcional MPE-FEC (*Multi Protocol Encapsulation - Forward Error Correction*) para dotar al sistema de una mayor capacidad de protección contra errores y la utilización del modo opcional 4K (4096 portadoras) como solución de compromiso en cuanto a calidad de recepción en movimiento y tamaño de la red frente al modo 2K y 8K. En caso de utilizar los modos 2K y 8K, la capa física permanece inalterada respecto a DVB-T, con lo cual ambos sistemas serían compatibles.

La Fig. 1 muestra el diagrama de bloques de un receptor DVB-H, que consiste en un receptor DVB-T (con la posibilidad de utilizar un tamaño de FFT 4K), junto con un bloque que implementa la recepción a ráfagas (*Time-Slicing*) y un decodificador MPE-FEC opcional [7], [8].

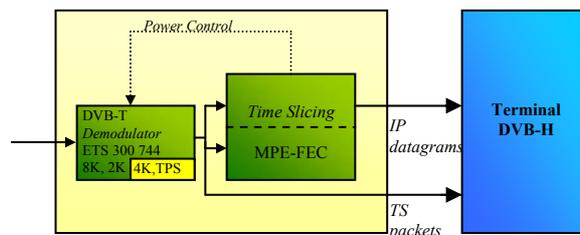


Fig. 1. Esquema receptor DVB-H.

II.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

1) Time-Slicing

El objetivo del *time-slicing* es proporcionar ahorro de batería al terminal, así como permitir la realización de cambios de celda sin que éstos impliquen discontinuidades en la transmisión. Consiste en transmitir la información de forma discontinua utilizando para ello una velocidad de transmisión mucho mayor que la que se usaría en el caso de una transmisión continua. El receptor recibe las ráfagas (*bursts*) correspondientes al servicio deseado y los almacena para posteriormente reproducirlos a una tasa menor que permita una recepción continua de la imagen por parte del usuario, reproduciendo durante todo el tiempo de ahorro de batería. Se trata, por tanto, de una multiplexación en tiempo de diferentes servicios que permite al receptor permanecer apagado durante la fracción del tiempo correspondiente a la transmisión de aquellos servicios no seleccionados, tal como se muestra en la Fig. 2.

Otra ventaja adicional de esta técnica es que durante los períodos de tiempo en que no se está recibiendo datos el receptor puede monitorizar el sistema, ofreciendo la capacidad de realizar un *handover* cuando sea conveniente sin implicar discontinuidad en la recepción de la señal.

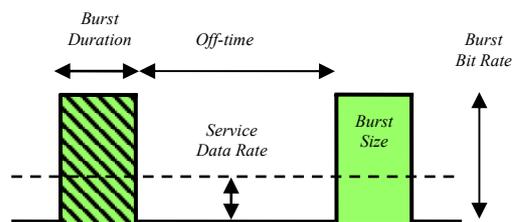


Fig. 2. Técnica de transmisión discontinua en DVB-H: *Time Slicing*.

Cuando se utiliza *time-slicing* el contenido del *burst* se divide en secciones. Para señalar el comienzo de la siguiente ráfaga que se debe recibir, la cabecera de cada sección contiene el valor del intervalo de tiempo entre el comienzo de la sección actual y la ráfaga siguiente. A este intervalo de tiempo se le llama *Delta-t* (Fig. 3). Esta información es relativa al *burst* que se está recibiendo para independizar el encendido y apagado del terminal de los posibles retardos constantes que pueda haber en el sistema. La transmisión de *Delta-t* en las secciones elimina la necesidad de sincronizar los relojes del transmisor gracias a que el tamaño, duración y tasa de transmisión del *burst* así como el tiempo de apagado puede variar tanto entre tramas como entre *bursts*.

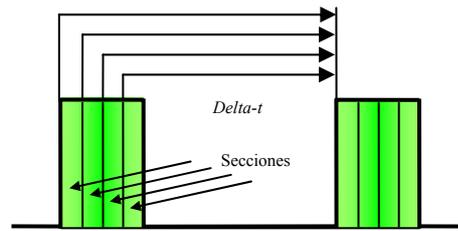


Fig. 3. La cabecera de cada sección contiene el valor Delta-t relativo al comienzo del siguiente *burst*.

En caso de querer transmitir distintos servicios por el mismo canal RF, la multiplexación de servicios discontinuos en el tiempo es intrínseca al *time-slicing*, es decir, durante el tiempo en que no se transmite un servicio se trasmite otro diferente.

2) MPE-FEC

El objetivo de esta técnica es mejorar la calidad del enlace radio en términos de SIR (*Signal to Interferece Ratio*, Relación Señal a Interferencia), así como evitar la degradación de la señal debida a las características del radiocanal móvil. Se basa en la utilización de información adicional para proporcionar mayor robustez y capacidad de corrección de errores, mediante el uso de codificación *Reed-Solomon* y entrelazado de bloque.

La protección contra errores MPE-FEC se calcula de forma independiente para cada flujo elemental. Con el fin de garantizar compatibilidad con los sistemas DVB-T, los bits de redundancia calculados se sitúan en la parte posterior de la trama MPE-FEC, de forma que, en caso de una recepción correcta de los datos, no sea necesaria la decodificación Viterbi de estos bits.

La trama MPE-FEC, cuya estructura se muestra en la Fig. 4, se distribuye en una matriz de 255 columnas y un número variable de filas (hasta 1024). En cada posición de la matriz se ubica un byte de información, con lo cual el tamaño máximo de dicha trama puede ser de hasta casi 2 Mb. En las 191 primeras columnas, a cuyo conjunto se le denomina *Application Data Table*, se ubica los datagramas IP, y posible información de *padding*, que es usada para calcular los bits de paridad pero que no es transmitida, mientras que las últimas 64, llamadas *RS Table* son utilizadas para insertar información de paridad calculada mediante un algoritmo *Reed-Solomon*.

Los datos IP se encapsulan en secciones MPE de forma estándar para poder decodificar los datos incluso si no se está usando el protocolo MPE-FEC.

Los datagramas IP se ubican en la trama por columnas, de forma que un datagrama puede ocupar más de una columna. Posteriormente se aplica para cada fila un algoritmo *Reed Solomon* (255,191). Los 64 bits resultantes se colocan por columnas en la *RS Data Table*.

III. UTILIZACIÓN DE REPETIDORES EN REDES DVB-H

III.1. TIPOS DE TRANSMISORES EN REDES DVB-H

En la actualidad existen diversas configuraciones de equipos transmisores DVB-H, cuyas diferencias principales vienen dadas en términos de coste y de prestaciones. Los tipos de emisores que se pueden utilizar son transmisores sincronizados, repetidores, repetidores regenerativos y *gap-fillers*. Los transmisores sincronizados reciben la señal en banda base por medio de una red independiente (enlace terrestre, red digital o enlace de satélite) y la modulan COFDM para posteriormente amplificarla y retransmitirla. Por otro lado, los repetidores y *gap-fillers* reciben la señal de la propia red DVB-H. Los repetidores y repetidores regenerativos retransmiten la señal a una frecuencia distinta de la de recepción. Los repetidores regenerativos demodulan la señal COFDM para corregir posibles errores en la transmisión. Finalmente los *gap-fillers* (GFs) retransmiten la señal a la misma frecuencia en que la reciben.

La principal ventaja de los transmisores sincronizados es que no muestran limitación en cuanto a potencia transmitida. Sin embargo, el coste de equipamiento es mayor (receptores GPS, moduladores COFDM etc.). Lo mismo sucede con los repetidores regenerativos, que implementan moduladores y demoduladores COFDM. Los transmisores de menor coste son, por tanto, los repetidores y los *gap-fillers*. Debido a que el tipo de red que se va a desplegar es una SFN, donde todos los emisores transmiten la misma señal a la misma frecuencia, se contemplará la posibilidad de utilizar *gap-fillers* junto con transmisores sincronizados. Sin embargo, debido a que los *gap-fillers* reciben y retransmiten la señal a la misma frecuencia, se produce un acoplo entre las antenas transmisoras y receptoras que limita la ganancia máxima del amplificador y que debe ser caracterizado para garantizar su correcto funcionamiento.

III.2. CARACTERIZACIÓN DE GAP-FILLERS EN REDES DVB-H

La planificación de redes DVB-H con *gap-fillers* se debe realizar teniendo en cuenta una serie de características técnicas de los mismos. La principal viene dada por el acoplo entre la antena transmisora y la receptora, puesto que la frecuencia de la señal a la entrada y a la salida del *gap-filler* es la misma. La Fig. 5 muestra el diagrama de bloques de un *gap-filler*.

Dentro del ancho de banda de trabajo, el *gap-filler* actúa como un amplificador de ganancia G con un retardo interno de valor τ . El acoplo entre las antenas transmisora y receptora (debido a los lóbulos secundarios de las antenas) se traduce en un camino de realimentación con unas pérdidas de valor I (*Isolation*, Aislamiento) y un retardo que se suele considerar despreciable respecto al retardo τ del *gap-filler*. A la entrada del GF existen ecos provenientes tanto del camino de realimentación, como de la reflexión en objetos del escenario estáticos (edificios) y dinámicos (principalmente vehículos). La señal de salida consiste en una sucesión de ecos, cada uno de ellos

retardado y atenuado respecto al anterior. Un GF es por tanto un sistema realimentado cuya ganancia máxima se debe limitar para evitar oscilaciones.

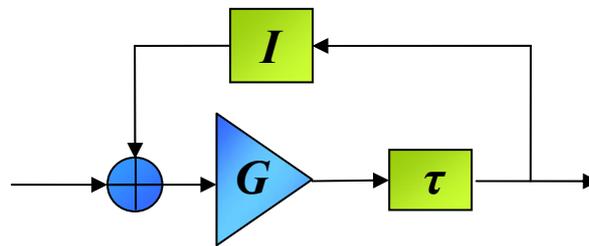


Fig. 5. Esquema de un *gap-filler*.

Para caracterizar la realimentación del GF se utiliza el parámetro Margen de Ganancia, que se define como la diferencia entre el aislamiento entre antenas, I y la ganancia del GF, G .

$$\text{Margen Ganancia (dB)} = I - G \quad (1)$$

La atenuación relativa entre cada eco y el siguiente es igual al Margen de Ganancia (ver Fig. 6). La estabilidad del GF sólo se garantiza cuando la ganancia del lazo es menor que la unidad. Esto es, cuando la ganancia es menor que el aislamiento. De otro modo, el sistema podría oscilar.

Por otro lado, el efecto del lazo de realimentación en la señal COFDM produce un rizado en el espectro de salida (ver Fig. 7) cuya amplitud de pico a pico aumenta conforme menor sea el aislamiento entre las antenas transmisora y receptora. Este rizado del espectro de la señal se debe mantener acotado bajo ciertos valores, lo cual implica que hay que establecer un valor mínimo del Margen de Ganancia para garantizar el correcto funcionamiento del GF. Mediante pruebas de laboratorio se ha encontrado que la ganancia debe de ser como mínimo 10 dB inferior al aislamiento [9]. Esta restricción supone una gran limitación en la potencia máxima transmitida.

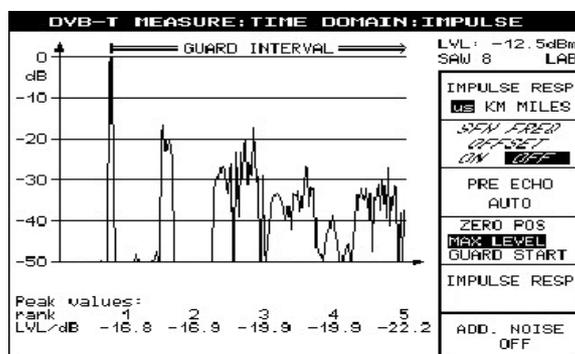


Fig. 6. Respuesta al impulso de un *gap-filler* convencional.

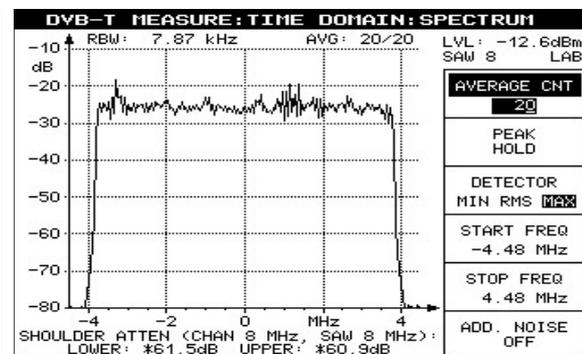


Fig. 7. Espectro de la señal a la salida de un *gap-filler* convencional.

Una mejora a la utilización de GFs convencionales es la utilización de unidades canceladoras de ecos. Esta solución ya se utiliza en redes DVB-T. Las Fig. 8 y Fig. 9 representan, respectivamente, la respuesta impulsional y el espectro de la señal a la salida de un *gap-filler* que utiliza cancelador de ecos. Se puede observar que la respuesta impulsional es más limpia y que el rizado del espectro de la señal a la salida es menor.

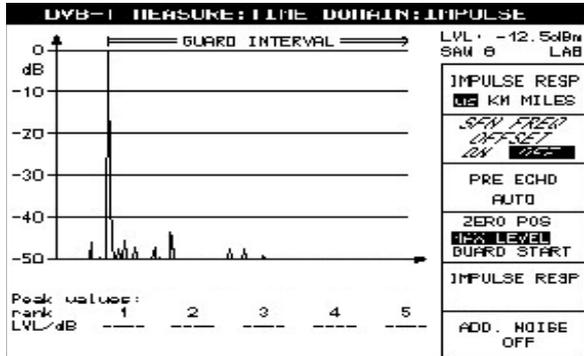


Fig. 8. Respuesta al impulso de *gap-filler* con cancelador de ecos. Margen de Ganancia 10 dB.

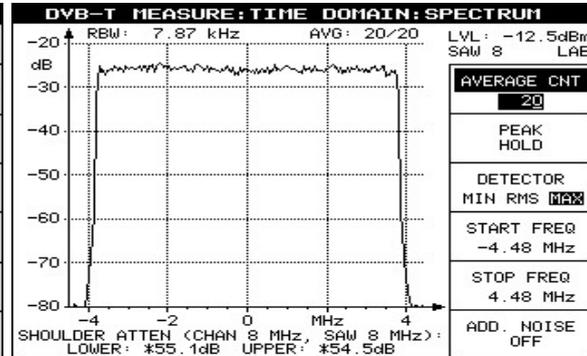


Fig. 9. Espectro de la señal a la salida de un *gap-filler* con cancelador de ecos. Margen de Ganancia 10 dB.

Un cancelador de ecos consiste en un receptor Rake, de modo que a cada réplica de la señal recibida (es decir, a las componentes multicamino de la señal y a los ecos debidos a la realimentación) se le asigna una rama del mismo. La unidad canceladora debe ser capaz de suprimir los ecos en la mayor medida de lo posible, y de adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno típicas de los escenarios urbanos característicos de DVB-H. En este sentido cobra importancia la ventana de cancelación, que se define como el intervalo temporal durante el cual la unidad canceladora aplica la cancelación sobre la señal de entrada. Este intervalo temporal debe tener una duración elevada para poder cancelar los ecos más relevantes, ya que al operar con márgenes de ganancia negativos, los ecos no cancelados se realimentarían una y otra vez llevando al GF a un estado de oscilación. Sin embargo, al aumentar el tamaño de la ventana de cancelación el retardo introducido es mayor debido a que la complejidad del procesado aumenta con el número de réplicas que el dispositivo debe ser capaz de eliminar. En la mayoría de los casos suele ser suficiente una duración de la ventana de cancelación de 10 μ s para evitar oscilaciones del sistema [10]. Es importante destacar que un GF recibirá ecos provenientes de los distintos emisores de la red cuyo retardo será mayor que la ventana de cancelación, por lo que es imprescindible utilizar antenas receptoras muy directivas para reducir la amplitud de estos ecos indeseados. De este modo, también se reduce el efecto multicamino experimentado por la señal recibida mejorando su calidad.

Además del retardo introducido por el cancelador de ecos, los *gap-fillers* introducen retardo debido al filtrado digital de la señal, el cual es proporcional a la selectividad del mismo. En la práctica el retardo típico de los canceladores de ecos es de 5 a 7 μ s [10]. Notar que este retardo no es significativo frente al intervalo de guarda tolerable en redes SFN (hasta 224 μ s [7]).

Los GF también introducen una degradación de la calidad de la señal transmitida en comparación con las señales transmitidas por los transmisores sincronizados. Esta degradación se debe, por un lado, a que la introducción de unidades canceladoras de ecos en los *gap-fillers* tiene como consecuencia la introducción de ruido adicional y al hecho de que la señal recibida contiene ruido, ecos e interferencias. El ruido introducido por el cancelador de ecos es generado por los procesos habituales (ruido térmico, impulsivo etc.) y por los procesos de cuantificación y procesado digital presentes en la unidad. La cancelación de ecos se realiza mediante procesado digital de la señal, lo cual implica un muestreo y cuantificación (y por tanto la adición de ruido de cuantificación) de la misma. Además, el cancelador realiza habitualmente filtrado digital adaptativo de la señal el cual, al tener capacidad limitada, introduce ruido. Por lo tanto el cancelador de ecos incrementa el factor de ruido del repetidor. Sin embargo, cabe destacar que el efecto de acoplo entre antenas es mucho mayor que el ruido introducido por los canceladores de ecos, siendo recomendable su utilización.

La mayoría de unidades reemisoras trasladan la señal a frecuencia intermedia y es en esta frecuencia donde se realiza el tratamiento de la señal para su posterior retransmisión en radiofrecuencia. Esta conversión y el posterior filtrado de la señal introducen un retardo adicional. El retardo introducido por el filtrado de la señal en el cancelador de ecos es proporcional a la selectividad del mismo. En este sentido es necesario llegar a un compromiso entre selectividad y retardo de la señal. Teniendo en cuenta que es mucho más importante disponer de buena calidad de señal, y por tanto, de buena selectividad, es preferible fijar la selectividad del filtrado sin reparar en el retardo, ya que el efecto de incrementar el retardo únicamente redundaría en la distancia entre centros emisores en redes SFN (siempre cuando el retardo no sea de tal nivel que incurra en interferencia). Otro de los efectos que incrementan el retardo es el uso de registros y memorias dentro del procesado digital en el cancelador, aunque en menor medida que el filtrado.

III.3. PARÁMETROS DE CALIDAD

Para modelar la calidad de la señal transmitida por los *gap-fillers*, se suele utilizar dos parámetros de calidad denominados degradación equivalente de ruido o END (*Equivalent Noise Degradation*), y tasa de error de modulación o MER (*Modulation Error Rate*).

El MER proporciona una figura de mérito de la calidad global de la señal recibida y de la señal transmitida. Se calcula a partir de los errores recibidos en la constelación de todas las portadoras que forman la señal COFDM. Para cada portadora COFDM, el valor de MER se define según (2). El parámetro que se suele utilizar es la media del valor de MER para todas las portadoras.

$$MER = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{error}} \right) \text{ [dB]} \quad (2)$$

Donde P_{signal} es la potencia de la señal que se decide se ha transmitido y P_{error} es el error cuadrático medio, es decir, la potencia del error cometido (diferencia entre la señal recibida y la señal que se decide se ha transmitido).

El hecho de analizar directamente la constelación hace que cualquier alteración de la señal (ruido térmico, ruido de fase, efecto multicamino, etc.) repercuta sobre el valor de MER. Lógicamente el MER de la señal transmitida por el GF siempre será menor que el de la señal recibida, y esto limita el máximo número de *gap-fillers* que pueden engancharse en cascada (normalmente no más de dos). Cabe destacar que la introducción del cancelador de ecos aumenta el factor de ruido del GF, por lo que el valor de MER se ve ligeramente afectado.

Por otro lado, el END es una medida de las pérdidas de implementación debido a utilizar un GF en vez de un transmisor sincronizado. Se define como el incremento en el nivel de portadora a ruido necesario para obtener un nivel de calidad de señal determinado respecto al comportamiento teórico. En DVB-T este comportamiento está referenciado a QEF (*Quasy Error Free*), es decir, para obtener una BER (*Bit Error Rate*) de $2 \cdot 10^{-4}$ después del decodificador Viterbi, con canal Gaussiano. En DVB-H se utiliza un MFER (*MPE-FEC Frame Error Rate*) del 5% en el canal TU6 (modelo de canal que se ha demostrado ser representativo para recepción móvil DVB-H para frecuencias Doppler mayores que 10 Hz [1]). El parámetro MFER se define como el porcentaje de tramas erróneas después del decodificador MPE-FEC.

Es importante destacar que la END del GF dependerá de la calidad de la señal recibida. El END también se puede interpretar como una disminución en la potencia radiada efectiva respecto al caso de referencia de utilizar un transmisor, por lo que es el parámetro que se usa en tareas de planificación de red. Mediante pruebas de laboratorio se ha observado que los *gap-fillers* existentes en el mercado presentan un END de 0.1 a 0.3 dB respecto a la señal de entrada, y de hasta 2 dB respecto a un transmisor en entornos que varían lentamente. Esta degradación aumenta con la velocidad de variación del canal, pudiendo llegar a ser hasta 2 dB superior en comparación con entornos semi-estáticos [10]. Por otro lado, la degradación también depende de la modulación utilizada, siendo la degradación en 16-QAM mayor que en QPSK.

IV. PLANIFICACIÓN DE REDES DE TDT MÓVIL DVB-H

La planificación de redes DVB-H consiste en, dado un escenario de despliegue y sus características, decidir dónde colocar transmisores, así como el tipo de transmisor y su configuración. Esta planificación es en cierta medida similar a la planificación de redes de TDT fija DVB-T. Sin embargo, las condiciones de recepción no son las mismas puesto que no se tienen antenas receptoras fijas en los tejados sino que la recepción pasa a realizarse en entornos urbanos tanto exteriores (*outdoors*) como interiores (*indoors*) y dentro de vehículos (*vehicular*). La cantidad de infraestructura necesaria en este tipo de redes y por tanto el coste de despliegue de las mismas es mucho mayor que en el caso de las redes de TDT fija.

Un aspecto clave para proporcionar ahorro en el coste de despliegue de red es reutilizar la infraestructura de radiodifusión de TV y radio fijas para proporcionar un nivel básico de cobertura que se aumentaría añadiendo nuevos transmisores. Como la construcción de nuevos emplazamientos es muy costosa, se debe contemplar la posibilidad de reutilizar los emplazamientos celulares existentes para colocar transmisores DVB-H. En este caso la planificación de la red se traduciría, por tanto, en decidir, de los emplazamientos celulares existentes, en cuáles ubicar un transmisor así como el tipo de transmisor utilizado (transmisor sincronizado, *gap-filler*) y su configuración (potencia transmitida, azimut y tilt de las antenas, a qué emisor enganchar los *gap-fillers* etc.) de forma que se cumplan una serie de objetivos. Los más inmediatos son proporcionar un máximo nivel de cobertura y que el coste de despliegue de red sea mínimo, sin embargo se puede añadir más objetivos, como puede ser minimizar la interferencia a otros sistemas que operan en la misma banda de frecuencias. En cualquier caso, debido a la gran cantidad de variables de decisión y de configuraciones posibles, la planificación de redes de TDT móvil se traduce en un complejo problema combinatorial, siendo necesaria la implementación de algoritmos de optimización para reducir su coste computacional.

IV.1. CARACTERIZACIÓN DEL ESCENARIO DE DESPLIEGUE

Para caracterizar el escenario de despliegue se pueden tener en cuenta diversas consideraciones. La validez de la planificación será mayor cuanto más se parezca el escenario sintetizado al escenario real. Por tanto se utiliza para la planificación datos cartográficos, posición y altura de los emplazamientos celulares, datos referentes a la densidad de población, mapas de edificios y diagramas de radiación de las antenas. También se debe tener en cuenta la frecuencia de despliegue, el ancho de banda de la señal, el modo de transmisión, las antenas transmisoras y receptoras utilizadas etc.

1) Datos cartográficos

El tipo de datos utilizado depende en gran medida del tamaño del área en que se quiere realizar el despliegue, de modo que en caso de realizar planificación a gran escala se debe tener en cuenta el

terreno y el tipo de escenario (*clutter*), mientras que si el diseño es a pequeña escala se tiene en cuenta el terreno, la altura de los edificios y el tipo de escenario.

2) Frecuencia de despliegue

Para realizar la planificación de red DVB-H se necesita determinar la frecuencia a la que se realiza el despliegue de red, ya que las pérdidas de propagación que experimenta la señal dependen de la misma. Diversos estudios demuestran que la banda adecuada para desplegar sistemas DVB-H es la banda UHF (470 a 830 MHz), ya que proporciona buenas prestaciones en cuanto a ancho de banda del canal (8MHz), tamaño y ganancia de antena y pérdidas de propagación. Sin embargo, no hay garantía de que esta zona del espectro quede libre, sobre todo mientras no se lleve a cabo el apagón analógico, con lo cual cabe la posibilidad de que se deba utilizar otra banda de frecuencia para realizar el despliegue de red.

Otra banda posible de despliegue de red es la banda L, que va desde 1.5 hasta 2.7 GHz. Esta banda presenta claras desventajas respecto a la banda UHF debido a que las pérdidas de propagación son mayores, reduciéndose el área de cobertura y aumentando el coste de despliegue de red.

3) Transmisores utilizados

Tal como se ha explicado anteriormente, la planificación de red consiste en decidir qué emplazamientos celulares de los existentes se van a utilizar, el tipo de transmisor, la potencia transmitida, el diagrama de radiación de las antenas, el azimut y el tilt de las mismas.

Los transmisores pueden ser transmisores sincronizados o *gap-fillers*. Los transmisores sincronizados reciben los flujos de transporte en banda base para posteriormente modularlos COFDM, amplificarlos y distribuirlos. Incorporan sincronización, normalmente vía GPS, para transmitir de forma simultánea al resto de transmisores de la red. Los *gap-fillers* reciben la señal de un transmisor DVB-H, la amplifican y la retransmiten.

La principal ventaja de la utilización de transmisores sincronizados es que la limitación en potencia viene impuesta por los límites de radiación electromagnética [11] y no por la tecnología utilizada. Además las prestaciones obtenidas con este tipo de transmisor son mejores, puesto que no introducen ningún tipo de retraso artificial. El principal inconveniente es el coste adicional debido a que se necesita implementar más equipamiento (modulador COFDM y sistema de sincronización).

Los repetidores tienen como principal inconveniente la limitación de potencia transmitida debido al acoplo entre las antenas transmisoras y receptoras, que se traduce en un rizado de la señal COFDM. Sin embargo la no necesidad de equipamiento adicional convierte a este tipo de transmisores en una alternativa de bajo coste a los transmisores sincronizados.

4) Antenas

La directividad de las antenas transmisoras depende de si se utiliza un transmisor sincronizado o un repetidor. Los transmisores sincronizados pueden utilizar antenas omnidireccionales, mientras

que la antena transmisora de los *gap-fillers* debe ser directiva para minimizar el acoplo con la antena receptora. Asimismo, la antena receptora de los *gap-fillers* debe ser directiva para evitar la recepción de señal proveniente de transmisores de los cuales no se desea amplificar señal.

En redes celulares el tilt de las antenas transmisoras se modifica para reducir la interferencia entre los transmisores y aumentar el nivel de señal en el área de servicio de cada transmisor. El estudio de este parámetro tiene sentido porque el diagrama de radiación vertical de las antenas es directivo, con un ancho de haz de entre 5° y 20° aproximadamente. Se distingue entre tilt mecánico y tilt eléctrico. El tilt mecánico se implementa inclinando la antena transmisora, mientras que el tilt eléctrico se obtiene modificando la fase de las señales a la entrada de cada segmento de la antena. El tilt eléctrico viene dado por el fabricante de las antenas, mientras que el tilt mecánico se puede variar en el proceso de instalación. Valores reducidos de *downtilt* (i.e., inclinación de las antenas hacia abajo) aumenta la cobertura en zonas cercanas al transmisor. Sin embargo, si el *downtilt* es demasiado elevado la cobertura quedaría demasiado reducida al entorno cercano del transmisor, perjudicando a zonas más alejadas.

Finalmente, es importante destacar que las pérdidas de propagación del enlace y la ganancia de las antenas transmisoras y receptoras dependen en gran medida de la frecuencia a la que se transmita la señal DVB-H, ya que a bajas frecuencias las pérdidas de propagación son menores pero las prestaciones de las antenas transmisoras y receptoras son peores, disminuyendo la ganancia de las mismas.

5) Balance de Potencias

A continuación se va a realizar el balance de la ganancia y las pérdidas que experimenta la señal. Estos parámetros se deben tener en cuenta para determinar el nivel de señal recibido por el terminal.

La potencia a la entrada del receptor se expresa por tanto de la siguiente forma:

$$P_{rx} = P_{tx} - L_f + G_{tx}(\theta_{tx}, \varphi_{tx}) - L_p + G_{rx} = PIRE - L_p + G_{rx}(\theta_{rx}, \varphi_{rx}) \quad (3)$$

Donde P_{tx} es la potencia transmitida, L_f es la degradación adicional del transmisor (debida al cableado etc.), L_p son las pérdidas del enlace radio y $G_{tx}(\theta_{tx}, \varphi_{tx})$ y $G_{rx}(\theta_{rx}, \varphi_{rx})$ son la ganancia de las antenas transmisora y receptora en función de la dirección angular.

La máxima potencia transmitida viene determinada por los límites de radiación electromagnética permitidos y por las prestaciones del transmisor utilizado. Se suele expresar en términos de PIRE, de forma que se tiene en cuenta la ganancia máxima de la antena transmisora y las pérdidas del equipamiento. La ganancia de la antena transmisora depende de la frecuencia utilizada para desplegar el sistema, ya que las prestaciones de las antenas DVB-H existentes

actualmente a frecuencias menores son peores. También depende del diagrama de radiación de la antena y por tanto del ángulo vertical y horizontal entre el transmisor y el receptor.

Para calcular las pérdidas de propagación se debe establecer el modelo de propagación. Su valor suele incluir las pérdidas por espacio libre (FSL, *Free Space Loss*) junto con las pérdidas debidas a los distintos mecanismos de propagación (reflexión, difracción, *scattering*). El modelo de propagación se elige en función de la información disponible del escenario de despliegue: área, altura del terreno, altura de los edificios, tipo de escenario etc.

Dado un escenario de despliegue de red DVB-H y un conjunto de usuarios dentro del mismo, la cobertura se calcula fijando una tasa de error que garantice cierto nivel de calidad de reproducción. A partir de esta tasa de error se halla el nivel mínimo de relación portadora a ruido. El ruido introducido por el receptor se expresa de la siguiente forma:

$$P_n = F + 10 \log(k \cdot T_0 \cdot B) \quad (4)$$

Donde F es el factor de ruido del receptor, k es la constante de Boltzman ($k=1.38 \times 10^{-23}$ Ws/K) y T_0 es la temperatura absoluta (290 K).

El nivel mínimo de señal viene expresado a continuación:

$$P_{s \min} = P_n + C / N \quad (5)$$

$$U_{s \min} = P_{s \min} + 120 + 10 \log(Z_i) \quad (6)$$

6) Modelo de Cobertura

Dada una configuración de red, la cobertura que proporciona se define como el porcentaje de puntos de test en los cuales la Relación Portadora a Interferencia más Ruido (*Carrier-to-Interference plus Noise Ratio*, CINR) supera cierto valor mínimo, dependiente del modo de transmisión. La definición de CINR, es la siguiente:

$$\Gamma = \frac{P_{Use}}{P_{Self} + P_{Ext} + N} \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{\sum_i P_{TXi} \cdot l_i \cdot Q(t_i - t_o)}{\sum_i P_i \cdot [1 - Q(t_i - t_o)] \cdot l_i + P_{Ext} + N} \quad (8)$$

Donde P_{Use} es la potencia útil, P_{Self} es la interferencia producida por la propia red, P_{Ext} son las interferencias externas, y N es el ruido térmico. P_i y t_i son la potencia recibida y el tiempo de llegada de la señal proveniente del transmisor i de la red, t_o es el instante de sincronización temporal (primera señal recibida entre todos los transmisores de la red).

Los estándares DVB-T y DVB-H permiten implementar Redes de Frecuencia Única gracias a la modulación COFDM. Por lo tanto en el receptor se recibirá varias señales provenientes de transmisores distintos. La señal total recibida se corresponderá con la suma lineal de las señales de cada transmisor, las cuales experimentan un canal de propagación distinto con pérdidas l_i y ponderadas según la función Q . Esta función determina en qué medida la señal proveniente del transmisor contribuye a formar parte de la señal y de la interferencia. De este modo, si el instante de llegada al receptor es menor que el Intervalo de Guarda, la señal contribuye completamente a la señal útil, mientras que si se recibe en un instante mayor que dicho intervalo comienza a contribuir a las interferencias, hasta que llega un instante en el que la señal es totalmente interferente. En este caso, Q se modela mediante una función cuadrática según (9). En la Fig. 10 se representa la función Q gráficamente [12]:

$$Q(t_i - t_o) = Q(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau \leq T_g - 7T_u/24 \\ (T_u + \tau/T_u) & T_g - 7T_u/24 < \tau \leq 0 \\ 1 & 0 < \tau \leq T_g \\ (1 - (\tau - T_g)/T_u)^2 & T_g < \tau \leq 7T_u/24 \\ 0 & \tau > 7T_u/24 \end{cases} \quad (9)$$

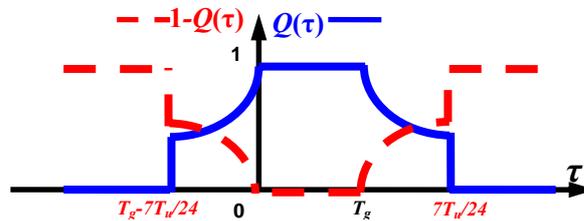


Fig. 10. Función de ponderación Q .

La fiabilidad del cálculo de cobertura depende del número de puntos elegido, de la distribución espacial de los mismos, de las características del terreno y de la configuración de la red.

Existen varias estrategias de distribución de puntos de test por lo que el muestreo puede ser aleatorio, sistemático, estratificado en función de la configuración de red, basado en el terreno etc. En [13] se ha estudiado el comportamiento de las estrategias de selección de puntos de test citadas anteriormente, concluyendo en que el muestreo sistemático, que consiste en utilizar una rejilla de puntos equiespaciados, es el que mejores resultados proporciona.

7) Modelo de Coste

Para encontrar las configuraciones de red de mínimo coste es necesario implementar un modelo de coste que considere las potencias de transmisión, energía eléctrica, cableado, equipamiento, adquisición de los emplazamientos, mantenimiento, etc. que proporcione el coste de utilizar cada tipo de emisor para las distintas potencias posibles en cada emplazamiento considerado. El modelo

de coste debe tener en cuenta tanto gastos de capital CAPEX como gastos operativos OPEX, por lo que las medidas de coste se deben definir para un intervalo de tiempo, como por ejemplo costes anualizados (i.e., coste por año).

El modelo de coste debe tener en cuenta si se utiliza la estructura de difusión de TV y radio fijas y si se utiliza la red celular existente. En caso de utilizar la red de difusión existente, el coste dependerá principalmente de la potencia transmitida, puesto que este nivel de potencia es muy elevado. Por otro lado, si se utiliza la infraestructura celular existente, cada emplazamiento tendrá asociado un coste por utilizarlo (alquiler del emplazamiento, mantenimiento, cableado si procede, etc.), más un coste proporcional a la potencia transmitida (amplificadores, antena, electricidad, etc.). Obviamente el coste será superior si se trata de un transmisor sincronizado en vez de un repetidor. Mientras que el coste proporcional a la potencia transmitida será en la práctica el mismo para todos los emplazamientos, el coste asociado a utilizar el emplazamiento en sí dependerá de cada emplazamiento en particular (i.e., unos emplazamientos pueden ser más caros que otros).

IV.2.MODO DE TRANSMISIÓN

El modo de transmisión DVB-H viene determinado por cuatro parámetros: tamaño de la FFT, intervalo de Guarda (GI), modulación y tasa de codificación.

El tamaño de la FFT (2K, 4K, 8K) indica el número de portadoras COFDM que modulan la señal. Este parámetro influye en la velocidad máxima alcanzable por el terminal así como en el tamaño de la celda. Un mayor número de portadoras implica menor espaciado entre las mismas y por lo tanto una menor velocidad máxima alcanzable. Sin embargo, dado que la separación entre las portadoras debe ser igual a la inversa del período de símbolo, los modos con mayor número de portadoras se corresponderán con símbolos de menor duración. La duración del Intervalo de Guarda será menor con lo cual la distancia máxima de los transmisores de la SFN también será menor.

El tamaño de la FFT, junto al intervalo de guarda relativo, establece el intervalo de guarda absoluto, que suele tener una duración de 1/4, 1/8, 1/16 ó 1/32 del periodo útil de símbolo. La elección del GI es un compromiso entre capacidad y el tamaño de celda en una SFN. Cuanto mayor sea el GI elegido, mayor será el tamaño de la celda y menor será la capacidad del sistema.

La capacidad del sistema depende del Intervalo de Guarda, de la modulación (QPSK, 16-QAM o 64-QAM) y de la tasa de codificación (1/2 ó 2/3). En la Tabla 1 se muestra la capacidad del canal en función del esquema de modulación, la longitud del intervalo de guarda y la relación de codificación interna para canales de 8 MHz. La capacidad es independiente del tamaño de la FFT.

La elección de la modulación y de la tasa de codificación influye en la robustez y en la capacidad del sistema. La modulación QPSK presenta mayor robustez frente al ruido y menor capacidad. La modulación 64-QAM presenta mayor eficiencia espectral, con lo cual proporciona

mayor capacidad y peor Relación Señal a Ruido. La elección de una mayor tasa de codificación protegerá más la señal a costa de disminuir la capacidad del sistema.

Modulación	Codificación	Capacidad (Mb/s)			
		GI 1/4	GI 1/8	GI 1/16	GI 1/32
QPSK	1/2	4.98	5.53	5.85	6.03
QPSK	2/3	6.64	7.37	7.81	8.04
16-QAM	1/2	9.95	11.06	11.71	12.06
16-QAM	2/3	13.27	14.75	15.61	16.09
64-QAM	1/2	14.93	16.59	17.56	18.10
64-QAM	2/3	19.91	22.12	23.42	24.13

Tabla 1. Capacidad del canal en función del modo de transmisión.

Tal como se ha indicado anteriormente, la distancia máxima entre transmisores solamente depende del valor absoluto del intervalo de guarda, que a su vez depende del tamaño de la FFT y del intervalo de guarda relativo GI. Un valor del intervalo de guarda mayor proporcionará mayor distancia entre transmisores a costa de una disminución de la capacidad del sistema. La Tabla 2 muestra el tamaño máximo de celdas de la red en función del número de portadoras y del Intervalo de Guarda. Si se aumenta el número de portadoras, la separación en frecuencia de las mismas es menor y por tanto el período de símbolo es mayor y también el intervalo de guarda absoluto, consiguiendo mayor distancia máxima entre transmisores.

Tamaño FFT	Período útil de símbolo	Distancia equivalente			
		GI 1/4	GI 1/8	GI 1/16	GI 1/32
2K	224 μ s	16.8 km	8.4 km	4.2 km	2.1 km
4K	448 μ s	33.6 km	16.8 km	8.4 km	16.8 km
8K	896 μ s	67.2 km	33.6 km	16.8 km	8.4 km

Tabla 2. Distancia máxima entre transmisores.

Una novedad importante en la planificación de DVB-H respecto a la planificación de DVB-T es la codificación opcional MPE-FEC, que complementa la codificación realizada en la capa física de DVB-T. Gracias a la utilización de la codificación MPE-FEC 3/4 (25% de información de paridad) la disponibilidad del servicio de DVB-H es prácticamente independiente de la velocidad del terminal móvil, obteniendo un rendimiento similar al de un receptor móvil de DVB-T con diversidad de dos antenas.

Para determinar si un punto del escenario de despliegue está cubierto, se necesita que la señal de entrada al receptor supere cierto umbral de relación señal a ruido que depende, entre otros factores, del modo de transmisión que se elija para realizar el despliegue de red.

IV.3. PLANIFICACIÓN DE REDES DVB-H CON GAP-FILLERS

Tal como se ha explicado anteriormente, una de las variables de decisión del diseño de red es el tipo de transmisor utilizado (transmisor sincronizado o *gap-filler*). La utilización de uno u otro

determina la potencia transmitida, ya que en los GF está limitada por la potencia a la entrada y el aislamiento entre las antenas transmisora y receptora. Por tanto se debe estudiar cómo afectan estas limitaciones en la planificación de la red.

Para realizar ejercicios de planificación con GF es fundamental caracterizar el aislamiento que se puede conseguir en los potenciales emplazamientos, ya que determina, junto al nivel de potencia recibida, la potencia máxima transmitida. Es importante por tanto parametrizarlo en función de la separación entre antenas, situación de éstas, diferencia de azimut, etc., teniendo en cuenta las características del entorno en el que se realiza la planificación. El aislamiento entre las antenas depende de la instalación de las mismas, del entorno en el que se encuentren, y de la frecuencia de operación (el aislamiento de una misma instalación puede variar entre 15 y 25 dB a lo largo de la banda UHF [10]). En entornos urbanos, el aislamiento de los *gap-fillers* es un aspecto crítico debido a la existencia de edificios próximos a los emplazamientos que provoca numerosos ecos a la entrada del transmisor. Además, las instalaciones se suelen llevar a cabo en azoteas o tejados sin grandes torres o mástiles y la propia infraestructura que soporte las antenas no permite una separación vertical importante entre ellas. Por tanto, en la instalación de los GF se deben implementar técnicas de aumento del aislamiento como puede ser alejar las antenas transmisoras y receptoras, romper la línea de visión directa mediante elementos estructurales o colocar elementos artificiales de pantalla próximos a la antena receptora que atenúen la señal procedente de la antena transmisora. El efecto de separar las antenas es más importante en los primeros 3 ó 4 metros, obteniendo menores ganancias en el rango de de 4 a 10 metros. En general, el aislamiento aumenta entre 15 y 20 dB cuando la distancia entre antenas pasa de 1 a 10 metros [10]. Por otra parte, el tipo de antenas utilizadas en transmisión y recepción también influye en el aislamiento del GF. De este modo, se puede utilizar antenas con distintas polarizaciones para aumentar el desacoplo entre ellas. En la práctica en núcleos urbanos se pueden conseguir valores de aislamiento de hasta 110 dB si se optimiza la instalación del *gap-filler*, cuyos valores se deben mantener acotados para garantizar el funcionamiento del sistema.

Finalmente, el uso de *gap-fillers* implica ciertos efectos ineludibles que se deben tener en cuenta. Estos efectos son básicamente el ruido y el retardo añadidos. La señal a la salida sufre en consecuencia una degradación adicional respecto a la señal de salida de los transmisores sincronizados. Es por esto que se debe contemplar unas pérdidas de implementación añadidas por el uso de *gap-fillers*.

La planificación de redes de TDT móvil con *gap-fillers* se debe realizar de forma que la ganancia implementada no supere cierto valor máximo para garantizar el correcto funcionamiento del sistema y evitar oscilaciones. Este valor depende del aislamiento entre las antenas transmisora y receptora de los *gap-fillers*. Se debe fijar un valor de Margen de Ganancia, y, dado el nivel de señal a la entrada y a la salida del GF, si la ganancia es mayor que el Aislamiento menos el Margen de

Ganancia, se considera que el sistema no es estable, con lo cual el *gap-filler* no se puede enganchar al transmisor.

IV.4. ALGORITMOS GENÉTICOS MULTI-OBJETIVO

En la actualidad la planificación eficiente de redes celulares se realiza mediante técnicas de optimización multiobjetivo, ya que permiten abordar problemas con distintos objetivos en conflicto entre sí. La principal ventaja de este tipo de algoritmos es que no es necesario combinar los dos objetivos en una única función, lo cual suele penalizar alguno de ellos. Por otra parte, en los últimos años se ha desarrollado exitosamente algoritmos genéticos que se adaptan adecuadamente a problemas multiobjetivo.

Investigaciones realizadas sobre el principio de *survival of the fittest* (ley de supervivencia de los más aptos) observado en la naturaleza, dieron como resultado simulaciones computacionales que resultaron muy útiles para solucionar problemas complejos, dando origen a los algoritmos genéticos, que han sido muy populares en tareas de búsqueda y de optimización en los últimos años, con un desarrollo constante de nuevos algoritmos. Los algoritmos genéticos multi-objetivo buscan encontrar, idealmente, un conjunto de soluciones equivalentes en ausencia de información sobre la importancia relativa de los distintos objetivos. De este modo, se busca un conjunto de soluciones que exhiban un alto rendimiento en todas las dimensiones. A este conjunto de individuos se le denomina Frente Óptimo de Pareto. En particular, los Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo permiten resolver problemas multi-objetivo, encontrando un conjunto completo de soluciones en una sola ejecución, convirtiéndolos en un candidato natural para resolver el problema de planificación eficiente de redes celulares. Además, este tipo de algoritmos permite la búsqueda en grandes espacios de soluciones y operan de forma simultánea con varias soluciones en lugar de trabajar de forma secuencial con una única solución.

Los Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo se inician con un conjunto de configuraciones aleatorias llamada población inicial. Cada individuo (cromosoma) en la población representa una solución al problema de optimización. La evolución del algoritmo consiste en la selección entre todas las soluciones de aquellas llamadas soluciones óptimas de Pareto y la aplicación de operadores genéticos a los padres para producir nuevos individuos que formarán parte de la nueva población. El proceso continúa intentando obtener soluciones cada vez mejores hasta que un criterio de parada sea satisfecho (Fig. 11).

La selección de las soluciones óptimas de Pareto se realiza en términos de dominancia y de diversidad. El término de dominancia se define a continuación:

Sean o_1, o_2, \dots, o_n , funciones objetivo que tienen que ser maximizadas. Sea S el conjunto de todas las posibles soluciones. Si $s \in S$ está dominada por $t \in S$ (indicado como $s \succ t$) si $\exists j, j \in \{1, \dots, n\}$ de tal modo que $o_j(t) > o_j(s)$, y $\forall i, 1 \leq i \leq n, o_i(t) > o_i(s)$. Una solución no-dominada es una solución óptima de Pareto.

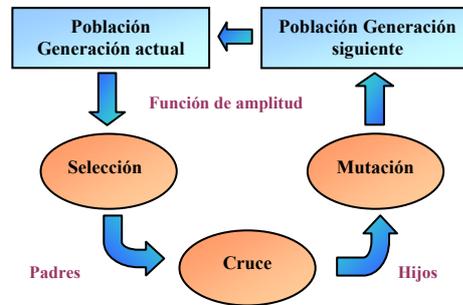


Fig. 11: Algoritmo genético multi-objetivo.

Una solución domina a otra si presenta mejor rendimiento en un objetivo y no presenta peor rendimiento en el resto de objetivos. Por otra parte, la diversidad se estima analizando la separación de cada individuo respecto al resto en el espacio de soluciones, con el objetivo de que la población final se encuentre uniformemente distribuida en el frente óptimo de Pareto.

La Fig. 12 representa la evolución del conjunto de soluciones hacia el Frente Óptimo de Pareto.

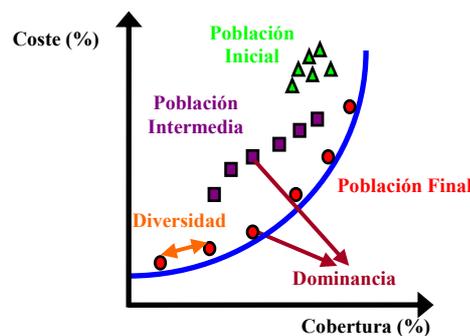


Fig. 12: Evolución de la población hacia el frente óptimo de Pareto.

En la literatura existe un gran número de variantes sobre técnicas de optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos. Los principales algoritmos genéticos multi-objetivo implementados en la práctica son el algoritmo NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm versión II*) y el algoritmo SPEA-II (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm versión II*) [14]. El algoritmo elegido para la optimización de la red DVB-H es el NSGA-II, ya que, en comparación con el SPEA-II, presenta mejores prestaciones para problemas de optimización con dos objetivos.

El algoritmo NSGA se basa en la clasificación de individuos en varias capas o frentes. La clasificación consiste en agrupar a todos los individuos no dominados en un frente igual para todos los individuos. Este valor es proporcional al tamaño de la población, para así proporcionar un potencial reproductivo igual para todos los individuos de este frente. Entonces el grupo de individuos clasificados es ignorado y otro frente de individuos no dominados es considerado. El proceso continúa hasta que se clasifican a todos los individuos en la población. Posteriormente se propuso una versión revisada del NSGA, llamada NSGA-II, que es computacionalmente más eficiente. Además, es elitista y no necesita especificar ningún parámetro adicional. El mecanismo elitista consiste en elegir los mejores individuos de la unión de las poblaciones padre e hijo.

IV.5. ALGORITMO NSGA-II

El algoritmo de planificación utilizado para encontrar las configuraciones de red de máxima cobertura y mínimo coste está basado en el algoritmo NSGA-II. La Tabla 3 muestra el pseudo código del algoritmo. Una descripción más detallada de su funcionamiento se puede encontrar en [15] y [16].

```

Generar la población inicial  $P_0$  de tamaño  $n$ 
Clasificar  $P_0$  en frentes con soluciones no dominadas
Calcular la crowding distance de cada solución
Aplicar selección, cruce y mutación para obtener la población hija inicial,  $H_0$ ,
de tamaño  $n$ 
for  $t = 1:nr_{generations}$  do
   $U_t = P_t \cup C_t$ 
  Clasificar  $U_t$  en frentes  $F_1, F_2, \dots$ 
  Calcular la crowding distance de cada solución
   $P_{t+1} = 0; i = 1;$ 
  while  $|P_{t+1}| \leq n$  do
    if  $|F_i| + |P_{t+1}| \leq n$  then
       $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$ 
    Else
      Ordenar  $F_i$  según su crowding distance
       $P_{t+1} = P_{t+1} \cup \text{first } (n - |P_{t+1}|) \text{ elements of } F_i$ 
    end if
     $i = i + 1;$ 
  end while
  Aplicar selección, cruce y mutación para obtener la población hija  $H_{t+1}$ 
end for

```

Tabla 3: Pseudo-código del algoritmo NSGA-II.

En cada generación, t , el algoritmo mantiene dos poblaciones: la población padre, P_t , que almacena los individuos con mejores prestaciones en cada generación, y la población hija, H_t . La población hija se obtiene de la población padre aplicando selección, cruce y mutación. La selección de los padres se realiza mediante la técnica de torneo. Dos individuos de P_t son elegidos aleatoriamente, y el individuo que pertenece a un frente de menor orden gana el torneo convirtiéndose en padre. En el caso de que ambos individuos pertenezcan al mismo frente, gana el torneo el que tenga la mayor diversidad (distancia de aislamiento o *crowding distance*). La

crowding distance indica el grado de aislamiento de una solución en el espacio de soluciones de los objetivos. Para calcularla, los miembros de un mismo frente se ordenan según su rendimiento en cobertura y coste. A los miembros con el mayor y menor rendimiento en coste y cobertura se les asigna una distancia infinita, mientras que al resto se les asigna la diferencia entre su rendimiento y el de las soluciones vecinas. De forma similar se selecciona un segundo padre, y aplicando las técnicas de cruce y mutación se obtiene un individuo hijo.

La técnica de cruce utilizada consiste en que el individuo hijo adquiere parte de los emplazamientos de un padre y el resto de emplazamientos del otro. Al utilizar repetidores, podría ocurrir que se heredara un repetidor de un padre pero no el emisor al que estaba enganchado. En este caso se eliminaría a posteriori el repetidor. La técnica de mutación utilizada consiste en que los parámetros de un único emplazamiento elegido al azar se cambia aleatoriamente. El porcentaje de mutación se ha limitado al 5%.

Este proceso se repite hasta que H_t tiene el mismo tamaño de población que P_t , n (parámetro fijo en la ejecución del algoritmo). A continuación, el algoritmo trabaja con el conjunto unión de ambas poblaciones, denominado U_t . El algoritmo selecciona los n individuos más aptos de U_t formando la población padre en la siguiente generación, P_{t+1} . El algoritmo clasifica los individuos de U_t en frentes, y va incluyendo frentes ordenadamente en P_{t+1} . En el caso de que se supere el tamaño deseado n al incluir un frente, F_j , se incluyen los individuos de F_j con mayor distancia de aislamiento, para intentar distribuir las soluciones sobre todo el frente óptimo de Pareto. El proceso se repite hasta obtener el número deseado de generaciones.

V. MODELO DE SISTEMA

V.1. ESCENARIO DE DESPLIEGUE

La planificación de la red de TDT móvil se va a realizar en un escenario real, concretamente en el centro de la Ciudad de Valencia. El área de servicio tiene una extensión 16 km² aproximadamente.

La planificación se va a realizar contemplando la posibilidad de utilizar una torre de TV y 134 emplazamientos celulares. La altura de la torre de TV es de 150 m y la de los emplazamientos celulares se ha considerado 3 m por encima de la altura de los edificios. La Fig. 13 muestra la ubicación en el escenario de la torre (rojo) y de los emplazamientos celulares (negro) junto con la altura de los edificios presentes en el escenario.

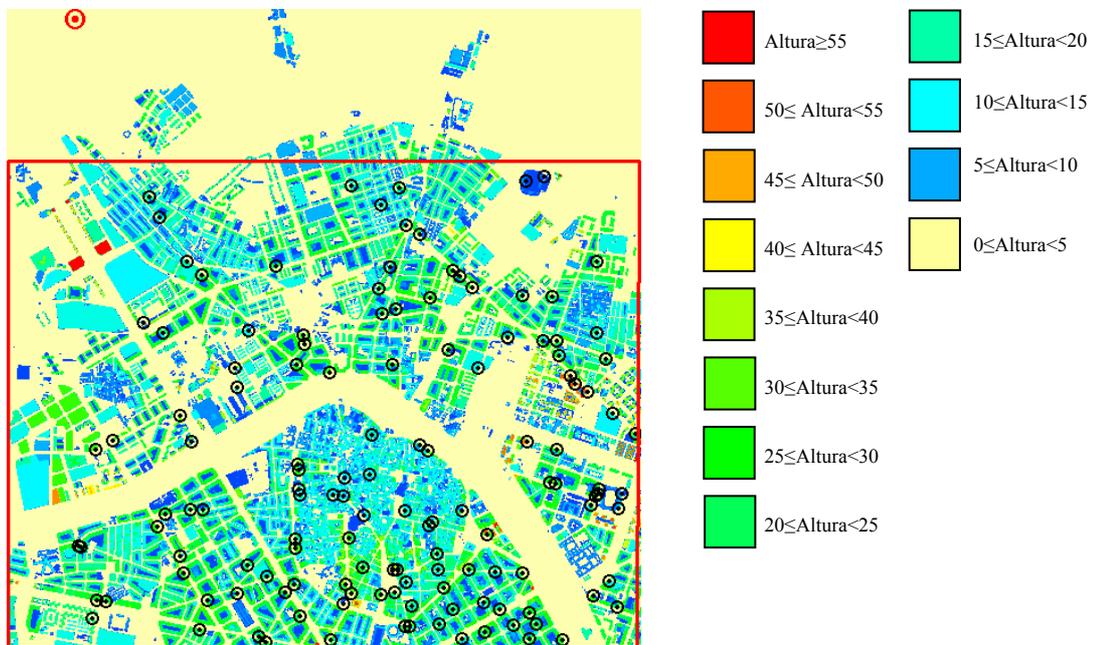


Fig. 13. Escenario de despliegue de red.

Sobre el escenario de despliegue se ha ubicado una rejilla de puntos de test con una resolución de 30 m, con lo cual el número total de puntos de test es aproximadamente de 7500. Este número es lo suficientemente elevado como para proporcionar valores fiables de cobertura en términos de tanto por cien.

V.2. PARÁMETROS DEL SISTEMA

El modo de transmisión elegido es el modo FFT 8K, intervalo de guarda $\frac{1}{4}$ relativo al período útil de símbolo y codificación MPE-FEC $\frac{3}{4}$. Este modo de transmisión presenta una distancia equivalente del intervalo de guarda de 33.6 km, que determina la máxima separación posible entre transmisores en la red. Se ha utilizado dos modulaciones distintas: QPSK y 16-QAM, con ratios de codificación de $\frac{1}{2}$ y $\frac{2}{3}$. La Tabla 4 muestra la capacidad del sistema, el requisito de CNR, y la

máxima frecuencia Doppler soportada en función de la modulación y la tasa de codificación en la capa física. Los diferentes modos de transmisión permiten velocidades superiores a los 100 km/h a la frecuencia considerada.

El entorno considerado es *pedestrian outdoor*. El sistema utiliza codificación MPE-FEC 3/4 para lograr recepción vehicular.

El receptor de los terminales se ha modelado mediante una antena omnidireccional con una ganancia de -7 dBi (para la frecuencia de 700 MHz), y un factor de ruido de 6 dB (incluyendo el filtro de rechazo GSM). La altura del receptor es 1.5 m.

	CNR	Capacidad	Doppler
QPSK 1/2	9.5 dB	4.1 Mb/s	84 Hz
QPSK 2/3	12.5 dB	5.5 Mb/s	74 Hz
16-QAM 1/2	15.5 dB	8.3 Mb/s	74 Hz
16-QAM 2/3	18.5 dB	11.1 Mb/s	66 Hz

Tabla 4: Requisitos de CNR (dB) en función del canal y la modulación.

En esta tesina se va a contemplar la posibilidad de utilizar, además de transmisores sincronizados, *gap-fillers* que reciben y amplifican señal de otros emisores de la red. Se ha considerado que los transmisores pueden transmitir potencias de 100, 200, 500 y 1000 W, y que los *gap-fillers* pueden transmitir 10, 20 y 50 W. Los transmisores sincronizados se implementan mediante tres sectores. Las antenas tanto de los transmisores como de los receptores tienen una ganancia de 14.5 dBi y un ancho de haz de 60°. La antena receptora de los *gap-fillers* tiene una ganancia de 14.5 dBi y un ancho de haz de 30°.

Para utilizar *gap-fillers* en la planificación de red, se debe modelar el margen de ganancia de los *gap-fillers* y el aislamiento de los emplazamientos donde se pueden ubicar. En este trabajo se estudiará valores de aislamiento de 70 a 110 dB y un Margen de Ganancia de -10 dB. Este margen de ganancia significa que, para que un *gap-filler* pueda engancharse a un emisor (que puede ser un transmisor sincronizado u otro *gap-filler*) el nivel de señal a la entrada proveniente de dicho emisor debe ser como mínimo 10 dB menor (i.e., diez veces menor) que el nivel de señal a la salida. El aislamiento se ha considerado constante para todos los emplazamientos, realizando un estudio de la influencia de este parámetro en el despliegue de red.

El algoritmo de planificación se utiliza para optimizar los emplazamientos celulares donde ubicar transmisores, el tipo de transmisor utilizado, la potencia transmitida y el azimut de las antenas. Se ha considerado valores de azimut de -40° a 40° respecto al eje de unión entre el *gap-filler* y el emisor del cual se amplifica la señal, con un paso de 10°.

En cuanto al modelo de coste utilizado, se ha definido la relación de coste, α como la relación entre el coste de un transmisor sincronizado y el de un *gap-filler*, es decir, α determina cuánto más

costoso resulta utilizar un transmisor sincronizado respecto a un *gap-filler* (10). Se estudia la influencia de este parámetro en la planificación de red, pudiendo tomar valores de 1 a 5.

$$\text{Relación de Coste} = \alpha = \frac{\text{Coste tx. sincronizado}}{\text{Coste gap - filler}} \quad (10)$$

V.3. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN

La herramienta de planificación utilizada para calcular las pérdidas de propagación es Atoll, principal producto de Forsk [17]. Se trata de una herramienta de diseño de redes inalámbricas que soporta diversas tecnologías. En nuestro caso la herramienta Atoll se utiliza para calcular las pérdidas de propagación desde cada emplazamiento hasta cada uno de los puntos de test.

Para ello, se introducirá un mapa de elevación del terreno (*Digital Terrain Model*, DTM) y un mapa de edificios de la ciudad de Valencia. Estos mapas contienen información de la altura para cada punto de test. El modelo de propagación implementado está basado en la fórmula de Hata que, mediante la información contenida en los mapas, establece un perfil de altura entre el transmisor el receptor y calcula las pérdidas debidas a la propagación en espacio libre y a la difracción en edificios. También establece correcciones para terreno montañoso.

V.4. ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN

El algoritmo de planificación se ha utilizado para estudiar en primer lugar la viabilidad de utilizar *gap-fillers* en el despliegue de red DVB-H, optimizando la posición y potencia de los transmisores sincronizados para distintas configuraciones de potencia y coste. Para ello, se ha utilizado cuatro semillas diferentes con el fin de obtener mayor número de soluciones. La probabilidad de mutación es del 5%, y el número de generaciones de 1000. Posteriormente, el algoritmo se utiliza para encontrar las configuraciones de transmisores sincronizados transmitiendo una potencia constante que obtienen máximo nivel de cobertura. Finalmente, cada una de las configuraciones obtenidas se ha utilizado como configuración base, añadiendo *gap-fillers* que aumenten la cobertura proporcionada.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

VI.1. ESTUDIO DE COBERTURA DE LA TORRE DE TV

La siguiente tabla muestra el valor de cobertura proporcionado por la torre de TV transmitiendo una potencia PIRE de 40 dBW (10 kW) en función de la capacidad de servicio proporcionada. La Fig. 14 muestra el valor de CNR de la señal para cada punto del escenario de despliegue. La Fig. 15 muestra la capacidad de servicio proporcionada en cada punto del escenario.

Capacidad	Cobertura torre TV
4.1 Mb/s	28 %
5.5 Mb/s	23 %
8.3 Mb/s	19 %
11.1 Mb/s	15 %

Tabla 5: Cobertura proporcionada por la torre de TV.

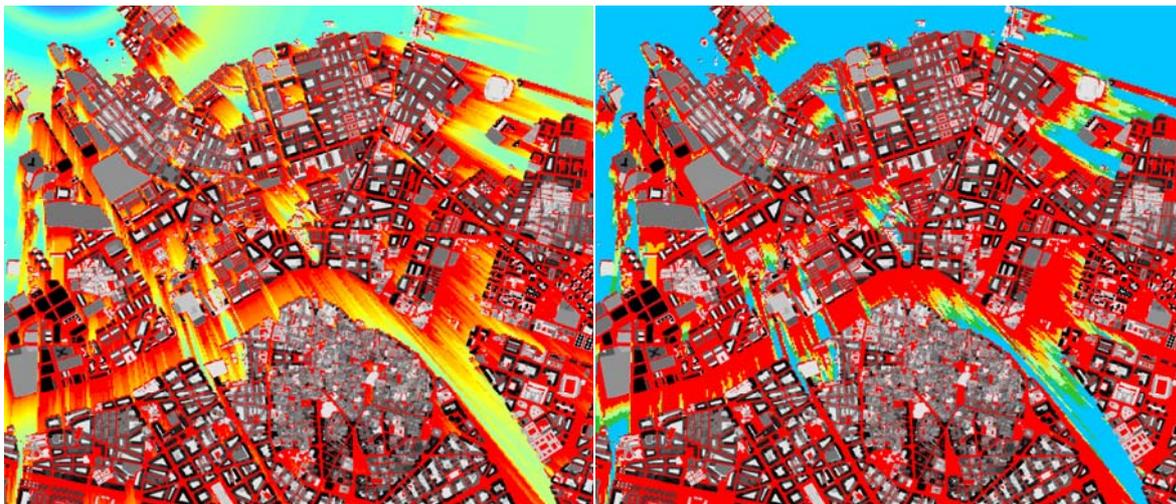


Fig. 14. CNR en cada punto del escenario de despliegue proporcionada por la torre de TV.

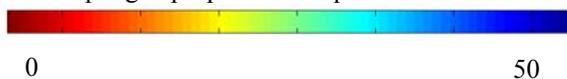
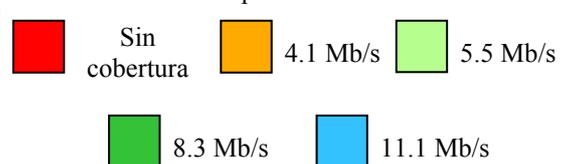


Fig. 15. Capacidad proporcionada por la torre de TV en cada punto del escenario.



Se observa que la cobertura proporcionada por la torre de TV no es lo suficientemente elevada, con lo cual se necesita transmisores adicionales que aumenten la cobertura de la red.

VI.2. ESTUDIO DEL AISLAMIENTO DE LOS EMPLAZAMIENTOS CELULARES

Tal como se ha explicado anteriormente, un parámetro que afecta considerablemente al rendimiento de los *gap-fillers* es el aislamiento entre la antena transmisora y receptora, que depende del emplazamiento en que estén ubicados.

Dados dos emplazamientos del escenario de despliegue en los cuales se colocan un emisor, se podrán enganchar si el nivel de señal a la entrada supera cierto umbral. Este umbral depende del margen de ganancia, de la potencia transmitida y del aislamiento.

A continuación se realiza un estudio del número de combinaciones posibles de GFs que se pueden enganchar a transmisores sincronizados en función del aislamiento de los emplazamientos y de la potencia transmitida por GFs y transmisores sincronizados. Se ha considerado que el aislamiento está comprendido entre 70 y 110 dB con un paso de 10 dB, que los transmisores sincronizados emiten una potencia de 100, 200, 500 y 1000 W y que los GF pueden transmitir 10, 20, 50 y 100 W. La Fig. 16 muestra el número de *gap-fillers* que pueden recibir y amplificar señal de transmisores sincronizados en función del aislamiento y las potencias de los emisores para una potencia transmitida por los *gap-fillers* de 20 W. La Fig. 17 muestra, para un aislamiento de 90 dB, el número de combinaciones posibles en función de la potencia transmitida por ambos tipos de emisores.

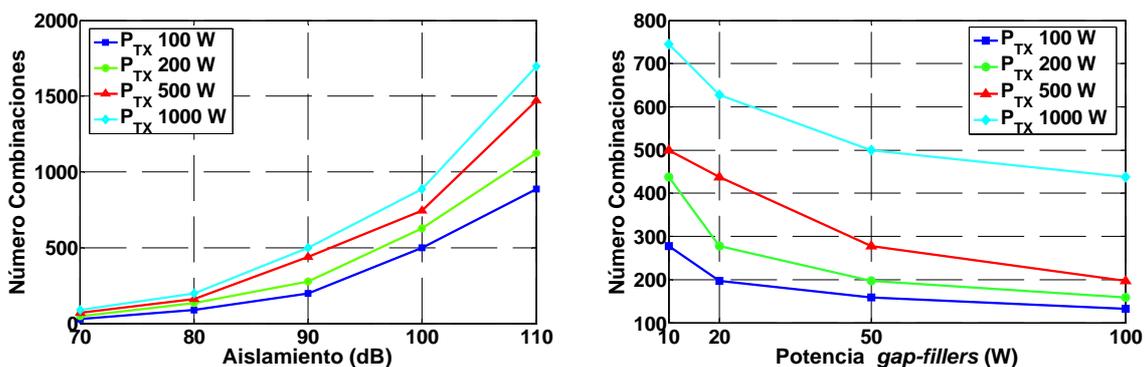


Fig. 16. Número de combinaciones Transmisor-GF vs. Aislamiento. Potencia GFs 20 W. Fig. 17. Número de combinaciones Transmisor-GF vs. Potencia GFs. Aislamiento 90 dB

Se observa como el número de combinaciones posibles en caso de que el aislamiento obtenido en los emplazamientos sea de 70 dB es muy reducido para cualquier valor de potencia de los transmisores sincronizados. Este número de combinaciones aumenta rápidamente con el aislamiento, siendo muy alto cuando éste tiene un valor de 110 dB. Sin embargo, el aislamiento suele tomar valores entre 70 y 90 dB [10]. Por otra parte, el número de combinaciones posibles aumenta con la potencia de los transmisores sincronizados y disminuye conforme aumenta la potencia emitida por los *gap-fillers*.

A continuación se presenta el número de emplazamientos que pueden recibir y amplificar la señal proveniente de la Torre de TV en caso de que ésta transmitiese 10 kW en función de la potencia emitida por los GFs y del valor de aislamiento.

Se observa que, en caso de que el aislamiento sea mayor de 90 dB, el número de emplazamientos que se puede enganchar a la torre de TV es elevado y que para valores altos de aislamiento se pueden enganchar los 134 emplazamientos celulares existentes. Esto es debido a que

en la mayoría de los casos existe visión directa entre la torre de TV, que se encuentra a una altura de 150 m, y los emplazamientos celulares. Sin embargo, en caso de que el aislamiento fuese de 70 dB, ningún emplazamiento podría recibir y amplificar señal proveniente de la torre de TV.

Potencia GFs	Aislamiento (dB)			
	80	90	100	110
10 W	126	130	133	134
20 W	114	129	133	134
50 W	17	128	132	133
100 W	0	126	130	131

Tabla 6. Número de *gap-fillers* que se pueden enganchar a la Torre de TV. PIRE 40 dBW.

VI.3. ESTUDIO DE LOS EMPLAZAMIENTOS CELULARES

A continuación se va a estudiar la red SFN formada únicamente por transmisores sincronizados. Para ello se va a realizar un ejercicio de planificación que obtenga las configuraciones que obtengan cierto nivel de cobertura a un mínimo coste, utilizando el algoritmo de planificación. Se considera que los transmisores pueden emitir varias potencias. El coste de cada transmisor es proporcional a la potencia transmitida. El coste total de la red será la suma del coste de la red celular más el coste de la torre de TV. En nuestro modelo cada emplazamiento celular tiene asociado un coste por utilizarlo más un coste proporcional a la potencia transmitida (debido a los amplificadores, antenas, electricidad etc.). El coste los emplazamientos se pueden modelar de la siguiente manera:

$$C_{bi} = C_{\alpha} + C_{\beta}(P_{Ci}) \quad (11)$$

Donde C_{α} es el coste de utilización del emplazamiento y C_{β} es el coste proporcional a la potencia transmitida, P_{Ci} .

La torre de TV sólo tiene un coste proporcional a la potencia, como viene expresado a continuación:

$$C_c = C_{\gamma}(P_{Bi}) \quad (12)$$

La Tabla 7 resume el rendimiento en coste considerado en el ejercicio de planificación. Se ha tomado como unidad de coste de referencia el coste debido a la mínima potencia considerada (20 dBW). Se ha asumido que el coste por utilizar un emplazamiento celular (C_{α}) es el mismo para todos los emplazamientos y que tiene un valor de 100 unidades de coste. El coste debido a la potencia transmitida aumenta proporcionalmente con ella (es decir, el coste se duplica al doblar la potencia). Finalmente, se ha considerado que el coste de utilización de la torre de TV es de 80 unidades de coste. El rendimiento en coste de una configuración de la red celular será el coste de la red celular en % respecto al coste máximo.

Potencia	Coste (Uds. Coste)
10 W	1
20 W	2
50 W	5.5
100 W	11
200 W	22
500 W	64
1000 W	128

Tabla 7. Costes anualizados considerados.

La Fig. 18 y Fig. 19 representan la cobertura obtenida el coste mínimo de despliegue de red en función de y del modo de transmisión utilizado para el caso en que se utilice la torre de TV y en caso de no utilizarla, respectivamente.

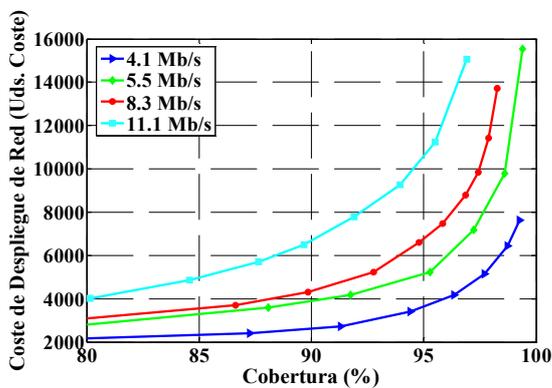


Fig. 18. . Coste despliegue de red vs. Cobertura PIRE Torre TV 10 kW.

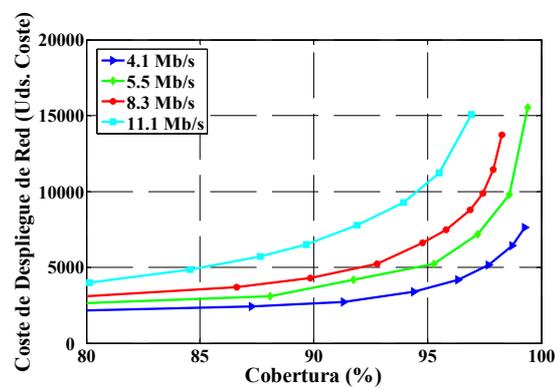


Fig. 19. Cobertura vs. Coste despliegue de red. Sin Torre TV.

Se observa que, para los costes considerados de utilización de la torre de TV, y de los emplazamientos celulares, la cobertura obtenida en función del nivel de coste es mayor en caso de utilizar la torre de TV. Estos resultados variarían si aumentase el coste de utilización de la torre de TV o si disminuyese el coste de utilización de los emplazamientos celulares.

La Tabla 8 y Tabla 9 muestran, en función del nivel de cobertura obtenido, el número de emplazamientos inactivos y transmitiendo a las distintas potencias consideradas en caso de querer proporcionar una capacidad de servicio de 4.1 Mb/s, en caso de que se utilice o no la torre de TV. Se observa como en todos los casos las configuraciones que proporcionan el nivel de cobertura requerido a un mínimo coste utilizan transmisores emitiendo a todas las potencias, tanto bajas como medias y altas.

En cuanto al número de emplazamientos celulares utilizados, se observa que, si bien el total de emplazamientos activos es mayor en el caso de utilizar la torre de TV, en caso de no utilizarla el número de emplazamientos transmitiendo altas potencias es mayor, mientras que utilizando la torre de difusión se utilizan más emplazamientos emitiendo a baja y media potencia.

Emplazamientos celulares	Cobertura			
	80%	90%	95%	98%
Inactivos	116	109	102	86
10 W	2	1	2	2
20 W	9	12	12	16
50 W	0	1	1	1
100 W	2	4	6	6
200 W	2	1	2	5
500 W	3	6	6	9
1000 W	0	0	3	9
Total Activos	18	25	32	47

Tabla 8. Emplazamientos celulares en función de la potencia transmitida y la cobertura proporcionada.
Capacidad 4.1 Mb/s. PIRE Torre TV 10 kW.

Emplazamientos celulares	Cobertura			
	80%	90%	95%	98%
Inactivos	110	109	103	87
10 W	5	2	4	5
20 W	12	14	7	8
50 W	1	0	1	3
100 W	1	0	0	2
200 W	1	1	6	8
500 W	1	1	5	8
1000 W	3	7	8	13
Total Activos	24	25	31	47

Tabla 9. Emplazamientos celulares en función de la potencia transmitida y la cobertura proporcionada.
Capacidad 4.1 Mb/s. Sin Torre TV.

A continuación se va repetir el ejercicio de planificación realizado anteriormente reduciendo el coste de los transmisores de baja potencia. El objetivo de este ejercicio es realizar una comparativa del número de transmisores utilizados para cada caso con el fin de observar la ventaja de introducir transmisores de baja potencia y bajo coste. El coste de transmitir a potencias de 10 W, 20 W, 50 W y 100 W se reduce por varios factores (2, 3, 4 y 5). La Tabla 10 muestra el número de emplazamientos utilizados en función de la potencia transmitida por los mismos en caso de que se utilice la torre de TV para una cobertura del 98 %.

Emplazamientos celulares	Red. Coste 1/2	Red. Coste 1/3	Red. Coste 1/4	Red. Coste 1/5
Inactivos	78	83	87	89
10 W	4	5	3	4
20 W	20	16	15	12
50 W	3	3	4	4
100 W	7	7	3	3
200 W	7	3	7	5
500 W	10	8	9	10
1000 W	5	9	6	7

Tabla 10. Emplazamientos celulares en función de la potencia transmitida, la cobertura proporcionada y la reducción en coste de los transmisores de baja potencia.

Se observa, en términos generales, que el número de emplazamientos activos aumenta conforme mayor es la reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia. Sin embargo, el número total de emplazamientos transmitiendo a las potencias cuyo coste no se ha reducido es menor, mientras que el número emisoras transmitiendo a baja potencia aumenta.

A continuación se va a introducir, además de la reducción de coste anterior, una degradación adicional en la potencia transmitida por los emisores de baja potencia (10, 20, 50 y 100 W). El objetivo de este ejercicio de planificación es estudiar el comportamiento de la red en caso de se utilice transmisores cuyo coste es menor a costa de introducir una degradación en potencia. Se va a introducir varios niveles de degradación de potencia (0.5, 2 y 3 dB). Se considera que la reducción de coste de aquellos emplazamientos que presentan una degradación adicional es de 1/2 (Tabla 11) y de 1/3 (Tabla 12).

Emplazamientos celulares	Degradación 0.3 dB		Degradación 0.5 dB		Degradación 1 dB	
	95%	98%	95%	98%	95%	98%
0 W	97	83	101	86	99	90
10 W	3	4	12	2	2	4
20 W	18	17	5	13	20	18
50 W	0	2	0	0	1	0
100 W	2	3	3	3	0	1
200 W	5	8	4	13	2	5
500 W	7	12	4	11	5	7
1000 W	2	5	5	6	2	4

Tabla 11. Emplazamientos celulares en función de la potencia transmitida, la cobertura proporcionada y la degradación en potencia de los transmisores de bajo coste. Reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia 1/2.

Emplazamientos celulares	Degradación 0.3 dB		Degradación 0.5 dB		Degradación 1 dB	
	95%	98%	95%	98%	95%	98%
0 W	97	88	98	87	110	89
10 W	1	3	2	3	8	10
20 W	18	18	18	18	2	2
50 W	3	4	1	1	0	1
100 W	8	2	0	2	2	7
200 W	2	8	6	8	2	7
500 W	7	7	7	6	1	2
1000 W	3	3	2	9	9	16

Tabla 12. Emplazamientos celulares en función de la potencia transmitida, la cobertura proporcionada y la degradación en potencia de los transmisores de bajo coste. Reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia 1/3.

Las siguientes tablas realizan una comparativa de el número de emplazamientos de baja potencia (10, 20, 50 y 100 W) y de alta potencia (200, 500 y 1000 W) utilizados en función de la reducción de coste y la degradación introducida por los transmisores de baja potencia para un nivel de cobertura del 98%.

Emplazamientos celulares	Sin Reducción de Coste	Reducción de Coste 1/2	Reducción de Coste 1/3	Reducción de Coste 1/4	Reducción de Coste 1/5
Baja Potencia	25	34	31	25	23
Alta Potencia	23	22	20	20	22

Tabla 13. Emplazamientos de baja y alta potencia en función de la reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia. Nivel de cobertura 98%.

Emplazamientos celulares	Degradación en potencia 0.3 dB	Degradación en potencia 0.5 dB	Degradación en potencia 1 dB
Baja Potencia	26	24	23
Alta Potencia	22	22	22

Tabla 14. Emplazamientos de baja y alta potencia en función de la reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia. Nivel de cobertura 98%. Reducción de coste 1/2.

Emplazamientos celulares	Degradación en potencia 0.3 dB	Degradación en potencia 0.5 dB	Degradación en potencia 1 dB
Baja Potencia	27	24	20
Alta Potencia	18	23	25

Tabla 15. Emplazamientos de baja y alta potencia en función de la reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia. Nivel de cobertura 98%. Reducción de coste 1/3.

Se observa que en caso de que los transmisores de baja potencia introduzcan degradación en potencia, el número de transmisores de baja potencia disminuye respecto al caso en que los transmisores de menor coste no presenten ningún tipo de degradación. Este número de transmisores de baja potencia sigue siendo mayor que en el caso en que el coste de los transmisores de baja potencia no se reduzca por ningún factor si la degradación introducida es de 0.3 y 0.5 dB.

Por lo tanto, resulta interesante, con el fin de reducir el coste de despliegue de red, utilizar transmisores de baja potencia cuyo coste sea menor, a costa de introducir una degradación adicional, mientras ésta no sea demasiado elevada. Por este motivo, se estudiará la utilización de *gap-fillers* en la planificación de red. Al utilizar este tipo de emisores se debe tener en cuenta que la antena transmisora no es omnidireccional, sino que es directiva y que por lo tanto la cobertura de cada uno de ellos disminuirá. En la práctica, los *gap-fillers* introducen una degradación adicional reducida. Esta degradación es debida al propio *gap-filler* y al enlace entre éste y el emisor al cual está enganchado. En caso de utilizar un *gap-filler* que recibe y amplifica señal proveniente de otro *gap-filler*, esta degradación será mayor.

Para estudiar el hecho de que las antenas transmisoras de los *gap-fillers* es directiva y no omnidireccional, se ha utilizado el algoritmo para encontrar las soluciones óptimas en caso de que la antena de los transmisores de baja potencia sea directiva. La siguiente tabla muestra el número

de transmisores a cada una de las potencias en caso de que la reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia sea de 1/2, y la degradación en potencia de 0.3 dB.

Potencia	Número de transmisores	
	95%	98%
0 W	90	70
10 W	4	8
20 W	19	15
50 W	3	8
100 W	4	5
200 W	3	8
500 W	9	14
1000 W	2	6

Tabla 16. Emplazamientos de baja y alta potencia en función de la reducción de coste de los emplazamientos de baja potencia. Nivel de cobertura 98%. Reducción de coste 1/3.

Se observa como el número de transmisores, en este caso aumenta, pero que el aumento es sustancial para los transmisores de baja potencia.

VI.4. ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE GAP-FILLERS

La Fig. 17 muestra la cobertura máxima que se puede obtener complementando la torre de TV únicamente con *gap-fillers* (que se pueden enganchar tanto a la torre de TV como a otros *gap-fillers*) en función de la capacidad del sistema y de la potencia transmitida por los *gap-fillers*. Se ha considerado un valor de aislamiento de los emplazamientos celulares de 100 dB y que los *gap-fillers* tienen una degradación adicional de 0.3 dB. El número máximo de *gap-fillers* que se pueden enganchar a la torre de TV en caso de que ésta transmita 10 kW se muestra en la Tabla 6.

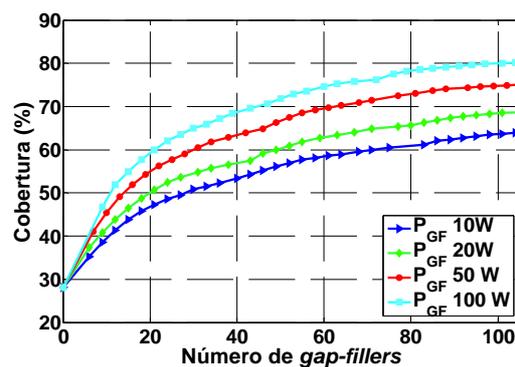


Fig. 20. Cobertura vs. Número de *gap-fillers* enganchados a la torre de TV. PIRE 40 dBW.

Utilizando únicamente *gap-fillers* no se obtiene suficiente nivel de cobertura puesto que la potencia transmitida por este tipo de emisores es menor que la de los transmisores sincronizados y las antenas transmisoras de los mismos son directivas. Por estos mismos motivos, el número de *gap-fillers* que se puede enganchar a otros *gap-fillers* es muy reducido.

A continuación se va a estudiar la mejora en coste que se obtiene gracias a la utilización de GFs en la planificación de red. Para ello se realizará en primer lugar un ejercicio de planificación considerando que se utilizan únicamente transmisores sincronizados a potencia constante. Posteriormente, a las configuraciones de red obtenidas, se añade *gap-fillers*, y se estudia el aumento de cobertura proporcionado y el coste de despliegue de red de las configuraciones resultantes. Las Figs. 19 y 20 muestran el máximo nivel de cobertura obtenido en función del número de transmisores activos y de la potencia transmitida en caso de utilizar torre de TV y de no utilizarla, respectivamente.

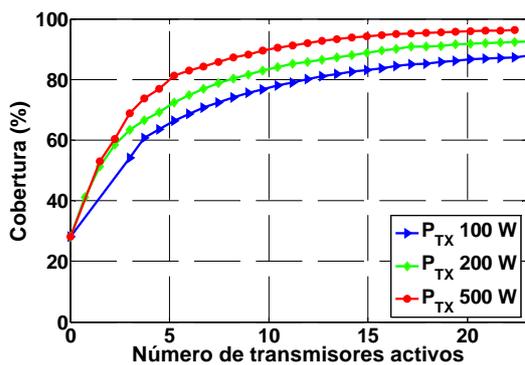


Fig. 21. Cobertura máxima vs. Número de transmisores activos. PIRE Torre TV 10 kW.

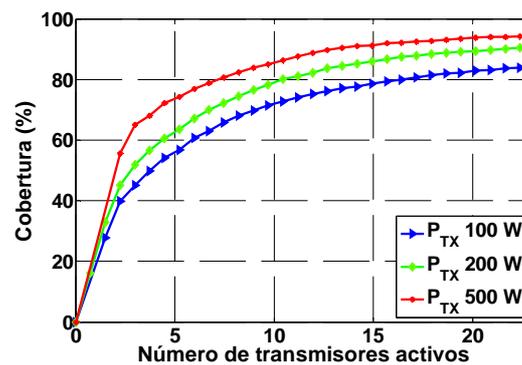


Fig. 22. Cobertura máxima vs. Número de transmisores activos. Sin Torre TV.

En caso de no utilizar torre de TV se necesitan menos transmisores para valores de cobertura menores del 90%. Sin embargo, a partir de estos valores de cobertura el hecho de no utilizar la torre de TV implica que se necesitan un número reducido de transmisores sincronizados adicionales. Esto es debido a que la torre de TV apenas proporciona cobertura en la zona central del escenario de despliegue, siendo necesario utilizar los emplazamientos celulares.

La Fig. 23 muestra el máximo nivel de cobertura obtenido en función del número de transmisores y *gap-fillers* utilizados para una capacidad de 4.1 Mb/s utilizando la torre de TV para una potencia de los transmisores sincronizados de 100 W y una potencia de los *gap-fillers* de 20 W. Se puede observar que para obtener cierto nivel de cobertura hay varias configuraciones posibles. La configuración óptima dependerá del coste relativo de un repetidor respecto al de un transmisor, de modo que cuanto menor sea el coste de un *gap-filler*, la configuración óptima consistirá de un mayor número de ellos. El número máximo de *gap-fillers* que se pueden utilizar es mayor que en el caso anterior puesto que también se consideran transmisores.

La Tabla 17 muestra las posibles configuraciones para obtener un nivel de cobertura del 95% para una capacidad de 4.1 Mb/s y una potencia de la torre de TV de 40 dBW, así como para qué rango de valores de α , definido como el ratio entre el coste de utilizar un transmisor y el coste de utilizar un *gap-filler*, son óptimas. Se observa que las configuraciones óptimas son aquellas que utilizan tanto transmisores sincronizados como *gap-fillers*. Por tanto, la utilización de emisores de

baja potencia en redes DVB-H es un aspecto clave para reducir el coste de despliegue de las mismas. Por otro lado, se observa que al aumentar la potencia de los transmisores sincronizados, la relación de coste a partir de la cual resulta viable utilizar *gap-fillers* se reduce.

Potencia transmisores sincronizados 100 W. Potencia <i>gap-fillers</i> 20 W.			Potencia transmisores sincronizados 500 W. Potencia <i>gap-fillers</i> 20 W.		
Transmisores Sincronizados	<i>Gap-fillers</i>	α	Transmisores Sincronizados	<i>Gap-fillers</i>	α
17	47	<4	17	0	<1
16	51	4-5	16	1	1-2
15	56	5-6	15	3	2-3
14	62	6-7	14	6	2-3
13	69	7-8	13	10	3-4
12	77	>8	12	15	4-5

Tabla 17. Configuraciones que obtienen el 95% de cobertura. Potencia transmisores sincronizados 100 W. Potencia *Gap-fillers* 20 W.

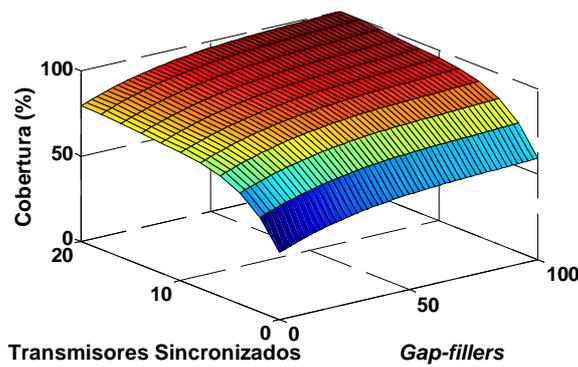


Fig. 23. Máxima cobertura vs. Transmisores sincronizados y *gap-fillers*. Potencia transmisores sincronizados 100 W. Potencia *Gap-fillers* 20 W.

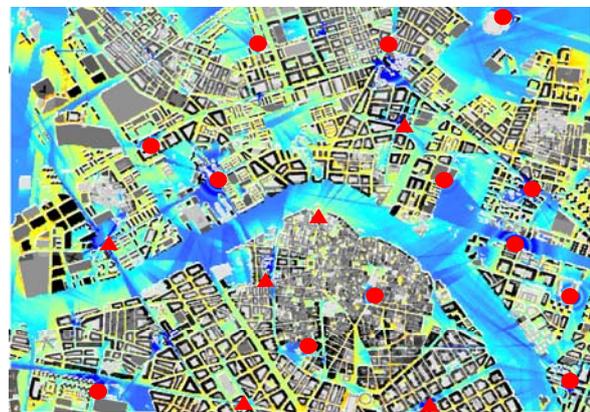
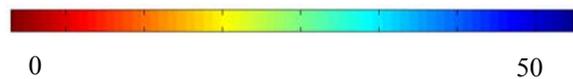


Fig. 24. CNR en cada punto del escenario de despliegue. Cobertura 95 %.



CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha estudiado la planificación de redes de TDT móvil basadas en el estándar DVB-H en un escenario real, concretamente en el núcleo urbano de la ciudad de Valencia. Debido a que las condiciones de propagación en DVB-H son mucho más severas que en DVB-T, se necesita mucha más infraestructura de red, esto es, mayores potencias de transmisión y mayor número de emplazamientos, lo cual tiene como consecuencia un aumento del coste de despliegue de red. Por este motivo en esta tesina se ha tenido en cuenta que se va a reutilizar la infraestructura de radiodifusión y celular existente, pudiendo ubicar transmisores sincronizados o *gap-fillers*. Éstos últimos presentan peores prestaciones en cuanto a potencia transmitida, pero su coste es menor.

Los resultados muestran que las configuraciones óptimas obtenidas mediante el algoritmo de planificación utilizan transmisores tanto de baja como de media y alta potencia. Resulta viable pensar, por tanto, que los transmisores de baja potencia se pueden sustituir por *gap-fillers*, teniendo en cuenta que su ganancia máxima está limitada debido al acoplo entre antenas y que la cobertura que proporcionan es menor que la de un transmisor sincronizado ya que la antena transmisora es directiva.

En cuanto a la utilización de *gap-fillers* en redes DVB-H, el algoritmo de planificación obtiene, dado un nivel de cobertura, las configuraciones que la proporcionan. La configuración utilizada dependerá del coste relativo entre utilizar un transmisor sincronizado y un *gap-filler*.

El trabajo futuro derivado de este trabajo se basa en mejorar el algoritmo de planificación añadiendo variables a optimizar como puede ser el tilt de las antenas o el azimut de cada uno de los sectores de los transmisores sincronizados. También se establecerá una comparativa del algoritmo utilizado con otros algoritmos de planificación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio dentro del proyecto FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual) en el marco del Programa Plan Avanz@. FURIA es un proyecto singular estratégico en el área de las Tecnologías Audiovisuales en Red de la plataforma e-NEM (www.furiapse.com).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Faria, J. A. Henriksson, E. Stare, y P. Talmola, "DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices," Proc. of the IEEE, vol. 94, no. 1, pp. 194-209, Enero 2006.
- [2] ETSI, EN 302 304 v1.1.1, "Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H)", October 2004.
- [3] D. Gómez-Barquero y A. Bria, "Feasibility of DVB-H Deployment on Existing Wireless Infrastructure", Proc. International Workshop on Convergent Technologies (IWCT), Oulu,

- Finlandia, 2005.
- [4] A. Bria y D. Gómez-Barquero, “Scalability of DVB-H Deployment on Existing Wireless Infrastructure”, Proc. IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Berlin, Alemania, 2005.
 - [5] A. Hoikkanen, “Economics of Wireless Broadcasting over DVB-H Networks,” Proc. IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Ponom, EEUU, 2006.
 - [6] D. Gómez-Barquero, A. Bria, J. F. Monserrat, y N. Cardona, “Minimal Cost Planning of DVB-H Networks on Existing Wireless Infrastructure,” Proc. IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Helsinki, Finlandia, 2006.
 - [7] ETSI, TR 102 377 v1.2.1, “Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines”, November 2005.
 - [8] ETSI, TR 102 401 v1.1.1, “Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission to Handheld Terminals (DVB-H); Validation Task Force Report”, May 2005.
 - [9] Proyecto FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual), “Topología de Red DVB-H: Redes SFN / Gap-filler,” Entregable T1.1, capítulo 5, Marzo 2007. <http://www.furiapse.com/>
 - [10] Proyecto IST-PLUTO (Physical Layer DVB Transmission Optimisation), “Initial Report on Echo Measurement”, Deliverable 5.1, Julio 2006. <http://dea.brunel.ac.uk/pluto/>
 - [11] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”, *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
 - [12] R. Brugger y D. Hemingway, “OFDM receivers – Impact on Coverage of Inter-Symbol Interference and FFT Window Positioning”, European Broadcasting Union (EBU) Technical Review, Julio 2003.
 - [13] A. Ligeti, “*Single Frequency Network Planning*”, Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 1999.
 - [14] E. Zitzler, M. Laumanns, y L. Thiele, “SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization,” *Evolutionary Methods for Design, Optimization, and Control*, pp. 95-100, 2002.
 - [15] H. Meunier, E. Talbi, y P. Reininger, “A multiobjective genetic algorithm for radio network optimization”, Proc. IEEE Evolutionary Computation, California, EEUU, 2000.
 - [16] K. Deb, A. Pratap, S. Agrawal, y T. Meyarivan, “A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
 - [17] www.forsk.com

PUBLICACIONES

- Proyecto FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual), “Topología de Red DVB-H: Redes SFN / Gap-filler,” Entregable T1.1, Marzo 2007.
- D. Gómez-Barquero, A. Salieta Teclas, J. Martín Fernández y N. Cardona, “Planificación y Despliegue de Redes de TDT Móvil DVB-H utilizando Gap-Fillers”, XVII JORNADAS TELECOM I+D, Valencia, Octubre 2007.