

# Planificación y Despliegue de Redes de TDT Móvil DVB-H utilizando Gap-fillers

David Gómez Barquero<sup>†</sup>, Ariana Salieta Tecles, Jorge Martín Fernández, Narcís Cardona Marcet

Grupo de Comunicaciones Móviles  
Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM)  
Universidad Politécnica de Valencia

Email: [dagobar@iteam.upv.es](mailto:dagobar@iteam.upv.es)

**Abstract** — Este artículo presenta y analiza el problema de planificación de redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) móvil basadas en el estándar DVB-H, incidiendo especialmente en la utilización de repetidores o *gap-fillers*. Los *gap-fillers* reciben la señal RF de un emisor de la propia red, ya sea un transmisor sincronizado o un *gap-filler*, y la retransmiten en la misma frecuencia tras amplificarla. 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, por lo que son una alternativa de bajo coste para emplazamientos de baja potencia. Por otro lado 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 comparación a un transmisor. En el artículo se describe en detalle todas las características que presentan los *gap-fillers*. Además, 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 transmisores como con *gap-fillers*. En el artículo 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 ambos tipos de emisores 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.

## I. INTRODUCCIÓN

Dentro de las comunicaciones móviles multimedia, el máximo exponente a día de hoy es la TV móvil. Recientes estudios de mercado han revelado un elevado interés por parte de los consumidores. 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.

El estándar europeo de TDT móvil es conocido 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 [1]. 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, lo cual reduce considerablemente el consumo de potencia medio de los terminales. Además, añade un mecanismo de corrección de errores adicional en la capa de enlace, el cual proporciona una mayor robustez a la transmisión, sobre todo en situaciones de movilidad e interferencias. Italia fue el primer país en ofrecer los primeros servicios comerciales DVB-H el año pasado. Actualmente ya se ofrecen servicios comerciales en Finlandia y Albania en Europa, y en Vietnam, India y las Filipinas en Asia, y se espera que el 2008 sea el inicio del despegue de estos servicios.

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 redes de TDT están diseñadas para recepción mediante antenas directivas fijas en los tejados de los edificios, se requiere mucha más infraestructura de red que la existente de TDT para compensar las mucho más severas condiciones de recepción características de DVB-H, sobre todo para situaciones de recepción en interiores (*indoor*) y en automóviles (*vehicular*) [2]. Esto es, mayores potencias de transmisión y, especialmente, un considerable

---

<sup>†</sup> Becario FPI de la Generalitat de Valencia.

mayor número de transmisores y repetidores (*gap-fillers*). Esta penalización es particularmente evidente para niveles de cobertura muy elevados (i.e., mayores que el 90%) [3]. 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*) [4].

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 [5]. De este modo, los emplazamientos celulares pueden ser utilizados como complemento de las grandes torres de TV y Radio para colocar transmisores o *gap-fillers* de baja/media potencia, formando redes SFN con una alta densidad de emplazamientos. Esta solución además resulta en una mejora del nivel de cobertura, así como una distribución más uniforme, debida al hecho de que muchos lugares reciben la señal procedente de varios emplazamientos.

Mientras que los transmisores se sincronizan mediante una señal GPS, y reciben la señal en banda base a través de una red independiente (enlace radio o red digital) para posteriormente modularla, amplificarla y transmitirla; los *gap-fillers* reciben la señal RF de emisores de la propia red (ya sea un transmisor sincronizado o un *gap-filler*), y la retransmiten en la misma frecuencia tras amplificarla. Los transmisores proporcionan mayores prestaciones y mayores niveles de cobertura, ya que pueden utilizarse para transmitir potencias elevadas. Sin embargo, pueden suponer una gran inversión para un emplazamiento de baja potencia. La principal ventaja de utilizar *gap-fillers* es que tienen un menor coste y complejidad, ya que su equipamiento e instalación son más sencillos. En concreto un *gap-filler* no dispone de modulador ni de GPS, y además evita la red de transporte hasta el emplazamiento. Sin embargo, los *gap-fillers* son un sistema realimentado, por lo que la potencia máxima transmitida está limitada, y por tanto el nivel de cobertura. La principal restricción viene dada por el acoplo entre la antena transmisora y la receptora, por lo que es fundamental utilizar técnicas de cancelación de ecos. Además, los *gap-fillers* introducen una degradación en la calidad de la señal retransmitida, ya que la señal transmitida no es tan pura como la de un transmisor, así como un retardo temporal adicional en comparación a un transmisor. Por lo tanto en general serán necesarios varios *gap-fillers* para obtener la misma cobertura que un transmisor, siendo un aspecto clave cuánto más barato resulta utilizar un *gap-filler* respecto a un transmisor sincronizado. La idoneidad de utilizar un transmisor o un *gap-filler* dependerá del emplazamiento en particular y del coste relativo de estos, pero en un despliegue en una zona urbana son necesarios ambos tipos de emisores.

En este artículo se describen las principales características de los *gap-fillers*, incidiendo en los aspectos fundamentales que se deben tener en cuenta para garantizar un correcto funcionamiento durante la fase de planificación de red. Además se propone un algoritmo de planificación basado en un algoritmo genético multi-objetivo, con el objetivo de minimizar el coste del despliegue de red en función del nivel de cobertura que trabaja tanto con transmisores como con *gap-fillers*. El algoritmo decide, dado un conjunto de emplazamientos posibles y un modelo de coste, qué emplazamientos utilizar, el tipo de emisor en cada emplazamiento (transmisor o *gap-filler*), así como su configuración individual (potencia transmitida, tilt y azimut de la antena transmisora, y a qué emisor enganchar el *gap-filler*). Finalmente en el artículo se presentan una serie de ejercicios de planificación de una red de TDT móvil DVB-H en el núcleo urbano de la ciudad de Valencia complementando la cobertura proporcionada por una torre de radiodifusión de TV con transmisores y *gap-fillers* situados en emplazamientos celulares.

## II. UTILIZACIÓN DE *GAP-FILLERS* EN REDES DE TDT MÓVIL DVB-H

Los *gap-fillers* (GF) son un sistema realimentado, donde parte de la señal transmitida es recibida a la entrada debido al acoplamiento entre las antenas transmisora y receptora. A la entrada del GF existen ecos provenientes de reflexiones de la señal transmitida en objetos del escenario debido al efecto multicamino y a los lóbulos secundarios de las antenas. En un GF convencional sin unidad canceladora de ecos la señal de salida consiste en una sucesión de ecos, cada uno de ellos retardado y atenuado respecto al anterior (ver Figura 1A). Para caracterizar la realimentación del GF se utiliza el parámetro Margen de Ganancia, que se define como la diferencia entre el aislamiento entre antenas (*Isolation, I*) y la ganancia del GF (*Gain, G*).

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

La atenuación relativa entre cada eco y el siguiente es igual al Margen de Ganancia. 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 transmitida produce una degradación en la calidad de la señal transmitida en forma de un rizado en el espectro que hay que mantener acotado bajo ciertos valores (ver Figura 1B). Esto 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 [6]. Esta restricción supone una gran limitación en la potencia máxima transmitida, y por tanto en el nivel de cobertura, lo cual hace imprescindible la utilización de canceladores de ecos.

Las prestaciones de los GF convencionales pueden mejorarse sensiblemente mediante la implementación de un cancelador de ecos, siendo posible trabajar con márgenes de ganancia negativos de hasta -10 dB [6]. Esta solución ya se utiliza en redes de TDT, y permite transmitir hasta 20 dB más de potencia (i.e., 100 veces más). En la Figura 2 se muestra un ejemplo de la

mejora obtenida en la respuesta impulsional y en la respuesta en frecuencia. Se puede observar cómo la respuesta impulsional es mucho más limpia y cómo el rizado en el espectro de la señal transmitida es mucho menor.

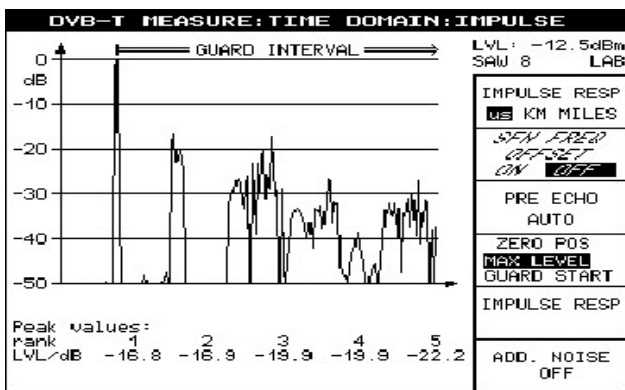


Fig. 1A. Respuesta al impulso de un *gap-filler* convencional. Margen de Ganancia 10 dB.

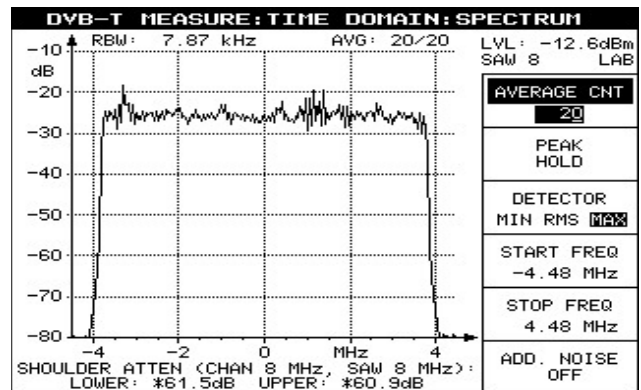


Fig. 1B. Espectro de la señal a la salida de un *gap-filler* convencional. Margen de Ganancia 10 dB.

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 procesamiento 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  $\mu$ s para evitar oscilaciones del sistema [7]. 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  $\mu$ s [7]. Notar que este retardo no es significativo frente al intervalo de guarda tolerable en redes SFN (hasta 224  $\mu$ s [1]).

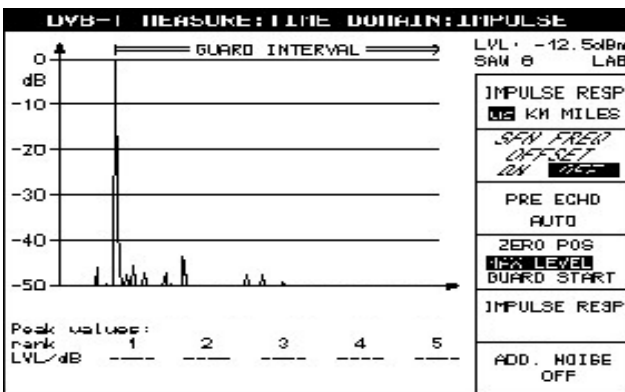


Fig. 2A. Respuesta al impulso de *gap-filler* con cancelador de ecos. Margen de Ganancia 10 dB.

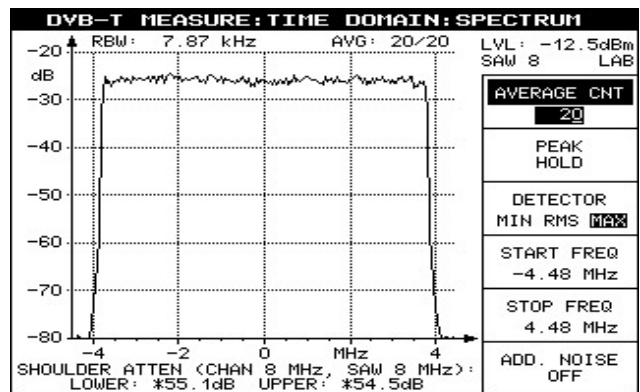


Fig. 2B. Espectro de la señal a la salida de un *gap-filler* con cancelador de ecos. Margen de Ganancia 10 dB.

Los GF también introducen una degradación en la calidad de la señal transmitida en comparación con las señales transmitidas por los transmisores sincronizados. Esta degradación se debe al propio GF (e.g., ruido introducido en el proceso de cancelación de ecos debido a la cuantificación y al procesamiento digital de la señal), pero también al hecho de que la señal recibida contiene ruido, ecos e interferencias. Normalmente se utilizan dos parámetros de calidad denominados degradación equivalente de ruido o END (*Equivalent Noise Degradation*), y la tasa de error de modulación o MER (*Modulation Error Ratio*). 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. 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). 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. Normalmente en DVB-H se utiliza el criterio de una tasa de error de burst 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]). 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 [7]. Por otro lado, la degradación también depende de la modulación utilizada, siendo la degradación en 16QAM mayor que en QPSK.

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 [8]). Los entornos más críticos son los urbanos, caracterizados por la existencia en las proximidades de numerosos edificios que facilitan las reflexiones de la señal transmitida. En general conviene separar al máximo las antenas tanto vertical como horizontalmente, romper la línea de visión directa entre ellas, y colocar elementos artificiales cercanos a la antena receptora que atenúen los ecos provenientes 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 [7]. 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*.

### III. PLANIFICACIÓN DE REDES DE TDT MÓVIL DVB-H

La planificación de red de DVB-H es, en cierta medida, similar a la planificación de red de DVB-T. Sin embargo, requiere una metodología diferente, ya que no se considera una recepción fija mediante antenas en los tejados, sino recepción móvil en exteriores (*pedestrian outdoor*) e interiores (*pedestrian indoor*), y en vehículos (*vehicular*). Además, se requieren muchos más emplazamientos, así como la utilización de transmisores y *gap-fillers* de baja potencia. En este sentido, la reutilización de la infraestructura de red de telecomunicaciones existente (tanto la de radiodifusión como la celular) es clave para minimizar el coste y evitar la construcción de nuevos emplazamientos.

Por lo general, el objetivo de planificación es proporcionar un nivel mínimo de calidad de la señal sobre el área de servicio (cobertura) minimizando el coste del despliegue de red. En el caso particular de DVB-H, en primer lugar normalmente se reutilizarán los emplazamientos de radiodifusión existentes empleando los máximos niveles de potencia posibles sin interferir a las transmisiones de TV analógica y TDT existentes.

La planificación de red consistirá por tanto en decidir, dado un conjunto de emplazamientos posibles (principalmente emplazamientos celulares de telefonía móvil) y una frecuencia de operación de la red conocida, qué emplazamientos utilizar, el tipo de emisor en cada emplazamiento (transmisor o *gap-filler*), así como su configuración individual (especialmente la potencia transmitida, pero también el tilt y azimut de la antena transmisora, a qué emisor enganchar el *gap-filler*, etc.).

Para ello es necesario estimar el nivel de cobertura de cada una de las diferentes configuraciones de red posibles en la región donde se quiere desplegar una red DVB-H (área de servicio), así como un modelo de coste, que proporcione el coste de utilizar los distintos tipos de transmisores y *gap-fillers* considerados en cada emplazamiento posible.

Debido a las numerosas combinaciones posibles, el problema de planificación de red se traduce en un complejo problema combinatorial en el que es imposible estudiar todas las configuraciones de red posibles, por lo que es imprescindible utilizar algoritmos de planificación con un coste computacional aceptable.

#### A. Estimación del Nivel de Cobertura

En una red SFN la calidad de la señal recibida depende de la relación señal a interferencia más ruido, o *Signal-to-Interference plus Noise Ratio* (SINR). El nivel de cobertura en DVB-H se suele definir como el porcentaje de localizaciones cuya SINR supera un valor mínimo conocido como requisito de CNR (*Carrier-to-Noise Ratio*), el cual depende del modo de transmisión DVB-H. Es importante destacar que en DVB-H la disponibilidad de la señal es prácticamente independiente de la velocidad gracias al mecanismo de corrección de errores de la capa de enlace (llamado MPE-FEC) [1].

Para estimar el nivel de cobertura es necesario determinar cómo las señales transmitidas por los distintos emplazamientos contribuyen a la señal útil o a crear interferencias en el área de servicio. Normalmente se suele utilizar una función de ponderación que determina la contribución a la señal útil y a la interferencia de las señales recibidas por los distintos emisores según su tiempo de llegada al receptor [8]. También es necesaria una predicción de la potencia recibida en el área de servicio debida a cada uno de los transmisores y *gap-fillers* de la red. En ejercicios de planificación real la exactitud de los modelos de propagación dependerá de la resolución de la cartografía existente, siendo la cartografía 3D la más completa, con información sobre la altura y morfología del terreno y las formas de los edificios. Además los modelos de propagación pueden ser calibrados con medidas de campo.

### B. Estimación del Coste del Despliegue de Red

Para buscar configuraciones de red que minimicen el coste de despliegue se necesita establecer un modelo de coste que considere las potencias de transmisión, energía eléctrica, cableado, equipamiento, adquisición de los emplazamientos, mantenimiento, etc. El modelo debe tener en cuenta gastos de capital CAPEX y 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).

Básicamente cada emplazamiento tendrá asociado un coste por utilizarlo (costes de alquiler, mantenimiento, cableado si procede, etc.), más un coste proporcional a la potencia transmitida (amplificadores, antena, electricidad, etc.) dependiendo de si se utiliza un transmisor o un *gap-filler*. Mientras que el coste proporcional a la potencia transmitida será en la práctica el mismo para todos los emplazamientos (para un tipo de emisor), el coste asociado a utilizar el emplazamiento en sí dependerá de cada emplazamiento en particular ya que unos emplazamientos pueden ser más caros que otros.

### C. Algoritmo de Planificación

El algoritmo de planificación utilizado en este artículo es una mejora del algoritmo genético multiobjetivo propuesto inicialmente por los autores en [5] que incluye la posibilidad de trabajar tanto con transmisores sincronizados como con *gap-fillers*. También se ha añadido la posibilidad de optimizar el tilt y azimut de las antenas.

Los objetivos del algoritmo son minimizar el coste de despliegue de red y maximizar el nivel de cobertura. La principal ventaja que presentan los algoritmos multiobjetivo es que no es necesario combinar los dos objetivos en una única función, lo cual suele penalizar alguno de ellos. Además, estos algoritmos consiguen un mayor abanico de soluciones. El algoritmo de planificación busca las configuraciones de red de mínimo coste en función del nivel de cobertura. A este conjunto de soluciones se le conoce como frente óptimo de Pareto.

Los algoritmos genéticos se basan en los mecanismos de selección de la naturaleza por los que los individuos más aptos de una población son los que sobreviven. La elección de los individuos se realiza en términos de no-dominancia y de diversidad. Un individuo domina a otro si proporciona una cobertura mayor para el mismo coste, o si proporciona menor coste para la misma cobertura. Por otro lado, 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 lo más uniformemente distribuida posible en el frente óptimo de Pareto. El grado de aislamiento de una solución en el espacio de soluciones se mide en términos de distancia de aislamiento (*crowding distance*).

En los ejercicios de planificación realizados en este artículo el algoritmo de planificación trabaja solamente con la red celular, asumiendo que la configuración de la red de radiodifusión es conocida. Cada emplazamiento celular se caracteriza por su posición, altura, rango de potencias de transmisión posibles, configuración de las antenas, y coste (en función de la potencia de transmisión y de si se utiliza un transmisor o un *gap-filler*). Las antenas de los transmisores se modelan mediante tres sectores independientes, con lo cual sus variables de decisión son el tilt mecánico de cada uno de los sectores. En el caso de utilizar *gap-fillers*, se necesita determinar a qué transmisor o *gap-filler* se debe enganchar el repetidor, así como la orientación de la antena transmisora (azimut) y el tilt mecánico de la misma.

Como se pueden optimizar más de un parámetro por emplazamiento, es necesario realizar una codificación jerárquica de los mismos para el algoritmo genético [9]. De este modo, el primer nivel de la jerarquía determina si el emplazamiento está activo o inactivo y, en el caso de que esté activo, el tipo de emisor utilizado. Las variables de decisión que se encuentran en un segundo nivel de la jerarquía son el transmisor al que se engancha el *gap-filler*, el azimut y el tilt de las antenas.

El algoritmo de planificación utilizado está basado en el NSGA-II (*Non-Dominated Sort Genetic Algorithm, version 2*) [10]. Se trata de un algoritmo elitista, que clasifica los individuos de la población en frentes. En concreto los individuos no dominados se clasifican en un primer frente, mientras que el segundo frente está formado por los individuos no dominados de la población restante, y así sucesivamente hasta tener a todos los individuos clasificados. Los individuos en el primer frente tienen más hijos que el resto de la población, lo cual permite una convergencia más rápida hacia el frente óptimo de Pareto. En el proceso de optimización primero se genera una población inicial de una forma aleatoria, a partir de la cual se obtienen un determinado número de generaciones utilizando las técnicas de selección, cruce y mutación. La selección consiste en, de entre dos individuos al azar, elegir como padre aquél que pertenezca a un frente de menor orden o, en caso de que pertenezcan al mismo, aquél cuya distancia de aislamiento sea mayor. Una vez seleccionados dos padres, se crea un individuo de la siguiente generación aplicando la técnica de cruce, que consiste en heredar parte de los emplazamientos de

cada uno de los padres. Finalmente, se aplica la técnica de mutación que puede cambiar la configuración de un parámetro de uno de los emplazamientos elegido al azar con una probabilidad de mutación del 5%.

#### IV. RESULTADOS

En esta sección presentamos ejercicios de planificación realizados en parte del núcleo urbano de la ciudad de Valencia. Se han considerado 134 emplazamientos celulares disponibles para colocar tanto transmisores como *gap-fillers* (ver Fig. 3) como complemento a una torre de TV. Los emplazamientos celulares están situados sobre los edificios a una altura de 3 m sobre los mismos y la torre de TV tiene una altura de 150 m. El área del escenario de despliegue es de unos 15 km<sup>2</sup>. En los ejercicios de planificación se ha considerado una frecuencia de 700 MHz, y distintos valores de capacidad de la red. El tipo de recepción es en exteriores (*pedestrian outdoor*). Se ha utilizado la herramienta de planificación profesional Atoll para calcular las pérdidas de propagación utilizando mapas de elevación del terreno DTM (*Digital Terrain Model*) y mapas de altura de edificios. El *shadowing* se ha modelado mediante una variable lognormal de media nula y desviación estándar 5.5 dB.

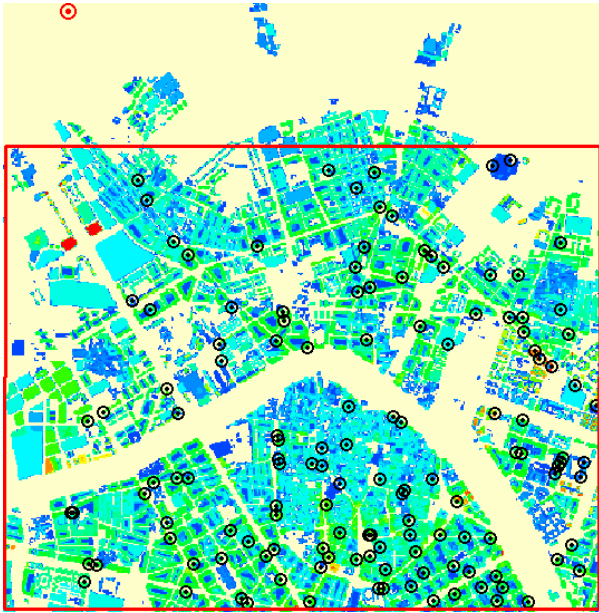


Fig. 3. Escenario de despliegue. Torre de TV (rojo) y emplazamientos celulares (negro).

La Tabla 1 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 demás parámetros del modo de transmisión utilizado son: tamaño de FFT 8K, intervalo de guarda 1/4 relativo al período útil de símbolo y codificación MPE-FEC 3/4 [13]. El intervalo de guarda seleccionado es lo suficientemente elevado como para que todas las señales de cada uno de los transmisores contribuya positivamente a la señal (112  $\mu$ s, distancia equivalente 33.6 km). Los diferentes modos de transmisión permiten unas velocidades superiores a los 100 km/h a la frecuencia considerada.

TABLA I

	Capacidad (Mb/s)	CNR (dB)	Doppler (Hz)
QPSK 1/2	4.1	9.5	80
QPSK 2/3	5.5	12.5	74
16-QAM 1/2	8.3	15.5	74
16-QAM 2/3	11.1	18.5	66

La potencia PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) transmitida por la torre de TV es de 40 dBW (10 kW). La antena de la misma es omnidireccional. Se ha considerado que en los emplazamientos celulares los transmisores pueden transmitir 400 W y los *gap-fillers* 20 W.

Los transmisores considerados son sectorizados, y se modelan con tres antenas directivas con un ancho de haz del diagrama de radiación de 60° y una ganancia de 14.5 dBi (paneles de 4 dipolos). El mismo tipo de antena se ha utilizado para la antena transmisora del *gap-filler*. Para la antena receptora del *gap-filler* se ha utilizado una antena Yagi más directiva (ancho de haz 30°, ganancia 14 dBi). El receptor se ha modelado mediante una antena omnidireccional con una ganancia de -7 dBi situado a 1.5 m de altura sobre el nivel del suelo y una figura de ruido de 6 dB (incluyendo un filtro de rechazo GSM).

En cuanto a los *gap-fillers*, se ha considerado que pueden operar con un margen de ganancia de hasta -10 dB, con lo cual la ganancia máxima puede estar hasta 10 dB por encima del aislamiento. Se ha asumido se puede obtener un aislamiento de 110 dB en todos los emplazamientos. Por último cabe destacar que se ha contemplado la posibilidad de que un *gap-filler* reciba la señal de otro *gap-filler* (este enganchado a un transmisor).

Se ha considerado que el tilt de las antenas transmisoras puede variar entre 0° y 10° con un paso de 1° y que el azimut de las antenas transmisoras de los *gap-fillers* varía 40° a derecha e izquierda respecto a la orientación inicial de las mismas (alineadas con el emisor del que amplifican señal) con un paso de 10°.

##### A. Estudio de la torre de TV

En primer lugar se ha estudiado la cobertura proporcionada por la torre de TV. Ésta es de sólo el 50% para una capacidad de 4.1 Mb/s, del 42% para 5.5 Mb/s, del 36% para 8.3 Mb/s y del 31% para 11.1 Mb/s. Se observa como el nivel de cobertura proporcionada no es lo suficientemente alto, con lo cual se necesita emplazamientos adicionales que aumenten la cobertura.

### B. Estudio de la torre de TV junto con transmisores sincronizados

A continuación se ha analizado la red SFN formada por la torre de TV y los emplazamientos celulares utilizando únicamente transmisores sincronizados. La Figuras 4 y 5 muestran el nivel máximo de cobertura para cada modo de transmisión en función del número de transmisores activos, utilizando la torre de TV y sin utilizarla. El algoritmo de planificación descrito en la sección 3 ha sido utilizado para encontrar los emplazamientos óptimos.

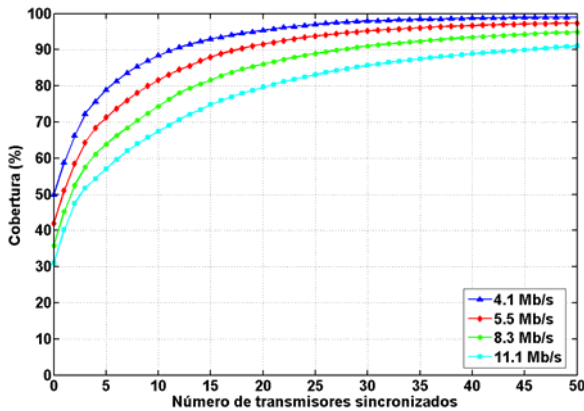


Fig. 4. Valor máximo de cobertura en función del número de transmisores activos. PIRE torre de TV 40 dBW.

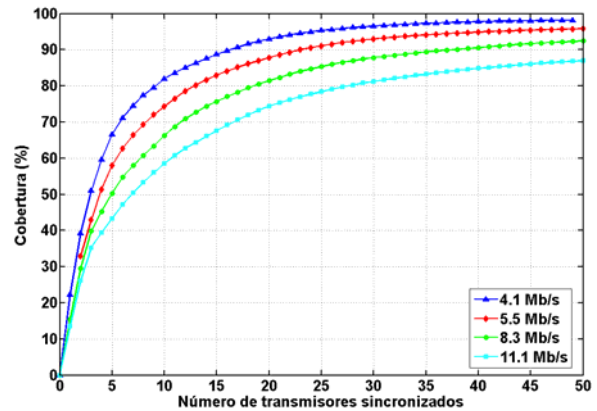


Fig. 5. Valor máximo de cobertura en función del número de transmisores activos. Sin Torre de TV.

Cabe destacar que el nivel de cobertura obtenido no llega a alcanzar valores del 100% porque existe una zona relativamente extensa en la cual (debido a que es de nueva construcción) no se tiene información sobre los emplazamientos celulares existentes en la misma. En cuanto al número de transmisores utilizados para valores de cobertura menores del 90%. Sin embargo, a partir de estos valores de cobertura el número de transmisores necesarios es similar. 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.

En cuanto al tilt de las antenas de los transmisores, cabe destacar que los valores de tilt que proporcionan mayor cobertura son de entre  $2^\circ$  y  $5^\circ$ . Valores mayores de tilt mecánico reducen la cobertura ya que, si bien la potencia recibida en un entorno cercano aumenta, la que se recibe en puntos más alejados del transmisor disminuye. El aumento de cobertura respecto al caso en que las antenas transmisoras no implementan tilt mecánico (i.e., tilt  $0^\circ$ ) varía entre un 1% y un 5%.

### C. Estudio de la utilización de gap-fillers.

La Figura 6 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. El máximo número de *gap-fillers* que se puede utilizar en este caso es 41, de los cuales 32 se enganchan a la torre de TV y 9 a otros *gap-fillers*.

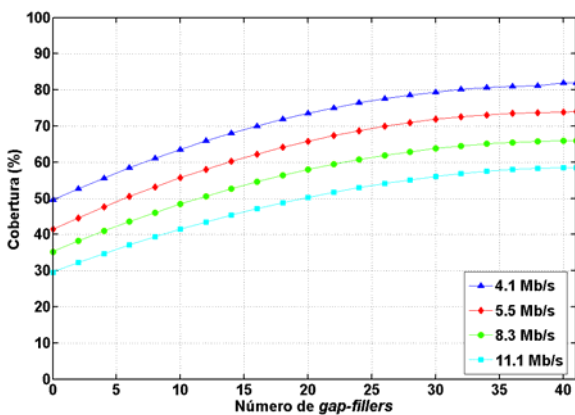


Fig. 6. Valor máximo de cobertura en función del número de *gap-fillers* sincronizados a la torre de TV activos. PIRE torre de TV 40 dBW.

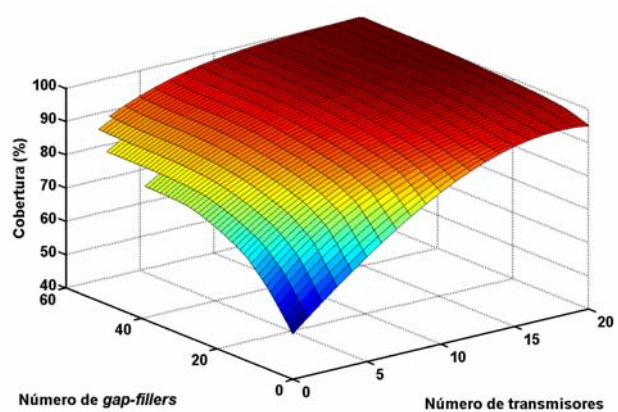


Fig. 7. Cobertura obtenida en función del número de transmisores utilizados y de *gap-fillers*. Capacidad 4.1 Mb/s. PIRE torre TV 40 dBW.

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. El número de *gap-fillers* que se puede enganchar a otros *gap-fillers* es muy reducido ya que, además de transmitir menor potencia, utilizan una antena directiva y el tilt de los mismos

se optimiza para aumentar la cobertura en zonas reducidas, penalizando el número de *gap-fillers* a los cuales llega suficiente nivel de señal.

La Figura 7 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. 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 2 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  $\alpha$ , 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 último, la Figura 5 muestra la distribución de la cobertura en el escenario de despliegue en términos de CNR con 15 transmisores y 9 GFs.

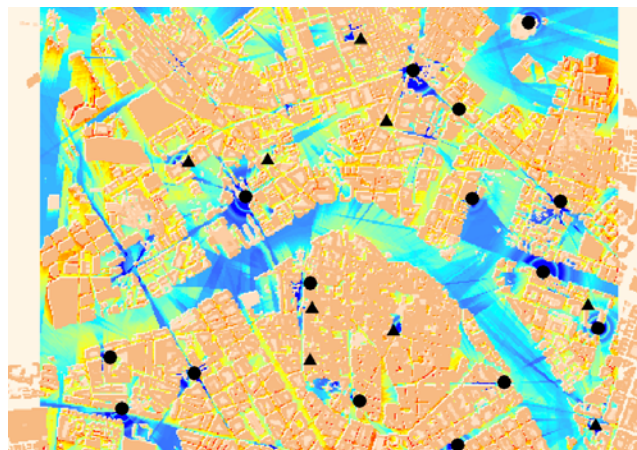


Fig. 8. Nivel de CNR (dB).

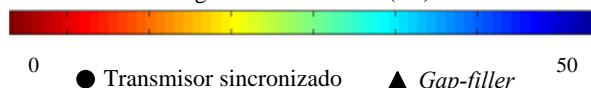


TABLA II

Transmisores	Gap-fillers	$\alpha$ óptimo
9	36	>7
10	29	5-7
11	21	3-4
15	9	2-3
20	0	1-2

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio dentro del Proyecto FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual) en el marco del Programa Plan Avanz@. Los autores quieren mostrar su agradecimiento a Joan Torra y Xavier Sánchez de MIER Comunicaciones por sus comentarios y discusiones sobre este artículo.

#### REFERENCIAS

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] A. Hoikkanen, "Economics of Wireless Broadcasting over DVB-H Networks," *Proc. IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, Ponomá, EEUU, 2006.
- [5] 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.
- [6] 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/>
- [7] Proyecto IST-PLUTO (Physical Layer DVB Transmission Optimisation), "Initial Report on Echo Measurement", Deliverable 5.1, Julio 2006. <http://dea.brunel.ac.uk/pluto/>
- [8] 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.
- [9] H. Meunier, E. Talbi, y P. Reininger, "A multiobjective genetic algorithm for radio network optimization", *Proc. IEEE Evolutionary Computation*, California, EEUU, 2000.
- [10] 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.