

Planificación de una Red DVB-H en la Ciudad de Valencia

David Gómez Barquero¹, Ariana Salieta, Alexis P. García, José F. Monserrat, y Narcís Cardona

Grupo de Comunicaciones Móviles
Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM)
Universidad Politécnica de Valencia
Telf: 963 879 585, Fax: 963 879 583
E-mail: dagobar@iteam.upv.es

Resumen

Este artículo presenta y analiza el problema de planificación de redes televisión digital móvil basadas en el estándar DVB-H (Digital Video Broadcast – Handhelds). El artículo incide especialmente en la minimización del coste del despliegue de red. En el artículo se presenta el estudio de planificación de una red DVB-H en la ciudad de Valencia. Se han considerado como posibles emplazamientos una torre de radiodifusión de televisión y los emplazamientos celulares 3G de un operador de telefonía móvil. La topología de red bajo estudio es la utilización de transmisores sincronizados en todos los emplazamientos. Para buscar las configuraciones de red de mínimo coste y máxima cobertura se ha utilizado un algoritmo de planificación basado en un algoritmo genético multi-objetivo. Los resultados obtenidos demuestran que para conseguir niveles de cobertura satisfactorios en interiores se requieren redes con una alta densidad de transmisores, por lo que reutilizar la infraestructura de telecomunicaciones existente es un aspecto clave para minimizar el coste de despliegue de red.

1. Introducción

Uno de los objetivos principales de la industria de las telecomunicaciones es proporcionar servicios multimedia mediáticos a teléfonos móviles (*mass mobile multimedia services*) a bajo coste. Hoy en día, está comúnmente aceptado que la demanda masiva de servicios multimedia estará siempre condicionada a la provisión a bajo coste de estos servicios [1]. El servicio multimedia mediático estrella por excelencia es la televisión digital. De hecho [2]:

“la televisión es el mayor medio de comunicación, y el único que no ha llegado a los teléfonos móviles”.

La extensión de la recepción de televisión digital a teléfonos móviles abrirá un abanico de nuevos servicios para los consumidores, lo cual proporcionará nuevas vías de negocio para todos los actores de la industria audiovisual y de telecomunicaciones. Además, estos servicios son clave para el desarrollo de la Sociedad de la Información, ya que permiten el acceso universal a contenidos multimedia en cualquier lugar y momento.

Bajo este contexto, y como alternativa a las redes celulares 3G, la tecnología DVB-H (*Digital Video Broadcasting – Handhelds*) [3] está considerada como un elemento clave en las redes de comunicaciones móviles futuras, ya que permite transmitir en modo difusión contenido multimedia IP a teléfonos móviles a altas velocidades de transmisión de datos sobre grandes áreas. DVB-H es por tanto ideal para transmitir servicios multimedia mediáticos, especialmente en zonas urbanas con densidades de población elevadas.

Numerosos pilotos DVB-H comerciales han demostrado muy buena aceptación de los servicios de “*TV digital móvil*” por parte de la usuarios de telefonía móvil. Actualmente se ofrecen servicios comerciales de DVB-H en Italia, y se espera que el año 2007 sea el año del inicio del despliegue comercial de DVB-H.

DVB-H es una evolución tecnológica del estándar Europeo de Televisión Digital Terrestre (TDT), DVB-T (*Digital Video Broadcast – Terrestrial*) [4], adaptado para dispositivos móviles (teléfonos móviles, PDAs, etc.). DVB-H reutiliza la misma capa física que DVB-T, y añade elementos adicionales en la capa de enlace, siendo posible compartir la misma infraestructura de red (transmisores, multiplex, etc.). Las principales características de DVB-H respecto a DVB-T son [5]:

- Técnica de transmisión discontinua que reduce considerablemente el consumo de potencia de los terminales, y posibilita realizar traspasos entre celdas transparentes al usuario (*seamless handovers*).
- Mayor robustez de la transmisión, sobre todo en situaciones de movilidad e interferencias.
- Mayor flexibilidad en el diseño de la red.

DVB-H permite la convergencia de los servicios de los mundos de radiodifusión y celular, por lo que no sólo posibilita la transmisión de servicios como TV o radio digital móvil a audiencia masivas, sino que también posibilita servicios interactivos gracias al canal bidireccional ofrecido por la red celular. El sistema extremo a extremo, basado en el protocolo IP (i.e., todos los servicios son transportados sobre IP), se conoce como *IP Datacast* (IPDC) [6].

¹ Becario FPI de la Generalitat de Valencia.

Los beneficios de estos sistemas híbridos celulares y DVB-H son evidentes, ya que pueden tomar ventaja de las características intrínsecas de DVB-H para transmitir eficientemente servicios multimedia mediáticos, mientras que la red celular proporciona una comunicación bidireccional con los usuarios y un sistema de gestión de pagos y tarificación sofisticado que, tradicionalmente, las redes de radiodifusión no disponen.

Además, en un sistema IPDC la red celular se puede utilizar no solamente como un canal de interacción del usuario, sino también como un medio para recuperar información perdida, lo cual se puede traducir en una utilización más eficiente de los recursos del sistema [7]. Típicamente, en una sesión de transmisión de DVB-H algunos usuarios experimentarán condiciones de recepción significativamente peores que la mayoría de los usuarios, por lo que podrían ser servidos más eficientemente a través de la red celular. Especialmente las redes celulares E3G (*Evolved 3G*) presentan un buen potencial para proporcionar mecanismos de reparación de errores eficientes, debido a las recientes mejoras del estándar celular 3G, que además de conexiones de altas velocidades de datos p-t-p con HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), posibilita transmisiones p-t-m con MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Services*) [8].

Por lo tanto, los sistemas IPDC se presentan como un elemento clave para potenciar la cooperación entre los operadores de radiodifusión (encargados del transporte y difusión de las señales de televisión y radio) y los de telefonía móvil. Esta cooperación está además justificada por el modelo de negocio inicial más probable. El cual consiste en una única red dedicada DVB-H con un canal radioeléctrico específico, operada y gestionada por un operador de radiodifusión, que a su vez la alquila a todos los operadores de telefonía móvil.

Una de las principales preocupaciones sobre DVB-H, conjuntamente con la indisponibilidad de canales de frecuencia hasta que se produzca el “apagado analógico”, es el coste de la infraestructura de red. Lo cual puede conducir a precios elevados que no sean atractivos para la mayor parte de los usuarios. 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. Esto es, mayores potencias de transmisión y, especialmente, un mayor número de transmisores. Esta penalización es particularmente evidente para niveles de cobertura muy elevados (i.e., mayores que el 90%) [9], [10].

Los operadores de radiodifusión liderarán probablemente el despliegue de DVB-H, ya que pueden beneficiarse de su infraestructura de TV digital terrestre. Además, el espectro más adecuado para ofrecer servicios de DVB-H coincide con la banda de radiodifusión de televisión UHF (también es posible utilizarlo en VHF y banda L, pero con peores prestaciones). En cualquier caso, los operadores de radiodifusión tendrán que incrementar su infraestructura de red considerablemente para conseguir unos niveles de cobertura de DVB-H satisfactorios. El escenario de despliegue más probable implica la utilización de sus torres de TV y radio para proporcionar una cobertura básica, y desplegar transmisores o repetidores adicionales, actuando como *gap-fillers* y formando redes de frecuencia única SFN (*Single Frequency Networks*), progresivamente en el tiempo en áreas críticas, donde se quiera conseguir cobertura en interiores o en automóviles.

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. De este modo, los emplazamientos celulares pueden ser utilizados como complemento de las grandes torres de TV actuando como *gap-fillers* (situando retransmisores o transmisores sincronizados). Es importante destacar que los operadores celulares podrían desplegar DVB-H utilizando solamente sus emplazamientos celulares. Sin embargo, el coste de esta configuración sería incluso mayor, debido a la alta densidad de transmisores necesario. 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 TV digital móvil a bajo coste.

Este artículo presenta el estudio de planificación de una red de TV digital móvil DVB-H en la ciudad de Valencia realizado por el Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM dentro del proyecto FURIA (FUtura Red Integrada Audiovisual). En el estudio se han considerado como posibles emplazamientos una torre de radiodifusión de TV y los emplazamientos celulares 3G de un operador de telefonía móvil. La topología de red SFN bajo estudio es la utilización de transmisores sincronizados en todos los emplazamientos. Para buscar las configuraciones de red de mínimo coste y máxima cobertura se ha utilizado el algoritmo de planificación propuesto en [11] y [12], basado en un algoritmo genético multi-objetivo. Además, en el artículo se describe el trabajo que se va a realizar en el proyecto FURIA en el ámbito de la planificación de redes DVB-H, cuyo principal objetivo es determinar las configuraciones de red SFN óptimas en distintos escenarios.

La estructura del artículo es la siguiente: la sección 2 presenta el problema de planificación de redes DVB-H, y explica como estimar la cobertura en el proceso de planificación. En la sección 3 se describe la problemática de la optimización multi-objetivo de coste y cobertura, y la aplicación de algoritmos genéticos. En la sección 4 se formula el problema de planificación y despliegue de red de DVB-H como un problema de optimización multi-objetivo. El algoritmo de planificación se describe en la sección 5. La sección 6 describe el escenario de despliegue y el modelo del sistema considerado. La sección 7 muestra los resultados más importantes. Por último, se presentan las principales conclusiones del estudio y las líneas de trabajo futuras sobre planificación de redes DVB-H dentro del proyecto FURIA.

2. Planificación de Redes DVB-H

Como se ha explicado en la introducción, el coste de la infraestructura de red de DVB-H es muy elevado ya que se requieren redes SFN con una alta densidad de transmisores para conseguir niveles de cobertura satisfactorios en interiores y en vehículos. En general, el objetivo de la planificación es, dado un escenario de despliegue, encontrar las configuraciones de red de *mínimo coste y máxima cobertura* que *minimicen las interferencias* producidas a otras redes externas [13]. 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. Es importante destacar que aunque es posible implementar redes compartidas DVB-T/H, donde DVB-T y DVB-H comparten el mismo múltiplex de televisión (y a su vez la capacidad total del canal radioeléctrico), es preferible utilizar redes dedicadas DVB-H. Las redes dedicadas ofrecen posibilidad de planificar el despliegue de DVB-H para la capacidad, cobertura y velocidad deseadas, sin ninguna restricción debida a DVB-T, lo cual no es posible en redes compartidas DVB-T/H.

Los emplazamientos celulares se pueden utilizar para situar transmisores o repetidores adicionales, actuando como *gap-fillers* y complementando la cobertura de las torres de radiodifusión. Obviamente, la colocación de un *gap-filler* DVB-H en un emplazamiento celular debe hacerse de tal manera que no interfiera a los sistemas celulares. En la práctica, dicha limitación se traduce en una distancia mínima entre antenas, así como en una potencia de transmisión máxima (la cual depende también de la altura del emplazamiento) [14]. Normalmente la altura de la antena será la máxima posible para incrementar el área cubierta por cada emplazamiento, y utilizar el mínimo número de emplazamientos posible.

Es importante destacar que en redes SFN el nivel de cobertura no mejora siempre al incrementar la altura de las antenas, ya que el nivel de interferencias de la

propia red también crece (como se explica en el siguiente apartado). Sin embargo, esta restricción no es válida para transmisores de mediana y baja potencia en entornos urbanos considerados en este artículo.

Básicamente, existen tres tipos de *gap-fillers* que se pueden situar en un emplazamiento celular:

- Transmisor sincronizado.
- Repetidor profesional (de alta potencia).
- Repetidor doméstico (de baja potencia).

Utilizar un transmisor sincronizado permite transmitir potencias mayores (e.g., hasta 1 kW), aunque es la alternativa más costosa: hay que cablear para distribuir la señal a los emplazamientos, requiere mayor equipamiento, etc. Por otro lado, los repetidores son más baratos pero ofrecen peores prestaciones ya que introducen un retardo (debido a que tienen que recibir la señal y retransmitirla). Además, las potencias transmitidas son menores (entre otros motivos para evitar problemas de realimentación). En este artículo sólo se ha considerado la utilización de transmisores sincronizados en los emplazamientos celulares, dejándose para un trabajo futuro utilizar repetidores.

Las principales decisiones en la planificación de una red SFN son el número de transmisores y sus ubicaciones. Adicionalmente cada transmisor ha de ser individualmente diseñado: potencia de transmisión, altura y configuración de la antena y retraso artificial. Sin embargo, en nuestro caso el problema de planificación no consiste en decidir dónde se van a construir nuevos emplazamientos, sino en elegir qué emplazamientos celulares ya existentes se deben de utilizar conjuntamente con las torres de TV en un despliegue de mínimo coste progresivo (tanto en cobertura como en capacidad). Especialmente importante es planificar un despliegue progresivo eficiente, ya que DVB-H no es un sistema escalable. Esto es, el coste en infraestructura por Mb/s aumenta cuando se incrementa la capacidad o el nivel de cobertura sobre un área de servicio predeterminada [10].

2.1. Estimación del Nivel de Cobertura

En una red SFN todos los transmisores se sincronizan para transmitir la misma señal a la misma frecuencia, de tal modo que los terminales reciben la misma señal proveniente de varios transmisores. Gracias a la utilización de la modulación OFDM (con un número elevado de portadoras moduladas a bajas tasas binarias que permiten periodos de símbolo muy largos), y la inserción de un intervalo de guarda T_g , las señales recibidas dentro del intervalo de guarda contribuyen positivamente a la señal útil. Esto proporciona una ganancia de diversidad, también conocida como SFN *network gain*, especialmente útil para mejorar la cobertura en entornos urbanos. Por otro lado, las señales con un retraso mayor que el intervalo de guarda crean interferencias (*self-interference*).

Para retrasos ligeramente superiores al intervalo de guarda la señal contribuye parcialmente a la señal útil y a crear interferencias, hasta llegar un momento a partir del cual todas las señales recibidas se consideran completamente interferentes. Para determinar cómo las señales recibidas por los distintos transmisores contribuyen a la señal útil, o a crear interferencias, en un punto se suele utilizar una función que pondere la contribución a la señal útil de las señales recibidas por los distintos transmisores según su tiempo de llegada al receptor [15].

Queda clara la importancia de tener en cuenta la situación de los retardos en el diseño de una red SFN para controlar las interferencias producidas por la misma red. Esto es especialmente importante cuando se utilizan repetidores o existen varias torres de TV de muy alta potencia, así como en redes de gran tamaño (más de 50 km de radio). En nuestro estudio, como no se cumple ninguna de estas condiciones, se ha asumido que no se aplica ningún retraso artificial a los transmisores.

En una 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 se define como el porcentaje de localizaciones cuya SINR supera un valor mínimo conocido como requisito de CNR (*Carrier-to-Noise Ratio*), que depende del modo de transmisión y de la velocidad de móvil. En el caso particular de DVB-H, cuando se utiliza el mecanismo de corrección de errores opcional de la capa de enlace (llamado MPE-FEC), la disponibilidad de la señal es prácticamente independiente de la velocidad [16].

En una SFN la SINR se puede calcular como:

$$\text{SINR} = \frac{P_{Use}}{P_{Self} + P_{Ext} + P_N} \quad (1a)$$

$$\text{SINR} = \frac{\sum_i P_i \cdot Q(t_i - t_o)}{\sum_i P_i \cdot [1 - Q(t_i - t_o)] + P_{Ext} + P_N} \quad (1b)$$

donde P_{Use} es la potencia recibida útil, P_{Self} es la potencia recibida de las interferencias producida por la propia red, P_{Ext} es la potencia recibida de las interferencias externas, y P_N es la potencia del 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), y Q es una función de ponderación cuadrática dada por (2), donde T_g y T_u son el intervalo de guarda absoluto y el periodo útil de símbolo [15].

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

Observando la ecuación se aprecia que para realizar ejercicios de planificación es necesaria una predicción de la potencia recibida en los puntos donde se quiera calcular la cobertura (de aquí en adelante puntos de test), debida a cada uno de los transmisores de la red. En la práctica lo que se calcula son las pérdidas de propagación entre todos los emplazamientos y los puntos de test. Esta predicción puede obtenerse mediante modelos de propagación con mapas digitales de terreno 3D o mediante medidas.

2.2. Coste del Despliegue de Red

Para buscar configuraciones de red que minimicen el coste de despliegue es necesario un modelo de coste que considere las potencias de transmisión, energía eléctrica, cableado, equipamiento, adquisición de los emplazamientos, mantenimiento, etc. Los costes se suelen clasificar en dos grupos: gastos de capital CAPEX (*CApital EXpenditure*) y gastos operativos OPEX (*OPerational EXpenditure*).

El coste de utilizar emplazamientos celulares será directamente proporcional al número de emplazamientos utilizados. Mientras que para emplazamientos de baja potencia se puede asumir que el coste es prácticamente independiente de la potencia transmitida, para emplazamientos de muy alta potencia (como las torres de TV), el coste total estará dominado por el coste proporcional a la potencia transmitida.

Una buena indicación de los costes de despliegue de las redes DVB-H puede obtenerse del estudio de la cobertura en función de las potencias transmitidas y el número de emplazamientos requeridos. El número de emplazamientos celulares necesarios dependerá de la capacidad del sistema, el nivel y el tipo de cobertura deseado, así como de las potencias transmitidas por las torres de TV (i.e., nivel de cobertura básico obtenido con la infraestructura de radiodifusión existente) [10].

3. Optimización de Coste y Cobertura

La planificación de redes DVB-H es, en cierta medida, similar a la planificación de redes celulares. La planificación eficiente de redes celulares es un tema muy estudiado en la literatura, ya que la optimización de los emplazamientos y de los distintos parámetros de estos sistemas puede redundar en un ahorro considerable del despliegue de red. En la actualidad este proceso se realiza mediante técnicas de optimización multiobjetivo, ya que permiten abordar problemas con criterios de optimización en conflicto entre sí.

En los últimos años los algoritmos genéticos han sido exitosamente adaptados para resolver problemas de optimización multiobjetivo, debido a las ventajas que éstos presentan frente a otro tipo de técnicas [17].

Los algoritmos genéticos se basan en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza por la que los individuos más aptos de una población son los que sobreviven. Los algoritmos genéticos multi-objetivo buscan encontrar, idealmente, un conjunto de soluciones óptimas las cuales pueden considerarse equivalentes en ausencia de información sobre la importancia relativa de los distintos objetivos [18]. De este modo, se buscan soluciones que exhiban un alto rendimiento en todas las dimensiones. Este conjunto de soluciones se conoce como frente óptimo de Pareto. Para encontrar las soluciones óptimas de Pareto es necesario definir el término de no-dominancia:

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

Esta estrategia permite definir el coste como función de la cobertura, o viceversa, como se puede ver en la Fig. 1, con las ventajas adicionales que ello representa (por ejemplo, para diseñar un despliegue progresivo de la red). Además, es importante destacar que sería posible considerar fácilmente otra función objetivo, como por ejemplo la minimización de las interferencias producidas a otras redes. En nuestro caso una solución, o configuración de red, dominará a otra cuando tenga un rendimiento en cobertura mayor (proporcione un nivel de cobertura superior) y no tenga un coste de despliegue superior), o viceversa.

4. Planificación de Red DVB-H como un Problema de Optimización Multi-Objetivo

En esta sección el problema de planificar un despliegue eficiente de una red DVB-H se formula como un problema de optimización multi-objetivo discreto. El objetivo de la planificación es encontrar configuraciones de red de *mínimo coste* y *máxima cobertura*. La introducción del tercer objetivo de minimizar las interferencias producidas a una red externa se ha dejado para un trabajo futuro.

4.1. Modelo del Sistema

El área de servicio se define como la región donde se quiere desplegar una red DVB-H. La frecuencia de operación de la red se supone conocida. Los siguientes conjuntos caracterizan el escenario de despliegue:

- Conjunto de emplazamientos celulares, \mathcal{L}_C .
- Conjunto de torres de TV, \mathcal{L}_B .
- Conjunto de localizaciones donde la calidad de la señal de DVB-H debe superar cierto umbral (*puntos de test*).

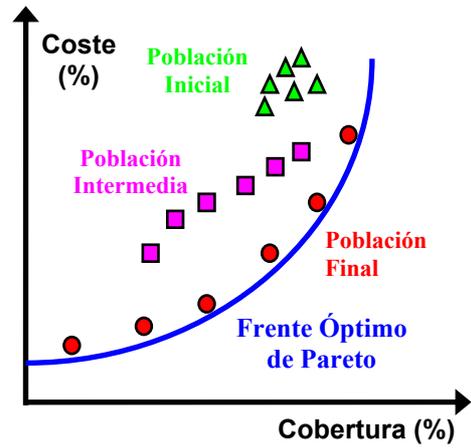


Fig. 1: Evolución de la población de los algoritmos genéticos al frente de Pareto.

Cada emplazamiento celular o torre de TV está completamente caracterizado por su posición, altura, máxima potencias de transmisión y coste. Sin pérdida de generalidad, se asume un conjunto discreto de valores de potencias de transmisión posibles. Recordar que en los emplazamientos celulares la altura de la antena DVB-H y la potencia máxima vendrán determinados por el tipo de *gap-filler* utilizado, la disposición de las antenas de los sistemas celulares, y de la altura del emplazamiento (para evitar interferencias).

4.2. Modelo de Coste

En nuestro modelo de coste cada emplazamiento celular o torre de TV tiene asociado un coste por utilizarlo (alquiler del emplazamiento, cableado, mantenimiento, etc.), más un coste proporcional a la potencia transmitida (amplificadores, antena, electricidad, etc.). El coste total de la red será la suma del coste de la red celular más el coste de las torres de TV. A continuación las medidas de coste se definen para un intervalo de tiempo, como por ejemplo costes anualizados (i.e., coste por año).

El coste de un emplazamiento celular DVB-H L_{Ck} , con una potencia P_{Ck} puede escribirse como:

$$\$(L_{Ck}) = C_{\alpha} + C_{\beta}(P_{Ck}) \quad (3)$$

Es importante destacar que el coste que depende de la potencia transmitida, $C_{\beta}(P_{Ck})$, será en la práctica el mismo para todos los emplazamientos. Mientras que el coste asociado a utilizar el emplazamiento, C_{α} , dependerá de cada emplazamiento en particular (i.e., unos emplazamientos pueden ser más caros que otros), y dependerá de las relaciones entre el operador de radiodifusión y los de telefonía móvil.

En cuanto a las torres de TV, como no es necesario inversión en nueva infraestructura, su coste anualizado de operación se puede modelar por:

$$\$(L_{TV}) = C_{\gamma}(P_{TV}) \quad (4)$$

4.3. Variables de Decisión

En general, en nuestro problema de optimización multi-objetivo existirán diferentes frentes óptimos de Pareto asociados a distintas configuraciones de la red de radiodifusión. Esto es debido a que una pequeña variación en la configuración de la red de radiodifusión (e.g., cambio de la potencia transmitida) resulta en un cambio significativo del nivel de cobertura. Por lo tanto, el algoritmo genético multi-objetivo trabajará solamente con la red celular. Es decir, la configuración de la red de difusión es un parámetro de entrada al algoritmo, y el algoritmo tratará de encontrar configuraciones de la red celular que minimicen su coste y maximicen el nivel de cobertura total. Esta restricción no es especialmente significativa, ya que el número de torres de TV suele ser muy pequeño (en muchos casos sólo habrá disponible una única torre de TV).

Los principales parámetros que se pueden optimizar son: potencia, altura, configuración de la antena (tilt y diagrama de radiación), y el retraso artificial. Normalmente, la altura de la antena será conocida, pero se podrían considerar diferentes alturas, cada una de ellas con un coste diferente. Asumiendo que se conoce la altura, se utilizan antenas omnidireccionales, y no se aplica ningún retraso artificial, la única variable de decisión es la potencia transmitida en cada emplazamiento.

Para formular el problema se introduce el vector \mathbf{p} , que contiene el índice de la potencia transmitida en el emplazamiento celular dentro de su conjunto de potencias posibles $[p_0, \dots, p_{MAX}]$, indicando p_0 potencia nula (el emplazamiento no es utilizado), y p_{MAX} la potencia máxima. Por lo tanto, el vector \mathbf{p} y las potencias transmitidas por las torres de TV determinan la configuración de la red.

Es importante destacar que en el caso de que se quieran optimizar más de un parámetro, sería necesaria una codificación jerárquica de los emplazamientos, como en [19].

5. Algoritmo de Planificación

El algoritmo de planificación está basado en el algoritmo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* versión 2) [20]. La técnica NSGA se basa en la clasificación por frentes de los individuos, agrupando a las soluciones no-dominadas jerárquicamente. Una vez que el primer frente se ha calculado con las soluciones no-dominadas de toda la población, el segundo frente se forma con las soluciones no-dominadas restantes, y así sucesivamente. Esta técnica utiliza selección proporcional, y los individuos en el primer frente tienen más hijos que el resto de la población. Esto permite una convergencia más rápida hacia el frente óptimo de Pareto.

Tabla 1: Pseudo código del algoritmo de planificación.

```

Generar la población padre inicial  $P_0$  de tamaño  $n$ 
Clasificar  $P_0$  en frentes con soluciones no-dominadas
Calcular la crowding distance de cada solución
Aplicar selección, combinación y mutación para
obtener la población hija inicial  $H_0$  de tamaño  $n$ 
for  $t = 1:nr_{\text{generaciones}}$  do
   $U_t = P_t \cup H_t$ 
  Clasificar  $U_t$  en frentes  $F_1, F_2, \dots$ 
  Calcular la crowding distance de cada solución
   $P_{t+1} = \emptyset; i = 1;$ 
  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  $F_i$  por su crowding distance
       $P_{t+1} = P_{t+1} \cup$  primeros  $(n - |P_{t+1}|)$ 
      elementos de  $F_i$ 
    end if
     $i = i + 1;$ 
  end while
  Aplicar selección, combinación y mutación para
  obtener la población hija  $H_{t+1}$ 
end for

```

El algoritmo de planificación se ha aplicado al vector de potencias de los emplazamientos celulares, \mathbf{p} . Cada solución, o individuo, del algoritmo genético es por tanto una configuración de la red celular. Las soluciones se comparan en coste y cobertura en términos de no-dominación. La Tabla 1 muestra el pseudo código del algoritmo. Una descripción más detallada de su funcionamiento se puede encontrar en [11] y [12].

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. Los padres son elegidos 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 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 calcular la *crowding distance*, 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. El punto de cruce en el vector \mathbf{p} se calcula de forma aleatoria. La técnica de mutación utilizada consiste en que la potencia 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.

6. Escenario de Despliegue

El escenario elegido para la planificación de la red DVB-H es el núcleo urbano de la ciudad de Valencia. Para el despliegue se han considerado una torre de TV de 200 m de altura, y 108 emplazamientos 3G de un operador móvil con alturas comprendidas entre 20 y 30 m. Se han asumido antenas omnidireccionales ideales en todos los emplazamientos. La Fig. 2 muestra el escenario de despliegue y la ubicación de los emplazamientos celulares (en negro) y de la torre de TV. El área del escenario es de 48 km² aproximadamente.

6.1. Balance de Potencias (*Link Budget*)

La Tabla 2 muestra el rendimiento de los diferentes modos de transmisión considerados. En concreto la capacidad, requisito de CNR para recepción portable y máxima frecuencia Doppler permitida [21]. La duración del intervalo de guarda absoluto (que sólo depende del tamaño de la FFT y del intervalo de guarda relativo GI) es 112 μ s, con una distancia equivalente de 33.6 km. La velocidad máxima alcanzable para el modo 16QAM 2/3 a 700 MHz (peor caso) son 175 km/h, más que suficiente para un entorno urbano.

Los valores utilizados en el balance de potencias son los recomendados en [22] para planificación de cobertura de DVB-H. Se han considerado cobertura *indoor*, *outdoor* y *vehicular*, así como dos frecuencias de operación: 500 y 700 MHz. El rango de potencias considerado para la torre de TV es entre 40 y 60 dBW PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente), esto es entre 10 kW y 1 MW. La PIRE de los emplazamientos celulares varía entre 20 y 30 dBW (i.e., de 100 W a 1 kW).

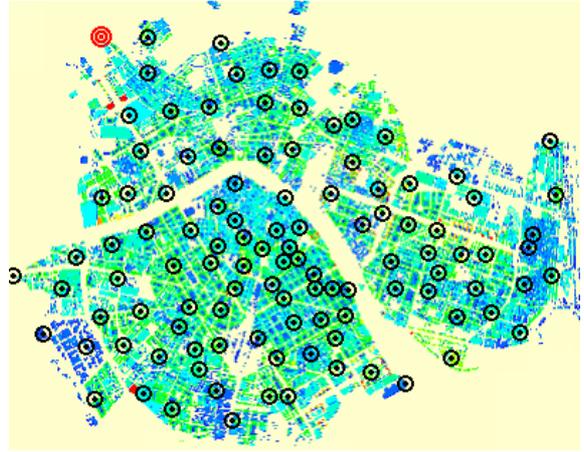


Fig. 2: Escenario de despliegue. Torre de TV (rojo) y emplazamientos celulares (negro).

Tabla 2: Prestaciones de los modos de transmisión. FFT 4K, GI 1/4, MPE-FEC 3/4.

	Capacidad	CNR	Doppler
QPSK 1/2	3.7 Mb/s	7.5 dB	141 Hz
QPSK 2/3	5 Mb/s	11 dB	131 Hz
16QAM 1/2	7.5 Mb/s	13.5 dB	128 Hz
16QAM 2/3	10 Mb/s	16.6 dB	113 Hz

El teléfono móvil DVB-H se ha caracterizado por una antena omnidireccional con una ganancia de -10 dBi (a 500 MHz) y -7 dBi (a 700 MHz), y una figura de ruido de 6 dB (incluyendo un filtro anti-GSM). No se han considerado interferencias producidas por redes externas.

El *shadowing outdoor* se ha caracterizado mediante una estadística log-normal con una desviación típica de 5.5 dB. Las pérdidas de propagación en edificios también se han caracterizado mediante una estadística log-normal con una media de 11 dB y una desviación típica de 6 dB. Las pérdidas de penetración en vehículos son 7 dB.

6.2. Cálculo de las Pérdidas de Propagación

Para calcular las pérdidas de propagación desde los emplazamientos celulares y la torre de TV hasta cada uno de los puntos de test se ha utilizado la herramienta profesional Atoll [23]. Se han utilizado un mapa de elevación del terreno y un mapa de edificios de la ciudad de Valencia. Sobre el escenario de despliegue se han ubicado 7600 puntos de test equiespaciados en situaciones *outdoor* e *indoor*. El número de puntos elegido es lo suficientemente elevado para garantizar que los niveles de cobertura calculados en tanto por ciento son fiables.

La Fig. 3 muestra la CDF de las pérdidas de propagación entre los puntos de test y la torre de TV para los distintos tipos de cobertura y las dos frecuencias consideradas. Se puede comprobar cómo las pérdidas son menores para 500 MHz.

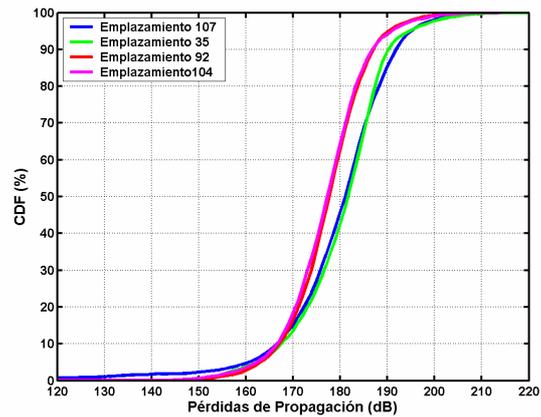
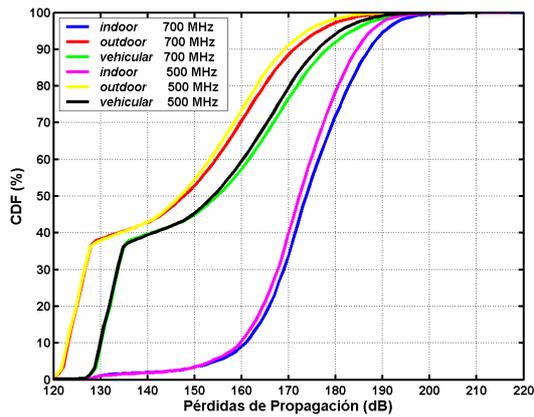


Fig. 3: CDF de las pérdidas de propagación de la torre de TV. **Fig. 4:** CDF de las pérdidas de propagación *indoor* de varios emplazamientos celulares.

También se puede apreciar una gran diferencia entre las pérdidas *indoor* y las pérdidas *outdoor* y *vehicular*. Notar que la diferencia entre estas últimas es simplemente una constante de 7 dB debido a las pérdidas de penetración en vehículos. En las pérdidas *outdoor* y *vehicular* también se puede distinguir fácilmente los puntos de test que se encuentran en condiciones de visión directa LoS (Line-of-Sight) con la torre de TV. Estos puntos de test se caracterizan por tener unas pérdidas mucho menores que los puntos que se encuentran en situaciones NLoS (Non-Line-of-Sight).

La Fig. 4 muestra la CDF de las pérdidas de propagación *indoor* de varios emplazamientos celulares. Se puede observar claramente cómo las pérdidas de propagación de la torre de TV son mucho menores que la de los emplazamientos celulares.

7. Resultados y Discusiones

7.1. Torre de TV

A partir de las pérdidas de propagación se puede calcular el nivel de cobertura obtenido por la torre de TV aisladamente.

Los valores numéricos obtenidos para unas potencias PIRE de la torre de TV de 40, 50, y 60 dBW se detallan en las Tablas 3 y 4. Se puede observar claramente que la torre de TV sólo es capaz de proporcionar niveles de cobertura satisfactorios (i.e., mayores que el 95%) para los casos de recepción *outdoor*, y para una potencia de 60 dBW. La cual puede ser excesiva debido a la proximidad de la torre de TV a la ciudad. También es importante destacar que se obtienen coberturas superiores para 500 MHz, a pesar de que la ganancia de la antena de los teléfonos móviles es menor (-7 dBi a 700 MHz y -10 dBi a 500 MHz respectivamente).

La Fig. 5 (A-C) muestra la distribución del nivel de cobertura en el escenario de despliegue a la frecuencia de 700 MHz (puntos de test *outdoor* e *indoor*). En las figuras de la izquierda se muestra la distribución de la SINR (dB), mientras que las figuras de la derecha muestran el modo de transmisión que puede ser utilizado en cada punto de test. Se puede apreciar que se consiguen niveles de cobertura altos para entornos *outdoor* fácilmente, mientras que para entornos *indoor* sólo se consiguen en la zona noroeste cercana a la torre de TV, consiguiéndose una cobertura muy pobre en la zona sureste incluso para el caso de 60 dBW.

Tabla 3: Cobertura obtenida con la torre de TV a 500 MHz.

Capacidad	<i>Outdoor</i>			<i>Vehicular</i>			<i>Indoor</i>		
	40 dBW	50 dBW	60 dBW	40 dBW	50 dBW	60 dBW	40 dBW	50 dBW	60 dBW
3.7 Mb/s	75 %	92 %	99 %	63 %	83 %	96 %	12 %	44 %	82 %
5 Mb/s	69 %	88 %	98 %	57 %	77 %	93 %	13 %	31 %	72 %
7.5 Mb/s	63 %	83 %	96 %	51 %	69 %	88 %	6 %	21 %	61 %
10 Mb/s	57 %	77 %	93 %	47 %	63 %	83 %	4 %	14 %	49 %

Tabla 4: Cobertura obtenida con la torre de TV a 700 MHz.

Capacidad	<i>Outdoor</i>			<i>Vehicular</i>			<i>Indoor</i>		
	40 dBW	50 dBW	60 dBW	40 dBW	50 dBW	60 dBW	40 dBW	50 dBW	60 dBW
3.7 Mb/s	73 %	90 %	98 %	60 %	79 %	93 %	10 %	38 %	75 %
5 Mb/s	66 %	86 %	96 %	54 %	73 %	90 %	7 %	27 %	65 %
7.5 Mb/s	61 %	80 %	94 %	50 %	66 %	86 %	5 %	23 %	55 %
10 Mb/s	56 %	75 %	91 %	47 %	61 %	81 %	4 %	12 %	43 %

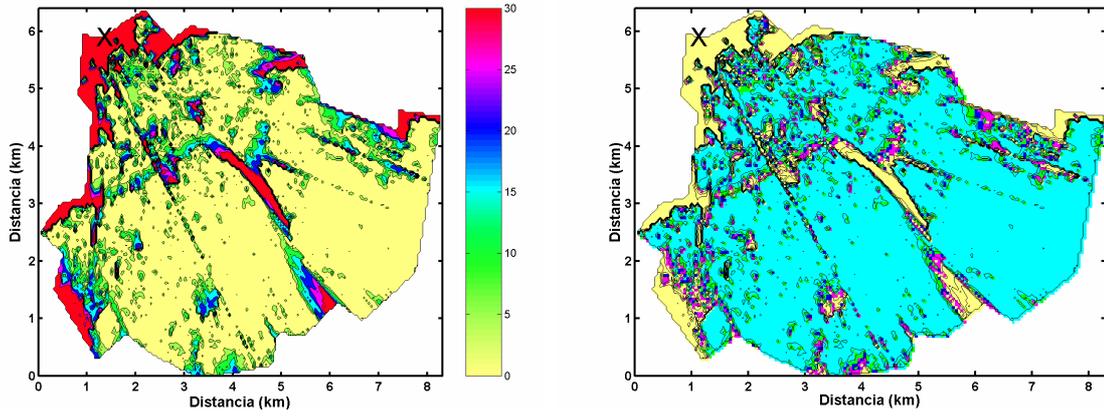


Fig. 5A: Potencia PIRE torre de TV 40 dBW (10 kW).

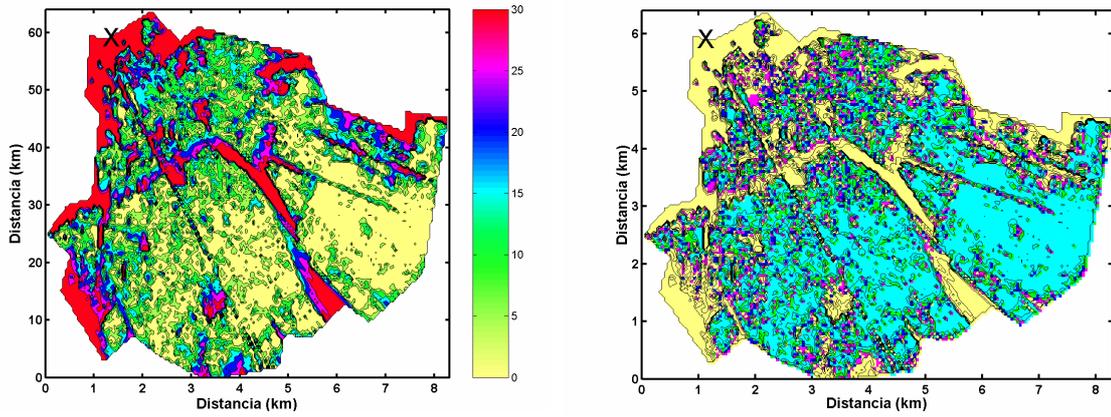


Fig. 5B: Potencia PIRE torre de TV 50 dBW (100 kW).

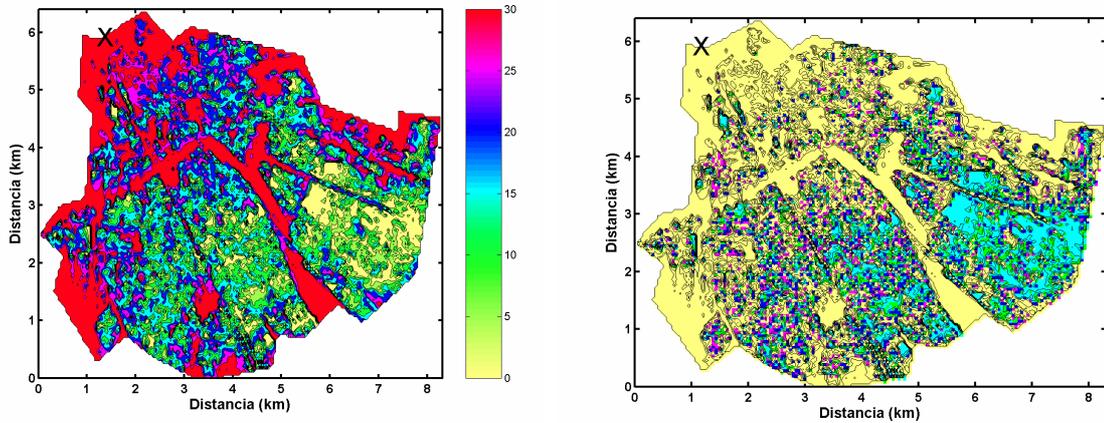


Fig. 5C: Potencia PIRE torre de TV 60 dBW (1 MW).

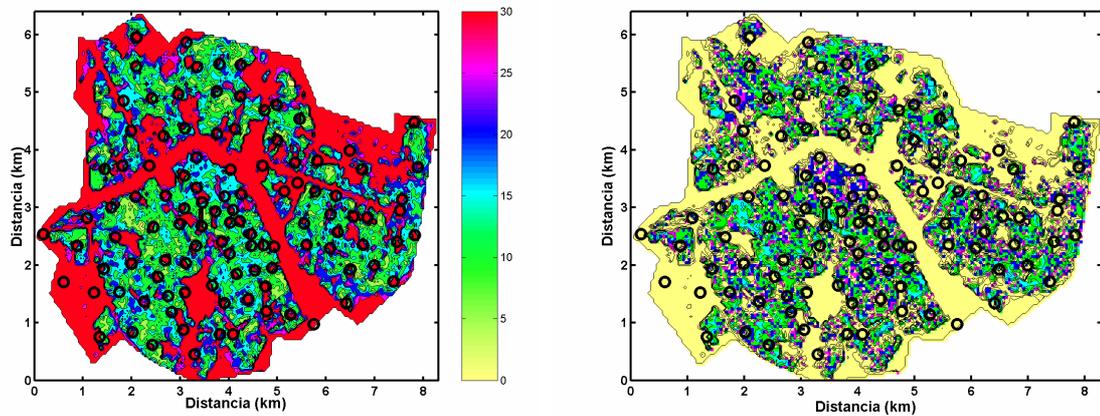


Fig. 5D: Potencia PIRE emplazamientos celulares 30 dBW (1 kW).

Fig. 5: Distribución de la cobertura a 700 MHz: SINR (dB) (izq.) y Modo de transmisión (dcha.).

■ Sin cobertura
 ■ 3.7 Mb/s
 ■ 5 Mb/s
 ■ 7.5 Mb/s
 ■ 10 Mb/s

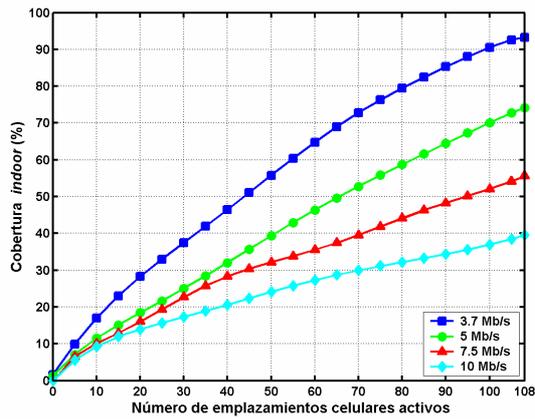


Fig. 6A: Sin torre de TV.

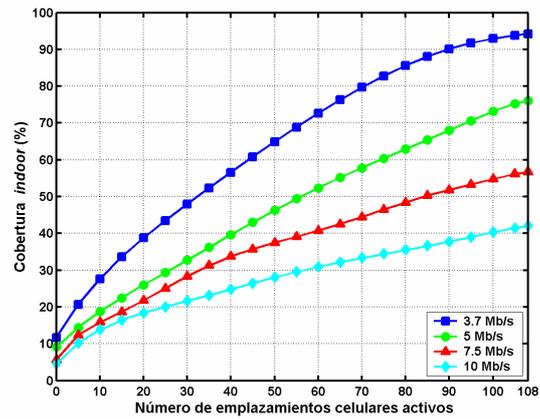


Fig. 6B: Potencia PIRE torre de TV 40 dBW.

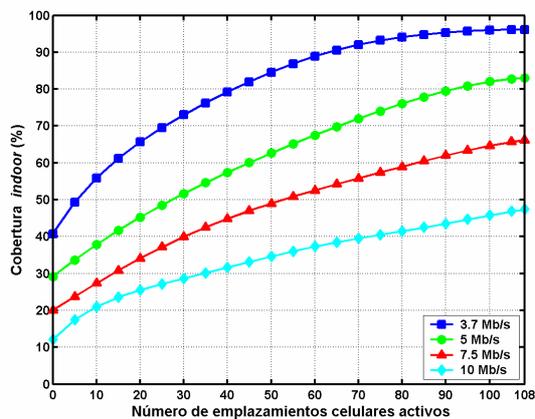


Fig. 6C: Potencia PIRE torre de TV 50 dBW.

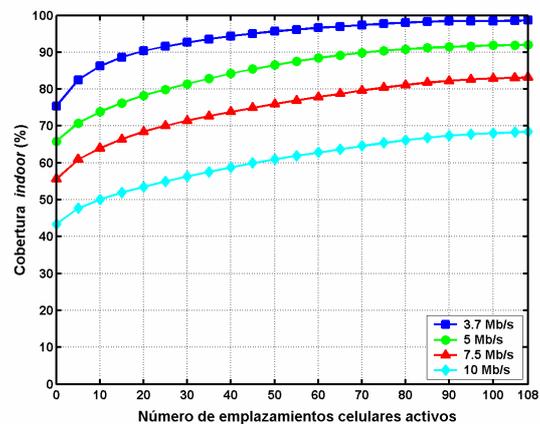


Fig. 6D: Potencia PIRE torre de TV 60 dBW.

Fig. 6: Cobertura indoor vs. Número de emplazamientos celulares red SFN (Potencia 30 dBW). Frecuencia 700 MHz.

7.2. Red SFN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la red SFN formada por la torre de TV y los emplazamientos celulares.

La Fig. 5D muestra la distribución de cobertura de la red SFN formada por todos los 108 emplazamientos celulares transmitiendo a una potencia de 30 dBW sin utilizar la torre de TV. Se puede apreciar claramente cómo se consigue una distribución de la cobertura mucho más uniforme que cuando se utiliza la torre de TV. Además se puede observar que existen pocas zonas sin cobertura. Esto se puede comprobar en la Fig. 6A, donde se representa el nivel de cobertura indoor a 700 MHz en función del número de emplazamientos utilizados. El nivel de cobertura para una capacidad de 3.7 Mb/s cuando se utilizan todos los emplazamientos es de 94%.

La Fig. 6 (B-C) muestra la cobertura indoor a 700 MHz en función del número de emplazamientos celulares utilizados para distintas potencias transmitidas de la torre de TV. Se puede comprobar que sólo se consiguen niveles de cobertura del 95% para una capacidad de 3.7 Mb/s, y que sólo se consigue una cobertura superior al 90% para una capacidad de 5 Mb/s cuando se utilizan todos los

emplazamientos celulares y la torre de TV transmite a la máxima potencia considerada.

El algoritmo de planificación se ha utilizado para determinar los emplazamientos más adecuados que proporcionan el mayor nivel de cobertura. Para ello simplemente se ha asignado el mismo coste a todos los emplazamientos. En general, los emplazamientos utilizados son los de mayor altura y los más alejados a la torre de TV. Notar que se no se ha tenido en cuenta las densidades de usuarios en el área de despliegue, por lo que todos los puntos de test tienen la misma importancia. En la práctica habrá zonas prioritarias donde se debe garantizar un nivel de cobertura satisfactorio (e.g., área comercial o estadio de fútbol), y en las que habrá que colocar *gap-fillers* imperiosamente. Por otro lado también existirán zonas con baja densidad de usuarios, las cuales podrían ser servidas más eficientemente utilizando la red celular [7].

7.3. Planificación de Mínimo Coste

En este apartado se muestra un ejemplo de planificación de mínimo coste utilizando el algoritmo de planificación.

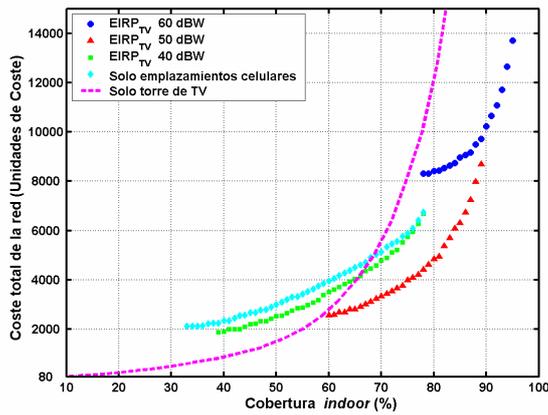


Fig. 7: Coste total de la red vs. Nivel de cobertura *indoor*. Capacidad 3.7 Mb/s. $C_a = 100$. Frecuencia 700 MHz.

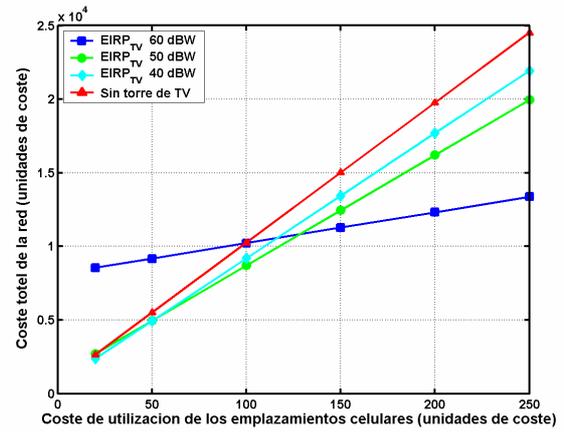


Fig. 8: Coste total de la red 90% cobertura *indoor* vs. C_a . Capacidad 3.7 Mb/s. Frecuencia 700 MHz.

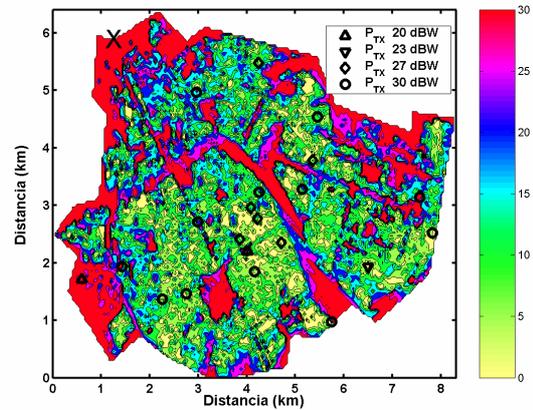
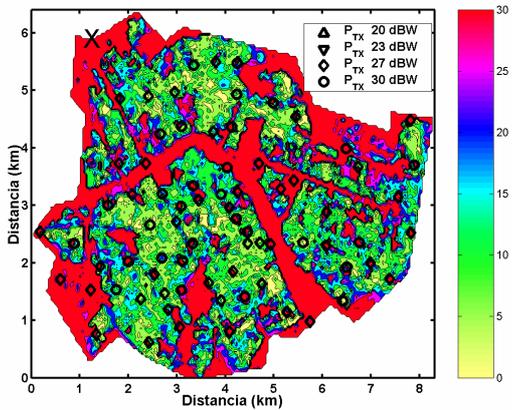


Fig. 9A: Red SFN mínimo coste: PIRE torre de TV 50 dBW. Fig. 9B: Red SFN mínimo coste: PIRE torre de TV 60 dBW.
Fig. 9: Distribución de la cobertura a 700 MHz: CNR (dB). Nivel de cobertura *indoor* 3.7 Mb/s 90%. $C_a = 100$.

Recordar que en nuestro modelo de coste los emplazamientos celulares tienen asociado un coste por utilizarlo C_a , y los transmisores un coste proporcional a la potencia transmitida $C_\beta(P_{ck})$. Se ha asumido que C_a es el mismo para todos los emplazamientos celulares, y que el coste debido a la potencia transmitida aumenta proporcionalmente con ella. Es decir, el coste se duplica al doblar la potencia. El mismo rango de potencias se ha considerado para todos los emplazamientos es: 20, 23, 27 y 30 dBW (100, 200, 500 y 1000 W). Se ha tomado como unidad de coste de referencia el coste debido a la mínima potencia considerada (100 W).

La Fig. 7 muestra el coste total de la red en función del nivel de cobertura para distintas potencias de la torre de TV para $C_a = 100$. Se puede comprobar cómo es muy costoso cubrir los últimos porcentajes de localizaciones utilizando sólo la torre de TV, y el beneficio de utilizar emplazamientos celulares para conseguir niveles de cobertura elevados. Se puede también observar que para este caso particular las configuraciones de mínimo coste se consiguen para una potencia de la torre de TV de 50 dBW, y que utilizar solamente emplazamientos celulares es una solución más cara que utilizar sólo la torre de TV para niveles de cobertura no muy elevados.

La Fig. 8 muestra el coste total de la red en función del coste de utilizar un emplazamiento celular para un nivel de cobertura del 90%. Se puede observar cómo al incrementar C_a el coste total de la red aumenta considerablemente para potencias de la torre de TV de 40 y 50 dBW, mientras que para una potencia de 60 dBW permanece constante. Esto es debido a que no se necesita ningún emplazamiento celular. Las configuraciones de mínimo coste dependerán en gran medida del coste C_a . Para valores elevados será más rentable incrementar las potencias de las torres de TV y utilizar pocos emplazamientos celulares, mientras que para costes bajos será más rentable utilizar más emplazamientos. La Fig. 8 proporciona la potencia óptima de la torre de TV en función de C_a , y da una indicación de los costes que se pueden ahorrar utilizando la infraestructura de radiodifusión y celular conjuntamente.

Por último la Fig. 9 muestra la distribución de la cobertura de las configuraciones de mínimo coste para $C_a = 100$ para conseguir una cobertura *indoor* a 3.7 Mb/s de 90% para unas potencias de la torre de TV de 50 dBW y 60 dBW.

Conclusiones y Líneas Futuras

Este artículo ha presentado el estudio de planificación de una red DVB-H en la ciudad de Valencia utilizando transmisores sincronizados en una torre de TV y en los emplazamientos celulares de un operador de telefonía móvil. Los resultados obtenidos muestran que la banda baja de UHF (entorno a 500 MHz) es la más adecuada para desplegar redes DVB-H. Además, se ha demostrado que las configuraciones de mínimo coste para conseguir niveles elevados de cobertura en interiores implican la reutilización de las torres de radiodifusión para lograr una cobertura básica, y cubrir los últimos porcentajes de localizaciones mediante la reutilización de emplazamientos celulares como *gap-fillers*.

A continuación se comentan las principales líneas de trabajo futuras dentro del proyecto FURIA en el ámbito de la planificación de redes DVB-H. Uno de los aspectos prioritarios es estudiar la utilización de repetidores profesionales y domésticos, además de transmisores sincronizados. Para ello se realizará una comparativa exhaustiva de sus prestaciones y coste. Cabe destacar que se estudiará en profundidad el desarrollo de repetidores domésticos como una alternativa de bajo coste para proporcionar cobertura en interiores. También se seguirá trabajando en el desarrollo de algoritmos de planificación. En concreto se considerará la posibilidad de introducir un tercer objetivo de planificación como la reducción de interferencias producidas a una red externa, así como más parámetros además de la potencia transmitida para modelar los distintos tipos de *gap-fillers* (como el tilt de la antena y el retraso artificial). Otro punto de interés relacionado es el desarrollo de modelos de propagación específicos de DVB-H a partir de las campañas de medidas realizadas en FURIA. También se estudiará el uso de la modulación jerárquica en un despliegue progresivo, para lograr un menor coste del despliegue inicial, así como las implicaciones a nivel de servicios que este tipo de modulación implica.

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@.

Referencias

- [1] B. Karlson *et al.*, “*Wireless Foresight: Scenarios of the Mobile World in 2015*,” Wiley, 2003.
- [2] J. Henriksson, “DVB-H Outline,” Diciembre 2003.
- [3] ETSI, EN 302 304 v1.1.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); transmission system for handheld terminals (DVB-H)*”, Noviembre 2004.
- [4] ETSI, EN 300 744 v1.5.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*”, Noviembre 2004.

- [5] G. Faria, J. A. Henriksson, E. Stare, y P. Talmola, “DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 1, pp. 194-209, Enero 2006.
- [6] ETSI, TR 102 469 V1.1.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); IP Datacast over DVB-H: Architecture*”, Mayo 2006.
- [7] D. Gómez-Barquero y A. Bria, “Repair Mechanisms for Broadcast Transmissions in Hybrid Cellular and DVB-H Systems,” *Proc. IEEE ISWCS*, Valencia, España, 2006.
- [8] S. Parkvall, E. Englund, M. Lundevall, y J. Torsner, “Evolving 3G Mobile Systems: Broadband and Broadcast Services in WCDMA,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 2, pp. 68-74, Febrero 2006.
- [9] D. Gómez-Barquero y A. Bria, “Feasibility of DVB-H deployment on existing wireless infrastructure”, *Proc. IWCT*, Oulu, Finlandia, 2005.
- [10] A. Bria y D. Gómez-Barquero, “Scalability of DVB-H deployment on existing wireless infrastructure”, *Proc. IEEE PIMRC*, Berlin, Alemania, 2005.
- [11] D. Gómez-Barquero, J. F. Monserrat, y N. Cardona, “Planificación y Despliegue de Red Eficiente de DVB-H,” *Jornadas Telecom I+D*, Madrid, España, 2005.
- [12] D. Gómez-Barquero, A. Bria, J. F. Monserrat, y N. Cardona, “Minimal Cost Planning of DVB-H Networks on Existing Wireless Infrastructure,” *Proc. IEEE PIMRC*, Helsinki, Finlandia, 2006.
- [13] A. Ligeti, y J. Zender, “Minimal Cost Coverage Planning for Single Frequency Network”, *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 50, no. 1, pp. 78-87, Marzo 1999.
- [14] IST-INSTINCT, Deliverable 6.1, “Radio Spectrum, Traffic Engineering and Resource Management”, Septiembre 2005.
- [15] R. Brugger y David Hemingway, “OFDM receivers – impact on coverage of inter-symbol interference and FFT window positioning,” *EBU Technical Review*, Julio 2003.
- [16] ETSI, TR 102 401 v1.1.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Transmission to Handheld Terminals (DVB-H); Validation Task Force Report*”, Mayo 2005.
- [17] K. Deb, “*Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*”, Wiley, 2001.
- [18] R. M. Whitaker, L. Raisanen, y S. Hurley, “A model for conflict resolution between coverage and cost in cellular wireless networks”, *Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, 2004.
- [19] H. Meunier, E. Talbi, y P. Reininger, “A multiobjective genetic algorithm for radio network optimization”, *Congress on Evolutionary Computation*, California, USA, 2000.
- [20] K. Deb, A. Pratap, S. Agrawal, y T. Meyarivan, “A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [21] TeamCast y DiBcom, “DVB-H Calculator - Mobile Performance Evaluator,” Disponible en: <http://www.teamcast.com/>
- [22] ETSI, TR 102 377 v1.2.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines*”, Noviembre 2005.
- [23] <http://www.forsk.com/>