

# Planificación de redes híbridas 3G/DVB-H

*Autor:* Ana Fernández Aguilera

*Director:* David Gómez Barquero

*Tutor:* Narcís Cardona Marcet

*Resumen* — En esta tesina se estudia el rendimiento de las redes híbridas HSDPA/MBMS y HSDPA/DVB-H para proporcionar *streaming* de servicios de televisión en escenarios reales y se realiza la planificación de una red híbrida para la provisión de servicios de TV móvil en la ciudad de Valencia. Por un parte se investiga el rendimiento de la red híbrida HSDPA/MBMS. Se estudia la necesidad de implementar MBMS en algunas de las celdas celulares y su elección (planificación híbrida), de modo que el porcentaje de usuarios servidos, tanto del servicio de TV como de los servicios básicos de las redes celulares (voz, datos, etc.), sea el mayor posible. Por otra parte también se investiga el rendimiento de la red híbrida HSDPA/DVB-H, optimizando los emplazamientos donde colocar los transmisores DVB-H de modo que, al igual que en el caso anterior, se maximice el número de usuarios servidos. Este estudio se realizará para varias tasas binarias del servicio bajo estudio de TV móvil, así como para varias combinaciones de probabilidad de demanda de los distintos tipos de servicios.

*Abstract* — This dissertation studies the performance of the hybrid HSDPA/MBMS and HSDPA/DVB-H networks to provide mobile TV services in realistic scenarios. Moreover, an hybrid network planning has been done in order to provide Valencia city with a mobile TV service. On the one hand, the performance of the hybrid HSDPA/MBMS network is investigated. We study the requirement of implement MBMS in some of the cellular sites and we choose which of them have to implement it (hybrid planning) with the aim of maximizing the number of users correctly served, both TV users and voice and data users. On the other hand, it is also investigated the performance of the hybrid HSDPA/ DVB-H network. We optimize the location of the DVB-H transmitters with the same objective as before, maximize the number of users served. This study will be done for three different data rates and for three service probability of demand combinations.

Autor: Ana Fernández Aguilera, email: [anferag@iteam.upv.es](mailto:anferag@iteam.upv.es)

Director: David Gómez Barquero, email: [dagobar@iteam.upv.es](mailto:dagobar@iteam.upv.es)

Director 2: Narcís Cardona Marcet, email: [ncardona@iteam.upv.es](mailto:ncardona@iteam.upv.es)

Fecha de entrega: 09-12-09

## ÍNDICE

<b>I. Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>II. Descripción de las tecnologías</b> .....	<b>6</b>
II.1. HSDPA .....	6
II.2. MBMS .....	7
II.3. DVB-H .....	10
<b>III. Escenario de despliegue</b> .....	<b>12</b>
III.1. Densidad de usuarios.....	12
III.2. Servicios.....	13
III.3. Descripción de la red 3G.....	14
III.4. Descripción de los transmisores DVB-H .....	15
<b>IV. Estudio previo: Escenario sintético</b> .....	<b>16</b>
IV.1. Transmisión de servicios con HSDPA.....	16
IV.2. Transmisión de servicios con HSDPA y MBMS .....	19
<i>IV.2.1 Estudio de cobertura de MBMS</i> .....	19
<i>IV.2.2 Resultados red híbrida HSDPA/MBMS</i> .....	20
IV.3. Transmisión de servicios con HSDPA y DVB-H .....	22
<i>IV.3.1 Estudio de cobertura de DVB-H</i> .....	22
<i>IV.3.2 Resultados red híbrida HSDPA/DVB-H</i> .....	23
<b>V. Escenario realista: Ciudad de Valencia</b> .....	<b>24</b>
V.1. Transmisión de servicios con HSDPA .....	25
V.2. Transmisión de servicios con HSDPA y MBMS .....	26
V.3. Transmisión de servicios con HSDPA y DVB-H.....	27
V.4. Transmisión de servicios con HSDPA, MBMS y DVB-H.....	30
<b>VI. Gestión de recursos radio para servicios de descarga de ficheros en redes híbridas</b> .....	<b>31</b>
VI.1. Transmisión del servicio con HSDPA y MBMS .....	32
VI.2. Transmisión del servicio con HSDPA y DVB-H.....	35
<b>VII. Conclusiones y trabajo futuro</b> .....	<b>37</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>39</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>39</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>41</b>

## I. INTRODUCCIÓN.

La distribución de contenidos multimedia mediáticos a dispositivos móviles y portátiles, como teléfonos móviles, resulta una tarea muy complicada, dado que exige tanto escalabilidad para grandes cantidades de usuarios como transmisión fiable. Si además se pretende proporcionar estos servicios a un coste asequible para los usuarios, esta dificultad se incrementa notablemente.

Con la llegada de las redes móviles de tercera generación (3G), los operadores de telefonía móvil empezaron a ofrecer servicios multimedia, como video-clips de eventos deportivos o programas de TV. Sin embargo, las prestaciones de la primera versión del estándar 3G estaban considerablemente limitadas, tanto desde un punto de vista técnico como del coste del servicio, ya que las redes 3G fueron originariamente diseñadas para servicios *unicast*, transmitidos mediante conexiones dedicadas punto a punto (p-t-p) para cada usuario individualmente. Incluso cuando el mismo contenido debe de ser transmitido a muchos usuarios. Esto limita el número máximo de usuarios activos que pueden ser soportados por el sistema, ya que tanto los recursos radio como los de la red de transporte son limitados. Para poder soportar un gran número de usuarios consumiendo el mismo servicio simultáneamente es necesario hacer transmisiones en modo *multicast* o *broadcast* (difusión)<sup>1</sup> **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Este tipo de transmisiones utilizan una conexión punto a multipunto (p-t-m) para todos los usuarios, no suponiendo ningún límite al número de usuarios que pueden recibir el servicio dentro del área de cobertura.

Para satisfacer las crecientes demandas para acceso de datos de alta velocidad y servicios *multicast/broadcast*, el estándar 3G fue mejorado con la introducción de:

- HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*).
- HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*).
- MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Services*).

La tecnología HSDPA, ya implantada en las redes actuales, soporta altas tasas de datos (hasta varios Mb/s) incrementando considerablemente la capacidad de la red. Con el HSUPA las capacidades de paquetes de datos en el enlace ascendente son mejoradas. Ambos son destinados para conexiones dedicadas p-t-p. MBMS trae soporte para servicios *multicast* (conexiones p-t-m) a una velocidad máxima de transmisión de 384 Kb/s. Estas mejoras conducen a una utilización más eficiente de los recursos radio en las redes 3G [2]. Sin embargo, la tecnología p-t-p HSDPA sigue sin ser eficiente para proporcionar contenido multimedia de difusión a gran cantidad de usuarios y MBMS no tiene la capacidad suficiente para proveer una gran variedad de servicios multimedia.

<sup>1</sup> *Multicast* y *broadcast* describen escenarios diferentes aunque estrechamente relacionados. Mientras que las transmisiones *broadcast* están dirigidas a todos los usuarios en el área de servicio, las transmisiones *multicast* van dirigidas a un grupo concreto de usuarios (grupo *multicast*).

El mayor potencial para proporcionar servicios multimedia mediáticos lo presentan las redes de radiodifusión digitales terrestres especialmente diseñadas para servicios móviles. Sólo estas redes tienen las capacidades necesarias para soportar un consumo a gran escala de este tipo de servicios, ya que pueden difundir contenidos 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.

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 adaptado para terminales móviles [3]. 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*). Esto es, mayores potencias de transmisión y, especialmente, un considerable 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 comportamiento representa una parte significativa de los gastos de capital OPEX (*operational expenditure*) [4]. Por tanto, la cantidad de usuarios que quieran acceder al servicio multimedia debe ser lo suficientemente elevada para que la instalación y utilización de transmisores DVB-H esté justificada.

Hoy en día, los sistemas de infraestructura híbrida de radiodifusión-celular están considerados como la opción con mejores posibilidades para proveer de servicios multimedia mediáticos a bajo coste. La reciente aparición de terminales multimodo (que soportan diferentes accesos radio), posibilita el desarrollo de estos nuevos métodos de distribución de servicios multimedia mediáticos. La combinación y complementación de estos sistemas permite superar las limitaciones de las redes celulares y de radiodifusión tradicionales, y aprovechar las ventajas de cada una de ellas. La red de radiodifusión permite la transmisión masiva de datos con un uso eficiente de los recursos de red, pero solamente en las zonas donde es estrictamente necesario, mientras que la red celular es capaz de transmitir este tipo de servicios en los casos en los que haya pocos usuarios que servir (HSDPA), o el número de servicios multimedia ofrecidos sea pequeño (MBMS). Además, la red celular proporciona capacidades de comunicación interactiva, a diferencia de DVB-H. Un esquema básico de un sistema híbrido de radiodifusión-celular se puede ver en la Fig. 1.

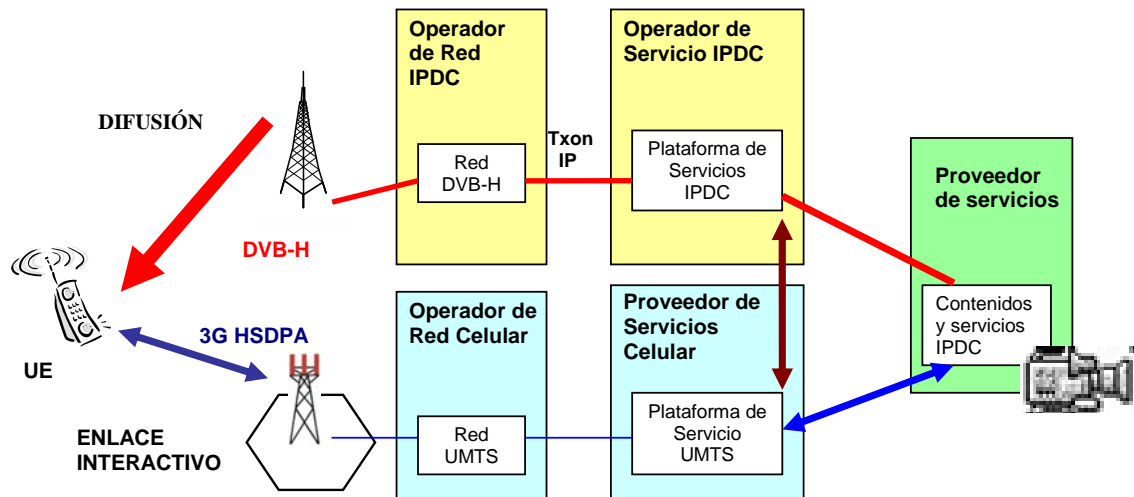


Fig.1. Esquema básico de un sistema híbrido con DVB-H y HSDPA.

En esta tesina se estudia el rendimiento de las redes híbridas HSDPA/MBMS y HSDPA/DVB-H para proporcionar *streaming* de servicios de televisión en escenarios reales y se realiza la planificación de una red híbrida para la provisión de servicios de *streaming* en la ciudad de Valencia. En primer lugar se considerará la transmisión del servicio a través de la red celular 3G, utilizando HSDPA (transmisiones punto a punto), ya que esta red está totalmente desplegada en el escenario considerado. De este modo comprobaremos si la red celular es suficiente para proporcionar este servicio, y si no lo es, obtendremos las limitaciones que presenta. Debido a que la red 3G está diseñada para proporcionar varios tipos de servicio se tendrá en cuenta que, aparte del servicio de TV (compuesto por una serie de canales de TV móvil) se proporcionará voz, datos etc.

A continuación se estudiará la posibilidad de complementar HSDPA con MBMS. Como se ha comentado, MBMS utiliza transmisiones punto a multipunto y no tiene limitaciones en cuanto al número de usuarios a los que se puede transmitir simultáneamente. Es por esto que se considerará que en zonas donde la densidad de usuarios que demandan el servicio de TV es elevada, alguno de los canales de TV (el más o los más populares) será transmitido mediante MBMS, mientras que el resto de servicios y canales de TV se servirán con HSDPA.

Por último, se estudiará la planificación de una red híbrida HSDPA/DVB-H. Se complementará la red celular desplegada en la ciudad de Valencia con transmisores DVB-H. La localización de dichos transmisores se decidirá mediante un proceso en el que se obtendrá un mapa de usuarios que mostrará el porcentaje de usuarios del servicio de TV con respecto al total que hay en cada una de las celdas celulares, y por tanto la conveniencia de colocar en ella el transmisor DVB-H. Lógicamente la ganancia obtenida por el transmisor DVB-H será mayor cuantos más usuarios del servicio de TV haya en la celda celular. En este caso, la red DVB-H será la encargada de servir a todos los usuarios del servicio de TV (todos los canales de TV) que se encuentren dentro de la zona de cobertura de los transmisores escogidos.

La estructura del documento es la siguiente: En la Sección II se realiza una descripción de las tecnologías involucradas en este trabajo. La Sección III contiene la descripción del escenario, de los servicios y de las redes que se van a utilizar. En la sección IV se muestra los resultados obtenidos del estudio previo en el que se utiliza una densidad de usuarios constante por celda celular. Esto servirá para determinar la capacidad de la red celular en cuanto a número de usuarios que es capaz de servir. La sección V muestra los resultados obtenidos en el escenario real de la ciudad de Valencia. Por último la sección VI presenta el estudio de la gestión de recursos radio cuando el servicio multimedia que se quiere ofrecer es de descarga de ficheros y la sección VII describe las conclusiones, seguida de los agradecimientos y de la bibliografía.

## II. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS.

### II.1. HSDPA.

Los sistemas celulares tradicionales han asignado típicamente los recursos de forma relativamente estática, donde la tasa de datos de un usuario no cambiaba o lo hacía muy lentamente. Este enfoque resultaba adecuado para aplicaciones con una tasa aproximadamente constante como la voz, pero para datos que se presentan en ráfagas y cuyas necesidades de recursos varían rápidamente, la asignación rápida de recursos compartidos resulta más eficiente. Esta es la principal característica de HSDPA (*High Speed Data Packet Acces*).

Esta tecnología busca la compatibilidad con las versiones anteriores, minimiza los cambios en UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y UE (*User Equipment*) y considera las limitaciones del UE. Así por ejemplo, comparte la banda de frecuencias con la Release99 (2110-2170 MHz) empleando multiplexación en código.

El concepto HSDPA engloba un conjunto de mejoras (ya empleadas algunas de ellas en las evoluciones de GSM: GPRS, EGDE...) que hacen progresar la tecnología inicial de UMTS para conseguir velocidades de bajada de datos (en enlace descendente o *downlink*) de hasta 14 Mbps. Con HSDPA se persigue proporcionar alta velocidad, muy baja latencia y la posibilidad de dar servicio a gran cantidad de usuarios, optimizándose el uso de la red para la transmisión en el dominio de paquetes.

El aumento de velocidad viene dado por el uso de modulaciones más eficientes, (16QAM frente a QPSK) y esquemas de modulación y codificación adaptativos, que como su nombre indica sirven para adaptarse a las condiciones del canal radio. Tradicionalmente se ha utilizado el control rápido de potencia en los sistemas CDMA para combatir las variaciones de *fading* en el enlace radio y para mantener una relación señal a ruido constante. Este es un enfoque adecuado para aquellos servicios que requieren una tasa de datos constante, como los servicios de voz. Sin embargo, para servicios de datos, es más eficiente controlar la relación señal a ruido ajustando la tasa binaria

mientras se mantiene la potencia de transmisión constante. A esto se le conoce normalmente como adaptación al enlace (*link adaptation*).

Con la adaptación al enlace se reducen las retransmisiones, que además se realizan directamente entre nodo B y móvil con lo que este mecanismo es más rápido. La retransmisión en HSDPA se realiza con un mecanismo ARQ mejorado, el HARQ (*Hybrid ARQ*) que al combinar la información de diferentes retransmisiones disminuye notablemente la cantidad de las mismas requeridas en otras capas superiores.

La utilización de un canal compartido de transmisión en HSDPA implica que una cierta fracción del total de los recursos radio en *downlink* disponibles dentro de una celda, los códigos de canalización y la potencia de transmisión, son vistos como un recurso común, dinámicamente compartidos entre los usuarios, principalmente en el dominio del tiempo. La utilización del canal compartido de transmisión, permite la posibilidad de asignar rápidamente una gran cantidad de recursos *downlink* a un usuario cuando sea necesario. La naturaleza compartida de este canal hace que la tasa binaria neta ofrecida a cada usuario no sea fija ni constante en cada momento, sino que dependa de la carga de la celda y de las condiciones radioeléctricas.

El mecanismo que planifica trama a trama a qué usuario se transmite es el *scheduling*. Cada TTI (*Transmisión Time Interval*) mira las condiciones de cada usuario y decide a quien transmitir dependiendo del criterio escogido para ello. La utilización de un tiempo de TTI corto (2 ms) reduce el retardo total y mejora el seguimiento de las variaciones rápidas del canal mediante la adaptación del enlace y el *scheduling*.

## II.2. MBMS.

Con MBMS el mismo contenido puede ser transmitido unidireccionalmente mediante una conexión p-t-m a múltiples usuarios, normalmente en varias celdas para cubrir el área en la que se quiere proporcionar el servicio. MBMS utiliza el canal FACH (*Forward Access Channel*), modulación QPSK y turbo códigos en la capa física, y una potencia y una velocidad de transmisión de información constante durante toda la transmisión del servicio. La información de control sobre los servicios disponibles, las celdas vecinas que transmiten los mismos contenidos, etc. se transmite en un canal FACH específico.

Como los servicios MBMS están dirigidos a múltiples usuarios, no es posible realizar una adaptación dinámica de los parámetros de transmisión según las condiciones de recepción de los usuarios como en HSDPA. Además durante la transmisión p-t-m MBMS no se utiliza el enlace ascendente, ya que no hay ningún tipo de comunicación entre los terminales y el servidor MBMS. La capa de control del enlace radio RLC (*Radio Link Control*) opera en modo sin reconocimiento, por lo que cada intervalo de transmisión, (*Transmission Time Interval*, TTI), los terminales identifican y descartan los bloques de transporte de datos erróneos, sin solicitar su retransmisión. En la práctica, como todos los datos transmitidos en un TTI son codificados a la vez por el turbo

codificador de la capa física, y esta se caracteriza por una muy rápida transición entre recepción casi perfecta a recepción nula, en la inmensa mayoría de las ocasiones se reciben o todos los datos transmitidos en el TTI correctamente, o no se recibe ninguno.

La configuración de los parámetros de transmisión se debe hacer estadísticamente para servir al usuario en el peor caso contemplado. En general este suele ser en el borde de la celda, ya que los sistemas 3G están fundamentalmente limitados por interferencias (procedentes tanto de la propia celda como de las celdas vecinas). Por este motivo, se suele decir que los servicios MBMS están limitados en potencia, ya que son necesarias potencias muy elevadas para conseguir niveles aceptables de cobertura. Sin embargo, estos mismos usuarios pueden beneficiarse del hecho de que reciben la señal proveniente de varias celdas para combinar señales y obtener una ganancia por macro diversidad. De este modo se puede conseguir una reducción significativa de la potencia de transmisión en comparación con el caso en el que se recibe la señal de una única celda [5]. Sin embargo estas técnicas incrementan la complejidad y el coste de los terminales. Dos estrategias de combinación son posibles en MBMS: combinación por selección (*selective combining*), y combinación suave (*soft combining*). En la combinación por selección, las señales recibidas de diferentes celdas (sectores) son decodificadas individualmente, de tal modo que los terminales seleccionan en cada TTI los bloques de datos correctos (si los hubiera). De este modo se incrementan las posibilidades de recibir correctamente la señal a costa de incrementar la complejidad del proceso de decodificación del turbo código. Una implementación más sencilla consiste en decodificar sólo la señal recibida de mayor calidad. En la combinación suave, las señales radioeléctricas recibidas de los distintos emplazamientos son combinadas coherentemente antes de la decodificación. De este modo se obtienen mejores prestaciones, ya que no solamente se obtiene una ganancia de diversidad, sino también una ganancia de potencia en comparación con la combinación por selección.

Otra característica significativa de MBMS es que soporta largos TTI, de hasta 80 ms, para proporcionar diversidad temporal para combatir los desvanecimientos rápidos de la señal debidos a la movilidad de los usuarios (*fast fading*). Esto aumenta la latencia de la red, sin embargo la naturaleza unidireccional de MBMS hace que no sea percibido por los usuarios.

Por último, en MBMS se ha adoptado un mecanismo de corrección de errores FEC en la capa de aplicación basado en códigos Raptor (para tanto servicios de *streaming* como de descarga de ficheros), para beneficiarse de la diversidad espacial debida a la movilidad de los usuarios, con el objetivo de compensar los errores en la transmisión que experimentan los usuarios en movimiento por el hecho de utilizar una potencia y velocidad de transmisión constante [5]. Con los códigos Raptor, un número de paquetes fuente son inicialmente codificados en un mayor número de paquetes codificados, los cuales son transmitidos a los terminales, no haciendo falta recibir correctamente todos los paquetes para recuperar el contenido original.



Todas estas técnicas de diversidad se pueden observar gráficamente en la Fig. 2. En ella se muestran los tres tipos de diversidad mencionados. En primer lugar la macro diversidad con las dos posibles técnicas *selective combining* y *soft combining*. Se representa por bloques el procedimiento que sigue el terminal móvil en ambas técnicas. En segundo lugar se muestra la diversidad temporal. Se compara el aumento de longitud en el TTI en MBMS (80 ms) frente a HSDPA (2 ms). El pequeño tamaño del TTI en HSDPA permite seguir las variaciones rápidas de la señal (*fast fading*), mientras que en MBMS se opta por alargarlo y hacer un promediado. Por último se muestra la diversidad espacial conseguida gracias a la utilización de los códigos Raptor que generan paquetes adicionales de paridad que compensan las posibles pérdidas de paquetes del fichero original debido a la utilización de una potencia y una velocidad de transmisión constante.

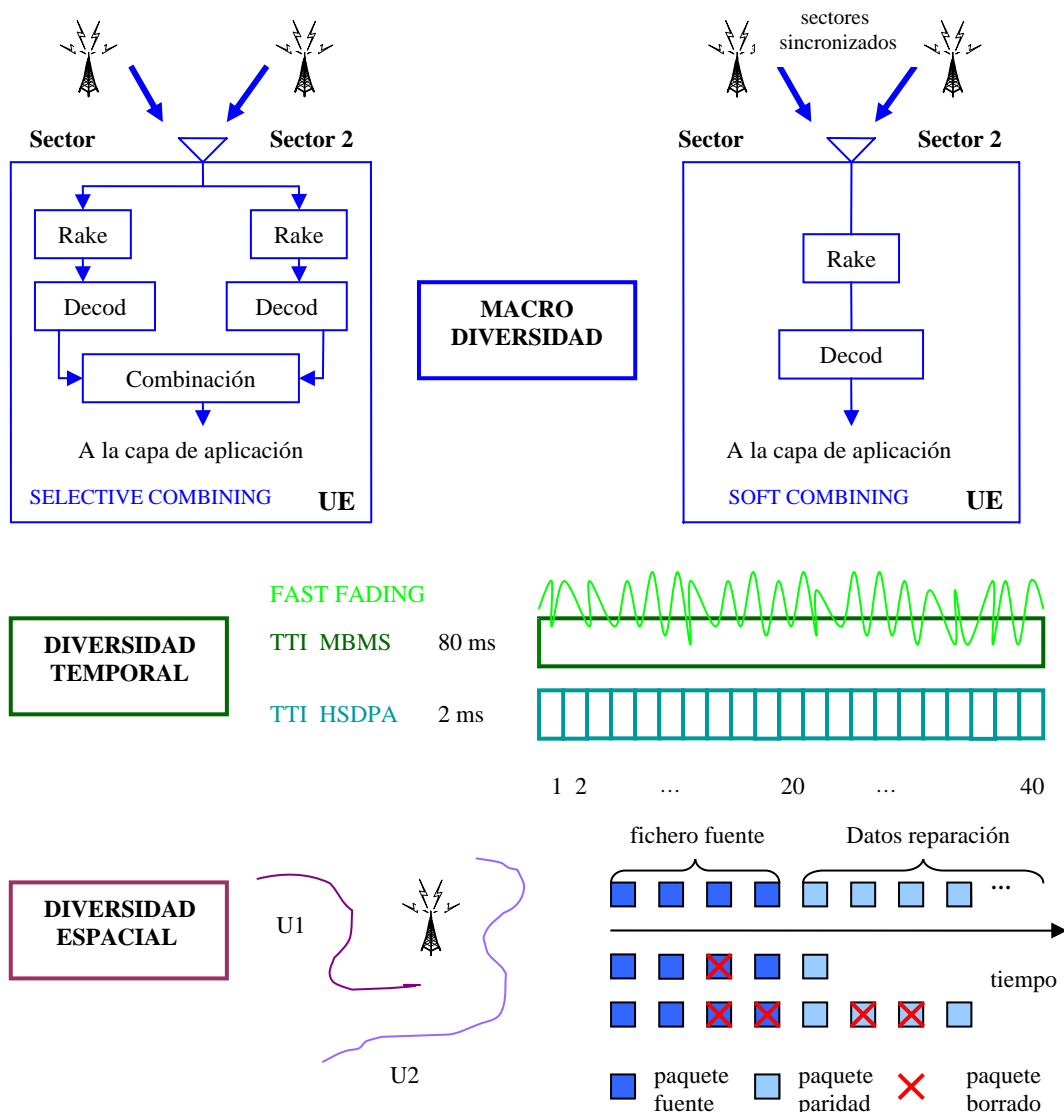


Fig.2. Técnicas de diversidad en MBMS.

II.3. DVB-H.

DVB-H (*Digital Video Broadcast-Handhelds*) es el estándar europeo para la televisión digital terrestre especialmente diseñada para servicios móviles. DVB-H puede ser desplegado en el espectro asignado a la TV analógica y digital terrestre (470-862 MHz), y puede reutilizar la infraestructura *broadcast* existente, caracterizada por torres muy altas y elevadas potencias de transmisión. Mediante la tecnología COFDM, DVB-H puede transmitir por radiodifusión contenido IP multimedia a teléfonos móviles a tasas binarias que van desde los 5 Mb/s a los 10 Mb/s en un canal de 8 MHz.

DVB-H es una extensión del estándar de TV digital terrestre DVB-T, diseñada para ser capaz de transmitir contenidos a dispositivos de mano. Adopta la misma capa física que DVB-T, y añade nuevas características en la capa de enlace, siendo capaz de compartir la misma infraestructura de red (por ejemplo transmisores, multiplexores, etc.). En contraste con DVB-T, donde el contenido se transmite en forma de paquetes MPEG-2, DVB-H está basado en IP, es decir, todo el contenido se transmite en forma de paquetes IP. MPE (*Multi-Protocol Encapsulation*) es el protocolo de adaptación utilizado para encapsular múltiples flujos IP (servicios DVB-H) en flujos de transporte MPEG-2 de DVB-T. Las principales características introducidas, en comparación a DVB-T, son las siguientes:

- Técnica de transmisión discontinua (*Time Slicing*), es decir, los datos son enviados periódicamente en *bursts*. El objetivo es reducir el consumo de potencia de los terminales.
- Procedimiento opcional de reparación de errores en adelante FEC (*Forward Error Correction*) en la capa de enlace, que asegura una recepción más robusta, especialmente bajo condiciones de movilidad y de interferencias.
- Elevada flexibilidad en el diseño de redes de frecuencia única SFN (*Single Frequency Networks*), permitiendo más opciones en los tamaños de las celdas y soporte para receptores a elevadas velocidades.

La técnica de del *Time Slicing* consiste en el envío de los datos de cada servicio en ráfagas. Las ráfagas de datos se transmiten a muy altas velocidades de transmisión en comparación con la tasa neta requerida por el servicio si se utilizaran los mecanismos tradicionales de *streaming*, consiguiendo de este modo un flujo de servicio continuo en el receptor. Esto se muestra en la Fig. 3. El receptor conoce los instantes en los que recibirá la ráfaga de datos correspondiente al servicio deseado a través de la señalización en tiempo real y se apaga durante el tiempo que no recibe el servicio deseado. Esto significa que el receptor está inactivo durante la mayor parte del tiempo, consiguiendo ahorros de hasta 90% de energía.

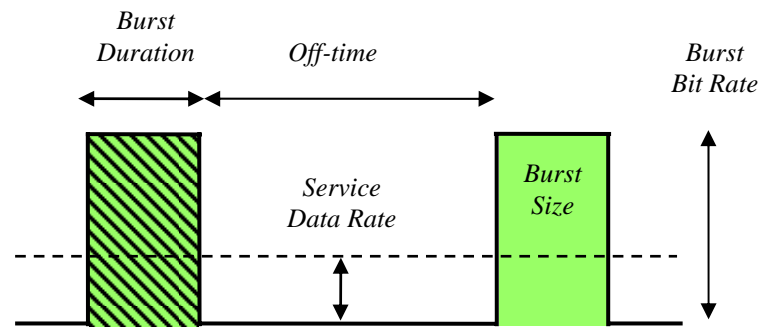


Fig.3. Técnica de transmisión discontinua en DVB-H.

DVB-H es un estándar de transmisión que especifica la capa física y de enlace, pero no define los protocolos de transporte, los formatos de codificación del audio y del vídeo, etc. El sistema extremo a extremo es conocido como sistema IP Datacast (IPDC), como se ha mencionado anteriormente en la introducción. El conjunto de especificaciones de IPDC contienen los protocolos necesarios de las capas altas para construir un sistema completo extremo a extremo, y especifica, entre otros, los protocolos de transmisión del contenido, la guía electrónica de servicio para el anuncio y descubrimiento del servicio por parte de los usuarios, y mecanismos de protección de datos. Las especificaciones IPDC también describen todos los componentes que se requieren para incorporar DVB-H en un sistema híbrido celular y de radiodifusión.

En estos sistemas, tanto en DVB-H como en MBMS, se distinguen dos tipos de servicios de distribución de contenidos multimedia:

- Servicios de *streaming*: en los que un flujo continuo de audio, vídeo y subtítulos es transmitido a los terminales utilizando RTP (*Real-Time Transport Protocol*), los cuales son consumidos por el usuario durante la recepción, como en el caso de la TDT móvil. Estos servicios se caracterizan por tolerar ciertos errores en la transmisión, si la calidad del audio y vídeo es suficiente para proporcionar una experiencia de usuario satisfactoria.
- Servicio de transferencia de ficheros: en que los datos recibidos se almacenan en el dispositivo para su utilización posterior. Algunas aplicaciones comprendidas en esta categoría son: clips de video, periódicos digitales, descarga de software, etc. Un requisito común para todos estos servicios es la transmisión libre de errores (un solo bit erróneo corrompe el archivo completo convirtiéndolo en inservible para el receptor). Con el objetivo de incrementar la robustez de la transferencia de ficheros con DVB-H, en el estándar IPDC se ha adoptado otro mecanismo opcional de corrección de errores FEC en la capa de aplicación utilizando códigos Raptor [6].

### III. ESCENARIO DE DESPLIEGUE.

El escenario elegido para el estudio de rendimiento y planificación de redes híbridas es la ciudad de Valencia. Sobre el escenario se ha considerado una red 3G cuyos transmisores se presentan en la Fig. 4. En esta misma figura se muestra también el mapa de altura de edificios de Valencia.

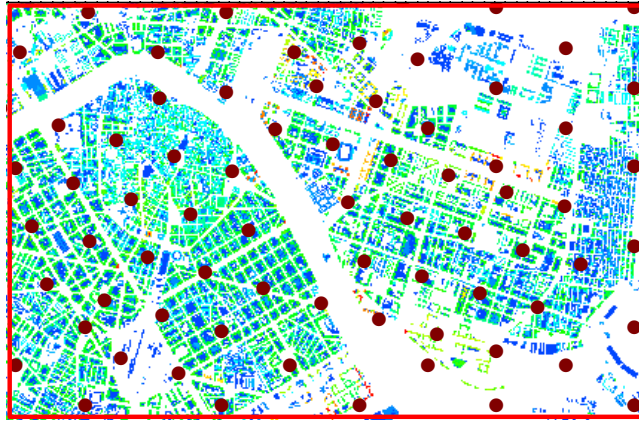


Fig.4. Escenario de despliegue y red 3G.

### III.1. DENSIDAD DE USUARIOS.

En el escenario de despliegue bajo estudio se han distinguido diferentes zonas en función de la densidad de población: urbano denso, urbano, suburbano. Adicionalmente, se han considerado zonas en las que la densidad de usuarios puede ser en ocasiones considerablemente mayor (centro ciudad, ciudad de las artes y las ciencias, etc.). La Fig. 5 muestra las zonas del escenario con diferentes valores de densidad de usuarios y la Tabla 1 presenta el valor de densidad para cada zona y su área.

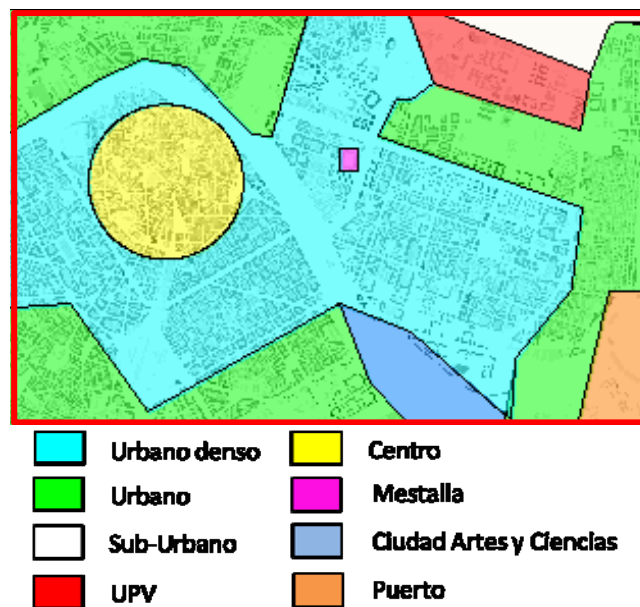


Fig. 5. Clasificación en zonas del escenario de despliegue según la densidad de usuarios para servicios multimedia turísticos.

Zona	Densidad de usuarios	Área (km <sup>2</sup> )
Urbano denso	2700 usuarios/km <sup>2</sup>	11.439 km <sup>2</sup>
Urbano	1900 usuarios/km <sup>2</sup>	17.311 km <sup>2</sup>
Sub-Urbano	1500 usuarios/km <sup>2</sup>	1.267 km <sup>2</sup>
UPV	3900 usuarios/km <sup>2</sup>	0.924 km <sup>2</sup>
Centro	7800 usuarios/km <sup>2</sup>	1.549 km <sup>2</sup>
Mestalla	1639100 usuarios/km <sup>2</sup>	0.035 km <sup>2</sup>
Ciudad Artes y Ciencias	5300 usuarios/km <sup>2</sup>	1.065 km <sup>2</sup>

<b>Puerto</b>	3800 usuarios/km <sup>2</sup>	2.688 km <sup>2</sup>
---------------	-------------------------------	-----------------------

Tabla 1. Densidad de usuarios y áreas de las zonas escogidas.

Los valores de densidad de usuarios en las zonas suburbano, urbano y urbano denso, han sido extraídos de censos realizados en la ciudad de Valencia. En el resto de zonas, se ha considerado una densidad de usuarios de acuerdo a una situación de carga máxima, es decir, en la zona de Mestalla se ha considerado la densidad de usuarios en un día de partido de fútbol, en la Universidad Politécnica de Valencia en un día de clase, etc.

### III.2. SERVICIOS.

Los servicios que proporciona la red 3G se muestran en la tabla 2. Como es lógico, el servicio prioritario en la red celular es el servicio de voz, ya que es la tarea fundamental de este tipo de redes. Además, la red celular también ofrece servicios de datos y multimedia interactivo. Como ejemplo de un servicio de datos podríamos tener la descarga de ficheros, y como ejemplo de servicio multimedia interactivo la descarga de videoclips. Finalmente está el servicio de TV, que se ha considerado el menos prioritario para la red celular, y que en este caso consta de 20 canales de televisión móvil. La tabla 2 muestra además las tasas binarias requeridas por cada uno de los servicios. En el caso de la TV móvil, que es el servicio bajo estudio, se obtendrán resultados para tres tasas binarias distintas (120, 240 y 384 kbps).

<b>Servicio</b>	<b>Tasa binaria</b>
<b>Voz</b>	12.2 kb/s
<b>Datos conmutados</b>	64 kb/s
<b>Multimedia interactivo</b>	144 kb/s
<b>Televisión</b>	120-240-384 kb/s

Tabla 2: Servicios proporcionados por la red celular y tasas binarias.

En cuanto a la probabilidad de que un usuario quiera acceder a un servicio o a otro, o lo que es lo mismo, la popularidad o probabilidad de cada uno de los servicios, se van a estudiar tres casos distintos. En un primer caso, que sería el más parecido al actual, el servicio más demandado y con diferencia es el de voz. En esta primera distribución de los servicios, los valores de probabilidad de han extraído del Report 6 del UMTS Forum como previsión para el año 2010. Además, se considerarán otras dos distribuciones en las que la probabilidad de que un usuario quiera acceder al servicio de TV móvil aumenta. En concreto, en la segunda distribución de servicios considerada la probabilidad del servicio de TV se duplica con respecto a la primera distribución, y en la tercera distribución se triplica. La finalidad de estas dos últimas distribuciones es obtener qué pasará en el futuro cuando la penetración del servicio de TV móvil aumente considerablemente. En la tabla 3 se muestran los valores de probabilidad utilizados.

<b>Servicio</b>	<b>Probabilidad</b>		
	<b>Distribución 1</b>	<b>Distribución 2</b>	<b>Distribución 3</b>

<b>Voz</b>	69.44%	55.44%	41.6%
<b>Datos conmutados</b>	9.26%	7.4%	5.6%
<b>Multimedia interactivo</b>	4.63%	3.91%	3%
<b>Televisión</b>	16.67%	33.25%	49.8%

Tabla 3: Servicios proporcionados por la red celular y tasas binarias.

La distribución de los distintos canales de TV móvil dentro del servicio global de TV es el siguiente: los canales 0 y 1 tienen un 25% de probabilidad, el canal 2 tiene un 15%, el canal 3 un 10% y los 16 canales restantes tienen un 1.56% de popularidad entre los usuarios cada uno.

### III.3. DESCRIPCIÓN DE LA RED 3G.

La red 3G que se va a estudiar consta de 71 emplazamientos con tres sectores (un total de 213 celdas) y antenas de 65° de ancho de haz. La tabla 4 muestra los parámetros más importantes del balance de enlace de la red 3G utilizada.

<b>Potencia transmitida, <math>P_{TX}</math></b>	43 dBm
<b>Ganancia de antena, <math>G_{TX}</math></b>	18 dBi
<b><math>G_{MS}</math></b>	0 dBi
<b>Pérdidas de cables y conectores</b>	$L_{BS}=3$ dB, $L_{MS}=0$ dB
<b>Factor de ruido, <math>F</math></b>	$F_{BS}=3$ dB, $F_{MS}=8$ dB
<b>Potencia de ruido</b>	$P_{NBS}=-106.2$ dBm, $P_{NMS}=-100.2$ dBm.

Tabla 4: Balance de enlace de la red 3G.

La potencia de transmisión disponible en la estación base para establecer el enlace de un servicio determinado depende del número y distribución de los usuarios puesto que todos ellos utilizan una fuente de potencia común. Por lo tanto en este caso se expresa la potencia total disponible en la estación base, que se ha considerado de 20 W (43 dBm). De estos 20 W de potencia de transmisión en *downlink*, se les asigna entre un 5% a los canales de control. En cada una de las celdas se aplica un control de potencia en el que se obtiene la potencia que necesita cada usuario en función de su posición, del servicio al que quiera acceder y del nivel de interferencias que recibe. Se ha considerado que en primer lugar se sirve a los usuarios de voz, ya que es el servicio prioritario, a continuación el servicio de datos y el servicio multimedia interactivo, y por último el servicio de TV. Entre los usuarios de un mismo servicio, tienen preferencia aquellos que necesiten una menor potencia.

Es importante resaltar que al aumentar el número de usuarios en la celda no solo se produce un aumento en la interferencia del sistema, sino que también se reduce la potencia disponible para cada usuario, pudiendo darse el caso de no ser posible servir a un nuevo usuario por no disponer la estación base de recursos de potencia suficientes.

La Fig. 6 muestra el mapa del mejor servidor de la red 3G para cada punto del escenario de despliegue.

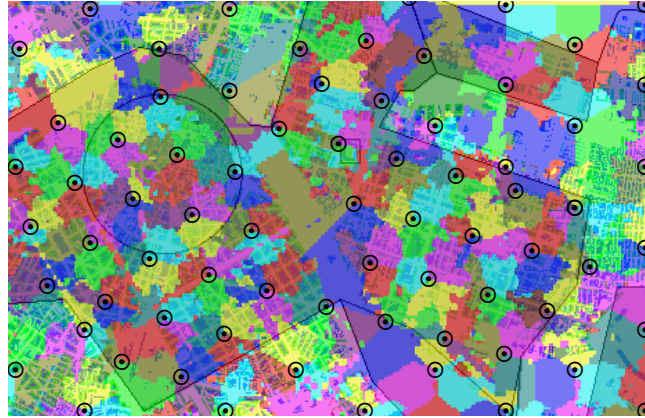


Fig. 6. Mapa "Best Server".

#### III.4. DESCRIPCIÓN DE LOS TRANSMISORES DVB-H.

Sobre la red 3G considerada, se va a realizar un estudio de la posibilidad de complementarla con transmisores DVB-H, para que estos se encarguen de la transmisión del servicio de TV. La posición de estos transmisores será aquella que maximice el número total de usuarios de dicho servicio.

La recepción de DVB-H se ha modelado mediante una antena omnidireccional, y la altura del receptor se ha considerado de 1.5 m. La Tabla 5 muestra los parámetros más relevantes del balance de potencias.

El modo de transmisión elegido es el modo FFT 8K, intervalo de guarda 1/4 relativo al período útil de símbolo y codificación MPE-FEC 3/4. Se ha utilizado dos modulaciones distintas: QPSK y 16-QAM, con ratios de codificación de 1/2 y 2/3. Los diferentes modos de transmisión permiten velocidades superiores a los 100 km/h a la frecuencia considerada. En cuanto a la potencia del transmisor, se realizará un estudio del nivel de cobertura en función de potencia, para escoger aquella que optimice el radio de cobertura en la zona que queramos.

	<b>DVB-H 482 MHz</b>
<b>Ancho de Banda de Canal</b>	8 MHz
<b>Frecuencia</b>	482 MHz
<b>FFT</b>	8K
<b>Modulación</b>	QPSK 1/2 QPSK 2/3

	16-QAM 1/2 16-QAM 2/3	
<b>GI</b>	1/8	
<b>MPE-FEC</b>	$\frac{3}{4}$	
<b>Duración GI</b>	112 $\mu$ s	
<b>TRANSMISOR</b>		
<b>PIRE transmitida</b>	Barrido en potencia	
<b>RECEPTOR</b>		
<b>Ganancia antena receptora</b>	-10 dBi	
<b>Ancho de banda señal transmitida</b>	7.6 MHz	
<b>Factor de ruido</b>	6 dB	
<b>Requisito CNR</b>	<b>QPSK 1/2</b>	9.5 dB
	<b>QPSK 2/3</b>	12.5 dB
	<b>16-QAM 1/2</b>	15.5 dB
	<b>16-QAM 2/3</b>	18.5 dB
<b>Nivel de ruido</b>	-99.2 dBm	
<b>Capacidad</b>	<b>QPSK 1/2</b>	4.1 Mb/s
	<b>QPSK 2/3</b>	5.5 Mb/s
	<b>16-QAM 1/2</b>	8.3 Mb/s
	<b>16-QAM 2/3</b>	11.1 Mb/s

Tabla 5: Balance de enlace de los transmisores DVB-H.

Finalmente, las pérdidas del enlace radio se calculan mediante el modelo de propagación *Okumura-Hata* más difracción.

#### IV. ESTUDIO PREVIO: ESCENARIO SINTÉTICO.

Como estudio previo a la planificación en el escenario real de la ciudad de Valencia, se ha realizado el estudio de la transmisión de los servicios en un escenario sintético en el que la distribución de las celdas, el tamaño de ellas y los mapas de terreno y edificios son los mismos que en el escenario real, pero en el que se ha considerado una densidad de usuarios constante por celda celular, es decir, en cada una de las celdas hay el mismo número de usuarios activos. El objetivo de esta sección es ver los límites de HSDPA en cuanto al número de usuarios que puede servir en función de las tasas binarias de los servicios y de distintas distribuciones de servicio. Además, también se obtendrán las prestaciones de MBMS y DVB-H, considerando que tienen cobertura en todo el escenario, en función de distintos parámetros detallados a continuación.

##### IV.1. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS CON HSDPA.

En este apartado se desea obtener el valor umbral de número de usuarios por celda celular, a partir del cual la red HSDPA disminuye sus prestaciones en cuanto a porcentaje de usuarios no servidos. En primer lugar, se ha estudiado el caso en el que todos los usuarios de la celda quieren acceder a un mismo servicio, considerando como servicios posibles los detallados en la tabla 2. La Fig. 7 muestra el rendimiento de la red HSDPA en este caso. Se observa que para la transmisión del servicio de voz no hay problemas en los valores de usuarios por celda considerados. Como la tasa binaria requerida es pequeña (12.2 kb/s), es posible servir a todos los usuarios. Conforme la tasa binaria requerida aumenta, la SINR necesaria para ser capaz de recibir el servicio aumenta, y por



tanto la potencia que hay que dedicar a cada usuario también. Es por esto que para el resto de servicios llega un momento en el que la red HSDPA no dispone de más potencia para transmitir, por lo que el porcentaje de usuarios no servidos aumenta. Lógicamente, las curvas de los servicios que requieren una tasa binaria mayor empiezan a crecer antes.

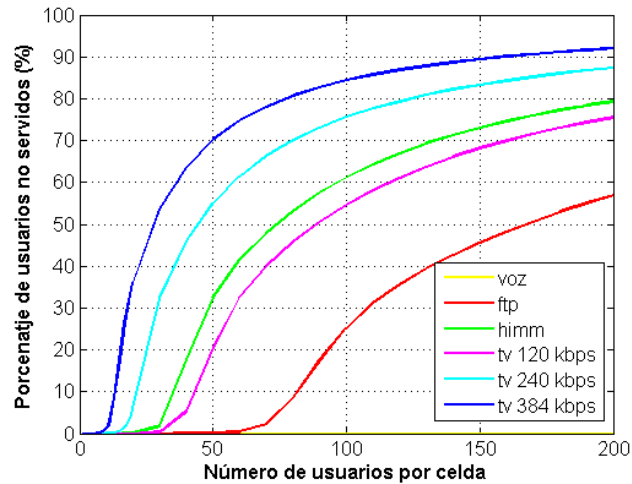


Fig.7. Porcentaje de usuarios no servidos (%) vs. Número de usuarios por celda. Transmisión de un único servicio. Curvas independientes.

La Fig. 8 muestra los resultados obtenidos en el caso ya más real en el que los usuarios dentro de una misma celda celular quieren acceder a distintos servicios. Dichos resultados son los correspondientes a la distribución de servicios 1. Se observa que la red HSDPA no es capaz de satisfacer a todos los usuarios. El porcentaje de usuarios no servidos aumenta, lógicamente, con el número de usuarios por celda y con la tasa binaria considerada para el servicio de TV. Conforme el número de usuarios por celda aumenta, las curvas de distintas tasas binarias van acercándose, tendiendo a un mismo valor. Este valor es el correspondiente al punto en el que la red HSDPA descarta la transmisión del servicio de TV, ya que es el menos prioritario, siendo por tanto indiferente la tasa binaria de dicho servicio.

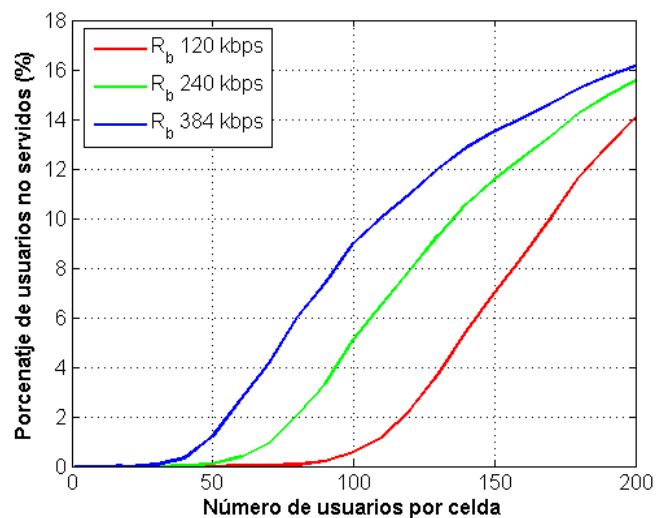


Fig.8. Porcentaje de usuarios no servidos (%) vs. Número de usuarios por celda.  
Transmisión de los 4 tipos de servicio con la distribución de servicios 1.

La Fig. 9 muestra el mismo resultado pero ahora para las tres distribuciones de servicio consideradas. Como las distribuciones 2 y 3 tienen más usuarios queriendo acceder al servicio de TV, el doble y el triple respectivamente, la pendiente de sus curvas es mayor. Además, para un mismo valor de usuarios por celda, el porcentaje de usuarios no servidos guarda la misma relación que los usuarios del servicio de TV entre las distribuciones. Para el caso de 200 usuarios y tasa binaria elevada por ejemplo, la distribución 1 está en torno al 15% de usuarios no servidos, la distribución 2 en torno al 30% y la distribución 3 en torno al 45%.

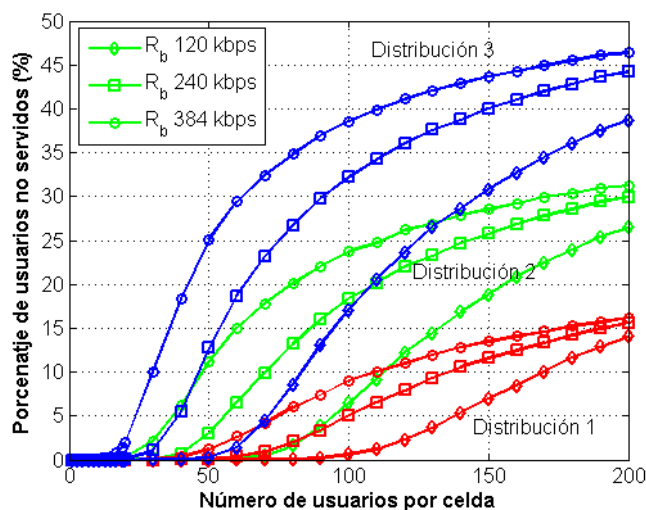


Fig.9. Porcentaje de usuarios no servidos (%) vs. Número de usuarios por celda.

De estas figuras obtenemos el número de usuarios umbral a partir del que consideramos que la red HSDPA necesita complementarse con otras redes para proporcionar un servicio de TV y ser capaz de satisfacer a la gran mayoría de usuarios. Estos valores los utilizaremos en el estudio del escenario real. Se va a considerar que a partir del 1% de usuarios no servidos, la red no da buen resultado. De este modo obtenemos la tabla 6.

$R_{TV}$	Número umbral de usuarios por celda		
	Distribución 1	Distribución 2	Distribución 3
120 kb/s	110	75	57
240 kb/s	71	42	30
384 kb/s	47	24	18

Tabla 6: Número umbral de usuarios por celda a partir del que la red HSDPA necesita complementarse con otras redes. Criterio de calidad de servicio del 1% de usuarios servidos.

#### IV.2. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS CON HSDPA Y MBMS.

Una primera opción para complementar a la red HSDPA es utilizar MBMS para proporcionar algunos de los canales del servicio de TV móvil. MBMS, como se ha comentado anteriormente, no tiene la capacidad suficiente como para proporcionar todos los canales de TV, pero sí que puede

ser de ayuda para HSDPA al no tener limitación en el número de usuarios a los que puede servir. Es por esto que se va a considerar que MBMS proporciona los canales de TV más populares, es decir, los que tienen una mayor probabilidad de ser solicitados. En este apartado se va a asumir que MBMS tiene cobertura en todo el escenario.

#### IV.2.1. Estudio de cobertura de MBMS

Antes de pasar a analizar los resultados de la red híbrida HSDPA/MBMS en el escenario con densidad constante, se debe hacer un estudio previo de MBMS en el que se estudie su nivel de cobertura en el escenario considerado en función de la potencia de transmisión asignada a los canales de TV, la tasa binaria del servicio y la utilización de macro-diversidad. Como técnica de macro-diversidad se va a utilizar el *soft combining* que, como se ha explicado en el estado del arte de MBMS, se basa en la combinación coherente de las señales recibidas de distintas estaciones base antes de la decodificación. De este modo, aparte de obtener una ganancia de diversidad se obtiene también una ganancia en potencia. Los resultados del estudio de cobertura de MBMS se muestran en la Fig. 10.

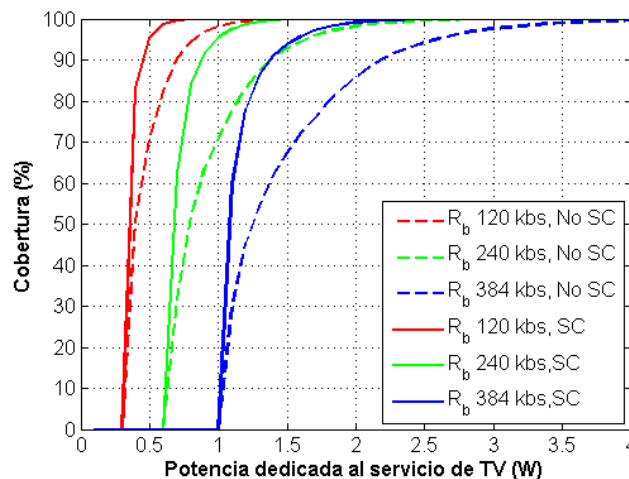


Fig.10. Nivel de cobertura MBMS (%) vs. Potencia dedicada al servicio de TV. Con y sin *soft combining* y para  $R_{TV}$  120, 240, y 384 kb/s

En la figura se observa que obviamente se necesita menor potencia de transmisión para servicios con menores tasas binarias. Además, la utilización de la técnica de macro-diversidad *soft combining* mejora considerablemente los resultados, llegando en este caso al 100% de nivel de cobertura con aproximadamente la mitad de potencia, comparado con el caso de transmisión sin macro-diversidad. La tabla 7 muestra los valores de potencia asignada al servicio de TV para alcanzar el 100% de cobertura MBMS en la celda. Estos valores son los que se utilizarán de ahora en adelante en el caso en el que se utilice MBMS para la provisión de contenidos multimedia. Además, se va a suponer en todos los casos que MBMS implementa *soft combining*.

$R_{TV}$	Potencia dedicada al servicio de TV
----------	-------------------------------------

	<b>Sin macro-diversidad</b>	<b><i>Soft-combining</i></b>
<b>120 kb/s</b>	1.5 W	0.8 W
<b>240 kb/s</b>	3 W	1.5 W
<b>384 kb/s</b>	4 W	2.4 W

Tabla 7: Potencia dedicada al servicio de TV para alcanzar el 100% de cobertura MBMS.

#### IV.2.2. Resultados red híbrida HSDPA/MBMS

Las Fig. 11, 12 y 13 muestran la mejora obtenida, en cuanto a usuarios no servidos, al complementar la red HSDPA con MBMS para la provisión de canales de TV de 120 kb/s cada uno, para las distribuciones de servicio 1, 2 y 3 respectivamente. La curva negra corresponde al caso en el que se utiliza la red HSDPA solamente. El resto de curvas son las obtenidas considerando que se transmite el canal de TV más popular, de entre los 20 canales que hay, con MBMS (curva roja), que se transmiten los dos canales de TV más populares con MBMS (curva verde), los tres canales de TV más populares con MBMS (curva rosa) y así sucesivamente hasta llegar al caso en el que se transmiten los 5 canales de TV más populares con MBMS (curva azul).

En general se obtiene una ganancia que va desde el 3% de usuarios más servidos en el peor caso (distribución 1, 125 usuarios) hasta el 33.6% en el mejor caso (distribución 3, 200 usuarios). Como era de esperar, la ganancia obtenida por utilizar MBMS es mayor cuanto un mayor porcentaje de usuarios solicitan el servicio de TV, es decir, en la distribución 3.

En las tres figuras se obtiene que es eficiente utilizar MBMS para transmitir hasta 4 canales de TV. Sin embargo, transmitir 5 canales de TV ya no resulta eficiente, y esto se ve reflejado en el porcentaje de usuarios no servidos. Esto es debido a que MBMS y HSDPA comparten los recursos de la estación base, por lo que llega un momento en el que el consumo de potencia de MBMS para proporcionar un canal de TV, que quizás no esté solicitando mucha gente, no compensa la pérdida de potencia para HSDPA con la que podría servir a bastantes usuarios de voz. Esto es lo que ocurre en este caso en el que la distribución de la popularidad de los canales de TV utilizada tiene mucho que ver. De entre todos los usuarios del servicio de TV un 25% pedirán el canal 0 o el 1, un 15% pedirán el canal 2, un 10% el canal 3, y a partir del cuarto canal hasta el número veinte solamente un 1.56% del total de los usuarios lo solicitarán. Esta reducida probabilidad para esos 16 canales restantes hace que no sea eficiente transmitir uno de ellos mediante MBMS, ya que apenas habrá usuarios queriendo acceder a él.

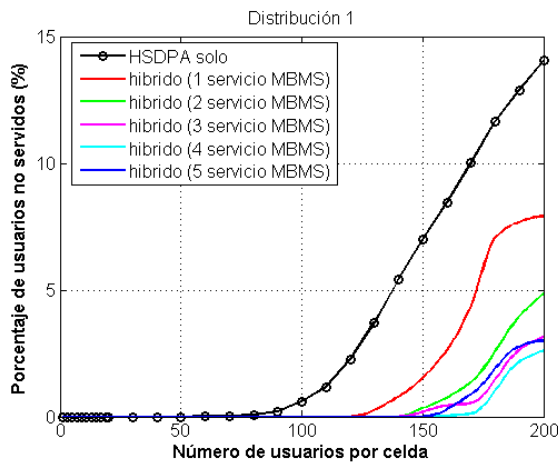


Fig.11. Porcentaje de usuarios no servidos (%) vs. Número de usuarios por celda. Distribución de servicios 1.

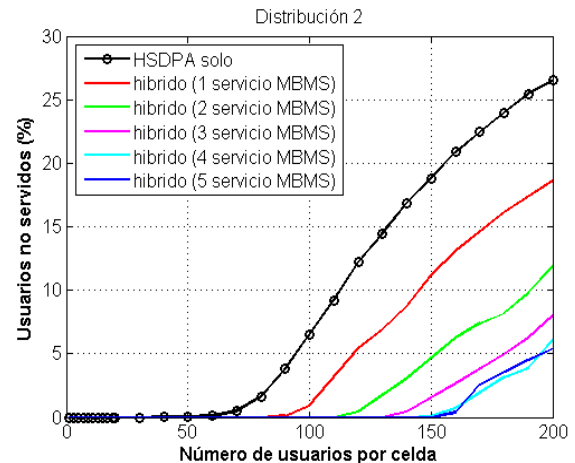


Fig.12. Porcentaje de usuarios no servidos (%) vs. Número de usuarios por celda. Distribución de servicios 2.

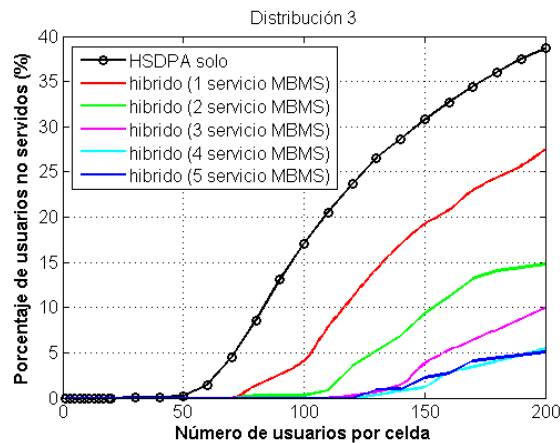


Fig.13. Porcentaje de usuarios no servidos (%) vs. Número de usuarios por celda. Distribución de servicios 3.

### IV.3. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS CON HSDPA Y DVB-H.

La otra opción considerada como red híbrida es la de complementar la red celular HSDPA con la red de radiodifusión digital terrestre DVB-H. Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de red es la opción con mejores posibilidades para proveer de servicios multimedia mediáticos a un elevado número de usuarios simultáneamente. Presenta la capacidad necesaria para proporcionar gran cantidad de contenido multimedia, y los recursos consumidos no son compartidos con HSDPA como ocurría con MBMS. Sin embargo, el principal inconveniente de DVB-H es la gran cantidad de infraestructura de red necesaria para proporcionar niveles aceptables de cobertura y el elevado coste del despliegue. En este apartado se va a asumir que DVB-H tiene cobertura en todo el escenario.

#### IV.3.1. Estudio de cobertura de DVB-H

Al igual que en el caso de MBMS, es necesario realizar un estudio de cobertura de DVB-H en el escenario considerado previamente. La Fig. 14 muestra las distintas curvas de nivel de cobertura de

un único transmisor DVB-H intentado cubrir el escenario completo, en función de potencia transmitida (en dBW) y para los cuatro modos de transmisión considerados, mencionados en la sección III.4. Se observa que el modo de transmisión QPSK1/2 es el que mejores resultados presenta en cuanto a cobertura, por lo que es el modo de transmisión que se va a utilizar de ahora en adelante para DVB-H. Sin embargo, vemos que un único transmisor no es suficiente para dar un elevado nivel de cobertura a toda el área de servicio, ya que utilizar una potencia de 1000 W no es viable. La Fig. 15 muestra el nivel de cobertura alcanzado por distintos números de transmisores y potencias utilizadas. Se observa que utilizando varios transmisores con una potencia de transmisión considerablemente menor se puede alcanzar un mejor nivel de cobertura que utilizando un único transmisor con una potencia muy elevada. Vamos a considerar que la configuración óptima es la correspondiente a 10 transmisores DVB-H transmitiendo a una potencia de 40 W.

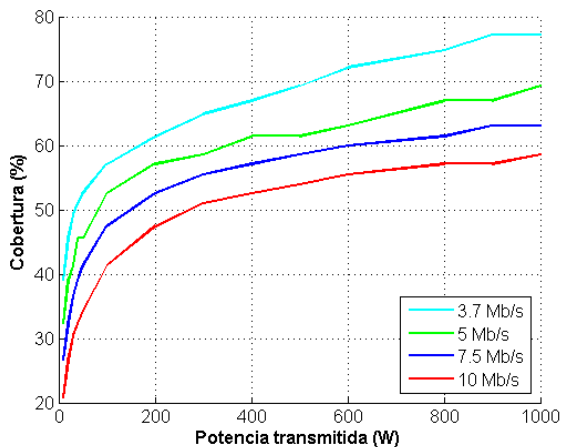


Fig.14. Nivel de cobertura DVB-H (%) vs. Potencia transmisor DVB-H (dBW).

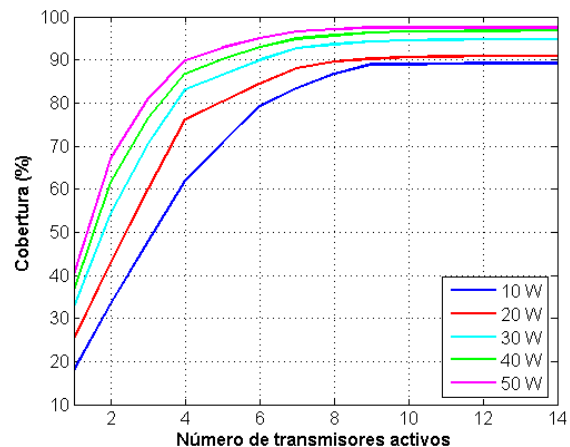


Fig.15. Nivel de cobertura DVB-H (%) vs. Número de transmisores activos.

#### IV.3.2. Resultados red híbrida HSDPA/DVB-H

En la Fig. 15 se encuentra representado el porcentaje de usuarios no servidos tanto para el caso en el que se utiliza la red celular HSDPA para proporcionar los cuatro tipos de servicios, como para el caso en el que se complementa HSDPA con DVB-H. Esta complementación se basa en que DVB-H se encarga de proveer el servicio de TV móvil (los 20 canales) a todos los usuarios que lo soliciten, ya que se ha escogido como potencia de los transmisores la necesaria para que se cubra aproximadamente el 100% del área deseada, según el apartado anterior. De este modo, HSDPA solo tendrá que servir a los usuarios de voz, de datos y del servicio de multimedia interactivo.

En la figura se observa una ganancia significativa, considerablemente mayor que la conseguida con MBMS. Conforme aumenta el número de usuarios por celda celular la ganancia obtenida es mayor. En cuanto a la variación de la ganancia obtenida en función de la distribución de servicio utilizada, se obtiene que la ganancia es mayor para la distribución 3 ya que es la que tiene un mayor porcentaje de usuarios de TV, y por tanto la red HSDPA se queda con un menor número de usuarios a los que servir en comparación con los otras dos distribuciones.

En este caso de red híbrida, la tasa binaria requerida por el servicio de TV no afecta a los resultados de DVB-H, ya que este servicio no es proporcionado por la red celular, y DVB-H tiene capacidad suficiente para proporcionar el servicio a las tasas binarias escogidas. Las curvas representadas de la red HSDPA son las correspondientes a la menor tasa binaria del servicio de TV, 120 kb/s. Para el resto de tasas, la ganancia será todavía mayor.

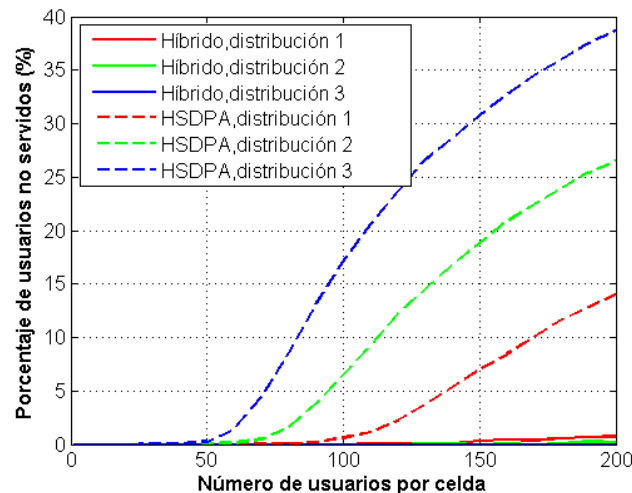


Fig.15. Porcentaje de usuarios no servidos (%) vs. Número de usuarios por celda.

## V. ESCENARIO REALISTA: CIUDAD DE VALENCIA.

Una vez analizado un escenario como el real pero simplificado considerando una densidad constante en todas las celdas celulares, se pasa a estudiar el caso real en el que la densidad de usuarios no es constante en todo el escenario sino que está repartida por zonas. Como primera clasificación se ha utilizado la misma que utilizan los operadores celulares, es decir, diferenciar las zonas entre rural, suburbano, urbano y urbano denso. En este caso particular no encontramos ninguna zona rural dentro del área de cálculo seleccionada. Además de estas zonas, también se han considerado otras distintas, más específicas, en las que es posible que haya una carga superior a la normal. Como ejemplo tenemos la zona del estadio de fútbol Mestalla un día de partido, el puerto un día de regatas de la Copa América, la Universidad Politécnica de Valencia un día de clase, el centro de la ciudad un sábado de compras y la Ciudad de las Artes y las Ciencias un día cualquiera de congreso, o de elevado número de turistas. Es muy complicado que se den todas estas situaciones de carga en las distintas zonas de la ciudad a la vez, y que todos los usuarios de una misma zona quieras utilizar servicios celulares simultáneamente, pero de este modo podemos analizar el límite de comportamiento de la red celular HSDPA.

En la sección anterior se ha realizado un estudio de las distintas redes para tres casos de distribución de los servicios en los que varía el porcentaje de usuarios que solicitan el servicio de TV, y también para tres tasas binarias consideradas para dicho servicio. Como se ha estudiado y analizado el comportamiento general de las redes para todos estos casos, y este es el mismo para

cualquier valor de densidad de usuarios considerado, en esta sección nos vamos a centrar en los casos más interesantes. Como punto de referencia vamos a considerar el caso en el que la distribución de servicio es la 1, en el que todavía no hay un número significativo de usuarios de TV, y la tasa binaria del servicio de TV es de 120 kb/s, que es la utilizada actualmente. Partiendo de este punto de referencia, analizaremos qué ocurre cuando la tasa binaria del servicio de TV aumenta (a 240 y 384 kb/s), y cuando la tasa binaria se mantiene y lo que aumenta es el porcentaje de usuarios del servicio de TV con respecto al número de total de usuarios activos. Se ha considerado hay un total de 16000 usuarios repartidos convenientemente entre las distintas zonas mencionadas.

### V.1. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS CON HSDPA.

En primer lugar se va a obtener el porcentaje de usuarios que la red HSDPA no es capaz de servir por sí sola. Hay que decir que lógicamente, en este escenario con distintas densidades de usuarios los resultados van a salir peores que en el estudio previo mostrado en la sección IV. Esto es porque habrá zonas en las que el número de usuarios activos por celda celular sea considerablemente mayor que los considerados en dicha sección, como por ejemplo en la zona del Mestalla, en la que el número de usuarios por m<sup>2</sup> es elevadísimo. En concreto, un 19.22% del total de usuarios (alrededor de 3070 usuarios) van a estar situados en esa zona, conectados todos a la misma celda celular. Es por esto que la zona del Mestalla va a ser, como se verá a lo largo de toda la sección, la más problemática y la que contribuya en mayor medida al número total de usuarios no servidos.

La tabla 8 muestra los valores del porcentaje de usuarios no servidos por la red celular HSDPA para las distintas situaciones consideradas. Se observa que en general dicho porcentaje es bastante más elevado que el deseado, incluso en la situación de referencia que sería el caso mejor. Esto es debido, como se ha explicado, a la elevada densidad de usuarios en la zona del Mestalla. De hecho, del porcentaje mostrado en la tabla 8, un 16.44% de los usuarios no servidos es debido solamente a esta zona. Comparando tasas binarias del servicio de TV, obviamente la cantidad de usuarios no servidos es mayor para mayores tasas binarias, y comparando las distintas distribuciones de los servicios, esta cantidad también para es mayor para un mayor porcentaje de usuarios de TV. Se podría decir que en este caso afecta más a los resultados un mayor porcentaje de usuarios de TV respecto del total de usuarios activos para la tasa binaria menor de 120 kb/s, que mantener dicho porcentaje y elevar la tasa binaria requerida para los canales de TV.

Distribución de los servicios	Tasa Binaria del servicio de TV	Porcentaje de usuarios no servidos
<b>Distribución 1</b>	120 kb/s	27.72%
	240 kb/s	29.02%
	384 kb/s	30.32%
<b>Distribución 2</b>	120 kb/s	30.34%
<b>Distribución 3</b>	120 kb/s	34.80%



Tabla 8: Porcentaje de usuarios no servidos con la red celular HSDPA.

Vamos a comprobar en los siguientes apartados el efecto de mejora que pueden provocar en esta situación MBMS y DVB-H.

## V.2. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS CON HSDPA Y MBMS.

A diferencia de la sección IV en la que se consideraba que todo el escenario disponía del 100% de cobertura de MBMS, en el estudio del escenario real de la ciudad de Valencia vamos a considerar que solamente se implementará MBMS en aquellas celdas en las que sea necesario, ya que habrá celdas en las que apenas haya usuarios demandando el servicio de TV. Como criterio para determinar si es necesario o no, se va a utilizar los valores de usuarios umbrales obtenidos en el estudio previo, a partir de los que la red celular HSDPA sobrepasa el 1% de usuarios no servidos. Dichos valores umbrales, para los casos concretos que se van a estudiar en este apartado, se encuentran resumidos en la siguiente tabla. En aquellas celdas celulares en las que el número total de usuarios activos sea mayor que el umbral, se implementará MBMS.

Distribución de los servicios	Tasa Binaria del servicio de TV	Número umbral de usuarios por celda
Distribución 1	120 kb/s	110
	240 kb/s	71
	384 kb/s	47
Distribución 2	120 kb/s	75
Distribución 3	120 kb/s	57

Tabla 9: Número umbral de usuarios por celda a partir del que la red HSDPA necesita complementarse con otras redes.

Como se va a considerar que MBMS implementa la técnica de macro-diversidad *soft combining*, para que cada una de las celdas que utilicen MBMS sea capaz de beneficiarse de dicha diversidad es necesario que disponga de celdas celulares a su alrededor que también implementen MBMS. De este modo encontraremos dos casos distintos de usuarios MBMS. Por una parte tendremos aquellos usuarios que se encuentren conectados a celdas celulares en las que debido a su elevado número de usuarios implemente MBMS para la transmisión de algunos de los canales de TV. Estos usuarios podrán beneficiarse de la ganancia obtenida con el *soft-combining*. Por otra parte, tendremos a los usuarios situados en celdas de alrededor de las que se implementa MBMS con la única finalidad de que estas celdas principales puedan utilizar la técnica de macro-diversidad. Estos usuarios se podrán beneficiar del *soft combining* solo en el caso en el que la señal recibida por las celdas principales sea lo suficientemente elevada. Esto ocurre cuando dichos usuarios están situados en el límite de su celda con respecto a la principal. Aquellos que no cumplan esa condición, no se podrán beneficiar de la diversidad conseguida con *soft combining*, por lo que necesitarán que su estación base les transmita el servicio con una mayor potencia para ser capaces de recibirlo. Bajo estas condiciones, obtenemos los valores de porcentaje de usuarios no servidos mostrados en la tabla 10.

Distribución de los servicios	Tasa Binaria del servicio de TV	Porcentaje de usuarios no servidos			
		1 canal TV	2 canales TV	3 canales TV	4 canales TV
Distribución 1	120 kb/s	27.38%	27.11%	26.15%	26.94%
	240 kb/s	28.41%	27.9%	26.91%	27.95%
	384 kb/s	29.44%	28.96%	27.46%	29.06%
Distribución 2	120 kb/s	29.37%	28.41%	26.28%	27.82%
Distribución 3	120 kb/s	31.7%	29.25%	25.71%	27.18%

Tabla 10: Porcentaje de usuarios no servidos con la red híbrida HSDPA/MBMS.

Al igual que se hizo en el estudio previo, se han estudiado los casos en los que MBMS transmite solamente el canal de TV más popular, MBMS transmite los dos canales más populares, los tres o los cuatro. Se observa que MBMS no proporciona una ganancia excesiva, siendo la máxima de 9.09% en el caso en el que MBMS transmita los tres canales más populares de TV en la distribución 3 de los servicios. Como ya ocurría antes, la ganancia es mayor para tasas binarias del servicio mayores, y para un mayor porcentaje de usuarios de TV.

En este caso, a diferencia del estudio previo, es eficiente utilizar MBMS para transmitir hasta 3 de los canales más populares. Cuando transmite 4 canales, el porcentaje de usuarios no servidos se ve afectado con un ligero aumento. Esto es porque el porcentaje de demanda del canal 4 de TV es lo suficientemente bajo como para que la mayoría de las celdas celulares no dispongan de más de un usuario solicitando dicho canal. En este caso será más eficiente servir a los pocos usuarios que lo demanden con conexiones punto a punto adaptándose a sus necesidades en recepción, que servirlos con MBMS a la potencia fija determinada en la sección IV.2.

En resumen, en este ejemplo de escenario real MBMS no ayuda a mejorar mucho los resultados debido a que hay muchas celdas celulares en las que el número de usuarios no es lo suficientemente elevado como para implementar MBMS, y otras en las que el número de usuarios es tan elevado (como por ejemplo en Mestalla), que aunque algunos de canales de TV los sirva MBMS, la red HSDPA sigue sin ser capaz de dar servicio al resto de usuarios.

### V.3. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS CON HSDPA Y DVB-H.

En este apartado nos vamos a basar en complementar la red 3G con DVB-H mediante la instalación de pequeñas celdas DVB-H localizadas en zonas específicas en las que gran cantidad de usuarios quieran adquirir el servicio multimedia de TV. En este caso, los servicios típicos *unicast* (voz, descarga de ficheros o servicios multimedia interactivos) se transfieren por la red HSDPA, mientras que el servicio de TV se transmitirá o a través de la red celular o a través de la red *broadcast* DVB-H, dependiendo de la cantidad de usuarios que haya solicitado el servicio y de si están dentro del área de cobertura de los transmisores DVB-H. Se espera obtener un beneficio de la red híbrida cuando varios usuarios consuman el mismo servicio simultáneamente, ya que si dichos usuarios

son servidos mediante una única transmisión *broadcast* en vez de mediante muchas transmisiones *unicast*, se puede ahorrar capacidad de transmisión.

Uno de los principales objetivos es determinar los tamaños y localizaciones de las celdas DVB-H. Para ello se utiliza un procedimiento de optimización explicado a continuación. La idea es colocar el transmisor DVB-H en la localización en la que serviría a un mayor número de usuarios. Para estimar el beneficio de la red híbrida se calcula el porcentaje de usuarios que quieren acceder al servicio de TV en cada una de las celdas celulares con respecto al número total de usuarios en el escenario. De este modo se han obtenido unos mapas de usuarios, uno por cada una de las distribuciones de servicios utilizada, que muestran las zonas en las que resulta más conveniente instalar una celda DVB-H. Las Fig. 16, 17 y 18 muestran estos mapas de usuarios del servicio de TV.

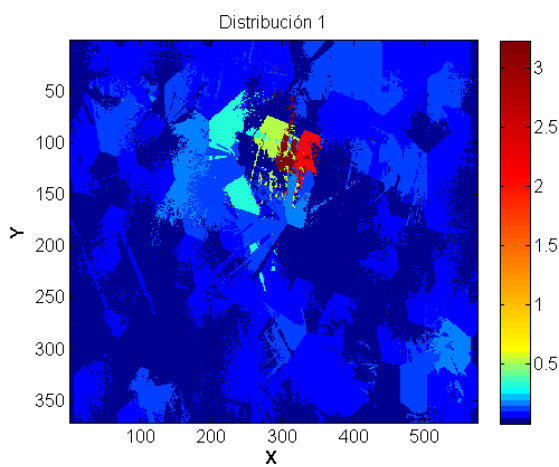


Fig.16. Mapa de usuarios del servicio de TV. Porcentaje de usuarios de TV en cada celda celular con respecto al total de usuarios en el escenario. Distribución de servicios 1.

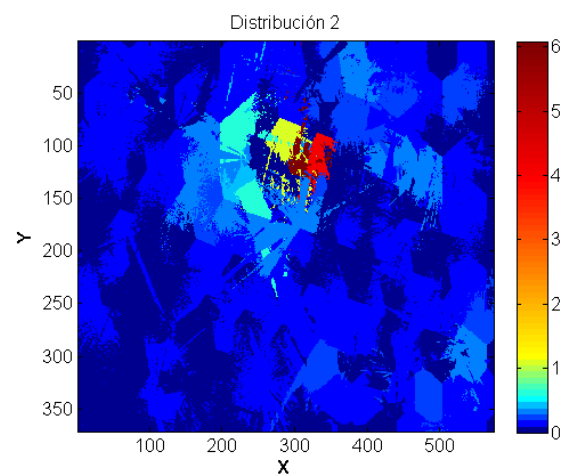


Fig.17. Mapa de usuarios del servicio de TV. Porcentaje de usuarios de TV en cada celda celular con respecto al total de usuarios en el escenario. Distribución de servicios 2.

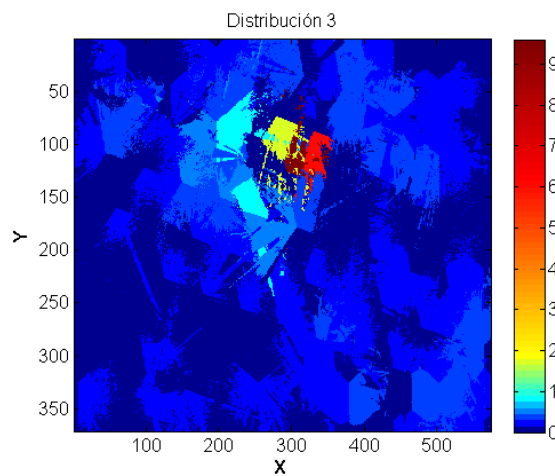


Fig.18. Mapa de usuarios del servicio de TV. Porcentaje de usuarios de TV en cada celda celular con respecto al total de usuarios en el escenario. Distribución de servicios 3.

De las tres figuras obtiene claramente cuáles son las zonas donde es necesario colocar las celdas DVB-H. Estas son la zona del Mestalla sobretodo y la zona del centro de Valencia. Estas coinciden lógicamente para las tres distribuciones de servicios. La única diferencia entre ellas es que el parámetro de medida que hemos utilizado (porcentaje de usuarios del servicio de TV en la celda celular con respecto al total de usuarios) se duplica en la distribución 2 con respecto a la distribución 1, y en la distribución 3 se triplica. En el resto de zonas, no sería eficiente instalar celdas DVB-H.

Para que la cobertura de los transmisores DVB-H se ajuste lo máximo posible a la zona en la que se quiere dar servicio, se ha ido variando tanto la posición como la potencia del transmisor, para el modo de transmisión QPSK1/2, tal y como se decidió en el apartado IV.3. Finalmente se ha obtenido que los valores de potencia óptimos son 10 W para el transmisor de la zona del Mestalla y 32 W para el del centro, y las posiciones óptimas son las mostradas en la Fig. 19, junto con la cobertura obtenida bajo esas condiciones.

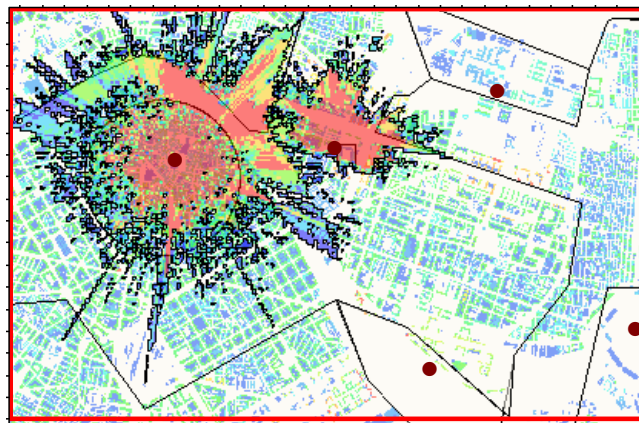


Fig.19. Cobertura transmisores DVB-H.

Los resultados obtenidos de la red híbrida HSDPA/DVB-H con la posición y potencia de los transmisores optimizadas son los que se muestran en la tabla 11.

Distribución de los servicios	Tasa Binaria del servicio de TV	Porcentaje de usuarios no servidos
<b>Distribución 1</b>	120 kb/s	20.90%
	240 kb/s	21.68%
	384 kb/s	22.69%
<b>Distribución 2</b>	120 kb/s	17.15%
<b>Distribución 3</b>	120 kb/s	12.84%

Tabla 11: Porcentaje de usuarios no servidos con la red híbrida HSDPA/DVB-H.

En este caso sí que se obtiene una ganancia significativa con respecto al caso en el que solo se utiliza la red HSDPA. Al igual que en el híbrido HSDPA/MBMS, la ganancia aumenta con la tasa binaria del servicio de TV, pero sobretodo aumenta con el aumento del porcentaje de usuarios de TV. De hecho, la máxima ganancia se consigue para la distribución 3 de los servicios. Esta

ganancia máxima es de 21.96%, es decir, gracias a la instalación de esas dos celdas DVB-H sea conseguido servir satisfactoriamente a casi un 22% de usuarios más. Para la distribución 1 de los servicios, que sería el caso más parecido al actual, el valor de ganancia está en torno al 7.5%.

#### *V.4. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS CON HSDPA, MBMS Y DVB-H.*

Con los resultados obtenidos para el híbrido celular HSDPA/MBMS observamos que MBMS no ofrece una ganancia significativa en este escenario en concreto. Evidentemente MBMS resuelve los problemas de la transmisión del servicio de TV a muchos usuarios simultáneamente, pero los recursos que consume se los quita a HSDPA, el cual los necesita para la provisión de usuarios de voz, datos y servicio multimedia interactivos.

En el híbrido HSDPA/DVB-H, sí que se observa una mayor ganancia en cuanto a número de usuarios servidos. En las zonas de cobertura DVB-H, este sirve a todos los usuarios del servicio de TV (todos los canales), por lo que descarga más a la red HSDPA.

Viendo esto, nos preguntamos qué ocurriría en el caso en el que mezcláramos HSDPA, MBMS y DVB-H para la provisión de todos los servicios. La idea es que DVB-H descarga a la red HSDPA en las zonas en las que la densidad de usuarios es excesivamente elevada, en concreto en la zona del Mestalla y del centro de Valencia como se ha mostrado en los mapas de usuarios, y MBMS descarga a la red HSDPA en el resto del escenario, transmitiendo los canales más populares. Las celdas DVB-H consideradas son las mismas que en el apartado anterior, y las celdas MBMS son también las mismas que en el apartado V.2, quitando aquellas celdas que ahora tienen cobertura DVB-H.

Los resultados obtenidos para esta configuración son los mostrados en la tabla 12. En la distribución 1, apenas se obtiene una mínima ganancia para las tasas binarias de 240 y 384 kb/s, cuando MBMS se encarga de transmitir los tres canales más populares de TV. Para la tasa de 120 kb/s que sería la situación más parecida a la actual, el híbrido HSDPA/MBMS/DVB-H no presenta ninguna mejora, es más, el porcentaje de usuarios no servidos aumenta ligeramente con respecto a los resultados obtenidos en el híbrido HSDPA/DVB-H. Esto es porque en dicha situación la gran parte de los usuarios que solicitaban el servicio de TV han sido servidos, y los que quedan son más eficientemente servidos con conexiones punto a punto ya que la potencia necesaria no es excesivamente elevada al ser la tasa binaria requerida baja.

Por tanto se observa que el híbrido HSDPA/MBMS/DVB-H solamente presenta cierta ganancia con respecto al híbrido HSDPA/DVB-H en los casos de distribución 2 y 3 de los servicios, es decir, solamente es eficiente implementar MBMS junto con DVB-H en condiciones de elevada penetración del servicio de TV, lo cual se prevé que ocurra en los próximos años. Sin embargo, esa ganancia obtenida será como máximo del 3% y en una situación de carga máxima, lo cual es complicado que ocurra. Si se pudiera utilizar, MBMS serviría en zonas con una densidad de

población media en la que no se dispone todavía de transmisores DVB-H, como una solución temporal hasta que sea necesaria la instalación de un transmisor DVB-H

Distribución de los servicios	Tasa Binaria del servicio de TV	Porcentaje de usuarios no servidos			
		1 canal TV	2 canales TV	3 canales TV	4 canales TV
Distribución 1	120 kb/s	21.08%	20.97%	20.92%	20.95%
	240 kb/s	21.73%	21.46%	21.30%	21.36%
	384 kb/s	22.49%	22.22%	22.09%	22.20%
Distribución 2	120 kb/s	16.23%	15.79%	15.51%	15.59%
Distribución 3	120 kb/s	11.83%	10.5%	9.96%	10.1%

Tabla 12: Porcentaje de usuarios no servidos con la red híbrida HSDPA/MBMS/DVB-H.

## VI. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO PARA SERVICIOS DE DESCARGA DE FICHEROS EN REDES HÍBRIDAS.

Aparte de la transmisión de servicios de TV móvil, MBMS y DVB-H también se pueden utilizar para la transmisión de servicios de descarga de ficheros de contenido popular, como por ejemplo periódicos digitales, descarga de software, etc. En este caso, lo importante no es optimizar la planificación de la red, sino realizar una buena gestión de los recursos radio. Los emplazamientos de los transmisores celulares y sus configuraciones se eligen en la fase de planificación optimizándolos para los servicios de *streaming*. Una vez desplegada la red, con su densidad de usuarios correspondiente, es indispensable una gestión optimizada de los recursos radio para la transmisión de este tipo de servicios. Por tanto, para servicios de descarga de ficheros nos encontramos con otro enfoque distinto de red híbrida. En este caso suponemos que o bien la red MBMS o bien la red DVB-H está completamente desplegada en el escenario considerado. Sin embargo ambas tecnologías presentan problemas. En MBMS, a pesar de disponer del mecanismo de reparación de errores FEC, no se puede garantizar que todos los usuarios reciban el fichero correctamente ya que algunos usuarios pueden estar situados en zonas de mala cobertura. Estos usuarios serían más eficientemente servidos con conexiones dedicadas adaptadas a sus condiciones de recepción, como hace HSDPA. Por su parte DVB-H necesita una gran cantidad de infraestructura de red para proporcionar niveles aceptables de cobertura, por lo que también necesitará complementarse con otras redes para conseguir una elevada cobertura y cubrir las zonas de sombra que pueda tener. Así pues, en este caso es la red HSDPA la que complementa a las redes *broadcast*.

Los servicios de descarga de ficheros consisten básicamente en la transferencia de una cantidad finita de datos a los terminales, la cual es almacenada como un archivo en los terminales utilizando FLUTE (*File Delivery over Unidirectional Transport Protocol*). Los archivos pueden ser consumidos inmediatamente tras la transmisión, o en un tiempo posterior. Se caracterizan por requerir una transmisión sin errores de los archivos, ya que un único bit erróneo conlleva la pérdida

de todo el archivo, haciéndolo inútil para el receptor. Para incrementar la robustez de la transmisión, tanto en MBMS como en el estándar IPDC de DVB-H, se ha adoptado un mecanismo de corrección de errores en adelante FEC (*Forward Error Correction*) en la capa de aplicación basado en los códigos Raptor [7]. Los mecanismos FEC se basan en transmitir información de paridad adicional redundante, lo cual permite reconstruir la información original a pesar de que se produzcan errores en la transmisión ya que no es necesario recibir todos los datos transmitidos.

La medida de rendimiento adoptada en este caso ha sido el de minimizar el coste necesario para transmitir el fichero a un número determinado de usuarios, es decir, minimizar el coste necesario para alcanzar una cierta probabilidad de adquisición. El coste es proporcional a la cantidad de recursos que la red utiliza. En el caso de la red celular el coste será proporcional a la energía de transmisión definida como el producto de la potencia transmitida por el tiempo de transmisión. Minimizar la energía supone maximizar el número de servicios que pueden ser transmitidos con la misma potencia y durante el mismo tiempo, por lo que esta medida es inversamente proporcional a la capacidad del sistema bajo condiciones de carga máxima en la red. En el caso de la red DVB-H, el coste será proporcional a la cantidad de datos transmitidos.

El escenario considerado para el estudio realizado es un escenario sintético urbano formado por 19 celdas. El radio de las celdas es de 866 m y la distancia entre emplazamientos es de 1.5 km. Se considera que no hay sectorización y se asume que en las estaciones base hay antenas omnidireccionales. Los usuarios están localizados en exteriores y se mueven de acuerdo a un modelo de movilidad *pedestrian* (3 km/h).

### VI.1. TRANSMISIÓN DEL SERVICIO CON HSDPA Y MBMS.

Los parámetros que el operador de red puede configurar y su efecto en los resultados son los siguientes. En HSDPA, el principal parámetro que ha de configurar el operador de red es la potencia dedicada al servicio. Mayores potencias implicarán que los usuarios reciben el fichero más rápidamente, sin querer esto decir que esta alternativa sea la más eficiente desde un punto de vista de gestión de los recursos radio ya que los sistemas 3G están limitados por interferencias, las cuales son directamente proporcionales a las potencias transmitidas. Por tanto, nos encontramos con que hay un compromiso entre el consumo de recursos y el tiempo de transmisión del fichero. Esto se puede observar en la Fig. 20, la cual es un ejemplo de transmisión de un servicio de descarga de un fichero de tamaño 512 KB para distintos ejemplos de número de usuarios por celda. Los valores de energía representados son los necesarios para que el fichero se transmita en un tiempo determinado al 99% de los usuarios.

Otro parámetro de HSDPA configurable por el operador es el algoritmo de *scheduling* a utilizar. Se ha considerado que el algoritmo utilizado es el MaxCIR. Esta estrategia consiste en servir al usuario que presente las mejores condiciones de recepción en términos de SINR, o equivalentemente, el que alcance la tasa de datos mayor.

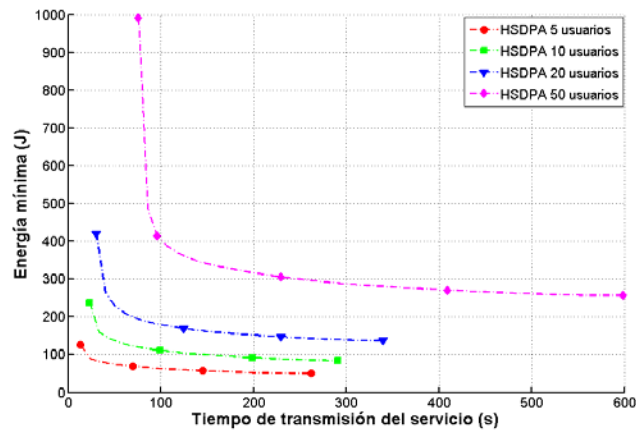


Fig.19. Resultados de descarga de ficheros con HSDPA.  
Tamaño del fichero 512 KB. Probabilidad de adquisición 99%.

En MBMS, el operador puede configurar la potencia transmitida (potencia dedicada al servicio), la velocidad de transmisión de la información (tasa binaria) y la cantidad de información de paridad transmitida, o alternativamente el tiempo de transmisión, el cual puede estar limitado por un tiempo máximo para completar la transmisión del servicio. La potencia transmitida y la velocidad de portadora determinan el nivel de cobertura. El tiempo de transmisión debe ajustarse de tal manera que se alcance la probabilidad de adquisición deseada para esta fase (porcentaje de usuarios que reciben correctamente el fichero). Lógicamente cuanto mayor sea la potencia utilizada, el nivel de cobertura será mayor (para una misma velocidad de portadora), por lo que la cantidad de información de paridad necesaria será menor, disminuyendo el tiempo de transmisión del servicio. Sin embargo la configuración óptima no tiene porqué ser la de mayor potencia, como se ha explicado anteriormente. Esto se muestra en la Fig. 21, para distintas tasas binarias de servicio consideradas. Se observa el considerable aumento de energía, y por tanto de coste, para potencias de transmisión mayores. Por otro lado, en principio cuanto mayor sea la tasa de transmisión de datos los usuarios recibirán el fichero más rápidamente. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que un aumento de la velocidad de portadora disminuye el nivel de cobertura (manteniendo la potencia constante), lo cual implica un aumento del tiempo de transmisión. Por tanto, al igual que ocurre en HSDPA, en MBMS también hay un compromiso entre el consumo de recursos y el tiempo de transmisión del fichero. Si no hay limitación temporal en la transmisión del servicio, lo más eficiente sería utilizar potencias bajas y así ahorrar recursos. Si se requiere un tiempo de transmisión máximo, habría que aumentar la potencia escogiendo la mínima posible que verifica dicho tiempo de servicio. Un ejemplo se muestra en la Fig. 22, en la que se observa la energía necesaria en función del tiempo de transmisión del servicio, para el caso en el que no se utiliza macro-diversidad y para el caso en el que se implementa *soft-combining*. Se observa que llega un punto en el que la disminución en la energía es pequeña en comparación al aumento en el tiempo de transmisión. Esta configuración sería la óptima, ya que mantiene un valor de energía similar el mínimo, pero en un tiempo considerablemente menor. Para el caso de referencia sin macro-



diversidad, esta configuración corresponde a una potencia de transmisión de 2 W, que será la utilizada tanto para MBMS como para HSDPA en el híbrido. En la curva de *soft-combining*, en la que lógicamente los niveles de energía necesarios son significativamente menores al beneficiarse de la señal recibida por una celda vecina, el efecto mencionado para el caso de referencia está más destacado.

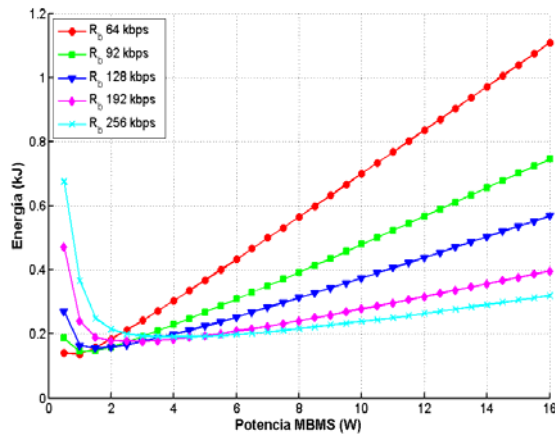


Fig.21. Energía de transmisión MBMS (J) vs. Potencia servicio (W). Tamaño fichero 512 KB. Probabilidad adquisición 99%. Sin macro-diversidad

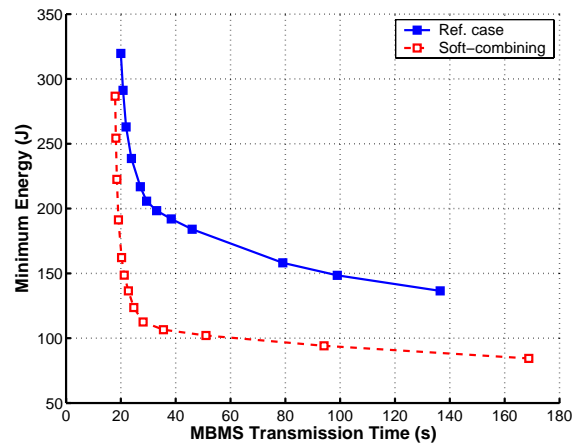


Fig.22. Energía mínima (J) vs. Tiempo de transmisión (s). Tamaño fichero 512 KB. Probabilidad adquisición 99%.

Para mejorar el rendimiento de ambas redes en la transmisión de un servicio de descarga de ficheros, se propone utilizar ambas tecnologías conjuntamente. En primer lugar hay una fase de transmisión inicial del fichero con MBMS, en la que se transmite el fichero más una serie de información de paridad previamente establecida generada por el codificador Raptor mediante una conexión p-t-m. Los usuarios que no son capaces de decodificar el fichero después de la transmisión inicial, son servidos en la fase de reparación mediante conexiones p-t-p con HSDPA hasta completar la recepción del fichero. El parámetro a optimizar en este sistema híbrido es el tiempo de duración de la transmisión MBMS. La red híbrida MBMS/HSDPA da como resultado una ganancia en el coste, o lo que es lo mismo una ganancia en la energía de transmisión. En concreto, para la descarga de un fichero de 512 KB y una probabilidad de adquisición del fichero objetivo del 99%, se obtiene un 30% de ganancia. La Fig. 23 muestra las curvas de energía para dicho ejemplo, en el caso en el que el servicio se transmita mediante solo HSDPA, solo MBMS o ambos conjuntamente.

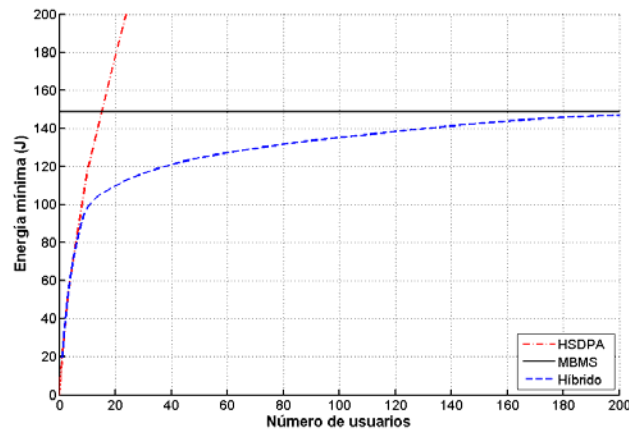


Fig.23. Resultados de descarga de ficheros con el híbrido MBMS/HSDPA. Tamaño fichero 512 KB. Probabilidad adquisición 99%. Sin macro-diversidad

El estudio completo de la transmisión de descarga de ficheros con solo HSDPA, solo MBMS y HSDPA y MBMS conjuntamente se encuentra totalmente detallado en el primer artículo del anexo B, publicado por la revista del IEEE *Transactions on Broadcasting*.

#### VI.1. TRANSMISIÓN DEL SERVICIO CON HSDPA Y DVB-H.

Los parámetros configurables por el operador en DVB-H son el tiempo de ciclo entre *bursts*, el tamaño de *burst* y la cantidad de información de paridad transmitida. Para DVB-H con AL-FEC, el comportamiento mejora para tiempos de ciclo mayores, a costa de aumentar el tiempo de transmisión del servicio. Una vez el tiempo de ciclo excede cierta duración, aquella para la que hay una pequeña correlación entre las condiciones de recepción de *bursts* consecutivos, el aumento del tiempo de ciclo ya no presenta ganancia. En cuando al tamaño del *burst*, el comportamiento de DVB-H mejora para *bursts* de datos más pequeños, a costa de un aumento en el consumo de potencia de los terminales. Sin embargo, el parámetro más importante es la cantidad de datos de paridad transmitida ya que, por una parte, poco paridad implica baja robustez de transmisión no permitiendo a muchos de los usuarios recuperar el fichero, y por otra parte una transmisión muy robusta consume recursos que podrían ser utilizados para otros servicios. La Fig. 24 muestra la probabilidad de adquisición alcanzada en la transmisión de un fichero de tamaño 512 KB en función del número de *bursts* transmitidos para distintos casos de recepción. En concreto para usuarios *pedestrian* (3 km/h) en interiores y exteriores y para usuarios *vehicular* (30 km/h). Se ha asumido una tasa binaria de datos constante de 250 kb/s. Se observa que lógicamente, cuantos más *bursts* se transmitan habrá una mayor probabilidad de recibir el fichero correctamente. Sin embargo, la ganancia obtenida por transmitir *bursts* de paridad adicionales disminuye cuando el total de número de *bursts* de paridad aumenta. En la Fig. 25 está representada la CDF de la cantidad de datos de reparación necesarios después de la transmisión DVB-H para el mismo ejemplo de un fichero de 512 KB, y para el caso de recepción de usuarios *vehicular in-car*. Se observa que hay todavía usuarios que necesitan una cantidad considerable de datos de reparación.

Esto ocurre porque están situados en zonas de mala cobertura DVB-H y se mueven a bajas velocidades. Estos usuarios serían más eficientemente servidos mediante una red celular en un sistema híbrido, en el caso en el que el coste de implementación fuera aceptable.

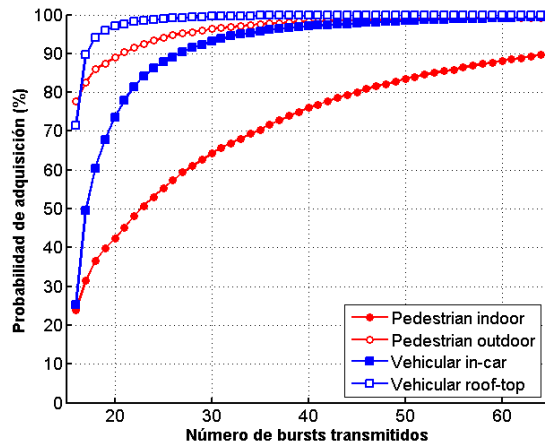


Fig.24. Probabilidad de adquisición (%) vs. Número de *bursts* transmitidos. Tamaño fichero 512 KB. Distintos casos de recepción.

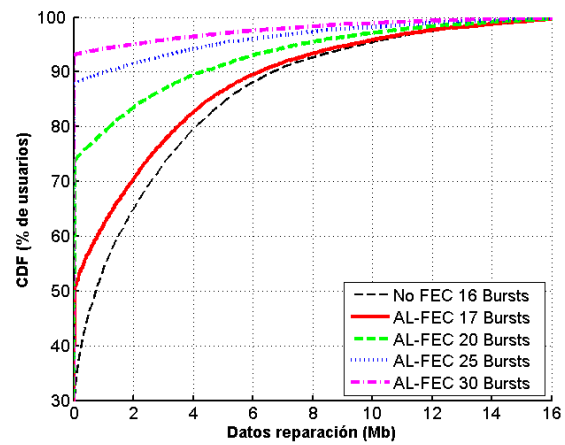


Fig.25. CDF datos reparación necesarios. Tamaño fichero 512 KB. Caso recepción *vehicular in-car*.

El proceso de la transmisión del servicio en el sistema híbrido DVB-H/HSDPA es prácticamente el mismo que el considerado en MBMS/HSDPA, cambiando las transmisiones MBMS por transmisiones DVB-H. El objetivo es encontrar el balance óptimo entre la transmisión inicial DVB-H y la fase de reparación HSDPA de modo que el coste se vea minimizado. Al igual que en el apartado anterior, se ha utilizado una potencia dedicada al servicio de 2 W en HSDPA. La Fig. 26 muestra el ahorro en los costes obtenido por la combinación de DVB-H y HSDPA con respecto a los casos en los que DVB-H y HSDPA se utilizan por separado. El ahorro en el coste se encuentra representado en función de la relación  $c_b/c_c$  para distintos números de usuarios activos en el sistema, siendo  $c_b$  el coste por *burst* transmitido en DVB-H y  $c_c$  el coste por unidad de energía (J) en HSDPA. En las situaciones en las que no hay ahorro en el coste de transmisión, la configuración óptima consiste en utilizar solo DVB-H o solo HSDPA. Inicialmente, el ahorro en el coste aumenta en función de la relación  $c_b/c_c$ . En esa área el coste de DVB-H es menor que el coste utilizando solo HSDPA. La máxima ganancia se alcanza para el ratio  $c_b/c_c$  que implica un mismo coste al utilizar DVB-H o HSDPA por separado. Valores mayores que dicho umbral de  $c_b/c_c$  implican que la red celular es más eficiente que DVB-H. La ganancia máxima también depende del número de usuarios activos en el sistema. Cuanto menor sea dicho número de usuarios, mayor será la ganancia. La máxima ganancia obtenida está en torno al 55%.

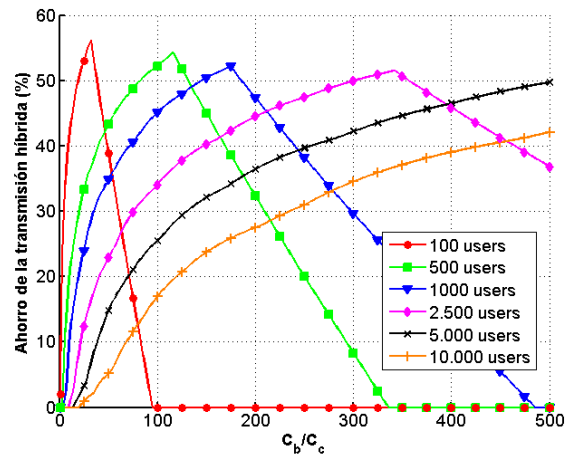


Fig.26. Resultados de ahorro de coste en descarga de ficheros con el híbrido DVB-H/HSDPA vs. Ratio  $c_b/c_c$ . Tamaño fichero 512 KB. Probabilidad adquisición 99%.

El estudio completo y detallado de la transmisión híbrida de servicios de descarga de ficheros en un sistema híbrido DVB-H/HSDPA se encuentra en el segundo artículo del anexo B aceptado en el congreso *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*.

Tanto el estudio del sistema híbrido MBMS/HSDPA como el de DVB-H/HSDPA, ha sido realizado para un escenario no realista en el que se ha considerado una densidad de usuarios por celda constante. Como trabajo futuro a la presente tesina, está previsto verificar los resultados obtenidos del escenario sintético en el escenario realista de la ciudad de Valencia.

## VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

En esta tesina se ha estudiado el rendimiento tanto de la red celular HSDPA como de la combinación de esta con MBMS y con DVB-H, para proporcionar servicios de TV móvil, basándose en el porcentaje de usuarios servidos. Se ha considerado una red celular HSDPA totalmente desplegada en el escenario de la ciudad de Valencia y se ha estudiado su capacidad para transmitir el servicio de TV móvil, además de los servicios típicos de las redes celulares como son los servicios de voz, datos, etc. Se han distinguido distintas zonas en función de la densidad de usuarios de cada una de ellas (Mestalla, centro de Valencia, Ciudad de las Artes y las Ciencias, etc.). Además se ha considerado que nos encontramos en una situación de elevada carga en cuanto al número de usuarios activos en el escenario.

Se ha obtenido que a partir de un cierto umbral en el número de usuarios por celda a servir, la red HSDPA empieza a fallar, dejando de servir a los usuarios del servicio de transmisión de TV, ya que es el menos prioritario para la red celular. Esto es debido a que HSDPA utiliza transmisiones punto a punto, lo cual presenta limitaciones en cuanto al número de usuarios activos a los que puede servir. Debido a esto, se ha considerado la opción de complementar a la red HSDPA con las tecnologías MBMS y DVB-H, ya que ambas se basan en transmisiones *multicast* y son capaces de transmitir el mismo contenido de TV a un elevado número de usuarios simultáneamente.

Por un lado, se ha considerado el sistema híbrido HSDPA/MBMS. En este sistema se ha estudiado cuáles son las celdas celulares que necesitan implementar MBMS para descargar a la red HSDPA. A partir de un estudio previo, en el que se ha considerado la misma densidad de usuarios constante por celda, se ha obtenido el umbral de usuarios a partir del que HSDPA empieza a fallar. Se ha considerado como medida de calidad, que es necesario complementar la red celular con MBMS o DVB-H a partir de un 1% de usuarios no servidos. Se ha obtenido que MBMS es capaz de disminuir hasta en un 9.09% el porcentaje de usuarios no servidos obtenidos con solo la red HSDPA. Esto es debido a que MBMS se encarga de transmitir el servicio de TV móvil a los usuarios conectados a las celdas que implementan MBMS. Sin embargo, la ganancia obtenida no es excesivamente elevada ya que MBMS no tiene suficiente capacidad como para transmitir los 20 canales de TV de los que consta el servicio global de TV. Además, los recursos de la red 3G se comparten entre HSDPA y MBMS, por lo que los recursos consumidos por MBMS se los está quitando a HSDPA para la transmisión del resto de servicios. Es por esto, que hay un óptimo en el número de canales transmitidos por MBMS en cuanto a la disminución del porcentaje de usuarios no servidos. Este óptimo depende del porcentaje de usuarios que solicitan cada uno de los canales de TV ofertados.

Por otro lado, también se ha estudiado el sistema híbrido HSDPA/DVB-H. DVB-H sí que tiene la capacidad suficiente como para proporcionar todos los canales de TV a todos los usuarios del escenario que lo soliciten. Sin embargo, necesita una gran cantidad de infraestructura de red necesaria para proporcionar niveles aceptables de cobertura. Es por esto, que se ha considerado que se instalan transmisores DVB-H solo en las zonas en las que es estrictamente necesario, es decir, en aquellas zonas en las que haya un elevado número de usuarios queriendo acceder al servicio de TV tal que se justifique el coste de instalación de transmisores DVB-H. Para determinar estas zonas se han obtenido unos mapas de usuarios en los que se muestra el porcentaje de usuarios de TV con respecto al total de usuarios (16000) que hay en cada una de las celdas celulares. De esto modo se ha visto que es necesario utilizar dos transmisores DVB-H, uno en la zona del Mestalla y el otro en el centro de Valencia. Gracias a estos transmisores se ha conseguido disminuir el porcentaje de usuarios no servidos alrededor de un 22%.

Una vez estudiado y analizado el problema de optimizar la planificación de redes híbridas para la transmisión de un servicio de TV móvil, se ha estudiado la transmisión del otro tipo de servicio que es capaz de transmitir tanto MBMS como DVB-H. Este servicio es el de descarga de ficheros. Se ha obtenido que en este caso también es posible combinar las tecnologías *multicast* con HSDPA para disminuir el coste de transmisión, que es la medida de rendimiento utilizada en este caso. Ahora el enfoque de red híbrida es distinto. Se ha supuesto que la red MBMS o en su caso la red DVB-H se encuentra totalmente desplegada en todo el escenario. Sin embargo, siempre hay usuarios situados en zonas de mala cobertura que no son capaces de recibir correctamente el fichero. Estos usuarios serían más eficientemente servidos con transmisiones dedicadas a sus

condiciones de recepción, como hace HSDPA. Así, se ha considerado que MBMS o DVB-H transmiten el fichero más una serie de información de paridad, y aquellos usuarios que no han sido capaces de recibir el fichero completo son servidos a continuación en la fase de reparación con HSDPA. Combinando estas redes se es capaz de conseguir hasta un 30% de ahorro en coste en el sistema híbrido MBMS/HSDPA, y un 55% de ahorro en coste en el sistema híbrido DVB-H/HSDPA. La medida de coste considerada es proporcional a la cantidad de recursos consumidos por las redes. En el caso de las redes celulares HSDPA y MBMS el coste es proporcional a la energía de transmisión utilizada que se define como el producto entre la potencia de transmisión y el tiempo de transmisión. En el caso de la red DVB-H, el coste es proporcional a la cantidad de información (*bursts*) transmitidos.

Como trabajo futuro, se tiene pensado validar el estudio de la transmisión de servicios de descarga de ficheros en el escenario realista de la ciudad de Valencia. Además, también se quiere repetir todo el trabajo realizado en la tesina utilizando MBMS en modo de duplexado TDD, ya que así los recursos consumidos por MBMS no están compartidos con HSDPA.

#### **AGRADECIMIENTOS (11 puntos, negrita)**

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio dentro del proyecto REDES HÍBRIDAS (T5I-020302-2008-94), <http://redeshibridas.germinus.com>. El objetivo del proyecto REDES HÍBRIDAS es el desarrollo de una plataforma de gestión y distribución de contenidos multimedia turísticos para la promoción de destinos. En el anexo A se encuentran los datos de dicho proyecto.

Quería agradecer a mi director y tutor de tesina, David Gómez Barquero y Narcís Cardona, la oportunidad de participar en estos proyectos tan interesantes, y poder trabajar y aprender tanto de ellos. También quiero dar las gracias a mis compañeros de trabajo del grupo de comunicaciones móviles, a los que siguen y a los que ya no están, por su apoyo y los buenos ratos que hemos pasado y espero sigamos pasando. Sobretudo darle las gracias a Ariana por la gran ayuda me ha ofrecido en esta tesina.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mi familia y mi pareja el infinito apoyo que me han mostrado siempre. Sin ellos no habría sido capaz de llegar hasta aquí.

#### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] R. Walsh, A. P. Vainio, y J. Aaltonen, *Content Networking in the Mobile Internet: Multicast Content Delivery for Mobiles*. Wiley, 2004.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] A. Hoikkanen, *Economics of Wireless Broadcasting over DVB-H Networks*. Proc. IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Ponomo, EEUU, 2006.
- [5] Digital Fountain Whitepaper, *How DF Raptor Technology is used in MBMS*. 2005.
- [6] Luby M., Watson M., Gasiba T., Stockhammer T., Xu W. *Raptor codes for reliable download in wireless broadcast systems*. Proc. Of the IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2006.
- [7] 3GPP TS 26.346 v7.1.1, *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and Codecs*. Septiembre 2006.

**ANEXO A****Título del proyecto:** REDES HÍBRIDAS.**Entidad financiadora:** MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO.**Duración desde:** 20/05/2008                      **Hasta:** 20/01/2010**Investigador principal:** CARDONA MARCET, NARCIS**Importe de la subvención:** 130.800                      **Nº total investigadores del proyecto:** 5



## **ANEXO B**

# Multicast Delivery of File Download Services in Evolved 3G Mobile Networks with HSDPA and MBMS

David Gómez-Barquero, Ana Fernández-Aguilella, and Narcís Cardona

**Abstract**—This article presents and analyzes the multicast transmission problem of file download services to several users simultaneously in 3G mobile networks with MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services). MBMS is the second major enhancement in the downlink of the 3G standard after HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access). Whereas HSDPA supports high speed point-to-point (p-t-p) transmissions up to several Mb/s, with MBMS the same content can be transmitted with a point-to-multipoint (p-t-m) connection to multiple users in a unidirectional fashion.

Reliable delivery of files is a challenging task, as an error-free reception of the files is required. In order to increase the robustness of the p-t-m transmission, MBMS adopts new diversity techniques to cope against fast fading and to combine transmissions from multiple cells, and an additional Forward Error Correction (FEC) mechanism at the application layer based on Raptor coding. Moreover, users not able to receive the file after the initial transmission can complete the download in a post-delivery repair phase, in which it is possible to employ both p-t-p and p-t-m connections.

The article focuses on the efficient multicast delivery of files in future 3G mobile networks with HSDPA and MBMS. Delivery configurations studied include: only p-t-p transmissions with HSDPA (one for each active user), a single p-t-m transmission with MBMS, and using both jointly in a hybrid approach employing HSDPA for error repair of the MBMS transmission. The approach of minimizing the transmission energy (product of the transmit power times the transmission time) to achieve a target file acquisition probability (percentage of users that successfully receive the file) has been adopted. Radio network simulations have been performed in a typical urban scenario under full background load conditions. This way by minimizing the energy the system capacity is maximized. We investigate the optimum HSDPA and MBMS transmission configurations as a function of the time to deliver the file when used separately, and the optimum trade-off between the initial MBMS file transmission and the HSDPA error repair for the hybrid delivery.

**Index Terms**—Application layer FEC, HSDPA, Hybrid multicast-unicast delivery, MBMS, Raptor codes, 3G.

## I. INTRODUCTION

**A**FTER a slow start, third-generation (3G) mobile networks are now being deployed on a broad scale all over the world, and mobile operators have started to provide multimedia services, such as video clips from sports events or live TV programs. However, the capabilities of the first release

of the 3G standard are considerably limited, from both a cost and a technical viewpoint. In order to offer a viable business model, and to not overload the network capacity to the point of preventing subscribers from placing voice calls (which is the main function and value of the cellular networks), only short video clips with a low resolution can be offered (e.g., 2 minutes at 128 kbps) [1].

To meet the increasing demands for high-speed data access, the 3G standard was initially enhanced with HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) [2], which supports higher peak data rates (up to several Mb/s), increasing considerably the network capacity. HSDPA introduces a new channel shared by all users in the cell, and it relies on a fast scheduling at the base station every 2 ms to control the allocation of the shared resources (transmission power and channelization codes), the use of link adaptation (variable modulation and coding rate, the transmit power is kept constant), and feedback from the terminals. All this leads to both higher data rates for users in favorable reception positions and reduced interferences.

Another important bottleneck of the first release of the 3G standard not solved with HSDPA is the fact that it was optimized for unicast services delivered through dedicated point-to-point (p-t-p) connections for each individual user, even if the same content should be delivered to many users. Traditionally, cellular systems have focused on the transmission of data intended for a single user employing dedicated p-t-p radio bearers, not addressing the distribution of popular content to a large number of users. Unicast systems can easily support a wide range of services, as each user can consume a different service, being possible to optimize the transmission parameters for each user individually. The main drawback of unicast is its unfavorable scaling when delivering the same content to many users at the same time. This limits the maximum number of users cellular systems can handle, since both radio and network resources are physically limited.

Multicast and broadcast<sup>1</sup> are more appropriate transport technologies to cope with high numbers of users consuming simultaneously the same service compared to unicast. Multicast/broadcast wireless transmissions employ a common point-to-multipoint (p-t-m) radio bearer for all users, which allows delivering the same content to an unlimited number of users within the covered area [3].

Manuscript received August 18, 2008; revised July 10, 2009. This work was partially supported by the Spanish Ministry of Industry, Tourism and Commerce under the project FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual).

The authors are with the iTEAM Research Institute of the Universidad Politècnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Edificio 8G, 46022, Valencia, Spain (e-mail: {dagobar, anferag, ncardona}@iteam.upv.es).

<sup>1</sup>Multicasting and broadcasting describe different, although closely related, scenarios. Whereas broadcast transmissions are intended for all users in the service area, multicast transmissions are addressed to a specific group of users (usually called the multicast group).

However, as p-t-m transmissions are intended for multiple users, it is not possible to dynamically adapt the transmission parameters according to the users' reception conditions, and the transmissions should be configured statistically to serve the worst-case user contemplated. Furthermore, error correction cannot be achieved retransmitting lost packets on-demand, but only by Forward Error Correction (FEC) mechanisms.

In order to transmit efficiently the same content to several users simultaneously, the 3G standard has been enhanced with MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services) [4], which represents the second major improvement of the downlink after HSDPA. MBMS provides a seamless integration of multicast/broadcast transport technologies into the existing 3G networks and service architectures, introducing new p-t-m radio bearers and multicast support in the core network. To increase the robustness of the p-t-m transmissions, MBMS introduces new diversity techniques to cope against fast fading and to combine transmissions from multiple cells [2], and an additional FEC mechanism at the application layer based on Raptor coding [5].

MBMS will lead to a better utilization of the existing radio resources provided by 3G, enabling the provision of new mass multimedia services purposed for many people, which are expected to generate a large amount of data traffic in future wireless networks [6]. In MBMS multimedia content is delivered either as a streaming service or as a file download service [7]. For streaming services a continuous data flow of audio, video and subtitling is transmitted to the terminals which is directly consumed by the users, whereas for file download services a finite amount of data is delivered and stored into the terminals as a file before being accessed by the applications. The most representative streaming service is mobile TV. However, MBMS offers limited capacity compared to terrestrial digital broadcast networks specially designed for mobile services such as DVB-H (Digital Video Broadcast - Handheld) [8], and hence download services seem to be the MBMS application favored by most mobile operators.

In this article we specifically focus on the efficient multicast delivery of file download services in evolved 3G mobile networks with HSDPA and MBMS from a Radio Resource Management (RRM) point of view. File download services can be used for most content types like multimedia clips, high quality music files, digital newspapers, software download, etc., and they can be delivered either on demand or with a background transfer. Common to these services is the requirement of an error-free transmission of the files, as even a single bit error can corrupt the whole file and make it useless for the receiver. As it cannot be guaranteed that each and every user will be able to recover the file, because some users might have experienced too bad reception conditions, a post-delivery repair phase can be performed to complete the download. The repair phase employs by default p-t-p transmissions, but it is also possible to employ a p-t-m transmission in case too many users fail to receive the file [7]. Nevertheless, the initial MBMS p-t-m transmission must ensure that the file is transmitted error-free to nearly all users, in order to avoid congestion issues in the post-delivery repair phase (the so-called feedback implosion problem in multicast file delivery) [3].

RRM in evolved 3G cellular networks with HSDPA is a well-studied topic in the literature, see e.g. [9] and references therein. However, there is not that much information on MBMS, especially for file download services, being the most relevant literature [10], [11], and [12]. In [10] the optimum cross-layer FEC configuration at the physical and application layers is investigated by means of system-level simulations in a realistic cellular environment. It is shown that from an overall system perspective it is more efficient to employ low transmit powers and moderate coding at the physical layer, which results in relatively large radio packet loss rates that are compensated by using a substantial amount of application layer FEC. In [11] the trade-off between application layer FEC protection and successive file repair is discussed. It is shown that a 100% error free initial transmission of the file is not efficient, and it proposes a repair scheme combining both p-t-p and p-t-m transmissions to minimize the overall transmission time and the resource usage. This multicast-unicast delivery configuration is potentially more efficient than using a single p-t-m transmission. In a realistic scenario there will always be some users that experience significantly worse reception conditions than the majority, being more efficient to serve them through p-t-p connections [13]. The benefits of using HSDPA to repair the errors of the MBMS transmission are discussed in [12]. In all papers the performance measure is the transmission energy required to achieve a successful reception of the file by a certain percentage of users, defined as the product of the transmit power and the transmission time. But the initial MBMS transmission should be optimized for a given accepted amount of repair data during the HSDPA repair phase [12].

In this paper we extend the work presented in [10] going several steps further. First of all, we consider a more generic approach for optimizing the MBMS transmission, as we optimize the optimum bearer data rate instead of the coding rate at the physical layer for a fixed bearer [14]. Moreover, we consider an interference scenario with full background load conditions instead of a scenario without interferences from other services, being able to evaluate the maximum MBMS capacity (as only in this scenario the transmission energy is inversely proportional to the system capacity). Furthermore, we additionally consider multicast delivery using only HSDPA with multiple p-t-p transmissions (one per active user), in order to identify the situations where MBMS is more efficient than HSDPA, and also the hybrid approach by employing HSDPA for error repair of the MBMS transmission. In our investigations we initially consider a background service without any time constraint to deliver the file, but we also study the effect of reducing the transmission time.

The rest of the paper is organized as follows. First we provide an overview of MBMS in Section II. In Section III we explain how file download services are transmitted in MBMS, describing the main parameters that influence the overall system performance from an RRM perspective. In Section IV we describe the system models adopted in our radio network simulations. In Section V we provide some illustrative results on multicast file delivery with MBMS and HSDPA when used separately and when used jointly (hybrid approach). Finally, we give some concluding remarks in Section VI.

## II. MULTIMEDIA BROADCAST MULTICAST SERVICES AN OVERVIEW

MBMS provides a seamless integration of multicast and broadcast transport technologies into the existing 3G networks and service architectures, reusing much of the existing 3G functionalities. Thereby, it is possible to transmit the same content with a p-t-m connection (both at the radio network level and at the core network level) to multiple users in a unidirectional fashion<sup>2</sup>. MBMS introduces only small changes into the existing radio and core network protocols, as well as into most of the functional entities of the architecture, and adds a new entity called Broadcast/Multicast-Service Center (BM-SC) [4]. This new element is located between the 3G core network and the content providers, and it serves as an entry point for the content delivered with MBMS. The BM-SC acts as an MBMS server, and it manages certain control tasks, as setting up and releasing the bearers, service announcements, Raptor coding, billing, security, etc.

MBMS p-t-m transmissions use the Forward Access Channel (FACH), QPSK modulation and turbo codes at the physical layer, and a constant transmission power and bearer data rate during the complete transmission of the service. During the transmissions the uplink is not utilized, and there is no communication between the terminals and the server. The Radio Link Control (RLC) layer operates in unacknowledged mode, and terminals identify and discard erroneously received transport blocks each Transmission Time Interval (TTI) and do not request any retransmission. In practice, all transport blocks sent during one TTI are with a very high probability either all correct or all erroneous, as they are encoded at once by the turbo encoder in the physical layer, which is characterized by a very rapid transition from near perfect reception to no reception at all.

The configuration of the MBMS transmission parameters should be set taking the worst-case user into account, as it determines the coverage for the service. However, the absence of any link adaptation technique makes the MBMS physical layer very vulnerable against the dynamic variations of the radio channel (i.e., fast and slow fading). In order to increase the robustness of the p-t-m transmissions, MBMS introduces new diversity techniques and an additional FEC mechanism at the application layer based on Raptor coding that do not require any feedback from the users.

### A. MBMS Diversity Techniques

MBMS supports the use of long TTIs, up to 80 ms, to provide time diversity against fast fading due to mobility of terminals, and the combination of transmissions from multiple cells (sectors) to obtain a macro diversity gain [2].

Longer TTIs have the advantage of an increased time interleaving at the physical layer [15] at the expense of longer delays increasing the network latency. The unidirectional nature of MBMS hides these delays from the user perception.

<sup>2</sup>MBMS is split into the MBMS bearer service and the MBMS user service, in such a way that it integrates p-t-p and p-t-m radio bearers in a transparent way to the MBMS service layer. Thus, it is possible to deliver an MBMS service with p-t-p transmissions. For the sake of clarity, in the paper we associate MBMS only to p-t-m and HSDPA to p-t-p.

On the other hand, macro diversity techniques take advantage from the fact that MBMS services will be usually transmitted in several cells, being thus possible to combine signals from different cells. Macro diversity can be fully exploited at cell edges, which are usually the worst-served areas in 3G systems, as they are limited by interferences from neighboring cells. As a consequence, a significant macro diversity gain in terms of reduced transmit power can be achieved compared to the single cell reception case [15].

Two combining strategies are supported in MBMS: selective combining and soft combining. With selective combining, signals received from different cells are decoded individually, such that terminals select each TTI the correct data (if any). With soft combining, the soft bits received from the different radio links prior to decoding are combined. Soft combining results in higher improvements because it provides also a power gain (the received power from several cells is added coherently) [15]. But it is more difficult to implement because it requires to synchronize the transmissions between cells.

### B. Application Layer FEC

Raptor codes are a computationally efficient implementation of fountain codes that achieve close to ideal performance, and allows for a software implementation without the need of dedicated hardware even in handheld devices [5]. This, in turn, allows to efficiently support a large range of file sizes.

Fountain codes are a special class of FEC codes that can potentially generate an infinite amount of parity data on the fly (i.e., they are rateless). They were originally designed to allow very efficient asynchronous file downloading over broadcast channels without the need of a feedback channel [17]. They have been found to be very suitable for data delivery in wireless broadcast systems when working at the application layer; outperforming other FEC solutions in terms of implementation complexity, spectrum efficiency and flexibility. The main benefits of working at the application layer are:

- It is possible to recover packet losses of all underlying layers and protocols, providing end-to-end error recovery (e.g., they can even recover IP packets lost in the core network or the Internet).
- No standardization or modification is required below the application layer.

Raptor codes have been standardized as application layer FEC codes for MBMS, for both streaming and file download services [7], to handle packet losses in the transport network and in the radio access network [16]. The standardized version is a systematic code, meaning that the original source data packets are transmitted first followed by additional parity packets. Obviously, if all source packets are correctly received, no parity data is needed at all. Otherwise, as Raptor codes achieve close to ideal performance, only a slightly greater number of packets than the number of source packets are needed (1-5% reception overhead, in average) [10]. It does not matter which packets are received but that enough packets are correctly received. In this way it is possible to benefit from the spatial diversity introduced by the users' mobility, and thus it can be also seen as another diversity technique.

### III. FILE DELIVERY IN MBMS

Generally speaking, a file download service in MBMS consists in three phases:

- 1) Service advertisement phase; in which the service is announced and set-up by the network and the users discover the service.
- 2) Initial MBMS file transmission phase; in which both source data file and a fixed pre-configured amount of Raptor parity data are initially transmitted with a p-t-m connection.
- 3) Post-delivery repair phase; in which users not able to decode the file after the initial MBMS transmission are served by default via p-t-p HSDPA connections to complete the reception of the file. In case too many users fail to receive the file it is also possible to employ a p-t-m connection.

In order to achieve an efficient delivery it is needed to optimize the initial MBMS file transmission including the trade-off with the error repair phase [12]. Fig. 1 shows a temporal diagram of both phases. For a more detailed description of the procedures involved we refer to [7].

#### A. Initial MBMS File Transmission Phase

In this phase the MBMS server must configure the transmission parameters statistically to ensure that the file is successfully received by the worst-case user contemplated, such that the desired file acquisition probability is reached (percentage of users that receive the file).

The robustness of the MBMS transmission is mainly given by the coverage level and the amount of Raptor parity data transmitted. The coverage level depends on many factors: scenario, macro diversity technique implemented in the terminals, interference conditions, radio bearer, etc. The only parameters that the network operator can control are the transmit power, the radio bearer settings, and the amount of Raptor parity data transmitted (or alternatively the transmission time, which can be limited by a maximum time to complete the transmission of the service). The transmit power and the radio bearer yield the area coverage. Obviously, the higher the transmit power, the larger the coverage level (keeping the bearer fixed), and thus the amount of required parity data will be smaller, and the service transmission time will be reduced. However, maximizing the transmit power does not necessarily need to be the optimum configuration, as 3G systems are interference-limited, and the interference level is directly proportional to the transmission powers. Moreover, a very high coverage level does not exploit the diversity gain that can be achieved with Raptor coding due to the mobility of the users [10]. This diversity gain is higher for larger user velocities, and thus the amount of parity data required depends on the degree of mobility of the users. On the other hand, when increasing the bearer data rate the file should be in theory received faster by the users. However, it should be taken into account that an increase in the bearer data rate results in a reduction of the area coverage (keeping the transmit power constant), what implies an increase in the transmission time.

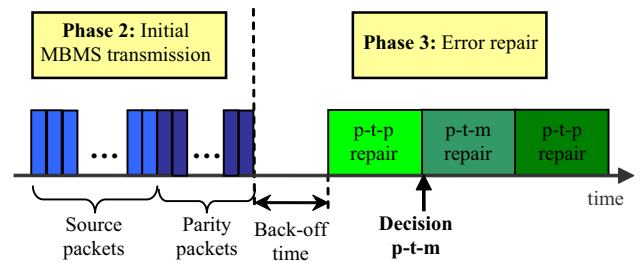


Fig. 1. MBMS file download service. Initial p-t-m MBMS transmission phase and error repair phase.

#### B. File Repair Phase

After the initial MBMS transmission, terminals not able to recover the file compute a random access time to the repair procedure within a given back-off window and a random repair server. The back-off window should be large enough to prevent congestion, but should not unnecessarily increase the duration of the repair phase. Terminals can notify the data packets required to repair the file or the total number of correctly received packets [7]. One important benefit of Raptor coding is that it can generate additional parity packets on-demand without knowing the total number of packets needed that can be used by all users.

Terminals start the repair phase using dedicated p-t-p (HSDPA) connections, but if the number of active users in this phase is high enough it is possible to employ a p-t-m connection. However, as during the initial file transmission there is no communication between the terminals and the server, once the MBMS transmission is finished the server does not have any information about the number of users that have not received the file and the amount of repair data needed by each of them. This information can be estimated in the beginning of the p-t-p repair session.

The decision of performing a p-t-m repair transmission should be taken as soon as possible once a representative number of error reporting messages have been collected. Usually, it is recommended to take this decision once the 10% of the back-off window has elapsed [11]. The amount of repair data transmitted through the p-t-m connection can be for example the maximum amount of repair data requested by the users at that time. Once the p-t-m repair session is completed, a new p-t-p repair session can be initiated if needed as there is no guarantee that users will receive the data transmitted with MBMS. In this case, the length of the second back-off window should be smaller than the first one, since a lower load on the repair server can be expected.

It should be also pointed out that the repair server should immediately proceed to initiate a p-t-m repair session as soon as congestion is detected. This may happen if, for example, the robustness of the initial MBMS transmission is too low, or unexpected transmission errors occur. According to [11], the link most likely to become the bottleneck is the one between the repair server and the cellular network (more precisely the GGSN). Nevertheless, the capability of generating additional Raptor parity data that can be used by all users could be employed to alleviate the congestion at the core network using multicast transmissions even if p-t-p radio bearers are used.

Besides the duration of the back-off window, the main parameter that the network operator should configure in the p-t-p repair session is the HSDPA transmit power devoted to repair the file. Higher power levels will imply that the users receive the file faster, although it may not be the most efficient resource allocation as explained before. It should be noted that the performance of the p-t-p repair phase with HSDPA depends on the actual number of users that fail to receive the file after the initial MBMS transmission and their positions.

#### IV. SYSTEM MODELS

##### A. Deployment Scenario

Radio network simulations have been performed in a typical urban scenario of 19 cells. The cell radius is 866 m and the inter-site distance is 1.5 km. No cell sectorization is considered and omnidirectional antennas have been assumed at the base stations. All users are located outdoors moving according to a pedestrian mobility model (average velocity 3 km/h). To obtain statistically consistent file acquisition probability results with a 1% resolution, we have simulated 10000 users.

##### B. Link Budget

Link budget values corresponding to an urban scenario at a frequency of 2 GHz have been considered. We assume lognormal shadowing with a standard deviation of 8 dB and a correlation distance of 50 m (correlation factor between cells is 0.5). Fast fading (Rayleigh distributed) is also considered. The distance dependent path loss has been modeled with an Okumura-Hata propagation model, and it is computed as:

$$L_d(\text{dB}) = 15.3 + 37.6 \cdot \log_{10}[d], \quad (1)$$

where  $d$  is the distance in meters. The thermal noise power at the terminals is -99 dBm, modeled with an omnidirectional antenna of 0 dBi gain. The maximum transmission power per cell is 20 W. All simulated cells transmit with the same power. It has been considered that control channels use 4 W.

##### C. Interference Model

In the simulations, both intra and inter-cell interferences are considered. A constant orthogonality factor is used to characterize the interference between channels of the same cell. The performance of MBMS and HSDPA has been tested under full background load conditions, assuming that all base stations transmit at the maximum power of 20 W, modeling a worst-case interference scenario. Other services are simulated to contribute with intra-cell interference.

The average Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR) during a TTI for user  $i$  and base station  $j$  is computed as:

$$\overline{\text{SINR}}_{i,j} = \frac{S_{\text{useful}}}{I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}} + P_N}, \quad (2)$$

where  $S_{\text{useful}}$  is the useful received power,  $I_{\text{intra}}$  and  $I_{\text{inter}}$  are the intra-cell and inter-cell interference levels, and  $P_N$  is the thermal noise. They are computed as:

$$\begin{aligned} S_{\text{useful}} &= g_{i,j} \cdot P_{U,j} \\ I_{\text{intra}} &= (1 - \rho) \cdot g_{i,j} \cdot (P_{T,j} - P_{U,j}) \\ I_{\text{inter}} &= \sum_{k \neq j} g_{i,k} \cdot P_{T,k} \end{aligned} \quad (3)$$

Where  $g_{i,j}$  is the path gain (inverse of the path loss) between user  $i$  and base station  $j$  including shadowing,  $P_{U,j}$  is the transmitted power of the desired channel,  $\rho$  is the orthogonality factor (the value employed in the simulations is  $\rho = 0.6$ ), and  $P_{T,j}$  is the total transmitted power of base station  $j$ .

It should be pointed out that the spreading factor of the channel also affects the average SINR, but in our case it is included in the radio link performance model described next.

##### D. Radio Link Performance Model

The radio link performance model is based on a shifted version of the Shannon limit, as proposed in [18]. The maximum data rate, in bps/Hz, that can be achieved for a given SINR is computed as:

$$R_b = \log_2[1 + \gamma \cdot \text{SINR}], \quad (4)$$

where  $0 < \gamma \leq 1$  is a degradation term, which shifts the link performance away from the Shannon limit.

The effective data rate is obtained from multiplying  $R_b$  with the amount of spectrum utilized for the transmission (5 MHz for 3G). In our simulations we have chosen a value of  $\gamma = 0.4$  (4 dB degradation from Shannon limit and assumption of BER  $10^{-4}$  [19]).

##### E. MBMS and HSDPA Performance Models

In the simulations we compute the path losses including shadowing every 80 ms (MBMS TTI period), and the fast fading every 2 ms (HSDPA TTI period).

In our MBMS simulations we compute the number of correctly received TTIs by each user. We first compute the average SINR considering path loss and shadowing in the TTI, and the fast fading experienced by each 2 ms slot. Then we compute the effective SINR in the TTI using the ECM method (Equivalent SNR Method based on Convex Metric) [10]. To decide whether the TTI is correctly received or not, we compare the effective SINR value to the threshold given by (4) for the bearer data rate employed. For the sake of simplicity we have assumed that one Raptor-coded packet is transmitted per TTI.

In our HSDPA simulations we compute the instantaneous SINR every 2 ms TTI (average SINR plus fast fading), and we assume that the effective data rate given by (4) is always correctly received (i.e., ideal link adaptation without retransmissions of lost packets). We consider a minimum data rate equal to 80 kbps (minimum that can be provided in HSDPA), meaning that users can be in outage, and a maximum data rate equal to 2 Mbps.

##### F. Raptor Code Model

To account for a practical implementation of a Raptor code, a constant 5% reception overhead has been assumed, as this will generally allow recovery of the file in most cases [10].

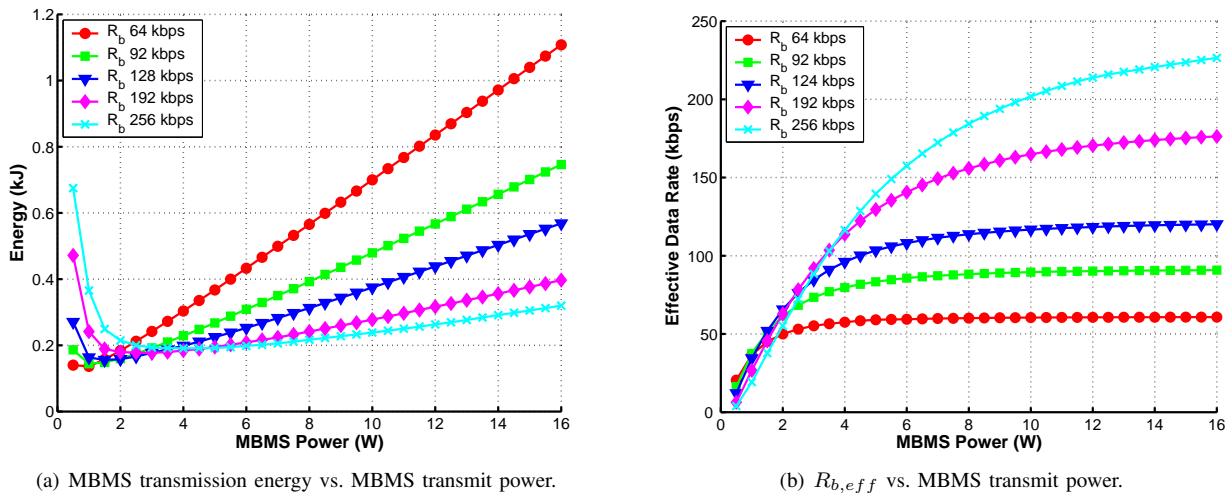


Fig. 2. MBMS file download results without time constraints. File size 512 KB. Acquisition probability 99%. Reference case without any macro diversity combining technique.

## V. RESULTS AND DISCUSSIONS

### A. Performance Evaluation

In this section we present comprehensive simulation results for a file download service using only MBMS with a single p-t-m transmission [14], using only HSDPA with simultaneous p-t-p transmissions, and using MBMS and HSDPA jointly (where HSDPA is used to repair the errors of the initial MBMS transmission). Results focus on determining the optimum transmission configurations that provide the minimum transmission energy to achieve a given file acquisition probability target with and without time constraints. The transmission energy is defined as the product of the transmit power and the active transmission time:

$$E = P_{tx} \cdot T_{tx}. \quad (5)$$

By minimizing the energy, the radio resource usage is minimized and the cell capacity maximized. The cell capacity represents a measure of the total data rate that can be provided when all the available power is used for file download services. It can be computed as:

$$C_{cell} = \frac{P_{available}}{P_{tx}} \cdot \frac{F_s}{T_{tx}}, \quad (6)$$

where  $P_{available}$  is the available power (16 W in our case),  $P_{tx}$  is the transmit power per channel,  $F_s$  is the file size and  $T_{tx}$  the transmission time.

For MBMS we investigate the optimum transmit power and bearer data rate. The effective bearer data rate depends on several factors (such as spreading factor, turbo-code coding rate, transport block format, etc.), and thus several configurations may provide the same data rate. The reference MBMS radio bearers that have been defined for interoperability and testing purposes as preferred configurations for specific data rates can be found in [20].

For HSDPA we only investigate the optimum transmit power, as we assume a MaxCIR scheduling algorithm. This strategy consists of serving the user who presents the best reception conditions in terms of SINR (no code multiplexing

is assumed, only time multiplexing), or equivalently, the one with the highest achievable data rate.

For the hybrid MBMS-HSDPA delivery case we investigate the optimum balance between the initial MBMS transmission and the HSDPA error repair phase by computing the optimum file acquisition probability after the MBMS transmission. It can be shown that the optimum delivery configuration corresponds to a hybrid multicast-unicast delivery with only p-t-p repair transmissions, as in case a p-t-m repair transmission is needed it would have been more efficient to increase the duration of the initial p-t-m transmission instead. The overall energy subject to minimization is thus:

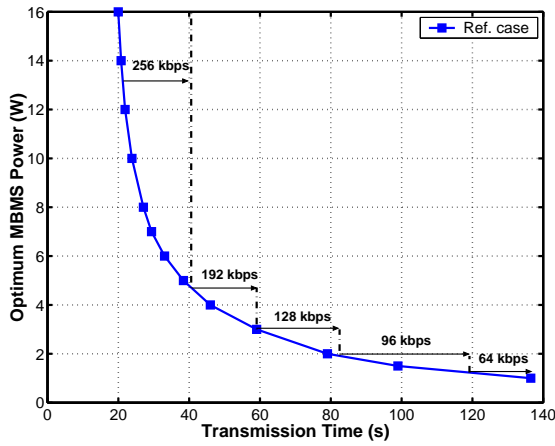
$$E_{Hybrid} = E_{MBMS} + E_{HSDPA}. \quad (7)$$

We assume that the same power employed for MBMS is used for HSDPA, and that the back-off window during the error repair phase is set to zero, in order to make a fair comparison with the results obtained when using only MBMS. This implies that there are no congestion problems in the network, and that the radio link is the bottleneck.

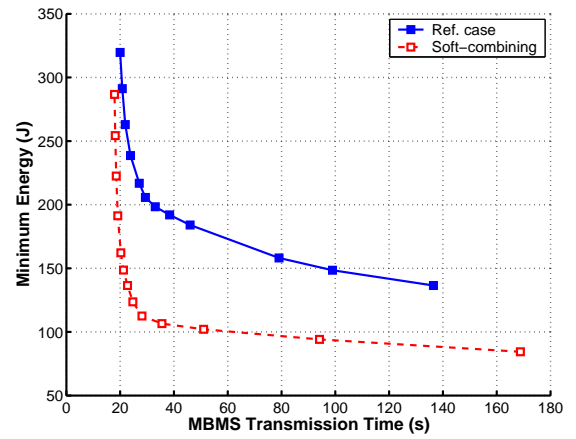
As a reference study case we will consider a 512 KB file and a 99% target file acquisition probability, although the implications of considering smaller and larger file sizes (128 KB and 2 MB), and different acquisition probability targets will be also discussed and some selected results will be presented. For MBMS we have analyzed the cases without any macro diversity combining technique (reference case), and the case with soft combining (SC) with 2 radio links. Feasible MBMS bearer data rates employed in the simulations are: 64, 96, 128, 192, and 256 kbps, and useful transmit power values range from 0.5 up to 16 W for both MBMS and HSDPA.

### B. File Delivery Results with MBMS

Fig. 2 shows the energy required per cell to achieve a 99% acquisition probability of a 512 KB file with MBMS as a function of the transmit power for different bearer data rates for the reference case without macro diversity.



(a) Optimum transmit power and bearer vs. Transmission time.



(b) Minimum MBMS energy vs. Transmission time.

Fig. 3. Time-constrained MBMS file download results. File size 512 KB. Acquisition probability 99%.

We can see that there is an optimum power value in general at low powers that minimizes the energy for a given bearer data rate. Results obtained can be explained due to the fact that it is more efficient to take advantage of the spatial diversity gain introduced by the mobility of the users allowing relatively high loss rates at the physical layer and correct them at the application layer transmitting a considerable amount of Raptor parity data [10]. However, if the transmit power is set too low the download delivery time increases drastically, leading to higher energy values.

Fig. 2(b) shows the effective service data rate for each combination considered, defined as the ratio between the file size and the transmission time required to achieve the target acquisition probability:

$$R_{b,eff} = \frac{F_s}{T_{tx}}. \quad (8)$$

As expected, the larger the useful transmit power, the higher the effective data rate, achieving a faster distribution of the file (although the number of available channels is reduced).

Coming back to Fig. 2(a), we can notice the importance of optimizing the bearer data rate as a function of the transmit power employed. In the figure it can be observed that the optimum bearer for large powers is the maximum considered, 256 kbps. The reason is that the signal level is high enough such that most users can benefit of transmitting more data per TTI. When the transmit power decreases, the optimum bearer data rate decreases. We can see this effect in Fig. 3(a), that shows the optimum transmit power as a function of the transmission time highlighting the ranges where each bearer data rate is optimum. The fastest delivery is achieved for the largest transmit power and bearer data rate considered. Results obtained agree with the ones presented in [10], where the code rate of the turbo-coder at the physical layer is optimized. However, it should be pointed out that there is a performance degradation when puncturing the turbo coding rate, and it may be more efficient to change other bearer parameters like the spreading factor instead [20].

Fig. 3(b) depicts the minimum energy per cell as a function of the transmission time with and without soft combining.

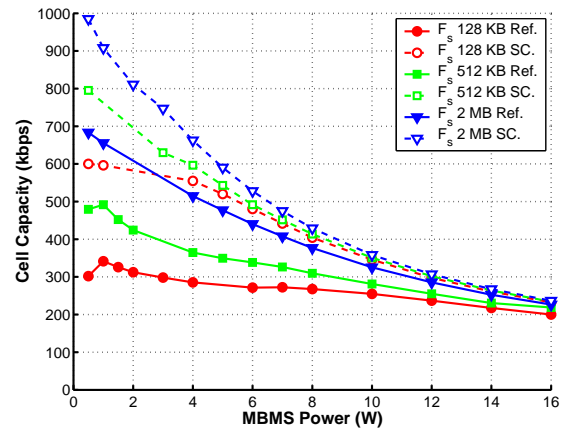


Fig. 4. Maximum MBMS Cell capacity vs. MBMS transmit power. File acquisition probability 99%.

A significant performance improvement with soft combining is observed, in both reduced transmission time and energy). The trade-off between the resource consumption and the file delivery time is evident. The relationship between energy and transmission time reveals that the once certain duration is exceeded the energy reduction is noticeably slower. Hence, the preferred configurations may not be the ones that provide the minimum energy to avoid very long transmission times.

Fig. 4 shows the maximum MBMS cell capacity as a function of the transmit power for different file sizes for both macro diversity cases. When comparing the different file sizes, we can see that it is more efficient to deliver larger files, especially for the reference case. This is because the Raptor coding efficiency improves for larger files, as the spatial diversity experienced by the users during the transmission of the file is larger for a given proportion of parity data transmitted. With soft combining, as the coverage level is considerably higher, less Raptor parity data is required, and thus the diversity gain is smaller. Note for example that for high powers all file sizes provide almost the same capacity. This is because the coverage level is close to 100%, and very little Raptor parity data is required.



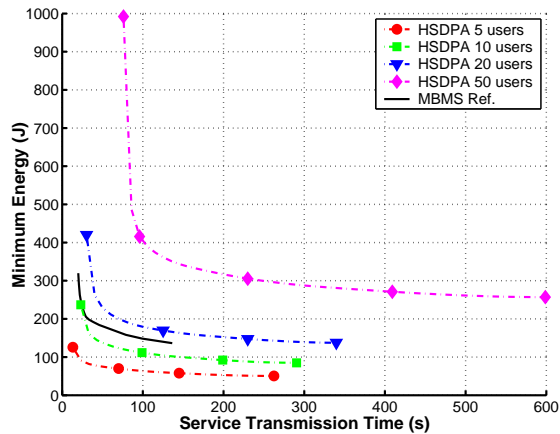


Fig. 5. HSDPA file download results with time constraints. File size 512 KB. Acquisition probability 99%.

### C. File Delivery Results with HSDPA

Multicast delivery with multiple p-t-m HSDPA simultaneous connections yields a transmission energy directly proportional to the number of active users. Interestingly, the minimum energy is achieved for the minimum power considered like in MBMS, which also incurs the largest delivery time. Therefore, there is again a trade-off between resource consumption and service transmission time.

Fig. 5 shows the energy required per cell to deliver a 512 KB file to 99% of the users with HSDPA as a function of the transmission time for different number of users per cell. The minimum energy achievable with MBMS (reference case without macro-diversity) is also shown for comparison. If we compare the minimum energy required with HSDPA as a function of the number of active users with the minimum energy required with MBMS (i.e., 0.5 W transmitted power), it is more efficient to employ HSDPA if there are up to 20 users per cell. In case soft combining is implemented the threshold goes down to only 10 users. The threshold depends on the file size and the acquisition probability target, see Table I.

For the reference case without macro diversity the threshold decreases for larger files because MBMS performs more efficiently. HSDPA also benefits of larger files in the sense that there is a larger scheduling gain, but in a lower extent than MBMS. With soft combining the threshold is practically constant. This is because the efficiency improvement obtained when considering larger files with HSDPA is similar to the one obtained for MBMS with soft combining.

In Table I we can note that the threshold increases for larger acquisition probabilities targets. This is because with MBMS it becomes increasingly more costly to serve the final percentage of users [12]. These users are the ones located in bad reception locations that move at low speeds, and they cannot be efficiently served with MBMS if low transmit powers are employed. The key with HSDPA is that the transmissions are optimized for each user individually, and that resources are only consumed when one user is actively using the service (i.e., there is at least one user in coverage). With MBMS the transmission parameters are fixed and the transmission remains active during the complete initial file transmission phase.

TABLE I  
NUMBER OF USERS THRESHOLD HSDPA vs. MBMS.

File size	90% Acq. Prob.		95% Acq. Prob.		99% Acq. Prob.	
	Ref.	SC	Ref.	SC	Ref.	SC
128 KB	16	7	18	9	26	12
512 KB	12	7	14	8	20	10
2 MB	10	6	11	8	15	9

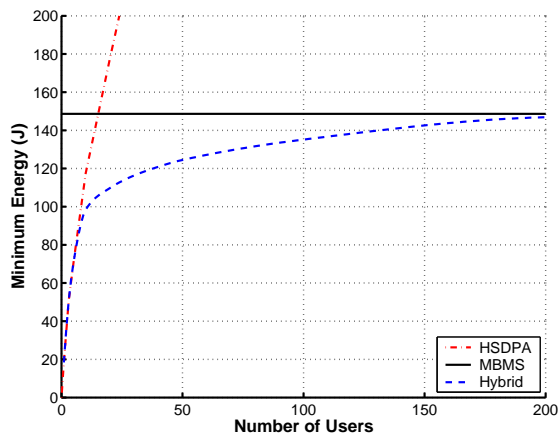
It is worth highlighting that the threshold does not increase if larger HSDPA data rates are considered. The interference level is so high, and the useful transmission power is so low, that it is not possible to benefit from higher rates. This may be useful for a time-constrained file delivery in a network with low/medium load conditions. With HSDPA, if there is a maximum time to deliver the file, the optimum transmit power is the minimum value that transmits the file in due time. However, the efficiency of MBMS compared to HSDPA increases when reducing the time to deliver the file to the users as it is more difficult to serve them with simultaneous p-t-p connections, see Fig. 5.

### D. File Delivery Results with MBMS and HSDPA

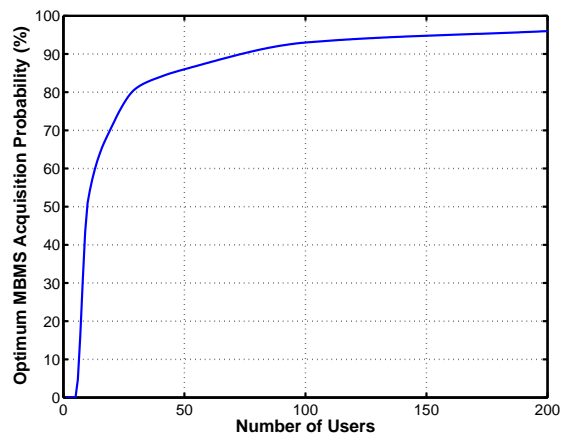
Fig. 6(a) shows the minimum energy that can be achieved with a hybrid delivery for the MBMS reference case without macro diversity to obtain a 99% acquisition probability of a 512 KB file as a function of the number of users compared to using MBMS and HSDPA separately. We do not consider any time constraint to deliver the files, and hence the transmit power value employed for both MBMS and HSDPA is 0.5 W.

Recall that the only parameter subject to optimization for the hybrid delivery is the MBMS transmission time, or in other words the percentage of users that successfully receive the file during the MBMS transmission. The optimum MBMS acquisition probability increases as a function of the number of active users, see Fig. 6(b). This is simply because the efficiency of MBMS compared to HSDPA increases with the number of users. For few users per cell, up to 5 users in our example, it equals to zero percent, meaning that MBMS is not used and all users are served with HSDPA. For more users than this threshold the optimum delivery configuration corresponds to a hybrid MBMS-HSDPA delivery. The gain increases until the crossing point of the two reference curves using HSDPA and MBMS separately. This is the point where the highest energy reduction with the hybrid delivery is achieved (about 30% energy reduction in this case), see Fig. 6(a). After this point, the gain decreases with the number of users per cell. For very large number of users there is very little gain using HSDPA as a complement of the MBMS transmission, and the optimum MBMS acquisition probability is close to the overall target, see Fig. 6(b).

The gain brought by the hybrid delivery increases for higher acquisition probabilities targets, as it becomes very costly to serve the last percentage of users using only MBMS, see Table II.



(a) Minimum energy.



(b) Optimum MBMS acquisition probability.

Fig. 6. Hybrid MBMS-HSDPA file download results without time constraints. File size 512 KB. Acquisition probability 99%. MBMS reference case without macro-diversity.

TABLE II  
MAXIMUM HYBRID ENERGY GAIN IN % (NUMBER OF USERS).

File size	95% Acquisition Prob.		99% Acquisition Prob.	
	Ref.	SC	Ref.	SC
128 KB	21% (20)	15% (9)	32% (27)	27% (11)
512 KB	20% (13)	14% (9)	30% (16)	23% (11)
2 MB	10% (12)	13% (8)	20% (16)	10% (10)

The energy reduction achieved behaves in a similar way than the number of users required so MBMS is more efficient than HSDPA. That is, the gain decreases for larger files and when implementing soft combining. The reason is that in these cases MBMS performs better, and thus the gain obtained by using HSDPA as a complement is lower. Very important energy reductions can be achieved, especially for the MBMS case without macro diversity (up to 30% for small and medium files).

Finally, our study ends with the analysis of the hybrid MBMS-HSDPA delivery with time constraints. Fig. 7 shows the minimum energy as a function of the transmission time for different number of active users per cell. Again the reference case using only MBMS is also shown. We can see how the hybrid gain decreases for larger number of users per cell.

## VI. CONCLUSIONS

In this paper we have discussed multicast delivery in evolved 3G mobile networks with HSDPA and MBMS, focusing on the potential efficiency gain that can be achieved with MBMS using a single p-t-m transmission compared to multiple p-t-p HSDPA connections, and how this gain can be further increased with a hybrid MBMS/HSDPA delivery (first MBMS p-t-m transmission and then p-t-p error repair with HSDPA).

We have shown that for HSDPA the optimum transmit power that minimizes the transmission energy is the minimum power value that delivers the file in due time.

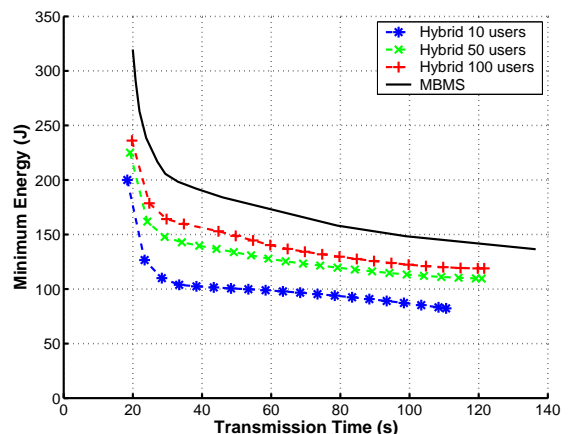


Fig. 7. Time-constrained hybrid MBMS-HSDPA file download results: Minimum energy vs. Service transmission time. File size 512 KB. Acquisition probability 99%. MBMS reference case without macro-diversity.

The problem with HSDPA is that the required resources are directly proportional to the number of active users in the cell, and thus it is not efficient to deliver medium and big files to large user groups. In these cases a considerable gain can be obtained performing a p-t-m transmission with MBMS.

For MBMS we have shown that it is more energy efficient to reduce the transmit power and increase the amount of Raptor parity data transmitted at the expense of a larger file delivery time in order to benefit from the time diversity of the mobile radio channel. This diversity gain is higher for larger files, enhancing the Raptor coding efficiency for the same proportion of parity data transmitted, being thus more efficient to deliver larger files. When the transmission of the file takes place over a limited amount of time, the optimum power is the minimum power value that delivers the file in due time as in HSDPA. However, the gain of MBMS compared to HSDPA increases when reducing the file transmission time.

The problem with MBMS is that it becomes very costly to serve the last percentage of users using only a p-t-m transmission, especially for the reference case without macro diversity,

and hence a significant gain can be achieved employing HSDPA to serve the worst-case users (up to 30% under certain settings). HSDPA outperforms MBMS in these cases because resources are only consumed when at least one user is actively using the service. The resource consumption reduction behaves in a similar way as the number of users required so MBMS is more efficient than HSDPA. That is, the gain decreases for larger files, for lower file acquisition probabilities, and when implementing macro diversity techniques. The reason is that in these cases MBMS performs better, and thus the gain obtained by using HSDPA as a complement is lower. Interestingly, obtained results show that from an overall system perspective it is not always efficient to serve nearly all users with MBMS, but rely on HSDPA to serve the final 20-30% of users.

## REFERENCES

- [1] Y. Solomon, "The Economics of Mobile Broadcast TV," Mobile DTV Alliance Whitepaper, Jan. 2007.
- [2] S. Parkvall, E. Englund, M. Lundevall, and J. Torsner, "Evolving 3G Mobile Systems: Broadband and Broadcast Services in WCDMA," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 2, pp. 68-74, Feb. 2006.
- [3] R. Walsh, A. P. Vainio, and J. Aaltonen, "Content Networking in the Mobile Internet: Multicast Content Delivery for Mobiles," Wiley 2004.
- [4] F. Hartung, et al., "Delivery of Broadcast Services in 3G Networks," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 52, no. 1, pp. 188-199, March 2007.
- [5] A. Shokrollahi, "Raptor Codes," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2251-2567, June 2006.
- [6] B. Karlson, A. Bria, J. Lind, P. Lönnqvist, and C. Norlin, "Wireless Foresight: Scenarios of the Mobile World in 2015," Wiley, 2003.
- [7] 3GPP TS 26.346 v6.11.0, "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and Codecs," March 2008.
- [8] G. Faria, J. A. Henriksson, E. Stare, and P. Talmola, "DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices," *Proc. of the IEEE*, vol. 94, no. 1, pp. 194-209, Jan. 2006.
- [9] H. Holma, T. Kolding, K. Pedersen, and J. Wigard, "HSDPA/HSUPA for UMTS: Radio Resource Management," Wiley 2006.
- [10] M. Luby, T. Gasiba, T. Stockhammer, and M. Watson, "Reliable Multimedia Download Delivery in Cellular Broadcast Networks," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 52, no. 1, pp. 235-246, March 2007.
- [11] T. Lohmar, P. Zhaoyi, and P. Mahonen, "Performance Evaluation of a File Repair Procedure based on a Combination of MBMS and Unicast Bearers," *Proc. IEEE WoWMoM*, Niagara Falls, USA, 2006.
- [12] T. Lohmar and J. Huschke, "Radio Resource Optimization for MBMS File Transmissions," *Proc. IEEE BMSB*, Bilbao, Spain, 2009.
- [13] A. Bria, "Cost-based Radio Resource Management in Hybrid Cellular-Broadcasting Systems," *Proc. IEEE VTC Spring*, Stockholm, Sweden, 2005.
- [14] D. Gómez-Barquero, A. Fernández-Aguilella, and N. Cardona, "Multicast Delivery of File Download Services in 3G Mobile Networks with MBMS," *Proc. IEEE BMSB*, Las Vegas, USA, 2008.
- [15] 3GPP TR 25.803 v6.0.0, "S-CCPCH Performance for MBMS," Sept. 2005.
- [16] "How DF Raptor Technology is used in MBMS," Digital Fountain White Paper, 2007.
- [17] J. Byers, M. Luby, and M. Mitzenmacher, "A Digital Fountain Approach to Asynchronous Reliable Multicast," *IEEE JSAC*, vol. 20, no. 8, pp. 1528-1540, Oct. 2002.
- [18] K. L. Baum, T. A. Kostas, P. J. Sartori, and B. K. Classon, "Performance Characteristics of Cellular Systems with Different Link Adaptation Strategies," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 6, pp. 1497-1507, Nov. 2003.
- [19] X. Qiu and K. Chawla, "On the Performance of Adaptive Modulation in Cellular Systems," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 47, no. 6, pp. 884-895, June 1999.
- [20] 3GPP TR 25.993 v6.15.0, "Typical Examples of Radio Access Bearers (RABs) and Radio Bearers (RBs) supported by Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)," Oct. 2007.



**David Gómez-Barquero** received a double M.Sc. degree in Telecommunications engineering from the Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Spain, and the University of Gävle, Sweden, in 2004, and a Ph.D. in Telecommunications from UPV in 2009. During his doctoral studies he was a guest researcher at the Royal Institute of Technology, Sweden, the University of Turku, Finland, and the University of Braunschweig, Germany. He also participated in the International R&D Summer Internship Program at Ericsson Eurolab, Aachen, Germany in 2004. His main research interests are in the area of mobile multimedia broadcasting, in particular radio resource management, forward error correction, and network planning issues in DVB and MBMS systems. Currently he is co-chairman of the special interest group on hybrid cellular and broadcasting networks in the COST2100 action and he is participating in the completion of the DVB bluebook on upper layer forward error correction as an invited expert.



**Ana Fernández-Aguilella** received her M.Sc. degree in Telecommunications engineering from the Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Spain, in 2007. Her M.Sc. thesis was awarded by the Telefónica chair of UPV and the Ericsson chair of the Official College of Telecommunications Engineers of Spain. She is currently working as an R&D engineer at the Mobile Communications Group in UPV. Her research focuses on radio resource management for broadcasting services in 3G/LTE cellular networks and in hybrid cellular and broadcasting

DVB-H networks.



**Narcís Cardona** was born in Barcelona, Spain. He received a M.Sc. degree in Telecommunications engineering from the Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, in 1990 and the Ph.D. in Telecommunications from the Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Spain, in 1995. Since 1990 he is with the UPV, where presently he is Full Professor, and is in head of the Mobile Communications Group. Additionally he is Director of the Mobile Communications Master Degree, and Assistant Director of the Research Institute on Telecommunications and Multimedia Applications (iTEAM). Prof. Cardona has led several National research projects and has participated in some European projects, Networks of Excellence and other research forums, always in Mobile Communications aspects. At European level, he has been Vice-Chairman of the COST273 Action, and he is currently in charge of the WG3 of COST2100 in the area of Radio Access Networks. He also chaired the 3rd International Conference on Wireless Communications Systems (ISWCS'06). His current research interests include Mobile Channel Characterisation; Planning and Optimisation Tools for Cellular Systems, RRM Techniques applied to Personal Communications and Broadcast Cellular Hybrid Networks.

# RRM for Filecasting Services in Hybrid DVB-H/3G+ Systems

David Gómez-Barquero, Ana Fernández-Aguilella, Narcís Cardona  
Mobile Communications Group - iTEAM Research Institute  
Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Spain  
Email: {dagobar, anferag, ncardona}@iteam.upv.es

Aurelian Bria  
Radio Communication Systems Lab  
Royal Institute of Technology (KTH), Sweden  
Email: aurelian@kth.se

**Abstract**— This article investigates efficient broadcast delivery of file download (filecasting) services in hybrid broadcast and cellular systems formed by a DVB-H network and an evolved 3G+ cellular network with HSDPA and MBMS capabilities. In particular, we investigate the delivery cost savings that can be achieved using HSDPA and MBMS to repair errors of the initial DVB-H broadcast transmission. In a realistic scenario, there may be users that experience significantly worse DVB-H reception conditions than the majority, such that it may be more efficient to serve them through the cellular network. To enable an easy and efficient implementation of the repair mechanisms in the hybrid DVB-H/3G+ system, we adopt application layer forward error correction (AL-FEC) with Raptor coding. With AL-FEC specific packets are not required to be retransmitted, and repair transmissions consist of additional repair packets that can be used for all users. Hence, repair data can be seamlessly delivered with unicast HSDPA, multicast MBMS, and broadcast DVB-H transmissions. Furthermore, AL-FEC provides a multi-burst protection of the DVB-H transmission to exploit the time diversity of the mobile broadcast channel.

## I. INTRODUCTION

The combination of cellular networks with new mobile broadcast technologies is seen today as the optimum way to successfully introduce mass mobile multimedia services; complementing the personalization, interaction and billing features of cellular networks with the capability of efficiently delivering very popular content.

After a slow start, terrestrial mobile broadcasting DVB-H (Digital Video Broadcast - Handheld) networks are being deployed across Europe [1]. Although alternative technologies exist, such as T-DMB in South-Korea, ISDB-T in Japan, and Media FLO in USA; DVB-H seems today the most relevant mobile broadcasting technology worldwide, as it is also being deployed in South-East Asia and Africa. A key to the success of DVB-H is that it is introduced almost exclusively as a link layer on top of the European standard for digital terrestrial TV DVB-T (Digital Video Broadcast - Terrestrial), which is the most widely adopted system in the world. This way it is possible to share the same network infrastructure (e.g., transmitters, antennas, multiplexers).

One of the major concerns about the roll-out of DVB-H is that it is very expensive to deploy due to the large investment in infrastructure required to provide acceptable coverage levels.

Nowadays it is acknowledged that a thriving mass mobile multimedia market will not develop unless services are provided at low cost, making them affordable to users and profitable to operators. However, the combination of a DVB-H network with a cellular network into a hybrid cellular and broadcasting system<sup>1</sup> allows for an incremental deployment of the DVB-H infrastructure following the user demand [2]. This enables the provisioning of mass mobile multimedia services in a cost effective manner, because new DVB-H sites only need to be deployed where required and when needed [3].

Multi-mode cellular/DVB-H terminals enable new ways of delivering multimedia services by jointly using both radio access networks, as users do not care about which radio accesses their phone can handle and which one they are actually using. In the initial phases of the DVB-H network roll-out, the cellular network should be used not only to avoid broadcasting services that few people watch, but also to avoid deploying new DVB-H sites in low populated areas until it is economically justified. This approach leverages existing wireless infrastructure, and reduces the investment risks in the technology.

On the other hand, in a hybrid cellular and DVB-H system the cellular network can be also used for error repair of the broadcast transmissions. This hybrid broadcast-cellular delivery is potentially more efficient than using a single DVB-H transmission [4]. Intuitively, in a realistic scenario there will always be some users that experience significantly worse DVB-H reception conditions than the majority (due to fading, noise, interference), such that it may be more efficient to serve them through the cellular network. Although the capability of the cellular network to deliver repair data depends on the distance between users and base stations, and other external factors as the network load, the delivery cost may be reduced significantly.

Especially, evolved 3G+ cellular networks present a very good potential to complement DVB-H networks due to the recent enhancements of the 3G WCDMA standard, that allow high-speed point-to-point p-t-p unicast connections with HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) and point-to-

<sup>1</sup>It should be pointed out that there is no convergence in networks, since both DVB-H and cellular networks are used separately and independently. Convergence is realized in services, platforms and multi-mode terminals which support both radio access technologies.

multipoint p-t-m multicast transmissions with MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services) [5]. From a radio resource management (RRM) perspective, a hybrid DVB-H/3G+ system combines the best of cellular and broadcast existing technologies. But in such systems it becomes crucial a proper joint management of the available radio resources in order to exploit their potential benefits.

In this paper we investigate the potential cost delivery savings that can be achieved if an evolved 3G+ cellular network with HSDPA and MBMS is used to repair errors of the broadcast transmissions of a DVB-H network. We focus on file download services (filecasting) because they exhibit the largest potential from a hybrid broadcast-cellular delivery point of view. File delivery requires an error-free reception of the files, which cannot be guaranteed for each and every user after a DVB-H transmission because some users might have experienced too bad reception conditions. Moreover, it does not have very stringent time constraints such as streaming delivery.

We assume a hybrid DVB-H/3G+ system in place, with the DVB-H network providing only partial coverage over the service area. We adopt the perspective of a network operator which controls both broadcasting and cellular networks. We adopt a similar framework for cost-based RRM in hybrid cellular and broadcast systems than the originally proposed in [4]. The delivery cost is assumed to be proportional to the amount of radio resources employed. In our case, the broadcast cost is proportional to the amount of data transmitted in DVB-H, and the cellular cost is proportional to the transmission energy, defined as the product of the transmit power times the transmission time. Minimizing the transmission energy the cell capacity is maximized.

To enable an easy and efficient implementation of the repair mechanisms, we adopt the use of forward error correction at the application layer (AL-FEC) with Raptor coding [6]. Raptor codes are a computationally efficient implementation of fountain codes that achieve close to ideal performance [6]. They have been standardized in DVB-H for file delivery services [7], and also in 3G+ MBMS for both streaming and file download services [8]. The main benefits of Raptor coding are that they can encode large amounts of data and that they can be implemented in software without the need of dedicated hardware.

In DVB-H, AL-FEC can be used to enhance the robustness of the transmission providing protection across several bursts (i.e., multi-burst FEC). The reason is that the effective time interleaving is increased, such that it is possible to exploit the time diversity of the mobile channel. In a hybrid DVB-H/3G+ system with AL-FEC, repair data can be seamlessly and efficiently delivered through p-t-p unicast transmission or p-t-m broadcast/multicast transmissions. The reason is that specific source packets are not required to be retransmitted, and repair transmissions consist of additional repair packets that can be used for all users.

The rest of the paper is organized as follows. First, we explain in Section II how filecasting services are transmitted in hybrid DVB-H/3G+ systems, describing the main parameters that influence the overall system performance from a radio resource management perspective. Next, in Section III we describe the performance evaluation methodology, including the scenario adopted in our radio network simulations. Then in Section IV we provide some illustrative results of broadcast file delivery in hybrid DVB-H/3G+ systems. We analyze the performance of the initial DVB-H transmission, and the error repair phase with the cellular network using only HSDPA, and using MBMS and HSDPA jointly. Finally, we give some concluding remarks in Section V.

## II. FILECASTING IN HYBRID DVB-H/3G+ SYSTEMS

Generally speaking, a filecasting service in a hybrid DVB-H/3G+ system with AL-FEC consists in three phases:

- 1) Service advertisement phase; in which the service is announced and set-up by the system and the users discover the service.
- 2) Initial DVB-H file transmission phase; in which the source data file is broadcasted over the whole service area. A fixed pre-configured amount of Raptor repair data can be also transmitted.
- 3) Post-delivery repair phase; in which users not able to decode the file after the initial DVB-H transmission complete the reception of the file by default via the cellular network with unicast p-t-p HSDPA connections. In case too many users fail to receive the file, it is also possible to employ p-t-m MBMS multicast transmissions in specific cells, or group of cells, or even employ again DVB-H.

For a detailed description of the procedures involved we refer to [7] and [8]. In order to achieve an efficient delivery it is needed to optimize not only the initial DVB-H file transmission phase and the cellular error repair phase separately, but also take into account the trade-off between DVB-H AL-FEC protection and the successive file repair.

### A. Initial DVB-H File Transmission Phase

In this phase the server must configure the transmission parameters statistically to ensure that the file is successfully received by the worst-case user contemplated, such that the desired file acquisition probability is reached (percentage of users that receive the file).

The DVB-H transmission parameters that the network operator has to configure are: the burst size, the cycle time between bursts, and the amount of Raptor repair data transmitted (code rate or FEC overhead). The amount of repair data transmitted is ultimately the most important parameter, as on the one hand very little overhead may result in a low robust transmission not allowing most users to recover the file, and on the other hand a very robust transmission consumes resources that could be used for other services.

The DVB-H file delivery performance with AL-FEC improves increasing the cycle time, at the expense of a larger delivery time [2]. Once the cycle time exceeds a certain value, such that there is little correlation between reception conditions of consecutive bursts, there is no further gain by increasing the cycle time duration. Regarding the burst size, the performance improves slightly for smaller data bursts (assuming a constant download data rate), at the expense of larger power consumption at the terminals [2].

### B. Cellular File Repair Phase

After the initial DVB-H transmission, terminals not able to recover the file start a repair procedure to complete the delivery. During the initial file transmission there is no communication between the terminals and the server. Therefore, once the DVB-H transmission is finished the server does not have any information about the number of users that have not received the file and the amount of repair data needed by each of them. This information can be estimated in the beginning of the repair phase from the received error reporting messages [9].

As mentioned before, terminals start the repair phase using unicast p-t-p HSDPA connections. To avoid congestion, error reporting messages from terminals can be distributed over time within a back-off window and across multiple repair servers [7]. Terminals compute a random access time to the repair procedure within the back-off window and a random repair server. The back-off window should be large enough to prevent congestion, but should not unnecessarily increase the duration of the repair phase.

It should be noted that the performance of the p-t-p repair phase with HSDPA depends on the actual number of users that fail to receive the file after the initial DVB-H transmission and their positions. With HSDPA the required resources are directly proportional to the number of active users in the cell, and thus it is not efficient to deliver medium and big files to large user groups. In these cases a considerable gain can be obtained performing a p-t-m multicast transmission with MBMS [10].

The decision of performing a p-t-m repair transmission should be taken as soon as possible once a representative number of error reporting messages have been collected. The amount of repair data transmitted through the p-t-m connection can be for example the maximum amount of repair data requested by the users at that time. Once the p-t-m repair session is completed, a new p-t-p HSDPA repair session can be initiated if needed, since there is no guarantee that users will receive the data transmitted with MBMS. In this case the length of the second back-off window should be smaller than the first one, since a lower load on the repair server can be expected.

It should be also pointed out that the repair server should immediately proceed to initiate a p-t-m repair session as soon as congestion is detected. This may happen if, for example, the robustness of the initial DVB-H transmission is too low, or unexpected transmission errors occur.

According to [9], the link most likely to become the bottleneck is the one between the repair server and the cellular network (more precisely the gateway GPRS support node, GGSN). Nevertheless, the capability of generating additional Raptor parity data that can be used by all users could be employed to alleviate the congestion at the core network using multicast transmissions even if p-t-p radio bearers are used.

In addition to the duration of the back-off window, the main parameter that the network operator should configure in the repair session is the cellular transmit power devoted to repair the file. Higher power levels will imply that the users receive the file faster, although it may not be the most efficient resource allocation because 3G systems are interference-limited, and the interference level is directly proportional to the transmission powers. Hence, the optimum power is the minimum power value that delivers the file in due time [10].

### C. Cost-based Radio Resource Management

From an RRM point of view, the problem of efficient file delivery in hybrid cellular and broadcasting systems is more complex than when each network is operated separately. The reason is that an additional variable is needed to relate the importance of the resources of both radio accesses since they cannot be directly compared.

As mentioned before, we adopt a cost-based RRM framework where the delivery cost is proportional to the amount of radio resources employed in each network [4]. The broadcast cost is proportional to the amount of data transmitted in DVB-H, and the cellular cost is proportional to the transmission energy, defined as the product of the transmit power,  $P_{tx}$ , and the active transmission time,  $T_{tx}$ :

$$E_c = P_{tx} \cdot T_{tx}. \quad (1)$$

By minimizing the energy, the radio resource usage is minimized and the cell capacity is maximized.

Assuming that the original source file is initially transmitted through DVB-H with a given burst size and cycle time, the optimum repair configuration will be the one that completes the delivery in due time and minimizes the delivery cost given by:

$$C_R = c_b \cdot n_b + c_c \cdot \sum_i E_{c,i}, \quad (2)$$

where  $n_b$  is the number of repair bursts transmitted in DVB-H, and  $c_b$  and  $c_c$  are the costs per transmitted DVB-H burst and per energy unit (J) of the cellular network respectively.

One important figure is the number of cells within the service area, since it should be taken into account the total energy consumed by all cells. The optimum amount of parity data that should be transmitted in DVB-H will heavily depend on the ratio  $c_b/c_c$ . It should be noted that this value is difficult to quantify, because in practice it may vary over time in real life implementations. Prices may vary, for example, according to the congestion level experienced by each radio access (the cost of delivering certain amount of data over the cellular network during peak hours is higher compared to off-peak hours).

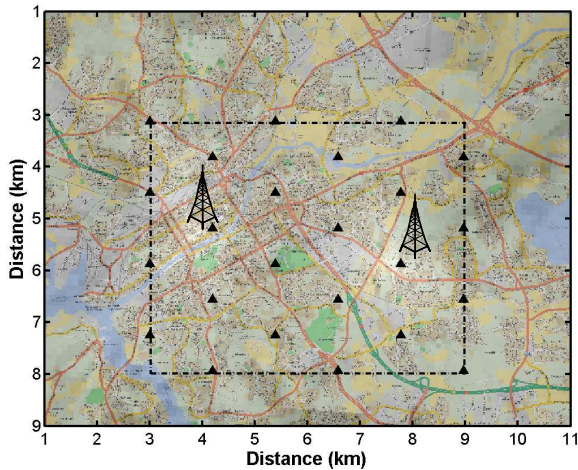


Fig. 1. Map of Turku (Finland) with the positions of the DVB-H transmitters and the simulated cellular base stations.

### III. PERFORMANCE EVALUATION

#### A. Performance Measures

In the next section we present radio network simulation results for a filecasting service in a realistic hybrid DVB-H/3G+ system. As a reference study case, we will consider a 16 Mb file, vehicular in-car users, and a 99% target file acquisition probability.

We will first present results on the performance of the initial DVB-H transmission (with AL-FEC), together with considerations that should be taken into account when designing the post-delivery repair phase with a cellular network. We compute the percentage of users able to decode the entire file (acquisition probability) as a function of the amount of repair data transmitted, and the repair data needed by the rest of the users that do not manage to decode the file.

Next, we will present results on the 3G+ cellular repair phase, where users not able to decode the file after the DVB-H transmission connect to the cellular network to complete the reception of the file. Users are allocated to their closest base station. We compute the delivery cost savings that can be achieved using the cellular network as a function of amount of repair data transmitted in DVB-H, the  $c_b/c_c$  ratio, and the number of active users in the system.

#### B. Simulation Scenario

The DVB-H simulation scenario corresponds to the DVB-H pilot network of the University of Turku (Finland), which consists of two transmitters operating at 610 MHz. The network is dimensioned for pedestrian outdoor reception. Figure 1 shows a map of Turku with the position of the transmitters and the service area considered. For the cellular network, 24 sites uniformly distributed over the service area have been considered. The useful transmit power assumed is 2 W.

In our simulations, 10,000 users are initially uniformly distributed within the central part of Turku. They do not leave the service area but bounce at the edges. For a detailed description of the scenario and the models employed see [2].

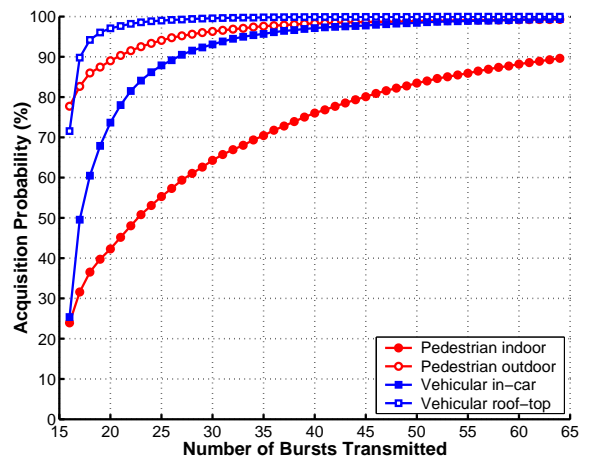


Fig. 2. Acquisition probability of a 16 Mb file as a function of the number of transmitted bursts in DVB-H for different reception cases.

### IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### A. Filecasting with DVB-H

Figure 2 shows the acquisition probability of a 16 Mb file as a function of the number of bursts transmitted for different reception cases. We have assumed a constant download data rate of 250 kb/s (1 Mb burst size and 4 s cycle time between bursts). The case without AL-FEC corresponds to 16 bursts containing the original source data file.

The figure offers a guideline for system planning, in the sense of providing the right amount of parity data as a function of the reception case for a given targeted percentage of users receiving the file. Obviously, the more parity bursts transmitted, the higher the probability of receiving the file successfully. Note that the gain is larger for higher user velocities. However, the gain obtained by transmitting an additional parity burst decreases as the total number of parity bursts grows. In the figure it can be observed that it is relatively easy to serve vehicular in-car users with a network infrastructure dimensioned for outdoor pedestrian reception.

Figure 3 shows the cumulative distribution function (CDF) of the amount of repair data needed to decode the 16 Mb file. The users that decode the file, they do not need any repair data, and thus in the y-axis it is plotted the acquisition probability for the different transmission configurations. In the figure we can note that in this example there are also some users that need a considerable amount of repair data. These users are ones located in bad DVB-H coverage areas that move at low speeds. Due to these reasons they will spend most of the time in the outage areas. These users could be served more efficiently through the cellular network in a hybrid system is the cost of doing this is acceptable.

In Figure 3 the potential efficiency improvement that can be achieved using the cellular network to deliver repair data can be seen looking at the percentage of users that receive the file for each additional burst.

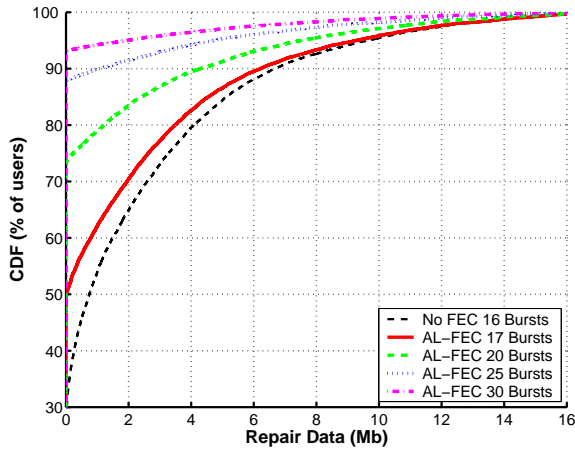


Fig. 3. Post-delivery results of a 16 Mb file to vehicular in-car users as a function of the number of transmitted bursts: CDF of the repair data needed.

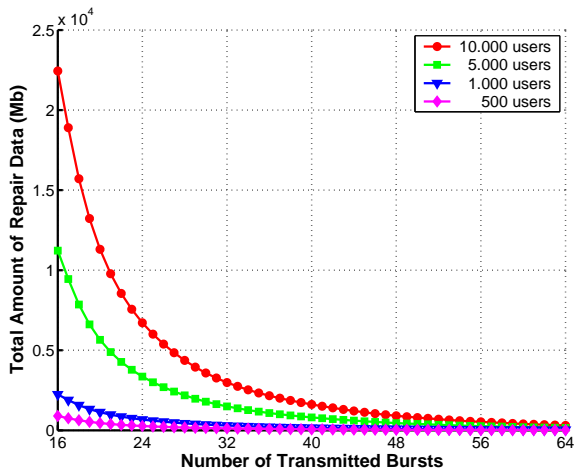


Fig. 4. Post-delivery results of a 16 Mb file to vehicular in-car users as a function of the number of transmitted bursts: Total amount of repair data.

The same curves can be interpreted as a lower bound on the hybrid system performance under the assumption that bursts in DVB-H can be lost, but not the ones sent via the cellular network. For example, looking at the curves for 25 and 30 bursts, about 5% of the users receive the file transmitting 5 more bursts (less than 1% for the 30-th bursts). Sending the 30-th burst through the cellular network would save one DVB-H burst for another service. The cost efficiency of such approach will be determined by the actual number of users and the relative cost between broadcast and cellular resources.

Figure 4 shows the total amount of data to be repaired in the post-delivery repair session as a function of the number of bursts transmitted in DVB-H and the number of active users per cell in the system (recall that there are 24 cells in the service area). Obviously, the amount of repair data that needs to be delivered with the cellular network increases linearly with the number of users, but we can see that it decreases exponentially with the number of transmitted bursts in DVB-H.

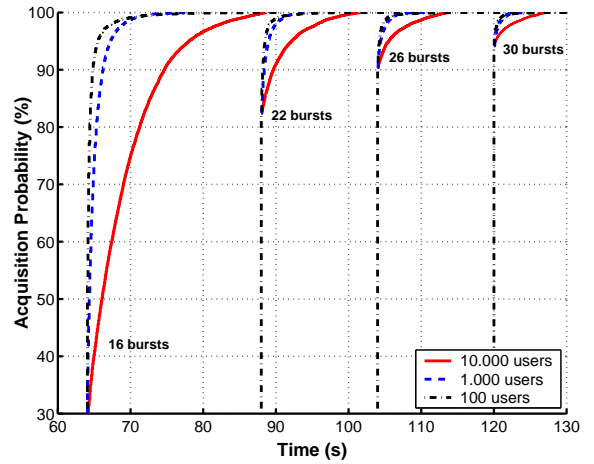


Fig. 5. File acquisition probability of a 16 Mb file for vehicular in-car users using DVB-H and HSDPA.

### B. Filecasting with DVB-H and HSDPA

Figure 5 shows the evolution of the acquisition probability of the 16 Mb file as a function of the time for different number of transmitted bursts in DVB-H and for different number of active users. Recall that the first 16 bursts correspond to the original data file, and the rest are additional parity bursts with repair information. In the figure it can be seen that the cellular performance depends on the absolute number of users in the system. The larger the number of users, it will be more convenient to transmit more repair bursts in DVB-H. The optimum transmission configuration will depend on the relative cost of transmitting one additional repair burst in DVB-H compared to using the cellular network to serve a given percentage of users (ratio  $c_b/c_c$ ).

Figure 6 shows the cost delivery savings that can be achieved combining DVB-H and HSDPA compared to the reference case where the DVB-H network and the HSDPA network are used separately. The cost saving is pictured as a function of the ratio  $c_b/c_c$  for different numbers of active users in the system. In the figure savings of up to 55% are achieved. In the situations that there are no savings the optimum configuration consists on using only DVB-H or HSDPA.

We can observe that the savings initially increase as a function of the ratio  $c_b/c_c$ . In this area the broadcast cost is smaller than the reference case using only HSDPA. The maximum gain occurs for the  $c_b/c_c$  ratio which provides the same cost using HSDPA and DVB-H separately. Larger  $c_b/c_c$  values than this threshold imply that cellular network is more efficient than the DVB-H network (when operated independently). The maximum gain also depends on the number of active users in the system. The lower the number of users, the higher the maximum gain. However, the differences are rather small. For a given number of users there is a  $c_b/c_c$  value which minimizes the delivery cost employing jointly DVB-H and HSDPA.



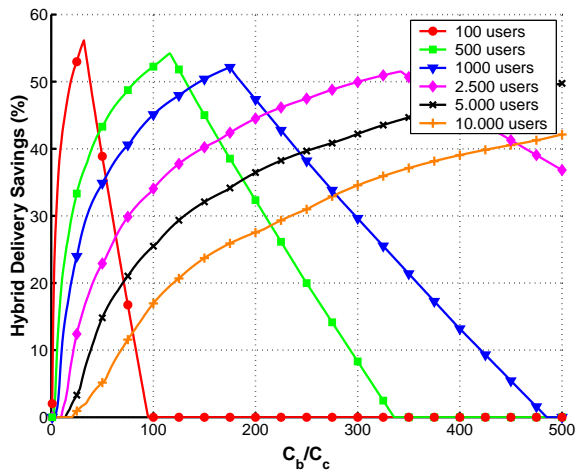


Fig. 6. Hybrid DVB-H/HSDPA delivery cost savings vs. Ratio  $c_b/c_c$ .

### C. Filecasting with DVB-H, MBMS and HSDPA

If MBMS is considered, the efficiency of the cellular network is noticeably increased for the cases where the number of active users in the system is high. Figure 7 compares the cellular energy as a function of the number of bursts transmitted in DVB-H using only HSDPA, and using MBMS and HSDPA jointly. We can see that MBMS only plays an important role for very large user densities and for low amounts of repair data transmitted in DVB-H.

In these cases the possibility of cellular multicasting with MBMS may reduce the repair cost of the DVB-H transmissions significantly compared to the reference case of using the broadcast network alone. However, the cost savings that can be achieved combining DVB-H, MBMS and HSDPA is reduced for large user densities compared to case with only DVB-H and HSDPA (values shown in Figure 6).

The reason is that the efficiency of the reference case using only the cellular network is also increased. This implies that the  $c_b/c_c$  which yields the maximum gain for a given number of users occurs for smaller broadcast costs. The maximum gains shown in Figure 6 for 2,500, 5,000 and 10,000 users would be reduced down to 40%, 35%, and 30%, respectively, if MBMS is considered.

## V. CONCLUSIONS

This paper addresses novel radio resource management issues for filecasting services in hybrid DVB-H/3G+ systems where users that do not receive the file after the initial broadcast DVB-H transmission complete the delivery via a 3G+ cellular network with HSDPA and MBMS capabilities. This fact has not been previously considered in the literature, where it is more often considered that users are served using exclusively a single radio access.

Results show that the file delivery efficiency in DVB-H networks that provide partial coverage of the service area can be significantly enhanced using a 3G+ HSDPA cellular network in areas with poor DVB-H coverage as a complement to deliver repair data.

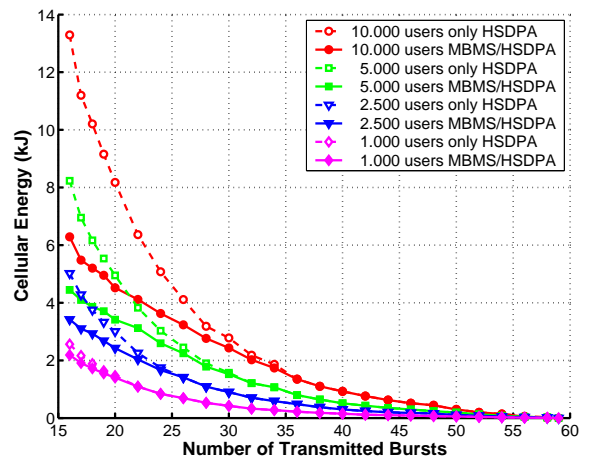


Fig. 7. Filecasting results using MBMS and HSDPA to repair the initial DVB-H file transmission. Cellular MBMS/HSDPA energy vs. number of transmitted bursts in DVB-H.

Cost delivery savings in the order of 50% are feasible in the situations where the content is popular enough that should be broadcasted with DVB-H. These savings may increase if the hybrid cellular and broadcasting system can take advantage of the opportunistic situations that may arise over time. The possibility of cellular multicasting with MBMS in the hybrid cellular and broadcasting system significantly increases the flexibility of the system in areas with poor DVB-H coverage levels and moderate user densities.

## ACKNOWLEDGMENT

This work has been performed within the European COST 2100 action, and it has been partially supported by the Spanish Ministry of Science under the project ALTAMIRA (TEC2008-06817-C02-01/TEC).

## REFERENCES

- [1] G. Faria, J. A. Henriksson, E. Stare, and P. Talmola, "DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices," *Proc. of the IEEE*, vol. 94, no. 1, Jan. 2006, pp. 194-209.
- [2] D. Gómez-Barquero, "Cost Efficient Provisioning of Mass Mobile Multimedia Services in Hybrid Cellular and Broadcasting Systems," Doctoral Dissertation, Universidad Politécnica de Valencia, Spain, 2009.
- [3] P. Unger and T. Kürner, "Radio Network Planning of DVB-H/UMTS Hybrid Mobile Communication Networks," *Wiley European Transactions on Telecommunication*, vol. 17 no. 2, pp. 193-201, March 2006.
- [4] A. Bria, "Cost-based Radio Resource Management in Hybrid Cellular-Broadcasting Systems," *Proc. IEEE VTC Spring*, Stockholm, Sweden, 2005.
- [5] S. Parkvall, E. Englund, M. Lundevall, and J. Torsner, "Evolving 3G Mobile Systems: Broadband and Broadcast Services in WCDMA," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 2, pp. 68-74, Feb. 2006.
- [6] M. Luby, M. Watson, T. Gasiba, T. Stockhammer, and W. Xu, "Raptor Codes for Reliable Download Delivery in Wireless Broadcast Systems," *Proc. IEEE CCNC*, Las Vegas, USA, 2006.
- [7] ETSI TS 102 472 v1.3.1, "IP Datacast over DVB-H: Content Delivery Protocols," June 2009.
- [8] 3GPP TS 26.346 v6.11.0, "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and Codecs," March 2008.
- [9] T. Lohmar, P. Zhaoyi, and P. Mahonen, "Performance Evaluation of a File Repair Procedure based on a Combination of MBMS and Unicast Bearers," *Proc. IEEE WoWMoM*, Niagara Falls, USA, 2006.
- [10] D. Gómez-Barquero, A. Fernández-Aguillella, and N. Cardona, "Multicast Delivery of File Download Services in 3G Mobile Networks with MBMS," *Proc. IEEE BMSB*, Las Vegas, USA, 2008.