

# Transmisión Multicast de Servicios de Descarga de Archivos en Redes Móviles 3G con MBMS

David Gómez Barquero, Ana Fernández Aguilera, Narcís Cardona Marcet

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

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

**Abstract** — Este artículo presenta y analiza el problema de la transmisión *multicast* de servicios de descarga de archivos en redes móviles 3G con MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Services*). MBMS permite transmitir el mismo contenido mediante una conexión punto a multipunto (p-t-m) a todos los usuarios en la celda. Para garantizar una correcta recepción de los archivos por parte de los usuarios se ha incluido un mecanismo de corrección de errores FEC (*Forward Error Correction*) en la capa de aplicación basado en los códigos Raptor. Además, los usuarios que no sean capaces de recibir el archivo tras la transmisión MBMS inicial pueden realizar una fase de reparación de errores, en la cual es posible utilizar tanto conexiones punto a punto (p-t-p) con HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*), como p-t-m con MBMS.

El artículo incide especialmente en la transmisión eficiente de estos servicios en futuras redes móviles 3G con MBMS, estudiando la gestión óptima de recursos en el sistema para conseguir una probabilidad de adquisición del fichero determinada (porcentaje de usuarios que reciben correctamente el fichero). El criterio adoptado ha sido el de minimizar la energía de transmisión necesaria para transmitir el fichero a un número determinado de usuarios, definida como el producto de la potencia transmitida por el tiempo de transmisión.

## I. INTRODUCCIÓN

Con la llegada de las redes móviles de tercera generación (3G), los operadores de telefonía móvil han empezado a ofrecer servicios multimedia, como video-clips de eventos deportivos o programas de TV. Sin embargo, las ofertas actuales de los operadores móviles están todavía limitadas, tanto desde un punto de vista técnico como del coste del servicio. Para conseguir un modelo de negocio viable, y no sobrecargar las redes hasta el punto de prevenir a los usuarios de realizar llamadas de voz (que es la función y el valor principal de las redes móviles), sólo se ofrecen video-clips cortos de baja resolución (por ejemplo, 2 minutos a 128 kb/s) [1].

Se prevé que en el año 2010 el tráfico de datos será superior al tráfico de voz, y que la demanda de servicios multimedia móviles explotará en el 2011. Las principales características de los futuros servicios multimedia móviles previstas son [2]: interactividad (hay una comunicación bidireccional entre los usuarios y los proveedores de contenidos o los operadores de red), asimetría (los usuarios reciben mucha más información que mandan), popularidad (el mismo contenido es de interés a un alto número de usuarios) y tolerancia al retardo (para información que no sea crítico consumir en tiempo real). En particular, se espera que los servicios multimedia masivos generen una gran cantidad de tráfico de datos en las futuras redes de comunicaciones móviles. Los servicios multimedia masivos están dirigidos, por definición, a muchas personas. Ejemplos de estos servicios son la transmisión en vivo de competiciones deportivas, conciertos, noticias de última hora, actualizaciones de software, u otros contenidos populares como los recreativos y educativos en general. Otros ejemplos son la distribución de información específica en áreas altamente pobladas (aeropuertos, centros comerciales, etc.).

Tradicionalmente, las redes móviles se han caracterizado por transmitir información específica para cada usuario, no tratando la distribución de contenido popular a muchos usuarios. Así, 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>. 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 puede recibir el servicio dentro del área de cobertura. Para poder transmitir eficientemente en modo *multicast* o *broadcast* el mismo contenido a varios usuarios simultáneamente, el estándar 3G ha sido mejorado recientemente con la introducción de MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Services*), funcionalidad que se espera que esté disponible a partir del año próximo [3]. MBMS

---

<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*).

constituye la segunda mejora significativa del enlace descendente del estándar 3G tras HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*), la cual ya está siendo implantada en las redes actuales. HSDPA permite conexiones p-t-p a muy altas velocidades de transmisión de datos (hasta varios Mb/s), incrementando considerablemente la capacidad de la red. Ambas mejoras conducirán a una utilización más eficiente de los recursos radio en las redes 3G, permitiendo la provisión de nuevos servicios multimedia [4].

Los servicios MBMS se clasifican en dos tipos básicos: *streaming* y *file download* (descarga de archivos) [5]. En los servicios de *streaming*, un flujo continuo de datos de audio, video y subtítulos es transmitido a los terminales, el cual es consumido inmediatamente por los usuarios. Estos servicios se caracterizan por tolerar ciertos errores en la transmisión, si la calidad del audio y video es suficiente para proporcionar una experiencia de usuario satisfactoria. El ejemplo más característico es la TV móvil. Por otro lado, 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. Los archivos pueden ser consumidos inmediatamente tras la transmisión, o en un tiempo posterior. Algunos ejemplos representativos son los periódicos digitales, archivos de música, video-clips, descarga de software, etc. Estos servicios 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.

Este artículo trata sobre la transmisión eficiente de servicios de descarga de ficheros con MBMS. Para incrementar la robustez de la transmisión MBMS, se ha añadido un mecanismo de corrección de errores en adelante FEC (*Forward Error Correction*) en la capa de aplicación basado en los códigos Raptor [6]. 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 (no importa qué información concreta es recibida, paquetes de datos o paquetes de paridad, sino que se reciba información suficiente). Como no se puede garantizar que todos los usuarios reciban el fichero correctamente en la transmisión inicial, ya que algunos usuarios pueden estar situados en zonas de mala cobertura, también es posible realizar una fase de reparación de errores del fichero para completar la recepción del mismo. Esta se realiza por defecto mediante conexiones p-t-p (HSDPA), aunque la utilización de MBMS en la fase de reparación para transmitir datos de reparación mediante una conexión p-t-m también es posible en el caso de que muchos usuarios no reciban el fichero correctamente. Por lo tanto, para lograr una transmisión eficiente de los servicios MBMS de descarga de archivos es necesario optimizar la configuración de la transmisión inicial MBMS, así como el balance entre la fase de transmisión inicial y la fase de reparación de errores. Una transmisión poco robusta no permitirá a muchos usuarios recibir el fichero, mientras que una transmisión muy robusta desperdiciará recursos que podrían utilizarse para otros servicios. Intuitivamente, durante la transmisión inicial del archivo habrá usuarios con muy malas condiciones de recepción, que podrían ser más eficientemente servidos mediante una conexión p-t-p con HSDPA.

El objeto de este artículo es determinar la configuración de transmisión óptima de este tipo de servicios con MBMS (en concreto la potencia útil, la velocidad de transferencia de información, y el tiempo de transmisión) en función del tamaño del fichero, la probabilidad de adquisición del fichero objetivo, y el tiempo máximo para la transferencia del servicio.

La estructura del artículo es la siguiente: la sección 2 introduce MBMS. La sección 3 detalla cómo se transmiten los servicios de descarga de archivos en MBMS. La sección 4 describe los principales modelos de sistema utilizados. La sección 5 presenta los resultados más significativos en un escenario que representa una red saturada (nivel de carga 100%).

## II. MULTIMEDIA BROADCAST MULTICAST SERVICES (MBMS)

### A. Principales Características

Con MBMS el mismo contenido es 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 MBMS no se utiliza el enlace ascendente, ya que 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 bien 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 de tanto 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 necesarios niveles de cobertura muy elevados. 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, del orden de 4-6 dB, en comparación con el caso en el que se recibe la señal de una única celda [4]. 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 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 del orden de 2-3 dB en comparación con la combinación por selección. Sin embargo, esta estrategia requiere mayor memoria en los terminales para almacenar los *soft* bits de cada radio enlace (similar a la de terminales HSDPA clase 6, hasta 3.6 Mb/s), y que las transmisiones entre celdas estén sincronizadas en un rango de unos 80 ms, lo cual no se prevé que ocurra en las primeras fases de despliegue de MBMS.

MBMS también 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*), a costa de una mayor 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 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 [7].

### B. Arquitectura

MBMS proporciona una integración transparente de las tecnologías de transporte *multicast* y *broadcast* en las redes 3G, reutilizando muchas de las funcionalidades existentes. Así, se realizan una serie de pequeñas modificaciones en los protocolos radio y de red de transporte, así como en las entidades funcionales de la arquitectura, y se añade una entidad nueva denominada BM-SC (*Broadcast/Multicast-Service Center*) [3]. Este nuevo elemento reside entre el núcleo de la red de paquetes y los proveedores de contenidos, y es el punto de entrada de los contenidos que utilizan MBMS. Actúa como un servidor, y lleva a cabo ciertas tareas de control, como inicializar y finalizar las transmisiones MBMS, anunciar los servicios, realiza la codificación Raptor, tarificación, seguridad, etc.

En MBMS se definen dos modos de operación básicos: modo *broadcast* y modo *multicast*. En el modo *broadcast* la información se transmite mediante conexiones p-t-m en todas las celdas dentro del área de servicio MBMS. La transmisión debe de estar configurada para servir al usuario en el peor caso contemplado, ya que la red no tiene ningún tipo de información sobre los usuarios activos. Además, los terminales no tienen que notificar que han recibido el servicio correctamente. El ejemplo de servicio típico del modo *broadcast* es el de TV móvil. Por otro lado, en el modo *multicast* la información se transmite a un grupo determinado de usuarios, los cuales deben de haber solicitado previamente el servicio. En este caso sí se monitoriza la posición de los usuarios, tanto a nivel radio como en la red de transporte, pudiendo ajustar la configuración de la transmisión según la posición de estos. En este modo es posible utilizar conexiones p-t-p con HSDPA en celdas con pocos usuarios. Además de estos dos modos básicos, también existe el modo *broadcast* mejorado (*enhanced broadcast*), en el cual se monitoriza el número de usuarios activos por celda, para determinar la configuración más eficiente (MBMS o HSDPA).

### C. Códigos Raptor

Los códigos Raptor<sup>2</sup> son una implementación computacionalmente eficiente de un código fuente (*fountain code*) con unas prestaciones cercanas a las de un código FEC ideal, los cuales pueden ser implementados en software sin la necesidad de un hardware específico [8]. Esto a su vez permite soportar eficientemente un amplio rango de tamaños de ficheros.

Los códigos fuente son una clase especial de códigos FEC que pueden generar una cantidad infinita de información de paridad. Fueron originariamente diseñados para transmitir datos eficientemente en canales *multicast* asíncronos. Sin embargo, su utilización en la capa de aplicación para aplicaciones *multicast/broadcast* en sistemas de comunicaciones inalámbricas ha resultado ser muy ventajosa superando en prestaciones a otros tipos de códigos FEC en términos de fiabilidad, eficiencia espectral y flexibilidad [9]. Los principales beneficios son:

---

<sup>2</sup> Los códigos Raptor están patentados por Digital Fountain Inc. y están sujetos a derechos de la propiedad intelectual.

- Pueden recuperar pérdidas de paquetes en todas las capas y todos los protocolos inferiores, proporcionando corrección de errores extremo a extremo. Pueden incluso corregir paquetes IP erróneos en la red troncal o en Internet.
- Proporcionan el mayor entrelazado temporal posible, siendo capaces de recuperar el archivo original incluso si todos los paquetes erróneos se producen consecutivamente.
- No se necesita ningún tipo de modificación o estandarización por debajo de la capa de aplicación.

En la práctica, el codificador Ráptor estandarizado en MBMS puede generar hasta 65.536 símbolos a partir de un fichero de datos [5]. El código estandarizado es un código sistemático, por lo que primero se transmiten los paquetes de datos originales, seguidos de paquetes adicionales de paridad. En el servidor MBMS, el codificador Raptor procesa la información a transmitir en bloques debido a las restricciones de memoria y procesamiento de los teléfonos móviles (tamaño máximo de bloque para los primeros terminales MBMS 4 MB [3]). En los terminales, los que reciben todos los paquetes del fichero original obviamente no necesitan ningún paquete adicional. Por otro lado, en los que sufren pérdidas el decodificador Raptor es capaz de recuperar la información original si se reciben correctamente un número total de paquetes (de datos o de paridad) ligeramente superior al tamaño del bloque de datos (en media un 1-5% más [7]).

### III. TRANSMISIÓN DE SERVICIOS MBMS DE DESCARGA DE FICHEROS

En general, un servicio MBMS de descarga de ficheros consta de tres fases:

1. **Fase de anuncio del servicio;** en la cual el servicio es anunciado por la red y es descubierto por los usuarios.
2. **Fase de transmisión inicial del fichero con MBMS;** en la cual se transmite el fichero más una serie de información de paridad generada por el codificador Raptor mediante una conexión p-t-m.
3. **Fase de reparación de errores;** en la cual los usuarios que no son capaces de decodificar el fichero después de la transmisión inicial son servidos mediante conexiones p-t-p con HSDPA hasta completar la recepción del fichero. La utilización de MBMS en esta fase también es posible si muchos usuarios no logran recibir el fichero.

A continuación explicamos los conceptos más importantes de las dos últimas fases que afectan al rendimiento de la transmisión del servicio. En la Figura 1 se muestra un esquema temporal de las distintas fases, así como de los mensajes intercambiados durante la fase de reparación p-t-p.

#### A. Fase de Transmisión Inicial del Fichero con MBMS

En esta fase el servidor MBMS debe garantizar que el archivo es correctamente recibido por la mayoría de usuarios, para evitar problemas de congestión en la fase de reparación de errores. El grado de protección del fichero viene determinado fundamentalmente por el nivel de cobertura y por la cantidad de información de paridad transmitida. El nivel de cobertura depende de muchos factores: escenario, tipo de usuario, técnica de macro diversidad implementada en los terminales, condiciones de interferencias, etc. Los únicos parámetros que puede controlar el operador de red son la potencia transmitida, la velocidad de transmisión de información, 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 por qué ser la de mayor potencia, ya que los sistemas 3G están limitados por interferencias, las cuales son directamente proporcionales a las potencias transmitidas. Por otro lado, en principio cuanto mayor sea la tasa de transmisión de datos los usuarios recibirán el fichero más rápidamente.

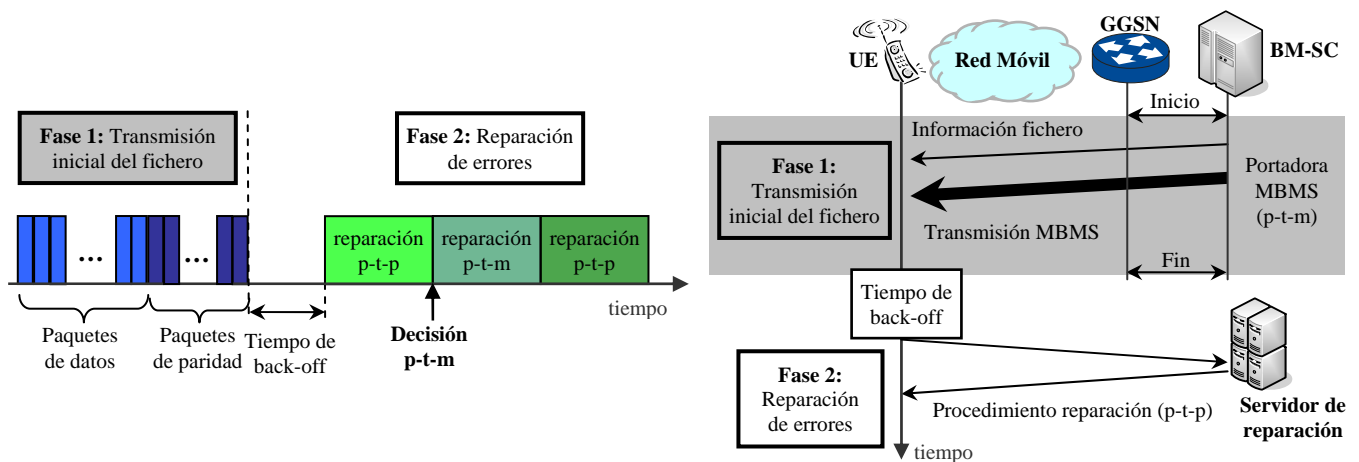


Fig. 1. Esquema temporal y flujo de mensajes durante un servicio de descarga de archivos en MBMS.

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 como se ha explicado anteriormente. La configuración óptima será aquella que minimice la energía de transmisión del fichero para conseguir una probabilidad de adquisición determinada, definida como el producto de la potencia transmitida por el tiempo de transmisión:

$$E_{MBMS} = P_{MBMS} \cdot T_{TX,MBMS} \quad (1)$$

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. Por último, es importante destacar que la configuración óptima dependerá del tiempo de transmisión máximo del servicio.

#### B. Fase de Reparación de Errores

El propósito de esta fase es reparar los ficheros que no se han recibido correctamente en la fase anterior. Para evitar problemas de congestión, las notificaciones de error de los terminales se distribuyen en una ventana temporal (*back-off window*), ya que los terminales calculan un tiempo de acceso aleatorio al proceso de reparación dentro de la ventana. Este intervalo de tiempo debe ser lo suficientemente largo para evitar que ocurran problemas de congestión, pero no demasiado como alargar innecesariamente la duración de la sesión de reparación. También es posible distribuir los mensajes utilizando varios servidores de reparación.

Los terminales pueden notificar el conjunto de paquetes mínimo que necesitan para recuperar el fichero, o simplemente el número de paquetes correctamente recibidos. Como se ha comentado anteriormente, cuando un terminal empieza la fase de reparación, esta comienza utilizándose una conexión p-t-p con HSDPA. En este caso, la información de reparación puede consistir de los paquetes especificados por el terminal, o simplemente paquetes de paridad adicionales. Si el número de usuarios presentes en esta fase es elevado, se puede utilizar una transmisión de reparación p-t-m con MBMS. En este caso, la información de reparación consiste en paquetes de paridad adicionales, ya que pueden ser utilizados por todos los usuarios. Una vez terminada la sesión de reparación p-t-m, se continuaría con otra sesión de reparación p-t-p en el caso de que fuese necesario.

Como durante la fase de transmisión inicial del fichero no se produce ningún tipo de comunicación entre los terminales y el servidor MBMS, al acabar la transmisión inicial no se dispone de ninguna información sobre el número de usuarios que no han recibido el fichero correctamente, ni la cantidad de datos de reparación necesaria por cada uno. Estos datos se pueden estimar al principio de la fase de reparación, mientras se llevan a cabo reparaciones p-t-p. En el caso de que sea conveniente, la decisión de establecer una reparación p-t-m debe hacerse lo antes posible. Sin embargo, la decisión ha de tomarse una vez recibidas un número representativo de mensajes de reparación por parte de los terminales. Normalmente, se recomienda tomar esta decisión cuando se ha superado un 10% de la ventana de *back-off* [10]. La cantidad de datos transmitida mediante la conexión p-t-m puede ser por ejemplo la máxima cantidad de datos de reparación solicitada por los usuarios hasta ese momento. Por otro lado, en el caso de que se detectasen problemas de congestión, el servidor de reparación también procedería a establecer una conexión p-t-m. De acuerdo con [10], el enlace más susceptible de saturarse es el enlace entre el servidor de reparación y la red celular (el concreto el GGSN, *Gateway GPRS Support Node*).

Además del tiempo de la ventana de *back-off*, el principal parámetro que ha de configurar el operador de red en la fase de reparación p-t-p es la potencia dedicada a HSDPA para reparar el fichero. 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 como se ha explicado anteriormente. En este caso también se puede utilizar el criterio de minimizar la energía de transmisión para lograr una probabilidad de adquisición del fichero determinada conjuntamente (fase de transmisión inicial con MBMS más fase de reparación de errores con HSDPA) para un número determinado de usuarios. Es importante resaltar que las prestaciones de la fase de reparación p-t-p con HSDPA dependerán del número de usuarios que no hayan recibido correctamente el fichero.

## IV. MODELOS DE SISTEMA

En esta sección presentamos los modelos y suposiciones más relevantes en las que se basa el simulador desarrollado durante este trabajo. Una descripción detallada del simulador puede encontrarse en [11].

### A. Escenario de Despliegue

El escenario de despliegue consiste en 19 celdas, con la celda bajo estudio en el centro (i.e., se consideran dos anillos de celdas interferentes). El radio de celda es 866 m, y la distancia entre estaciones base 1.5 km. Antenas omnidireccionales se han asumido en todos los emplazamientos.

Los usuarios son del tipo *pedestrian outdoor*, y se mueven según el modelo de movilidad descrito en [11] (la función de distribución de velocidad es de tipo Rayleigh con una media de 3 km/h). Los usuarios están inicialmente uniformemente distribuidos en la celda central, y no salen de ella (rebotan en los bordes). Los resultados presentados en la siguiente sección han sido obtenidos simulando 10.000 usuarios.

### B. Balance de Enlace

Se han utilizado valores típicos correspondientes a un escenario urbano a una frecuencia de 2000 MHz. El *shadowing* se ha caracterizado mediante una estadística log-normal con una desviación típica de 5.5 dB y una distancia de correlación de 50 m. También se ha considerado los desvanecimientos rápidos de la señal (*fast fading*), con una distribución tipo Rayleigh. El nivel de ruido térmico presente en los terminales es de -103 dBm, que se han modelado con una antena omnidireccional con una ganancia de -0 dBi. El modelo de propagación utilizado es el Okumura-Hata, y las pérdidas de propagación vienen dadas por  $L_D = 15.3 + 37.6 \log_{10}[d]$ , donde  $d$  es la distancia en metros.

La potencia máxima por celda es de 20 W, y se ha considerado que se utilizan 4 W para canales de control. En las simulaciones todas las celdas transmiten a la misma potencia.

### C. Modelos de Interferencias

En las simulaciones se han considerado tanto las interferencias intercelulares (de otras celdas) como las interferencias intracelulares (de la propia celda). Se ha considerado un factor de ortogonalidad constante para todos los usuarios para modelar las interferencias de la propia celda debidas al efecto multicamino. No se ha simulado ningún otro servicio aparte del servicio de descarga de fichero bajo estudio. Sin embargo se ha considerado que las estaciones base transmiten al nivel de potencia máximo 20 W (peor caso de situación de interferencias). La relación señal a interferencia más ruido media en el TTI, o en inglés SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), del usuario  $i$  y la estación base  $j$  se calcula como:

$$\overline{SINR}_{i,j} = \frac{g_{i,j} \cdot P_{MBMS,j}}{(1-\rho) \cdot g_{i,j} \cdot (P_{Total,j} - P_{MBMS,j}) + \sum_k g_{i,k} \cdot P_{Total,k} + P_N} \quad (2)$$

Donde  $g_{i,j}$  son la ganancia de propagación (incluyendo *shadowing*) entre el usuario  $i$  con respecto a la estación base  $j$ ,  $P_{MBMS,j}$  es la potencia útil MBMS transmitida al usuario,  $\rho$  es el factor de ortogonalidad (el valor utilizado en las simulaciones es de 0.6), y  $P_{Total,j}$  es la potencia total transmitida por la estaciones base  $j$ , y  $P_N$  es la potencia de ruido térmico. Se debe destacar que el factor de ensanchamiento del canal utilizado también afecta a la SINR, pero en nuestro caso este se tiene en cuenta en el modelo de rendimiento del enlace radio que se describe en el siguiente apartado.

En las simulaciones, se calculan las pérdidas de propagación incluyendo el *shadowing* cada 80 ms (periodo TTI de MBMS), y se calcula el *fast fading* cada 2 ms (periodo de TTI de HSDPA). En MBMS, para promediar la SINR instantánea en el TTI (SINR media más *fast fading*), y obtener un valor de SINR efectiva en el TTI se ha utilizado el método ECM (*Equivalent SNR Method based on Covex Matrix*) [7]. Esta técnica se basa en la fórmula de la capacidad del canal de Shannon y se realiza en los siguientes pasos:

1) Calcular la capacidad del canal  $C_i$  para cada slot de 2 ms en el TTI ( $i = 1, 2, \dots, 40$ ).

2) Calcular la capacidad media en el TTI:  $\overline{C} = (Q/n) \cdot \sum_{i=1}^{n=40} C_i$ .

3) Calcular  $SINR_{eff}$  tal que  $C(SINR_{eff}) = \overline{C}$ .

Donde  $Q$  es un factor de corrección que depende principalmente de la velocidad del terminal y del entrelazado. Para velocidades de peatón y los entrelazadores de la capa física 3G se ha observado que  $Q = 1$  es una buena aproximación.

### D. Modelos de Rendimiento

El modelo de rendimiento del enlace radio utilizado está basado en el límite de Shannon [12]. Este modelo proporciona la máxima tasa de modulación y codificación permitida, o *Modulation and Coding Rate* (MCR), en bps/Hz, a partir de la SINR:

$$MCR = \log_2 [1 + \gamma \cdot SINR] \quad (3)$$

Donde  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ) es un término de degradación que desplaza el rendimiento del enlace del límite de Shannon. En las simulaciones se ha utilizado un valor de  $\gamma$  de 0.4, que equivale a un desplazamiento de 4 dB del límite de Shannon para una BER de  $10^{-4}$ . La tasa binaria efectiva se obtiene multiplicando el MCR por la cantidad de espectro utilizado para la transmisión (en nuestro caso 5 MHz).

Para decidir si se recibe correctamente la información contenida en el TTI se compara la SINR efectiva del TTI con la SINR umbral dada por (3) para la velocidad de transmisión de datos por portadora utilizada: 64, 96, 128, 192, ó 256 kbps.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Figura 2 muestra la energía necesaria en función de la potencia MBMS para conseguir una probabilidad de adquisición del 95% de un fichero de 512 KB. Los resultados presentados son para el caso en el que los terminales no tienen disponible ningún mecanismo de combinación de señales procedentes de varias celdas (caso de referencia sin macro diversidad). Se puede observar cómo en general se obtienen menores energías para potencias bajas, aunque salvo para 64 kbps la solución óptima no es la mínima potencia considerada, 0.5 W, como en un escenario sin interferencias de otros servicios [11]. En este caso el óptimo se obtiene para una tasa binaria de 64 kbps y una potencia de 0.5 W, siendo el valor de la energía de 342.9 J, y el tiempo de transmisión de casi 12 minutos. La capacidad efectiva del canal para esta configuración es de sólo 6.1 kbps.

La Figura 3 muestra el tiempo de transmisión necesario para alcanzar una probabilidad de adquisición del 95% de un fichero de 512 KB para los mismos casos contemplados en la Figura 2. Se puede apreciar como potencias bajas implican tiempos de transmisión elevados, como ya se discutió en la sección 3.

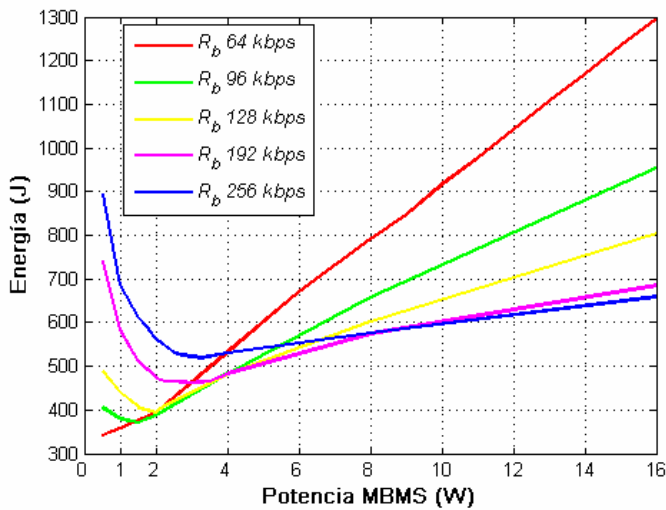


Fig. 2. Energía vs. Potencia MBMS. Probabilidad de adquisición 95%. Fichero 512 KB. Sin *selective combining*.

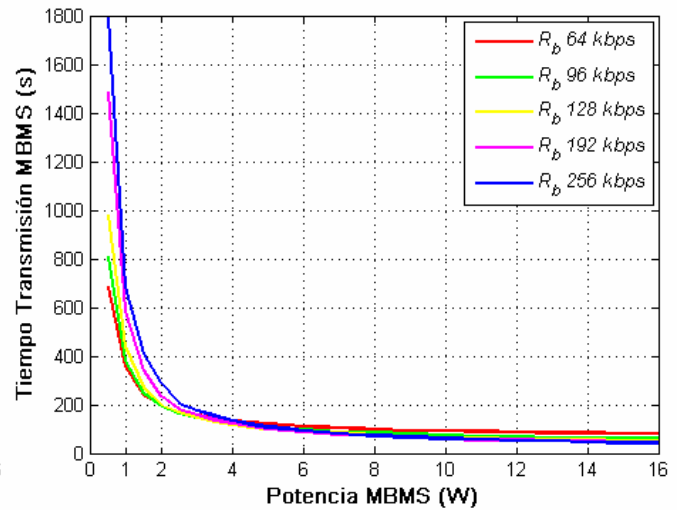


Fig. 3. Tiempo de transmisión MBMS vs. Potencia MBMS. Probabilidad de adquisición 95%. Fichero 512 KB. Sin *selective combining*.

Por lo que tanto hay un claro compromiso entre la asignación óptima de recursos y el tiempo máximo de transmisión del servicio. De la Figura 2 se puede observar que para potencias elevadas la tasa binaria óptima corresponde a la máxima considerada (256 kbps). Esto es debido a que el nivel de cobertura es lo suficientemente elevado para que la mayoría de los usuarios se beneficien de transmitir más información por TTI. Conforme disminuye la potencia, la tasa binaria óptima decrece. Esta tendencia se puede observar claramente en la Figura 4, que muestra la potencia y tasa binaria óptimas en función del tiempo de transmisión para un fichero de 512 KB. El tiempo mínimo de transmisión del servicio se obtiene para la máxima potencia y la máxima tasa binaria (16 W, 256 kbps), en concreto 41.2 s, proporcionando una capacidad efectiva del canal de 101.8 kbps (casi 17 veces mayor que para la configuración de mínima energía). Sin embargo, esta configuración requiere aproximadamente el doble de energía que la mínima (659.2 J).

La Figura 5 muestra la energía mínima en función del tiempo de transmisión que puede conseguirse para el caso de referencia sin macro diversidad y para el caso de *selective combining* (2 radiolinks). Se puede apreciar una significativa mejora en las prestaciones respecto al caso de referencia. En concreto la energía mínima se reduce de 342.9 a 123.9 J (la configuración óptima con *selective combining* son 1 W y 64 kbps), y el tiempo mínimo de transmisión se reduce de 41.2 a 17.6 s (la capacidad efectiva de canal máxima son 238.3 kbps).

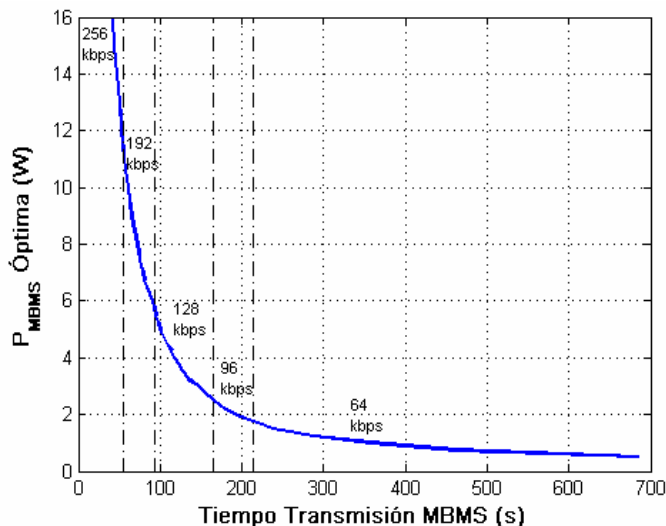


Fig. 4. Potencia MBMS óptima vs. Tiempo máximo de transmisión. Fichero de 512 KB. No *selective combining*.

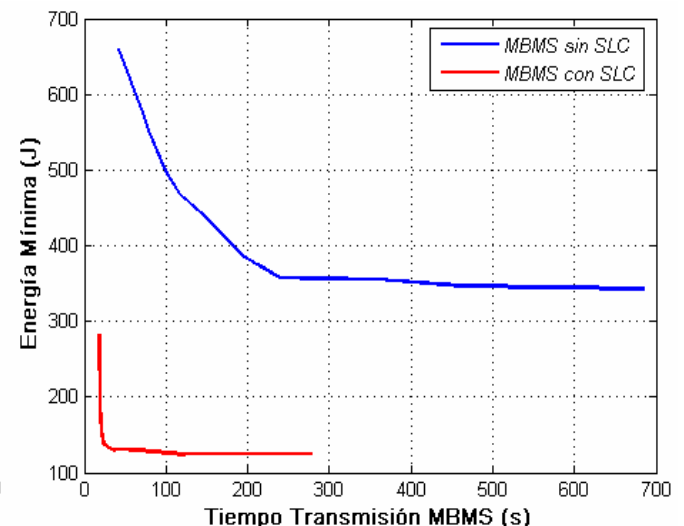


Fig. 5. Energía mínima vs. Tiempo máximo de transmisión con/sin *selective combining*. Fichero de 512 KB.

la Figura 6 muestra la máxima capacidad por celda en función de la potencia transmitida para diferentes tamaños de ficheros (128 KB, 512 KB y 2 MB) y para los casos de referencia y sin *selective combining*. La capacidad por celda representa una medida de la velocidad máxima de información que puede ser transmitida si se emplea toda la potencia disponible (16 W) para servicios de descarga de archivos.

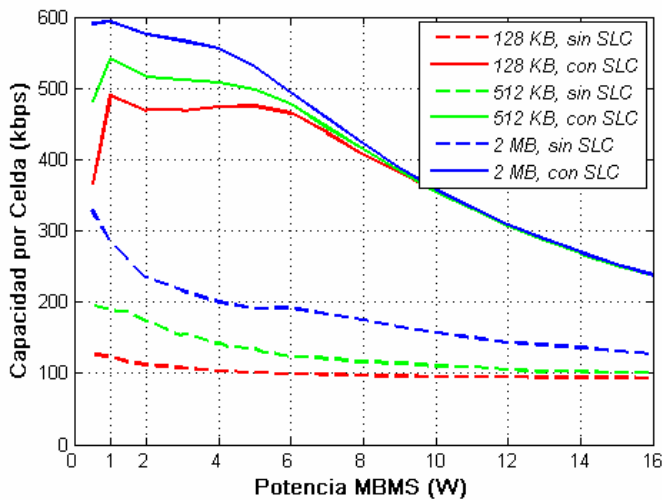


Fig. 6. Capacidad por celda con/sin *selective combining*. Ficheros de 128 KB, 512 KB, y 2 MB.

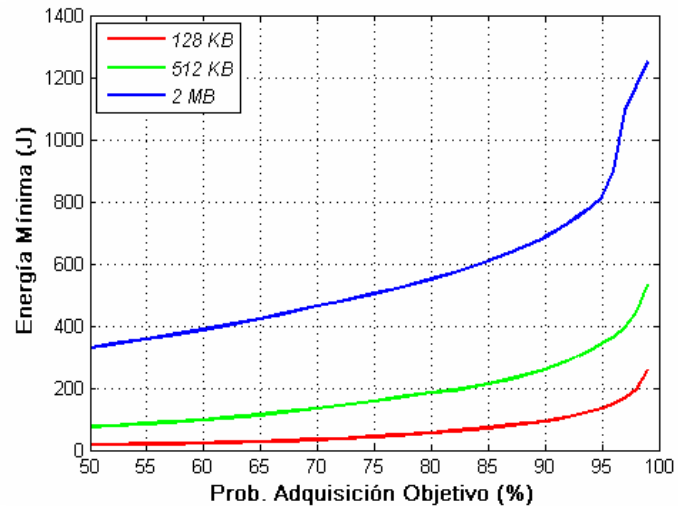


Fig. 7. Energía mínima vs. Probabilidad de adquisición objetivo sin *selective combining*. Ficheros de 128 KB, 512 KB y 2 MB.

Se observa que la potencia óptima para los tres casos de tamaños de fichero es de 0.5 W en el caso en el que no se implemente *selective combining* y 1 W cuando sí se implementa (ambos para una tasa binaria de 64 kbps). Los valores mínimos de energía sin *selective combining* para la transmisión de un fichero de 128 KB y 2 MB son de 132.5 J y 814.6 J respectivamente. Dichos valores disminuyen a 34.2 J y a 451.6 J al introducir *selective combining*.

De los resultados obtenidos se puede concluir que es más eficiente transmitir ficheros de mayor tamaño, sobre todo para el caso de referencia sin macro diversidad. Los valores de energía no presentan un factor de multiplicación de 4 como los tamaños de fichero considerados, sino de aproximadamente 2.5. Esto es debido a que la protección ofrecida por la codificación Raptor es mayor para ficheros de mayor tamaño. Por este mismo motivo la ganancia debido a *selective combining* es mayor para ficheros pequeños.

Finalmente la Figura 7 muestra la energía mínima en función de la probabilidad de adquisición objetivo de un fichero de tamaño 128 KB, 512 KB y 2 MB. Se puede observar como resulta mucho más costoso alcanzar probabilidades de adquisición cercanas al 100% utilizando sólo MBMS. Esto es debido a que hay algunos usuarios situados en zonas sin cobertura que se mueven a baja velocidad, por lo que es muy difícil servirlos con MBMS con una baja potencia. Estos usuarios podrían ser servidos más eficientemente con HSDPA en la fase de reparación de errores.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio dentro del Proyecto FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual) en el marco del Programa Plan Avanz@, y por la Generalitat de Valencia a través del programa de becas predoctorales FPI.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. Solomon, "The Economics of Mobile Broadcast TV", Mobile DTV Alliance Whitepaper, Enero 2007.
- [2] B. Karlson, A. Bria, J. Lind, P. Lönnqvist, y C. Norlin, "Wireless Foresight: Scenarios of the Mobile World in 2015", Wiley, 2003.
- [3] F. Hartung, U. Horn, J. Huschke, M. Kampmann, T. Lohmar, y M. Lundevall, "Delivery of Broadcast Services in 3G Networks," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 52., no. 1, pp. 188-199, Marzo 2007.
- [4] 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.
- [5] 3GPP TS 26.346 v7.1.0, "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and Codecs," Septiembre 2006.
- [6] "How DF Raptor Technology is used in MBMS," Digital Fountain Whitepaper, 2005.
- [7] M. Luby, T. Gasiba, T. Stockhammer, y M. Watson, "Reliable Multimedia Download Delivery in Cellular Broadcast Networks," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 52., no. 1, pp. 235-246, Marzo 2007.
- [8] A. Shokrollahi, "Raptor Codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no.6, pp. 2551-2567, Junio 2006.
- [9] M. Luby y A. Shokrollahi, "Mobile Data Broadcast Delivery using FEC codes," Digital Fountain Technical Report, Marzo 2003.
- [10] T. Lohmar, P. Zhaoyi, y P. Mahonen, "Performance Evaluation of a File Repair Procedure based on a Combination of MBMS and Unicast Bearers," *Proc. IEEE World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Cataratas del Niágara, EEUU, 2006.
- [11] A. Fernández Aguilera, "Transmisión Multicast de Servicios de Descarga de Archivos en Redes Móviles 3G con MBMS," Proyecto Final de Carrera, E.T.S.I. de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, Octubre, 2007.
- [12] K.L. Baum, T.A. Kostas, P.J. Sartori, y 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, Noviembre 2003.