

Estrategias para la Distribución Eficiente de Tráfico en Redes Heterogéneas de Comunicaciones Móviles de Cuarta Generación

Miguel López Benítez, Javier Gozávez
Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Miguel Hernández
Avenida de la Universidad, 03202 Elche (Alicante)
Teléfono: +34 96 665 8955
Correo electrónico: j.gozalvez@umh.es

Resumen

Los futuros sistemas de comunicaciones móviles consistirán en la integración y gestión conjunta de diversas tecnologías de acceso radio (Radio Access Technologies, RATs), dando así lugar al concepto de redes radio heterogéneas. En este tipo de sistemas, uno de los elementos clave que debe considerar el proveedor de red para garantizar un adecuado nivel de calidad de servicio es la gestión común de los recursos radio (Common Radio Resource Management, CRRM) de las diferentes RATs del sistema. En este contexto, el presente artículo se centra en el desarrollo de nuevas técnicas CRRM diseñadas para distribuir eficientemente el tráfico de una red radio heterogénea entre las diversas alternativas de acceso radio disponibles. El objetivo último de este trabajo es el de proveer soluciones que permitan satisfacer los diversos requisitos de QoS de los usuarios al mismo tiempo que se garantiza un aprovechamiento óptimo de los recursos radio disponibles.

1. Introducción

Mientras la industria de las comunicaciones móviles actualmente dirige sus esfuerzos hacia el desarrollo y explotación comercial de los sistemas de tercera generación (3G), la comunidad investigadora ha comenzado a trabajar en la definición de los futuros sistemas *Beyond 3G* o sistemas de cuarta generación (4G). Aunque existen diferentes puntos de vista, el concepto más ampliamente extendido concibe estos sistemas como la integración y gestión conjunta de los actuales sistemas celulares, no sólo entre sí, sino también con otras tecnologías de acceso radio (*Radio Access Technologies*, RATs) ya existentes o en vías de desarrollo, así como otras nuevas que pudieran surgir en el futuro. Este concepto se basa en la idea de que diferentes redes de acceso radio pueden ser elementos complementarios y cooperantes dentro de una infraestructura radio heterogénea a través de la cual el proveedor de red puede satisfacer de manera más eficiente los diversos requisitos de calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS). Para tal fin, uno de los elementos clave que debe considerar el proveedor de red es la gestión coordinada de los recursos radio (*Common Radio Resource Management*, CRRM) de las diversas RATs como si de un único sistema se tratase, con el objetivo de lograr un aprovechamiento óptimo de los recursos radio disponibles y, en definitiva, un uso más eficiente del sistema en su conjunto.

El concepto CRRM es relativamente amplio y abarca técnicas de diversa índole. Una función importante dentro del concepto CRRM es la función de selección de RAT, encargada de decidir la RAT que debe seleccionarse para la transmisión de los datos de cada usuario. Como primera aproximación, todos los usuarios podrían ser asignados siempre a la RAT

con mejores prestaciones en términos de régimen binario. Sin embargo, esta solución podría dar lugar a una situación indeseable en la cual una RAT permanece fuertemente cargada, incluso saturada, mientras otras RATs del sistema disponen de recursos libres sin utilizar. Esta discusión sugiere la necesidad de distribuir los usuarios del sistema entre las diferentes RATs disponibles con el objetivo de lograr un uso más eficiente de la totalidad de recursos radio disponibles en el sistema. Sin embargo, generalmente en una red heterogénea se hallan presentes diversas RATs con capacidades de transmisión bastante diferentes así como diversos tipos de servicios con diferentes requisitos de QoS, los cuales no pueden satisfacerse en todas las RATs del sistema. Por lo tanto, las asignaciones de los usuarios del sistema deben decidirse de manera que no sólo se obtenga una utilización óptima de la totalidad de recursos radio sino que también los diversos requisitos de QoS se vean satisfechos.

En este contexto, el presente trabajo propone y evalúa nuevas técnicas CRRM diseñadas para distribuir eficientemente el tráfico de una red heterogénea entre las RATs disponibles. El objetivo último de este trabajo es el de proveer soluciones que permitan satisfacer los diversos requisitos de QoS de los usuarios al mismo tiempo que se garantiza un aprovechamiento óptimo de los recursos radio disponibles.

2. Trabajo Previo

Existen varias aproximaciones y algoritmos para la selección de RAT propuestos en la literatura por otros autores. Por ejemplo, en [1] se propone un marco general para la definición de políticas para la selección inicial de RAT y se evalúan varios ejemplos basados en asignaciones preestablecidas.

En la referencia [2] se analizan los beneficios potenciales derivados de la gestión común de los recursos radio (CRRM). Las estrategias de selección de RAT empleadas en este estudio pretenden obtener una distribución de tráfico uniforme entre las RATs del sistema, lo cual se señala en [2] como deseable para maximizar la capacidad del sistema y minimizar la probabilidad de realizar traspasos de usuarios innecesarios. Para servicios en tiempo no real, el balanceo de carga se basa en el retardo medido en el *buffer* de transmisión para cada RAT. Para servicios en tiempo real, el balanceo se basa en ciertos umbrales de carga que disparan los procesos de traspaso de usuarios entre RATs (*handover* vertical).

En [3] los autores proponen varios principios de selección de RAT basados en la intensidad de señal (cobertura) y en la carga instantánea. Los *handovers* verticales se llevan a cabo de acuerdo a un determinado umbral de relación señal a ruido, el cual se selecciona para obtener una determinada distribución de carga. En [3] también se proponen otros principios de selección de RAT donde también se tiene en cuenta el nivel de QoS (expresado en términos de la tasa de transmisión) que puede ofrecer cada RAT del sistema. El trabajo descrito en [4] es otro ejemplo donde la selección de RAT también se basa en el nivel de QoS. En [4] se compara una estrategia basada en el punto de vista del terminal de usuario, donde los usuarios compiten entre sí para acceder a la RAT con mejores prestaciones, frente a una estrategia basada en el punto de vista de la red, donde la red selecciona el usuario a servir en cada momento. Asimismo, se evalúa la ganancia debida a la diversidad multi-radio y multi-usuario respecto al caso en que los usuarios están obligados a conectarse siempre a la misma red de acceso.

Tal y como ha quedado patente en la revisión previa, diferentes soluciones, basadas en distintas aproximaciones, se han propuesto en la literatura para el problema de selección de RAT en redes radio heterogéneas. Sin embargo, el trabajo en este campo todavía es relativamente reciente y requiere más esfuerzo del que se le ha dedicado hasta el momento. En este contexto, el presente trabajo propone nuevos algoritmos de selección de RAT cuyo objetivo es el de satisfacer los requisitos de QoS de los diversos usuarios del sistema al mismo tiempo que se garantiza un aprovechamiento óptimo de la totalidad de recursos radio disponibles.

3. Algoritmos Propuestos

En esta sección se presentan y describen nuevos algoritmos diseñados para distribuir eficientemente el tráfico de una red radio heterogénea entre las diversas alternativas de acceso radio disponibles. Los usuarios del sistema se asignan a aquella RAT que resulta óptima de acuerdo a un criterio predefinido. En este trabajo se proponen y evalúan diversos criterios para decidir dicha asignación. Todos ellos se caracterizan por el uso de una función de utilidad que cuantifica numéricamente todos los

factores tenidos en cuenta en la decisión. La RAT seleccionada en cada momento es aquella con el valor de utilidad más elevado.

En el primero de los algoritmos propuestos, la función de utilidad cuantifica, basándose en la calidad del canal percibida, el *throughput* estimado que podría esperarse por parte de cada una de las RATs del sistema. Por lo tanto, este algoritmo será denominado en lo sucesivo algoritmo UBET (*Utility Based on Expected Throughput*). En el segundo algoritmo propuesto en este trabajo, el valor de la tasa de transmisión esperada también se tiene en cuenta, pero la utilidad que un determinado usuario asigna a una tasa de transmisión dada depende de la requerida por el servicio que solicita dicho usuario. Por lo tanto, en lo sucesivo se hará referencia a este algoritmo como algoritmo UBReQoS (*Utility Based on Required Quality of Service*).

La definición de los algoritmos se ilustra considerando una red heterogénea integrada por las tecnologías de acceso radio GPRS (*General Packet Radio Service*), EDGE (*Enhanced Data-rates for GSM/Global Evolution*) y HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*). Este escenario será el considerado para evaluar el rendimiento de los algoritmos propuestos en este trabajo.

3.1. Algoritmo UBET

En una red heterogénea el usuario dispone de diversas RATs con diferentes prestaciones. En principio, se podrían obtener elevados niveles de QoS si los usuarios fueran asignados a la RAT con las mayores capacidades de transmisión. No obstante, esta afirmación es cierta mientras la carga del sistema se mantiene por debajo de un determinado nivel. Para un nivel de carga lo suficientemente elevado, si todos los usuarios del sistema fueran dirigidos hacia la misma RAT se podrían experimentar elevados niveles de interferencia, al mismo tiempo que cierta escasez de recursos. En este caso, el rendimiento final de dicha RAT disminuiría, y otras RATs alternativas no usadas, aun ofreciendo menores capacidades de transmisión, podrían ofrecer un mejor rendimiento. El objetivo de este algoritmo es el de ofrecer elevados niveles de QoS a los usuarios asignándolos a la RAT con las mejores prestaciones, hasta que dicha RAT alcanza un nivel de carga tal que el rendimiento estimado para otras RATs alternativas es mejor. Para tal fin, se calcula un valor de utilidad para cada RAT del sistema que representa una estimación del *throughput* que puede esperarse para el usuario si dicha RAT es seleccionada. Para obtener el valor de utilidad de cada RAT, se emplea un conjunto de curvas que relacionan la tasa de bloques erróneos (*Block Error Rate*, BLER) con la calidad del canal, expresada en términos de la relación portadora a interferencia (*Carrier to Interference Ratio*, CIR), para cada uno de los modos de transmisión (modulación y codificación de canal) disponibles en cada RAT. El *throughput* puede expresarse en función de la relación CIR como:

$$\text{Throughput} = R \cdot [1 - \text{BLER}(\text{CIR})] \quad (1)$$

donde R representa la tasa binaria correspondiente al modo de transmisión considerado. Suponiendo que se selecciona el modo de transmisión que ofrece el máximo *throughput* para la calidad radio experimentada, la envolvente de estas curvas se puede considerar como una estimación del *throughput* que podría obtenerse de una RAT determinada si ésta fuera seleccionada para transmitir. Así pues, esta envolvente se selecciona como función de utilidad U_1 del algoritmo. Siguiendo el procedimiento indicado, se obtiene una función de utilidad U_1 para cada RAT (que dependerá de las características de los modos de transmisión disponibles en cada una de ellas). Dichas funciones representan una estimación del *throughput* que cabe esperar de cada RAT en función de la calidad del canal de transmisión.

El *throughput* estimado dependerá, así pues, de la calidad radio experimentada. Si el número de usuarios asignados de manera simultánea a una determinada RAT se incrementa, los niveles de interferencia aumentarán y la calidad del canal se deteriorará, disminuyendo así el *throughput* esperado para dicha RAT. En tal caso, una RAT alternativa que experimente un menor nivel de carga de usuarios podría ofrecer un mayor *throughput* y, por lo tanto, una mayor utilidad. Varios usuarios serían entonces asignados a dicha RAT, donde experimentarían un mayor *throughput*. De esta forma se mejoraría el nivel de QoS global y se evitaría la saturación en la RAT con mejores prestaciones del sistema.

Es importante señalar que la función de utilidad U_1 anteriormente descrita ofrece una estimación del *throughput* que puede esperarse de una determinada RAT. Esta estimación tiene en cuenta el efecto de los usuarios interferentes a través del valor de la relación CIR, que representa la calidad radio experimentada y determina el *throughput* estimado. Sin embargo, el cálculo de este valor de utilidad se basa en la suposición de que el usuario recibirá un canal siempre que lo solicite, ignorando el efecto de los usuarios en la misma celda que se encuentran conectados a la misma RAT y que, por lo tanto, compiten entre sí por los canales disponibles. Si el número de usuarios en la celda actual es suficientemente grande en comparación con el número de canales disponibles para la RAT considerada, no todos los usuarios recibirán un canal cada vez que lo soliciten, lo cual afectará al rendimiento real del *throughput*. Con el objetivo de incluir este efecto en el *throughput* estimado, se introduce una segunda función de utilidad U_2 , de tal forma que la utilidad total U para una determinada RAT viene dada por $U = U_1 \cdot U_2$. La función de utilidad U_2 se define como

$$U_2 = \begin{cases} 1 & N_u \leq N_c \\ N_c / N_u & N_u > N_c \end{cases} \quad (2)$$

donde N_u representa el número de usuarios en la celda actual que se encuentran conectados a la RAT

considerada y N_c representa el número de canales disponibles para dicha RAT en la celda considerada. Si el número de usuarios es menor que el número de canales disponibles, es posible garantizar que todos los usuarios recibirán un canal cada vez que lo soliciten. Por lo tanto, para $N_u \leq N_c$, $U_2 = 1$ y $U = U_1$, lo que significa que el *throughput* estimado viene dado por el valor de U_1 . Sin embargo, si el número de usuarios es mayor que el número de canales disponibles, algunos usuarios podrían no recibir un canal cuando lo necesiten. Por ejemplo, si $N_u = 2 \cdot N_c$, podemos considerar a modo de aproximación sencilla que, en promedio, cada usuario tendría acceso a un canal la mitad de las veces que lo solicitara (en realidad, esto podría depender fuertemente de la política de *scheduling* aplicada). Por lo tanto, para $N_u = 2 \cdot N_c$, $U_2 = 0.5$ y $U = 0.5 \cdot U_1$, lo que significa que en este caso el *throughput* estimado se considera que es 0.5 veces la estimación proporcionada por U_1 .

El valor de la función U_2 puede obtenerse de manera sencilla ya que únicamente depende del número de usuarios conectados a la RAT considerada y del número de canales disponibles en la celda actual. Sin embargo, el cálculo de la función U_1 requiere estimar los niveles de interferencia durante la operación del sistema, lo cual suele ser complejo y computacionalmente costoso. A fin de simplificar este procedimiento, se propone una aproximación que puede emplearse para determinar de manera sencilla un valor de CIR para cada RAT. La aproximación sugerida ha sido elaborada considerando el enlace descendente y se basa en el valor de CIR predicho por un determinado modelo de propagación en función del número de usuarios interferentes. En dicho procedimiento, los niveles de portadora y de interferencia se calculan por separado. El nivel de portadora se obtiene suponiendo el caso más desfavorable, es decir, cuando el usuario se encuentra en el borde de la celda. Con ello se pretende que las prestaciones obtenidas por el usuario en la RAT seleccionada no resulten inferiores a las estimadas para dicha RAT. Los niveles de interferencia se estiman considerando sólo la primera corona de celdas interferentes. En este caso se distingue entre dos tipos de sistemas. En sistemas FDMA/TDMA, como es el caso de GPRS o EDGE, la interferencia procede de celdas co-canales separadas de la celda interferida por una distancia igual a la distancia de reutilización R (considerando la primera corona co-canal). Se supone que tanto los usuarios interferentes como los interferidos se encuentran en el centro de sus respectivas celdas, con objeto de eliminar los efectos de la movilidad de los usuarios sobre el valor instantáneo de la calidad radio. Por lo tanto, para GPRS y EDGE, el valor de la relación CIR se estima como

$$\text{CIR}_{\text{GPRS/EDGE}} = \frac{\frac{P_i}{L_P(r)}}{N_j \cdot \frac{P_j}{L_P(R)} + N_0 \cdot W} \quad (3)$$

donde P_i representa la potencia de transmisión de la señal deseada en la celda de referencia (celda i), $L_P(r)$ es la atenuación media entre el centro y el borde de la celda de referencia, es decir, sobre una distancia igual al radio r de la celda de referencia, N_j es el número de transmisores interferentes en las celdas co-canal interferentes, P_j es la potencia de transmisión de las celdas interferentes (supuesta, por simplicidad, la misma en todas las celdas interferentes), $L_P(R)$ es la atenuación media sobre una distancia igual a la distancia de reutilización R , y $N_0 \cdot W$ representa el ruido térmico en el receptor en la celda de referencia, siendo N_0 la densidad espectral de ruido y W el ancho de banda del canal.

En sistemas CDMA, como por ejemplo HSDPA, la interferencia procede de las celdas de alrededor pero también procede de dentro de la propia celda, ya que el efecto multicamino reduce la ortogonalidad entre los códigos de canalización de la celda, originando así cierta componente de interferencia intracelda. La interferencia intercelda se estima suponiendo la misma posición de usuarios interferentes e interferidos que para sistemas FDMA/TDMA. Para el cálculo de la interferencia intracelda, se supone que el usuario interferido se encuentra en el borde de la celda mientras que los interferentes se consideran situados en el centro de la celda. En este caso la potencia de interferencia se atenúa por un factor de ortogonalidad α [5]. Así pues, para HSDPA el valor de la relación CIR se calcula según indica la expresión (4), donde N_i es el número de canales activos que producen interferencia intracelda.

$$CIR_{HSDPA} = \frac{\frac{P_i}{L_P(r)}}{N_i \cdot \frac{P_i \cdot (1-\alpha)}{L_P(r)} + N_j \cdot \frac{P_j}{L_P(R)} + N_0 \cdot W} \quad (4)$$

El método propuesto ofrece una manera sencilla de establecer una relación directa entre el número de usuarios interferentes y el valor de la relación CIR, que puede almacenarse en tablas y ser consultada cada vez que sea necesario, en lugar de tener que estimar el valor de CIR durante la operación de sistema para calcular el valor de la función U_1 .

Resumiendo, el modo de operación del algoritmo UBET es el siguiente. En cada decisión de selección de RAT se calcula el valor de la función U para cada RAT. Para obtener el valor de la función U_1 , se determina el número de usuarios interferentes y este valor se traduce a un valor de utilidad mediante el uso de tablas almacenadas cuyos valores habrán sido previamente calculados siguiendo el método anteriormente descrito. El valor de U_2 se obtiene a partir del número de usuarios en la celda actual y del número de canales disponibles según indica la expresión (2). Ambos valores se multiplican para obtener un valor de utilidad total U para cada RAT. El usuario finalmente es asignado a la RAT con el valor más elevado de utilidad.

3.2. Algoritmo UBReQoS

El criterio del algoritmo UBET descrito en la sección previa consiste en asignar los usuarios a la RAT con el rendimiento esperado de *throughput* más elevado. Esta asignación se ejecuta sin tener en cuenta la posibilidad de que los usuarios con bajos requisitos de QoS podrían ser satisfechos con otras RATs con menores capacidades. Cuando dichos usuarios son asignados a las RATs con las mejores prestaciones, pueden provocar un deterioro innecesario del rendimiento experimentado por aquellos usuarios que requieren elevados niveles de QoS y que sólo pueden ser satisfechos a través de las RATs con mejores prestaciones. Esta situación podría evitarse si cada usuario fuera asignado a una RAT cuyas prestaciones fueran acordes al nivel de QoS requerido. Como primera aproximación, cada servicio podría preasignarse a una determinada RAT de acuerdo al nivel de QoS requerido. Sin embargo, un incremento en la demanda de un determinado servicio podría saturar la RAT asociada, por lo que se hace necesario diseñar otras soluciones más sofisticadas. El objetivo del algoritmo UBReQoS propuesto en esta sección consiste en distribuir inteligentemente los usuarios entre las RATs de la red heterogénea de acuerdo al nivel de QoS requerido. Para tal fin, la función de utilidad definida para este algoritmo asigna a cada RAT un valor de utilidad que depende de los requisitos de QoS específicos de cada usuario.

En primer lugar se define una función de utilidad u_1 que depende de la tasa binaria R_{nom} requerida por el servicio solicitado para ser provisto de manera adecuada. Antes de describir esta función, es importante aclarar el significado del parámetro R_{nom} para diferentes tipos de servicios. Los servicios en tiempo real se caracterizan de manera clara por una tasa binaria requerida, la cual puede tomarse directamente como valor R_{nom} del servicio para la aplicación del algoritmo UBReQoS. Sin embargo, la identificación de este valor para servicios en tiempo no real no resulta inmediata. Para tal fin proponemos un método para derivar este valor para servicios en tiempo no real como, por ejemplo, navegación web o correo electrónico. El primer paso consiste en calcular la función de distribución acumulativa (*Cumulative Distribution Function*, CDF) de los tamaños de paquete (un paquete corresponde a una página web o a un correo electrónico). En este trabajo se ha considerado el tamaño de paquetes generados con los modelos de tráfico señalados en la sección 4. Una vez calculada la CDF, se obtiene un valor de tamaño de paquete en función de los objetivos específicos. En este trabajo se ha considerado el valor correspondiente a una probabilidad igual a 0.5 en la CDF, es decir, el máximo tamaño de paquete observado en el 50% de las muestras. Suponiendo que la transmisión de una página web o de un correo electrónico resulta satisfactoria para el usuario si tiene lugar en un intervalo de tiempo inferior a 4 segundos (tal y como se indica en las especificaciones 3GPP TS 22.105), el tamaño de paquete obtenido a partir de la

CDF se divide entre dicho valor. El resultado finalmente obtenido con este procedimiento es el valor de R_{nom} considerado para los servicios de navegación web y correo electrónico.

En la definición de la función u_i , se emplea un coeficiente de utilidad nominal μ . Este parámetro se define como la utilidad percibida por el usuario cuando la tasa binaria estimada es igual a la tasa binaria media nominal R_{nom} del servicio. Este parámetro por lo tanto define la utilidad u_i en función de la relación entre la tasa binaria estimada y la tasa binaria nominal R_{nom} requerida por el servicio considerado. La Fig. 1 ilustra la relación entre este parámetro y la función de utilidad u_i . Según puede apreciarse, la función u_i es una función normalizada. Para una tasa binaria estimada igual a cero, la utilidad es siempre igual a cero. A medida que la tasa binaria estimada aumenta, la utilidad también aumenta hasta que se alcanza el máximo valor. La pendiente de la curva viene dada por el parámetro μ y la tasa binaria nominal R_{nom} del servicio.

El motivo de definir la función de utilidad u_i de esta forma es el siguiente. Considérese por ejemplo el usuario de un determinado servicio que percibe la máxima utilidad cuando la tasa binaria estimada es igual a R_{nom} , es decir, $\mu = 1$. Para tasas binarias mayores que R_{nom} el usuario percibe la misma utilidad que para R_{nom} , lo que significa que una RAT capaz de proveer una tasa binaria de al menos R_{nom} bits por segundo resultará suficiente para satisfacer al usuario. Mayores tasas binarias no incrementarán la utilidad percibida por el usuario, por lo que resulta innecesario asignar dicho usuario a otra RAT con mayores prestaciones binarias. Por lo tanto, el usuario sería asignado a una RAT capaz de satisfacer sus requisitos de tasa binaria, aunque en la red existan otras RATs con mayores tasas binarias. Por otra parte, el usuario de un servicio caracterizado por un elevado valor de R_{nom} sería asignado a otras RATs con mayores prestaciones binarias, ya que una RAT que ofrezca una tasa inferior a R_{nom} resulta insuficiente para satisfacer al usuario. El objetivo de la función u_i consiste, por lo tanto, en distribuir el tráfico entre las RATs del sistema de acuerdo al nivel de QoS requerido por cada usuario, expresado en términos de la tasa binaria.

A fin de emplear la función u_i para determinar un valor de utilidad para las RATs del sistema, se hace necesario estimar la tasa binaria que cabe esperar para cada una de ellas. Para tal fin, es necesario tener en cuenta los modos de transmisión (*Transmission Mode*, TM) disponibles en cada RAT. En general, una RAT dispone de diversos TMs, ofreciendo así un determinado rango de tasas binarias. Además, el TM empleado suele variar de manera dinámica en función de la calidad radio experimentada en cada momento. El rendimiento binario final de una determinada RAT viene fuertemente determinado por el conjunto de TMs disponibles y por la frecuencia

Función de utilidad u_i para diferentes servicios ($\mu = 1.0$)

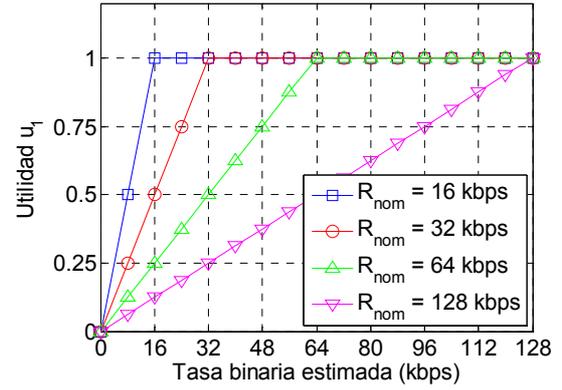


Figura 1. Función de utilidad u_i .

de utilización de cada uno de ellos. Para una RAT que dispone de T modos de transmisión, se calcula el valor de una función U_1 según la expresión

$$U_1 = \sum_{i=1}^T p(TM_i) \cdot u_1(TM_i) \quad (5)$$

donde $p(TM_i)$ denota la probabilidad (porcentaje) de utilización del modo de transmisión TM_i , y $u_1(TM_i)$ representa la utilidad u_1 asociada a la tasa binaria del modo de transmisión TM_i .

Al igual que para el algoritmo UBET, también se introduce la función de utilidad U_2 definida según la expresión (2) para incluir los efectos de tener que servir una cantidad de usuarios superior al número de canales disponibles. Por otra parte, los usuarios que producen interferencia degradan la calidad radio experimentada y, por lo tanto, también afectan al rendimiento final. Para incluir el efecto de los usuarios interferentes se introduce una tercera función de utilidad U_3 , la cual se define como

$$U_3 = 1 - \sum_{i=1}^T p(TM_i) \cdot BLER(TM_i) \quad (6)$$

donde $p(TM_i)$ denota la probabilidad (porcentaje) de utilización del modo de transmisión TM_i , y $BLER(TM_i)$ representa el BLER del modo de transmisión TM_i para la calidad radio experimentada. Este último término puede obtenerse de curvas que relacionan el BLER con el CIR experimentado. El procedimiento descrito en la sección 3.1 para mapear el número de usuarios interferentes a un valor de CIR también puede emplearse. Obsérvese que el valor devuelto por la función de utilidad U_3 decrece a medida que el valor de BLER aumenta, es decir, la calidad radio se degrada. Por lo tanto, mayores niveles de interferencia se reflejan en valores de utilidad U_3 más reducidos. Finalmente, la RAT que ofrece el valor de utilidad $U = U_1 \cdot U_2 \cdot U_3$ más elevado se selecciona finalmente para transmitir.

4. Plataforma de Simulación

El rendimiento de los algoritmos propuestos en este trabajo se evalúa mediante simulaciones a nivel de sistema. Estas simulaciones han sido llevadas a cabo haciendo uso de la plataforma de simulación SPHERE (*Simulation Platform for HETereogeneous wiREless systems*) [6]. La plataforma SPHERE integra tres avanzados simuladores a nivel de sistemas de las tecnologías GPRS, EDGE y HSDPA. Las especificaciones de sus respectivas interfaces radio han sido implementadas en detalle. Además, las transmisiones radio se modelan a nivel de *slot*, lo cual permite una evaluación precisa de la QoS final percibida por el usuario.

La Tabla 1 resume la configuración utilizada para las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo. Se ha considerado un escenario celular conformado por 27 celdas omni-direccionales con un radio de 500 m. Para evitar efectos de borde, se ha empleado una técnica *wrap-around*. En cada celda existe cobertura de todas las RATs disponibles en el sistema. La asignación de canales se realiza seleccionando de manera aleatoria uno de entre los disponibles en el momento en que se recibe la solicitud de canal. Cuando no hay canales disponibles en la RAT seleccionada, el usuario puede ser dirigido hacia otra RAT alternativa con canales libres o puede colocarse en la cola de espera. Para los usuarios en las colas de espera de GPRS y EDGE se emplea una política de *scheduling* de tipo *First Come First Served* (FCFS), atendiendo las peticiones de canal en el mismo orden en que surgen. Los usuarios en la cola de HSDPA pueden servirse siguiendo una política *round robin* (turnos rotativos) o *Max C/I* (selecciona el usuario con mejor calidad radio).

La plataforma de simulación implementa todos los modos de transmisión de las RATs consideradas y modela su funcionamiento adaptativo mediante una técnica de *Link Adaptation* (LA), también conocida como *Adaptive Modulation and Coding* (AMC) para HSDPA. El funcionamiento de esta técnica consiste en evaluar de manera periódica la calidad radio y seleccionar el modo de transmisión que resulta óptimo para dicha calidad, según cierto criterio predefinido. Para servicios en tiempo no real se selecciona el modo de transmisión que ofrece el *throughput* más elevado para la calidad radio experimentada. Para servicios en tiempo real se emplea el algoritmo descrito en [7], ya que mejora el rendimiento del primero en varios aspectos de vital importancia para servicios en tiempo real.

Los datos recibidos con error se retransmiten mediante un protocolo de retransmisión ARQ (*Automatic Repeat reQuest*). Para GPRS y EDGE se ha implementado un protocolo ARQ selectivo según se describe en las especificaciones 3GPP. Para HSDPA, la retransmisión de la información recibida con error se lleva a cabo mediante un protocolo de parada y espera (*Stop And Wait*, SAW) con N procesos operando de manera simultánea. Estos protocolos de retransmisión han sido activados para servi-

Tabla 1. Configuración de la plataforma de simulación.

Parámetro	GPRS	EDGE	HSDPA
Entorno	Urbano macro-celular		
Enlace simulado	Descendente		
Nº de celdas	27		
Factor de reutilización	3	3	1
Radio de celda	500 m		
Canales/celda	4	4	4
Asign. canal	Aleatoria		
<i>Scheduling</i>	FCFS	FCFS	<i>Round Robin</i>
Potencia/canal	30 dBm	30 dBm	30 dBm
Modelo de atenuación	Okumura-Hata COST 231		
	$f_c = 1.8$ GHz	$f_c = 1.8$ GHz	$f_c = 2.0$ GHz
Modelo de efecto sombra	Log-normal, con desviación estándar de 6 dB y distancia de decorrelación de 20 m		
Ruido térmico	-121 dBm	-121 dBm	-107 dBm
Configuración del protocolo ARQ	Tamaño de ventana de 64 bloques. Periodo de respuesta de 16 bloques.	Tamaño de ventana según clase de <i>multislot</i> . Periodo de respuesta de 32 bloques.	4 procesos SAW. Máximo 4 transmisiones.
Periodo actualización LA/AMC	60 ms	60 ms	2 ms

cios en tiempo no real ya que para dichos servicios la integridad de los datos es un aspecto de suma importancia, pudiéndose tolerar cierto retardo. Sin embargo, los servicios en tiempo real se caracterizan por poseer estrictas limitaciones de retardo. Los protocolos de retransmisión, así pues, han permanecido desactivados para servicios en tiempo real con el fin de evitar excesivos retardos. Por lo tanto, los datos recibidos con error son descartados. No obstante, en el caso particular de HSDPA se ha permitido la posibilidad de efectuar algunas retransmisiones para aquellos paquetes de datos recibidos con error antes de ser definitivamente descartados, ya que los modos de transmisión de HSDPA se caracterizan por poseer elevadas tasas binarias.

El rendimiento de los algoritmos propuestos en este trabajo ha sido evaluado considerando tres tipos de tráfico, concretamente, navegación web [8], correo electrónico [9] y vídeo H.263 en tiempo real a diferentes velocidades binarias medias [10].

Por último, es importante señalar que todas las RATs de la red heterogénea son emuladas de manera simultánea, y los cambios de RAT (*handovers* verticales) se realizan de manera dinámica durante las simulaciones. La capacidad de modelar este tipo de situaciones es un aspecto importante en una plataforma de simulación de redes heterogéneas de cara a permitir una evaluación realista y precisa del rendimiento de las técnicas bajo estudio. En la referencia [6] puede encontrarse una descripción exhaustiva de la plataforma de simulación SPHERE.

5. Rendimiento de los Algoritmos Propuestos

En la presente sección se muestran y analizan los resultados obtenidos mediante simulación para los diversos algoritmos propuestos en este trabajo. El rendimiento ha sido evaluado bajo diferentes escenarios de carga en el sistema (baja/alta) a fin de poder mostrar claramente ciertos efectos que tienen lugar bajo determinadas condiciones de carga. La Tabla 2 muestra el número de usuarios por celda de cada servicio para cada uno de los escenarios.

Tabla 2. Escenarios de evaluación.

Esc	Web	Correo	Vídeo 32 kbps	Vídeo 64 kbps	Vídeo 256 kbps
I	2	2	4	3	1
II	3	3	6	4	2
III	4	4	8	6	2

Antes de entrar a discutir en detalle los resultados obtenidos, resulta conveniente definir varios parámetros empleados para evaluar el rendimiento de los algoritmos propuestos. El primer aspecto evaluado en cada algoritmo es el porcentaje de selección de cada RAT, medida representativa de la frecuencia con la que el algoritmo selecciona cada una de las RATs de la red heterogénea. El porcentaje de selección de una RAT se define como el cociente entre el número de veces que el algoritmo selecciona dicha RAT y el número total de decisiones de selección de RAT tomadas por el algoritmo. El nivel de QoS experimentado desde el punto de vista del usuario se cuantifica mediante un parámetro denominado nivel de satisfacción del usuario. El criterio empleado para definir este parámetro depende del servicio considerado. Para los servicios de navegación web y correo electrónico se considera que la transmisión de una página web o un correo electrónico resulta satisfactoria para el usuario cuando se completa en un periodo de tiempo no superior a 4 segundos, según se indica en las especificaciones 3GPP TS 22.105. Para el servicio de vídeo H.263 en tiempo real, se considera que la transmisión de una trama de vídeo resulta satisfactoria para el usuario cuando finaliza antes de que se genere la siguiente trama de vídeo. El nivel de satisfacción de los usuarios se define por tanto como el porcentaje de ocasiones en las que la transmisión de una página web, correo electrónico o trama de vídeo resulta satisfactoria para el usuario según el criterio correspondiente a cada servicio. Por último, otro aspecto interesante a analizar es el coste de señalización derivado de la aplicación de los algoritmos de distribución de tráfico, el cual se cuantifica mediante el número de cambios de RAT por minuto y por usuario solicitados en el sistema.

5.1. Rendimiento del Algoritmo UBET

Las Fig. 2, 3 y 4 muestran el porcentaje de selección global de cada RAT del sistema para el algoritmo UBET considerando los escenarios I, II y III respectivamente. Cada figura muestra los resultados obtenidos cuando EDGE funciona en modo tanto *monocanal* como *multicanal*, es decir, cuando a cada

usuario de EDGE se le asigna, respectivamente, un único canal o varios canales de manera simultánea (concretamente hasta 2, 3 y 4 canales por usuario). Para GPRS y HSDPA se considera en todos los casos operación monocanal. Según puede apreciarse para los diversos escenarios, cuando todas las RATs operan en modo monocanal, todos los usuarios del sistema son siempre asignados a HSDPA. Este comportamiento se explica por la considerable diferencia existente entre las velocidades de transmisión de HSDPA y las del resto de RATs operando en modo monocanal. Conviene recordar que el algoritmo UBET fue diseñado con el objetivo de obtener un elevado nivel global de QoS en el sistema. Para ello el algoritmo asigna los usuarios del sistema a aquella RAT que, en cada momento, ofrece el valor de *throughput* estimado más elevado. Dadas las mayores capacidades de transmisión de HSDPA, resulta lógico, así pues, el comportamiento observado. Cuando EDGE opera en modo multicanal se observa que el porcentaje de selección de EDGE aumenta. Esta tendencia se acentúa a medida que aumenta el número de canales simultáneamente asignados a cada usuario en EDGE. Este comportamiento indica que cuando las RATs del sistema poseen unas capacidades binarias considerablemente diferentes, el algoritmo UBET selecciona de forma masiva aquella con mejores prestaciones. En cambio, cuando las capacidades de transmisión de las RATs disponibles resultan comparables, los usuarios del sistema son distribuidos.

Para analizar cómo repercute el comportamiento del algoritmo UBET sobre el rendimiento del sistema, la Tabla 3 muestra el nivel de satisfacción de los usuarios para cada escenario junto con el número de cambios de RAT por minuto y por usuario. En primer lugar, es interesante señalar la obtención de elevados niveles de satisfacción global en el sistema. En efecto, para el escenario I el nivel de satisfacción es superior al 90% en todos los casos. A medida que la carga del sistema aumenta, el nivel de satisfacción decrece debido a un aumento del nivel de interferencia en el sistema y a una reducción de la disponibilidad de recursos libres. Aun así, incluso en condiciones de elevada carga, como es el caso de los escenarios II y III, los niveles de satisfacción obtenidos están comprendidos entre el 80% y el 90% (excepto para el escenario III con EDGE operando en modo monocanal, para el cual se obtiene un nivel de satisfacción global del 71.64 %, que en cualquier caso puede considerarse aceptablemente alto). Estos resultados permiten afirmar el algoritmo UBET se comporta de forma satisfactoria en la medida en que cumple el objetivo para el cual fue diseñado, es decir, ofrecer elevados niveles de QoS a los usuarios del sistema, los cuales experimentan un alto grado de satisfacción.

En la Tabla 3 se observa que a medida que aumenta el número de canales simultáneamente asignados a los usuarios de EDGE, el nivel de satisfacción experimentado es mayor. Para los escenarios con cargas

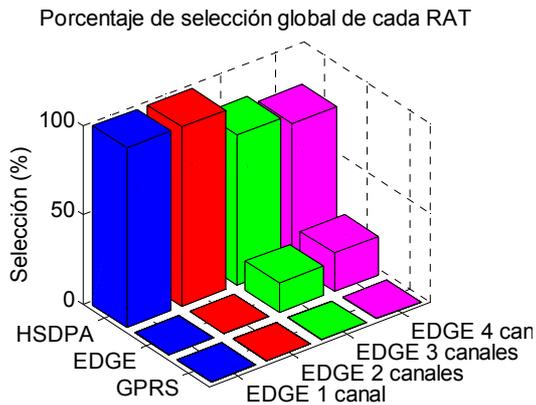


Figura 2. Porcentaje de selección global de cada RAT – Algoritmo UBET (escenario I).

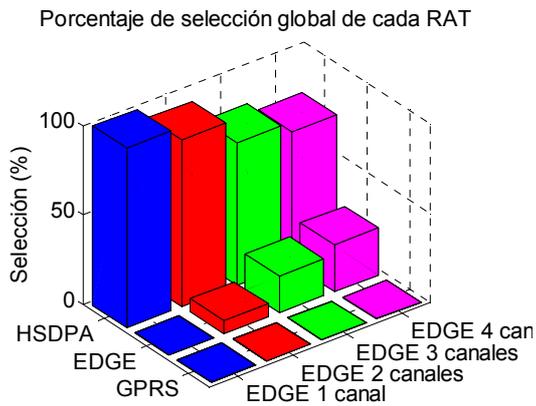


Figura 3. Porcentaje de selección global de cada RAT – Algoritmo UBET (escenario II).

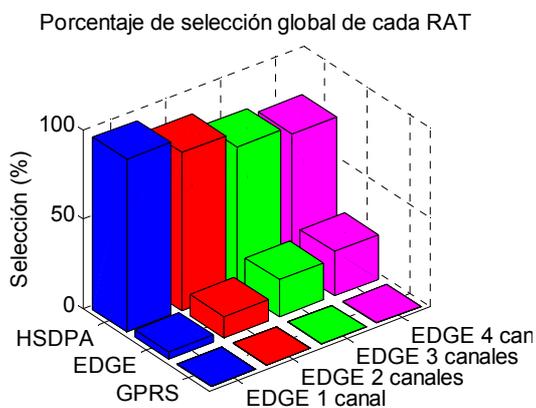


Figura 4. Porcentaje de selección global de cada RAT – Algoritmo UBET (escenario III).

Tabla 3. Nivel de satisfacción de los usuarios y número de cambios de RAT por minuto y por usuario para el algoritmo UBET.

Esc	Parámetro	Canales/usuario para EDGE			
		1	2	3	4
I	Satisfacción (%)	92.73	92.17	91.38	92.29
	Cambios RAT	0.00	0.00	1.11	1.37
II	Satisfacción (%)	83.09	84.02	87.99	89.51
	Cambios RAT	0.00	0.26	1.25	1.28
III	Satisfacción (%)	71.64	80.55	85.27	87.85
	Cambios RAT	0.28	0.78	1.06	1.18

elevadas (escenarios II y III) esta tendencia resulta bastante clara. Ello se debe a que a medida que las prestaciones de EDGE y HSDPA se aproximan más entre sí, el algoritmo UBET asigna un mayor número de usuarios a EDGE, en lugar de dirigirlos hacia HSDPA. Como resultado, la carga de usuarios soportada por HSDPA decrece, lo cual redundará en la obtención de mejores prestaciones para los usuarios de HSDPA. Por otra parte, los usuarios que son asignados a EDGE operando en modo multicanal experimentan unas prestaciones que, aunque ligeramente menores que las ofrecidas por HSDPA, tampoco resultan tan diferentes. El resultado general observado, según se aprecia en la Tabla 3, es un aumento del nivel de satisfacción de los usuarios del sistema. A medida que las RATs del sistema ofrecen unas prestaciones más similares, la distribución de usuarios que realiza el algoritmo UBET se traduce en última instancia en una mejora del nivel de satisfacción global de los usuarios del sistema, según muestra la Tabla 3. El coste de esta mejora, según puede apreciarse, es un aumento del nivel de señalización debido a la mayor frecuencia de traspaso de usuarios entre las RATs del sistema. En el caso del escenario I también se observa un aumento del nivel de señalización del sistema, aunque en este caso el nivel de satisfacción de los usuarios permanece prácticamente constante. Esta circunstancia sugiere que en situaciones de carga moderada puede resultar desaconsejable operar las RATs con menores prestaciones en modo multicanal, ya que aunque la carga quede más repartida entre las RATs del sistema, ello no se traduce en un aumento del nivel de satisfacción de los usuarios, existiendo no obstante un coste asociado al aumento de señalización. En situaciones de carga elevada, la estrategia anterior contribuye a mejorar el nivel de QoS ofrecido a los usuarios, según se observa para los escenarios II y III, con el coste ya indicado. En cualquier caso es importante observar que, mediante una configuración adecuada, es posible obtener niveles de satisfacción superiores al 90 % para cargas bajas o moderadas, y muy cercanos al 90 % para cargas elevadas, según muestran los resultados obtenidos.

Existe un último punto que merece la pena ser discutido. En la sección 3.1 se sugirió una aproximación sencilla para la obtención de elevados niveles de QoS consistente en seleccionar siempre aquella RAT con las mayores capacidades de transmisión en términos de tasa binaria (HSDPA en el escenario de simulación considerado). Se señaló que esta estrategia, aparte de suponer un uso claramente ineficiente de los recursos disponibles en el sistema, podría no proporcionar siempre los mejores resultados para los usuarios del sistema. Llegados a este punto se hace necesario verificar, así pues, si efectivamente la estrategia de asignar los usuarios del sistema siempre a la RAT con las mejores prestaciones puede verse superada, en términos de QoS, por otra estrategia que realice cierta distribución de usuarios entre las RATs disponibles y que, por lo tanto, no seleccione siempre la RAT con mejores prestaciones. En

las Fig. 2, 3 y 4 se puede observar que, para los diversos escenarios considerados, cuando todas las RATs operan en modo monocanal se observa una utilización del 100% de HSDPA por parte del algoritmo UBET. Esto indica que en este caso el algoritmo UBET se comporta precisamente como la estrategia consistente en seleccionar siempre la RAT con las mejores prestaciones. La Tabla 3 asimismo muestra que el nivel de QoS obtenido en este caso puede mejorarse cuando otras RATs alternativas operan en modo multicanal y se realiza cierta distribución de usuarios entre ellas. La estrategia anterior puede resultar satisfactoria cuando la carga del sistema es moderada, ya que en tal circunstancia el nivel de satisfacción de los usuarios permanece constante independientemente de que todos los usuarios del sistema se asignen a HSDPA (caso correspondiente a EDGE operando en modo monocanal) o se distribuyan entre HSDPA y EDGE operando en modo multicanal, según muestran los resultados obtenidos para el escenario I. No obstante, para cargas elevadas, la estrategia de asignar los usuarios a la RAT con mejores prestaciones no ofrece siempre el mejor rendimiento, ya que según queda patente en los resultados obtenidos para los escenarios II y III, resulta posible obtener mayores niveles de satisfacción para los usuarios del sistema operando otras RATs en modo multicanal y realizando cierta distribución de usuarios entre ellas. En este caso el algoritmo UBET es un candidato adecuado para decidir cómo realizar dicha distribución, permitiendo así la obtención de un mayor nivel de satisfacción de los usuarios del sistema. Estos resultados demuestran, por lo tanto, que el algoritmo UBET constituye una mejor opción que la estrategia mencionada ya que, aunque ofrece un nivel de satisfacción similar para cargas bajas y moderadas, los usuarios experimentan un mayor nivel de satisfacción ante cargas altas.

Existen dos posibles objeciones al algoritmo UBET. La primera de ellas es que se realiza un uso más bien poco eficiente de los recursos del sistema, ya que unas RATs se seleccionan de manera muy habitual mientras otras se utilizan con poca o ninguna frecuencia. Por otra parte, los usuarios de todos los servicios son dirigidos habitualmente hacia la RAT con mejores prestaciones, lo cual puede dificultar que aquellos servicios más exigentes en términos de QoS puedan proveerse satisfactoriamente debido a un excesivo nivel de carga en la única RAT en la que pueden proveerse dichos servicios. Para suplir estas carencias del algoritmo UBET, se propone el algoritmo UBReQoS, cuyo criterio consiste en distribuir los usuarios del sistema entre las RATs disponibles según las prestaciones ofrecidas por cada una y el nivel de QoS requerido por el usuario.

5.2. Rendimiento del Algoritmo UBReQoS

La Fig. 5 muestra el porcentaje de selección de cada RAT para el algoritmo UBReQoS cuando todas las RATs operan en modo monocanal. Según se observa, los usuarios de navegación web y correo electrónico, los servicios menos exigentes, son asignados

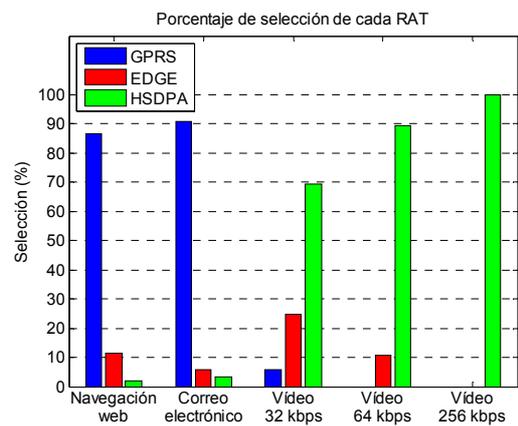


Figura 5. Porcentaje de selección de cada RAT por tipo de servicio – Algoritmo UBReQoS (escenario I).

Tabla 4. Nivel de satisfacción de los usuarios para los algoritmos UBET y UBReQoS (escenario I).

Servicio	Nivel de satisfacción (%)		
	UBET	UBReQoS	UBReQoS optimizado
Web	97.70	59.64	94.01
Correo	92.80	57.85	93.51
Video 32 kbps	99.53	90.96	97.27
Video 64 kbps	96.05	90.30	94.96
Video 256 kbps	52.49	55.89	55.66

de manera más habitual a GPRS, la RAT con las prestaciones más modestas. Los usuarios de vídeo a 256 kbps, el servicio más exigente, son asignados siempre a HSDPA, la única RAT capaz de satisfacer sus necesidades. Finalmente, para los usuarios de vídeo a 32 y 64 kbps se observa un cierto reparto entre EDGE y HSDPA. Así pues, queda patente que el algoritmo UBReQoS distribuye los usuarios del sistema entre las RATs disponibles de manera acorde a sus requisitos de QoS.

La primera consecuencia derivada de este reparto de usuarios es un mayor grado de utilización de la totalidad de recursos disponibles en el sistema respecto al algoritmo UBET. Por otra parte, este reparto también implica que muchos de los usuarios que antes eran asignados de manera habitual a HSDPA, ahora son asignados a otras RATs con menores prestaciones. Como resultado, el nivel de satisfacción de varios servicios experimenta un descenso respecto al algoritmo UBET. Según puede apreciarse en la Tabla 4 para el escenario I, el mayor descenso se observa para los usuarios de navegación web y correo electrónico, que han pasado de ser asignados habitualmente a HSDPA a ser asignados habitualmente a GPRS, cuyas prestaciones son considerablemente menores. Para los usuarios de vídeo a 32 y 64 kbps también se observa un descenso, aunque en este caso el nivel de satisfacción de los usuarios sigue siendo bastante elevado, del 90 % en ambos casos. En cambio, gracias al reparto de usuarios realizado por el algoritmo UBReQoS, la carga total soportada por HSDPA disminuye y, como resultado, los usuarios

de vídeo a 256 kbps experimentan un mayor nivel de satisfacción que con el algoritmo UBET. El nivel de mejora mostrado en la Tabla 4 para el escenario I es del 3.40 %, aunque para escenarios de mayor carga las mejoras son mucho más notables, del 12.04 % para el escenario II y de hasta un 21.92 % para el escenario III.

Así pues, el algoritmo UBReQoS, en comparación con el algoritmo UBET, ofrece un menor nivel de satisfacción a los usuarios de aquellos servicios menos exigentes en términos de QoS a cambio de mejorar el nivel de satisfacción de los usuarios de aquellos servicios más exigentes. Esta circunstancia podría resultar interesante al proveedor de red en la medida en que una reducción del nivel de QoS ofrecido a los usuarios de servicios poco exigentes (en este caso navegación web y correo electrónico, servicios de tipo *best effort*) podría resultar provechosa si con ello consigue incrementar el nivel de satisfacción de los usuarios de aquellos servicios con mayores requisitos de QoS y, por lo tanto, también facturados a un precio más elevado.

En cualquier caso, es importante señalar que mediante un ajuste adecuado de los parámetros de diseño del algoritmo UBReQoS es posible optimizar el rendimiento del mismo. En efecto, tras realizar numerosas simulaciones del algoritmo UBReQoS para un amplio margen de valores de los parámetros μ y R_{nom} , se verificó la existencia de una configuración óptima del algoritmo. Los resultados se muestran en la Tabla 4. Frente a una configuración arbitraria con $\mu = 1.00$ y el valor de R_{nom} obtenido a partir del punto correspondiente a una probabilidad igual a 0.5 en la CDF de los tamaños de paquete, se verificó la obtención de mejores resultados para una configuración óptima con $\mu = 0.25$ y una probabilidad en la CDF igual a 0.9. Comparando los resultados obtenidos en ambos casos con los resultados obtenidos para el algoritmo UBET, se concluye que mediante un ajuste adecuado de los parámetros de diseño del algoritmo UBReQoS es posible obtener una configuración óptima gracias a la cual es posible mantener el nivel de mejora para los usuarios más exigentes al mismo tiempo que se minimiza el impacto sobre el nivel de satisfacción de los servicios menos exigentes.

Por último, el rendimiento del algoritmo UBReQoS también ha sido comparado con el caso en que cada servicio se asigna de manera fija a una RAT determinada del sistema cuyas prestaciones están acordes a las exigencias de cada servicio. Para la aplicación de esta estrategia basada en asignaciones fijas, se ha considerado un reparto de servicios en el cual los usuarios de navegación web y correo electrónico se conectan siempre a GPRS, los usuarios de vídeo a 32 kbps se conectan siempre a EDGE y los usuarios de vídeo a 64 y 256 kbps, siempre a HSDPA. Comparando esta estrategia de asignaciones fijas con la del algoritmo UBReQoS, resulta evidente que el algoritmo UBReQoS ofrece más flexibilidad ya que

es capaz de adaptar de forma dinámica la distribución de los usuarios de la red a las condiciones particulares de carga y demanda experimentadas en cada momento. Como resultado, el algoritmo UBReQoS ofrece mayores niveles de satisfacción para todos los servicios, excepto para vídeo a 64 kbps (ver Tabla 5). En cualquier caso, el nivel de satisfacción de los usuarios de este servicio sigue siendo bastante elevado, del 90%. Este nivel de mejora respecto al algoritmo de asignaciones fijas se obtienen a cambio del nivel de señalización introducido por el algoritmo UBReQoS, el cual es originado por el traspaso de usuarios entre RATs.

Tabla 5. Nivel de satisfacción de los usuarios para los algoritmos UBReQoS y de asignaciones fijas.

Servicio	Nivel de satisfacción (%)	
	UBReQoS	Asignaciones fijas
Web	59.64	49.79
Correo	57.85	54.32
Vídeo 32 kbps	90.96	88.23
Vídeo 64 kbps	90.30	92.90
Vídeo 256 kbps	55.89	51.86

Gracias a la distribución inteligente de usuarios realizada por el algoritmo UBReQoS, los diversos usuarios del sistema reciben un servicio satisfactorio al mismo tiempo que se realiza un uso eficiente de los recursos disponibles en el sistema.

6. Conclusiones

Este trabajo ha propuesto nuevos algoritmos diseñados para distribuir eficientemente el tráfico de una red heterogénea de comunicaciones móviles entre las diversas alternativas de acceso radio disponibles. El objetivo de este trabajo es el de proveer soluciones que permitan satisfacer los diversos requisitos de QoS del sistema al mismo tiempo que se realiza un uso eficiente de los recursos radio disponibles. La primera estrategia propuesta en este trabajo pretende ofrecer elevados niveles de QoS a los usuarios del sistema seleccionando aquella RAT para la cual se prevé la obtención del throughput más elevado, el cual se estima a partir de la calidad de transmisión radio y de la disponibilidad de recursos en cada RAT. Los resultados obtenidos demuestran que esta estrategia permite a los usuarios del sistema experimentar en general un elevado nivel de satisfacción. La segunda estrategia propuesta en este trabajo consiste en distribuir los usuarios entre las RATs del sistema en función de las prestaciones ofrecidas por cada una de ellas y del nivel de QoS requerido por el usuario. Frente a otro tipo de soluciones estáticas basadas en asignaciones prefijadas de cada servicio a una determinada RAT, esta propuesta ofrece un elevado grado de flexibilidad adaptando de forma dinámica la distribución del tráfico de la red a las condiciones particulares de carga y demanda experimentadas en cada momento, lo cual resulta en la obtención de mayores niveles de satisfacción para los usuarios, tal y como demuestran los resultados obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo en

este trabajo. En definitiva, gracias a esta distribución inteligente de usuarios, los diversos usuarios del sistema reciben un servicio satisfactorio al mismo tiempo que se garantiza un uso eficiente de la totalidad de recursos disponibles en la red.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y fondos FEDER a través del proyecto TEC2005-08211-C02-02, y por la Generalitat Valenciana a través del proyecto GV05/189.

Referencias

- [1] J. Pérez-Romero, O. Sallent, y R. Agustí, "Policy-based initial RAT selection algorithms in heterogeneous networks", en actas de *Mobile and Wireless Communication Networks (MWCN'05)*, Marrakech (Marruecos), 19-21 Septiembre 2005, pp. 1-5.
- [2] A. Tolli, P. Hakalin y H. Holma, "Performance evaluation of common radio resource management (CRRM)", en actas de *IEEE International Conference Communications*, Nueva York (Estados Unidos), 28 Abril - 2 Mayo 2002, vol. 5, pp. 3429-3433.
- [3] O. Yilmaz, A. Furuskär, J. Pettersson y A. Simonsson, "Access selection in WCDMA and WLAN multi-access networks", en actas de *IEEE 61st Vehicular Technology Conference (VTC'05)*, Estocolmo (Suecia), 30 Abril - 1 Mayo 2005, vol. 4, pp. 2220-2224.
- [4] R. Veronesi, "Multiuser scheduling with multi radio access selection", en actas de *2nd International Symposium on Wireless Communication Systems*, Siena, 5-7 Septiembre 2005, pp. 455-459.
- [5] J. Laiho, A. Wacker y T. Novosad, "Radio network planning and optimisation for UMTS", *Wiley*.
- [6] M. López Benítez, M. C. Lucas Estañ y J. Gozávez, "A dynamic radio simulation platform for the study of radio resource management techniques in heterogeneous wireless systems", en actas de *Poster and Demos/Tools session, The 9-th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2006)*, Torremolinos (Málaga), 2-6 octubre 2006, pp. 143-171.
- [7] J. Gozávez, M. López Benítez y O. Lázaro, "Link adaptation algorithm for improved wireless transmission of delay-sensitive packet data services", *Electronic Letters*, Julio 2005, pp. 813-815.
- [8] P. Barford y M. Crovella, "Generating representative web workloads for network and server performance evaluation", en actas de *1998 ACM SIGMETRICS Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (SIGMETRICS'98/PERFORMANCE'98)*, Madison (Estados Unidos), 24-26 Junio 1998, pp. 151-160.
- [9] J. Ho, Y. Zhu y S. Madhavapeddy, "Throughput and buffer analysis for GSM general packet radio service (GPRS)", en actas de *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99)*, Nueva Orleans (Estados Unidos), 21-24 Septiembre 1999, pp. 1427-1431.
- [10] O. Lázaro, D. Girma y J. Dunlop, "H.263 video traffic modelling for low bit rate wireless communications", en actas de *IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC'04)*, Barcelona, 5-8 Septiembre 2004, pp. 2124-2128.