

Gestión Coordinada de Sistemas de Comunicaciones Móviles Heterogéneos Multimedia

Javier Gozávez⁽¹⁾, M^a Carmen Lucas Estañ⁽¹⁾, Joaquín Sánchez Soriano⁽²⁾, David García Cutillas⁽³⁾

⁽¹⁾Uwicore - Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory

⁽²⁾Centro de Investigación Operativa

⁽³⁾Vodafone

Universidad Miguel Hernández

Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche

j.gozalvez@umh.es, www.uwicore.umh.es

Abstract — Los sistemas de comunicaciones móviles inalámbricos *Beyond 3G* estarán formados por varias tecnologías de acceso radio (RATs) con prestaciones y características técnicas distintas a la vez que complementarias. Para garantizar la interoperabilidad y la gestión eficiente de las distintas RATs, son necesarias técnicas de gestión coordinada de recursos radio (*Common Radio Resource Management, CRRM*) que exploten dicha diversidad. En este contexto, este trabajo propone y evalúa una política CRRM basada en técnicas de optimización de programación lineal que simultáneamente realiza la selección de RAT y la asignación del número de recursos radio de dicha RAT que garantizan las necesidades de calidad de servicio (QoS) del usuario.

I. INTRODUCCIÓN

Existe un amplio consenso en que los sistemas de comunicaciones *Beyond 3G* consistirán en distintas tecnologías de acceso radio móviles e inalámbricas coexistiendo físicamente. Gracias a la posibilidad de interoperación entre las distintas tecnologías, podrá realizarse un uso más eficiente del conjunto de recursos radio disponibles, asignando a cada usuario la RAT (selección de RAT) y el número de recursos (RRM intra-RAT) que mejor y más eficientemente satisfaga sus requisitos de calidad de servicio (QoS), a la vez que se obtiene el máximo beneficio global del sistema. Varios estudios abordan por separado los distintos aspectos que abarca la gestión CRRM, pero sólo recientemente se ha comenzado a realizar propuestas que abordan simultáneamente ambos dilemas. Por ejemplo, [1] propone un algoritmo CRRM basado en redes neuronales y lógica difusa que determina la RAT y la tasa de bits más adecuada considerando, entre otros aspectos, las restricciones de QoS del usuario. Aunque [1] determina la tasa de transmisión necesaria dentro de la RAT asignada, no aborda el problema de la asignación de recursos dentro de cada RAT. En este contexto, este trabajo propone y evalúa una política CRRM que simultáneamente asigna a cada usuario la combinación adecuada de RAT y número de recursos radio de dicha RAT que garantiza los requisitos de QoS del usuario según las condiciones actuales de carga del sistema.

II. FUNCIONES DE UTILIDAD

La técnica de selección de RAT y asignación de recursos radio propuesta basa su criterio de decisión en funciones de utilidad que expresan la QoS percibida por el usuario según el tipo de servicio solicitado y el número de recursos radio asignado de las RATs disponibles en el sistema. Siguiendo la metodología definida en [2], este trabajo considera las funciones de utilidad mostradas en la Fig.1 para los servicios de navegación web, correo electrónico y vídeo en tiempo real. La obtención de dichas funciones de utilidad se ha basado en el establecimiento previo de tres niveles de QoS y sus correspondientes valores de utilidad; [2] demostró la validez de estas funciones de utilidad para expresar la QoS percibida por el usuario. De la Fig. 1 conviene destacar que solamente han sido definidos valores de utilidad distintos de cero cuando el nivel de QoS asignado supera el nivel de QoS mínimo establecido para cada servicio.

Una vez definidas las funciones de utilidad, es necesario establecer la relación entre valores de utilidad y número de recursos radio dentro de cada RAT necesarios para alcanzar cada valor de utilidad. Para ello, a cada combinación recursos/RAT le ha sido asociada una tasa de transmisión. Para realizar esta asociación es importante tener en cuenta que todas las RATs emuladas implementan técnicas de adaptación al medio, con lo que las tasas de transmisión varían con la calidad del enlace radio. Por este motivo, a la hora de calcular la tasa de transmisión alcanzable con un número de recursos dado de una RAT se ha optado por considerar aquella tasa proporcionada por el modo de transporte (modulación y codificación) de la RAT bajo análisis que proporciona un balance entre prestaciones y fiabilidad. Este modo de transporte corresponde a CS2 para GPRS y a MCS5 para EDGE. En el caso de HSDPA, al existir distintos modos de transporte por cada número de códigos posible, ha sido escogido de nuevo el modo de transmisión que logra un balance entre prestaciones y fiabilidad. Una vez establecida la tasa de transmisión alcanzable para cada combinación recursos/RAT, la correspondencia con el valor de utilidad es obtenida a través de la Fig. 1. Para los servicios de vídeo en tiempo real es necesario un paso intermedio. Este paso consiste en calcular la tasa de transmisión necesaria para transmitir cada trama de vídeo antes del comienzo de la transmisión de la siguiente trama [2]. Una vez obtenida esta tasa de transmisión y con la metodología anteriormente explicada es posible obtener la relación entre utilidad y combinación recursos/RAT (la Tabla 1 muestra la

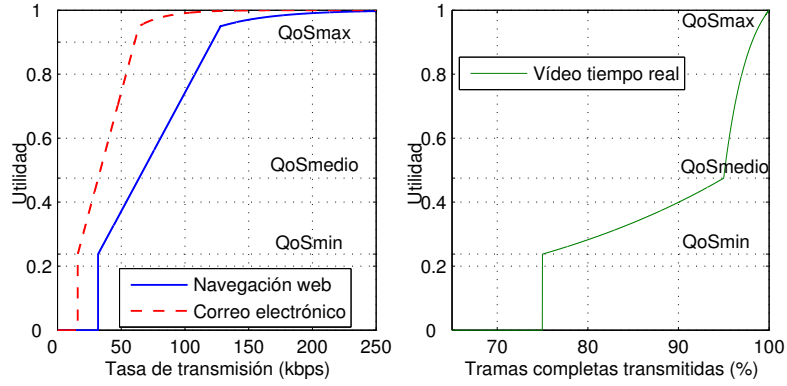


Fig. 1. Funciones de utilidad por tipo de servicio.

TABLA I. VALORES DE UTILIDAD PARA EL SERVICIO DE VÍDEO A 64KBPS

Recursos/ RAT	Tasa datos (kbps)	Utilidad	Recursos/ RAT	Tasa datos (kbps)	Utilidad	Recursos / RAT	Tasa datos (kbps)	Utilidad
1G	13.4	0.0000	4E	89.6	0.2983	3H	741	1.0000
1E	22.4	0.0000	7G	93.8	0.3127	4H	1139.5	1.0000
2G	26.8	0.0000	8G	107.2	0.3532	5H	2332	1.0000
3G	40.2	0.0000	5E	112	0.3654	7H	4859.5	1.0000
2E	44.8	0.0000	1H	116.5	0.3775	8H	5709	1.0000
4G	53.6	0.0000	6E	134.4	0.4350	10H	7205.5	1.0000
5G	67	0.0000	7E	156.8	0.9338	12H	8618.5	1.0000
3E	67.2	0.0000	8E	179.2	0.9819	15H	11685	1.0000
6G	80.4	0.0000	2H	396	1.0000			

relación entre los valores de utilidad y las combinaciones recursos/RAT disponibles para el servicio de vídeo en tiempo real a 64kbps). Las combinaciones recursos/RAT han sido denotadas como xY , correspondiendo a x recursos radio de la RAT Y (GPRS está representado por G , EDGE por E y HSDPA por H). Es importante destacar que ciertas combinaciones recursos/RAT no consiguen alcanzar un valor de utilidad mayor que cero, y que para otras determinadas combinaciones, el valor de utilidad experimentado no aumenta después de alcanzar ciertas tasas de transmisión.

III. ALGORITMOS DE GESTIÓN COORDINADA DE RECURSOS RADIO

Este trabajo está centrado en la definición de políticas CRRM que logren maximizar la eficiencia del canal a la vez que garantizar niveles adecuados de QoS al usuario. La política propuesta aborda de manera simultánea el dilema de la selección de RAT y de la asignación del número de recursos adecuado dentro de la RAT seleccionada, utilizando las funciones de utilidad previamente definidas y herramientas de optimización de programación lineal para tomar su decisión.

A. Función CRRM objetivo

El objetivo de la técnica CRRM propuesta es proporcionar valores de utilidad homogéneos, y los más altos posibles, a los usuarios de todos los servicios aprovechando la flexibilidad ofrecida por el hecho de que varias combinaciones de recursos/RAT alcanzan niveles de satisfacción similares (representados por valores de utilidad). En este contexto, la función CRRM objetivo puede denotarse del siguiente modo:

$$\max\{\min u_j\}, j \in [0, N-1] \quad \text{con} \quad u_j = \sum_r \sum_s u_j^r(s^r) \cdot y_j^{r,s} \quad (1)$$

donde u_j representa el valor de utilidad asignado al usuario j en una ronda de distribución de recursos en la que participan N usuarios. En la expresión de u_j , $u_j^r(s^r)$ representa el valor de utilidad alcanzado por el usuario j cuando le son asignados s recursos radio (códigos o *timeslots*) de la RAT r (r es igual a G, E o H), y $s \in [1, c_r]$ siendo c_r el número máximo de recursos radio disponibles en cada RAT. $y_j^{r,s}$ es una variable binaria que toma el valor uno si le han sido asignados s recursos de la RAT r al usuario j , e igual a cero en caso contrario. Dado que en este trabajo no ha sido considerada la posibilidad de que un mismo usuario pueda recibir recursos de más de una RAT simultáneamente, sólo una variable $y_j^{r,s}$ puede tomar el valor uno para cada usuario. De este modo, la técnica CRRM propuesta debe decidir los valores de las variables $y_j^{r,s}$ para cada usuario, considerando tan solo las variables $y_j^{r,s}$ que proporcionan valores de utilidad mayores que cero.

Con el fin de aplicar técnicas de programación lineal para resolver nuestro problema, la función objetivo a maximizar debe ser expresada de manera lineal. Para ello ha sido definida una nueva variable z que tomará el menor valor de utilidad asignado a los usuarios. Con esta nueva variable, la función objetivo puede expresarse como ‘ $\max z$ ’ sujeto a la condición $z \leq u_j$ para todo $j \in [0, N-1]$. Con este planteamiento, a las variables incógnita binarias $y_j^{r,s}$ se incorpora la variable real z , cuyo valor está restringido al intervalo $[0,1]$, intervalo de valores que puede tomar la función de utilidad.

B. Restricciones CRRM

Para completar el planteamiento del problema deben ser incorporadas una serie de restricciones impuestas por los servicios y por el propio sistema. En situaciones en las que no se dispone de recursos suficientes en las distintas RATs para satisfacer a todos los usuarios ni siquiera en su demanda mínima, la solución al planteamiento anterior puede quedar indeterminada. Con el fin de identificar estas situaciones, ha sido impuesta la condición de que todos los usuarios deben obtener una variable $y_j^{r,s}$ distinta de cero. De este modo, en caso de no poder satisfacer esta condición por no disponibilidad de recursos suficientes, el problema podrá ser identificado como no factible, permitiendo la reducción del número de usuarios participantes en el reparto hasta satisfacer las restricciones:

$$\sum_r \sum_s y_j^{r,s} = 1, \forall j \quad y \quad \sum_j \sum_{s^r} s^r \cdot y_j^{r,s} \leq c_r, \forall r \quad (2)$$

La técnica CRRM será aplicada siempre que un usuario solicite recursos para una nueva transmisión o una determinada transmisión finalice. En este caso, solamente los usuarios activos de los servicios de vídeo en tiempo real que hubieran obtenido recursos en la ronda de distribución anterior mantendrán aquellos recursos correspondientes al nivel de QoS mínimo y competirán con el resto de usuarios por recursos adicionales, lo cual puede ser expresado como:

$$\sum_r \sum_{s^r} E_{s^r} \cdot y_j^{r,s} \geq E_{\min}, \forall j_{h263} \quad (3)$$

donde E_{s^r} representa el índice de la combinación recursos/RAT en la tabla de utilidades (índice 1 para 1G, 2 para 1E, etc.) correspondiente a la asignación de s recursos radio de la RAT r . De manera similar, E_{\min} representa el índice de la combinación recursos/RAT que alcanza el nivel mínimo de QoS.

Si debido a la escasez de recursos no es posible alcanzar los mismos valores de utilidad para todos los usuarios, éstos serán servidos según las siguientes prioridades: vídeo en tiempo real H.263 (de mayor a menor tasa de transmisión) con mayor prioridad, navegación web y correo electrónico con menor prioridad. Si el usuario con menor prioridad (m) corresponde a un usuario de vídeo que obtuvo recursos en el reparto anterior, la condición establecida en (3) se impondrá a la condición de prioridades y el usuario recibirá los s_{\min} recursos radio de la RAT r_{\min} necesarios para alcanzar su nivel de QoS mínimo establecido por E_{\min} . Una vez alcanzado dicho nivel de QoS, el usuario de menor prioridad no recibirá recursos adicionales hasta que el usuario de mayor prioridad (k) supere su nivel de utilidad ($u_m^{r_{\min}(s_{\min})}$). Esta condición puede resumirse como:

$$\sum_{r_a} \sum_{s_a} u_m^{r_{\min}(s_{\min})} \cdot y_k^{r_a, s_a} + \sum_{r_b} \sum_{s_b} u_k^r(s^r) \cdot y_k^{r, s} \geq \sum_r \sum_s u_m^r(s^r) \cdot y_m^{r, s} \quad (4)$$

Esta condición sólo será aplicada cuando la prioridad del usuario k sea mayor que la del usuario m , donde (r_a, s_a) representa las asignaciones recursos/RAT que verifican $u_m^{r_{\min}(s_{\min})} - u_k^r(s_a) > 0$ y (r_b, s_b) las que verifican $u_m^{r_{\min}(s_{\min})} - u_k^r(s_b) \leq 0$. Según (4), en los casos en los que no sea posible satisfacer (2) y por tanto el problema sea no factible, los usuarios con menor prioridad serán eliminados del reparto CRRM hasta que el problema tenga una solución factible.

C. Técnicas de programación lineal

Las herramientas de programación lineal representan una solución muy atractiva en problemas de optimización que buscan la solución más adecuada según una función objetivo previamente establecida. En este contexto, este trabajo propone su uso para abordar el problema de gestión CRRM en sistemas heterogéneos de comunicaciones móviles inalámbricas. Este trabajo ha expresado el problema de gestión CRRM mediante una serie de ecuaciones lineales con variables reales y binarias. En investigación operativa, este tipo de problemas son denominados problemas de Programación Entera Mixta (PEM) [3], para los cuales se proponen distintas técnicas de resolución. Los métodos más populares gracias a su rendimiento y sus propiedades computacionales y los utilizados en este trabajo son el método ‘Ramificación y Acotamiento’ (*Branch and Bound*) y el método simplex [3]. Para la resolución de los problemas de PEM ha sido utilizado el *software* de optimización ILOG CPLEX [4], ampliamente utilizado por las empresas para mejorar su eficiencia en el proceso de toma de decisiones.

IV. RENDIMIENTO DE LA TÉCNICA CRRM

El rendimiento de la técnica CRRM propuesta ha sido analizado en una plataforma que considera un sistema compuesto por las RATs GPRS, EDGE y HSDPA. Han sido emuladas transmisiones de vídeo en tiempo real, correo electrónico y navegación web, representando cada servicio la tercera parte de la carga total en términos de usuarios. Dentro de la carga de

vídeo H.263 del sistema, los usuarios son distribuidos de manera equitativa entre las tasas de transmisión de vídeo seleccionadas de entre todas las emuladas en el sistema: 16, 64, 128, 256 y 512kbps. Solamente ha sido considerada una única celda con la misma cobertura para GPRS, EDGE y HSDPA.

La política CRRM propuesta ha sido evaluada en dos escenarios de tráfico multimedia distintos. En el primero de ellos (E1) los servicios demandados son los servicios de navegación web, correo electrónico y vídeo H.263 en tiempo real a 16, 64 y 128kbps, mientras que en el segundo escenario (E2), los servicios en tiempo real ofrecidos presentan demandas de QoS más exigentes en términos de recursos correspondiendo a los servicios de vídeo a 64, 256 y 512kbps. En ambos escenarios, han sido simuladas cargas de 20 y 30 usuarios por celda siguiendo las distribuciones de tráfico descritas. La Fig. 2 muestra el porcentaje de usuarios que alcanzan los niveles de QoS mínimo, medio y máximo para cada tipo de servicio. Antes de analizar los resultados mostrados en la figura, es importante notar que niveles de QoS máximos no pueden ser alcanzados por todos los tipos de servicios debido al limitado número de recursos disponibles por RAT. La Fig. 2 muestra por tanto, que en situaciones de escasez de recursos, como son las emuladas, los resultados satisfacen el criterio de prioridades establecido. Además, la Fig. 2 muestra como la mayoría de los servicios alcanzan su nivel de QoS mínimo, y sólo cuando este nivel mínimo es garantizado para el máximo número de usuarios posible, los usuarios de mayor prioridad reciben recursos adicionales. Con respecto a esta afirmación, es posible observar en los resultados mostrados en la Fig. 2, como determinados usuarios no logran alcanzar un determinado nivel de QoS, por ejemplo el nivel de QoS medio, mientras que usuarios más prioritarios alcanzan un nivel de QoS mayor, por ejemplo el nivel de QoS máximo, pareciendo que no ha sido logrado el objetivo buscado de homogeneidad. Si los recursos que hacen que los usuarios más prioritarios alcancen el nivel de QoS máximo fueran asignados a los usuarios menos prioritarios para intentar que logren el nivel de QoS medio, los usuarios menos prioritarios alcanzarían un valor de utilidad mayor que el conseguido por los más prioritarios, incumpliendo de este modo el criterio de prioridades entre servicios establecido. Por tanto, la asignación de recursos realizada es el reparto más homogéneo que cumple las condiciones impuestas por el sistema.

Para evaluar la capacidad de adaptación de la técnica CRRM propuesta a las condiciones de carga del sistema y a las exigencias de QoS de los servicios presentes en el sistema, es necesario analizar la distribución de las combinaciones recursos/RAT realizadas en los distintos escenarios. A continuación ha sido realizado este análisis para el servicio de vídeo a 64 kbps en particular. En una situación de demanda de recursos no muy elevada como es el escenario E1 con 20 usuarios por celda, los usuarios de vídeo a 64 kbps reciben combinaciones recursos/RAT que le proporcionan valores de utilidad muy por encima de su nivel de QoS mínimo (1H, 7E y 2H asignadas en un 1.3, 1.6 y 95.4% de las transmisiones respectivamente). Al aumentar los requisitos de QoS de los servicios presentes en el sistema o la carga de usuarios, y por tanto la demanda de recursos, las asignaciones son más ajustadas a los requisitos mínimos y medios con el fin de satisfacer a un mayor porcentaje de usuarios; así, las combinaciones recursos/RAT recibidas en E2 con 20 usuarios son 1H, 7E y 2H en el 18.6, 14.4 y 62.6% de las transmisiones respectivamente, mientras que en E2 con 30 usuarios por celda, 1H y 2H son asignados el 38.2 y 43.3% de las transmisiones, llegando incluso a recibir en el 2.5% de las transmisiones la combinación 4E correspondiente a su nivel de QoS mínimo. Del análisis realizado se desprende que la técnica CRRM propuesta busca satisfacer un mayor porcentaje de usuarios con el mayor nivel de QoS posible, adaptando las asignaciones de recursos de manera dinámica a las condiciones actuales del sistema.

Por otro lado, los resultados de las simulaciones han mostrado que al aplicar la técnica CRRM propuesta, varios recursos quedan sin asignar en un número considerable de repartos, por ejemplo, en los escenarios E1 y E2 con 30 usuarios por celda, en el 32.2 y 44.6% de las rondas de distribución no son asignados todos los recursos. Esto es debido a que en situaciones en

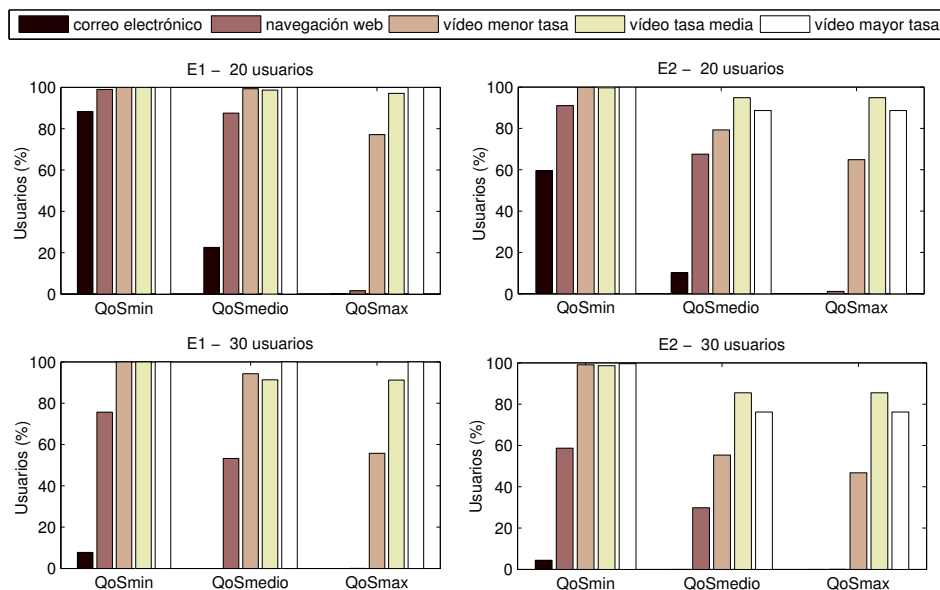


Fig. 2. Asignación de utilidad por clase de servicio.

las que no se dispone de recursos radio suficientes para servir a todos los usuarios presentes en el sistema, la técnica propuesta tiene que eliminar a los usuarios de menor prioridad del proceso de distribución. En estas situaciones puede ocurrir que el último de los usuarios eliminados tuviera una demanda de recursos mayor que el resto de usuarios previamente eliminados, pudiendo ser éste el único causante de que el problema no tuviera solución inicialmente. Este hecho, sumado a que no es posible asignar recursos de distintas RATs a un mismo usuario, resulta en el porcentaje mencionado de recursos sin asignar. Para intentar hacer un uso más eficiente de los recursos, ha sido implementada una modificación de la técnica CRRM propuesta. Esta modificación, después de completar el procedimiento de la técnica CRRM original, realiza de manera iterativa el mismo procedimiento de distribución de recursos pero sólo sobre los recursos radio que hayan quedado sin asignar en el sistema y los usuarios descartados en el procedimiento de reparto anterior. La Tabla 2 compara los resultados obtenidos con la técnica CRRM original y la modificación para los escenarios E1 y E2 con 30 usuarios por celda. Estos resultados muestran como con la técnica CRRM modificada, los servicios más prioritarios mantienen los niveles de utilidad alcanzados con la técnica original, mientras que los servicios de navegación web y correo electrónico experimentan una mejora en su nivel de utilidad recibido. Además, la técnica CRRM modificada consigue que tan solo en el 9.9 y el 0.64% de las rondas de distribución queden recursos sin asignar en el sistema para los escenarios mostrados en la Tabla 2.

TABLA II. PORCENTAJE DE USUARIOS QUE ALCANZAN LOS NIVELES DE QoS MÍNIMO, MEDIO Y MÁXIMO EN E1 Y E2 CON 30 USUARIOS POR CELDA

	Nivel de utilidad	Técnica CRRM			Técnica CRRM modificada		
		QoS min	QoS medio	QoS max	QoS min	QoS medio	QoS max
E1 30 usuarios	Correo electrónico	7.74	0.0	0.0	9.70	0.08	0.08
	Navegación web	75.69	53.28	0.005	76.77	54.35	0.02
	Vídeo 16kbps	100	94.25	55.73	100	94.25	55.73
	Vídeo 64kbps	99.99	91.34	91.19	99.99	91.34	91.19
	Vídeo 128kbps	100	100	100	100	100	100
E2 30 usuarios	Correo electrónico	4.39	0.0	0.0	8.07	0.07	0.07
	Navegación web	58.66	29.86	0.003	63.64	33.17	0.01
	Vídeo 64kbps	99.04	55.36	46.78	99.88	55.43	46.85
	Vídeo 256kbps	98.62	85.51	85.51	98.69	85.40	85.40
	Vídeo 512kbps	99.60	76.15	76.15	99.60	75.98	75.98

V. CONCLUSIONES

Las redes de comunicaciones móviles heterogéneas *Beyond 3G* requieren la definición de políticas CRRM que gestionen eficientemente las distintas RATs disponibles y sus correspondientes recursos radio. Este trabajo ha propuesto y evaluado una nueva técnica CRRM basada en herramientas de optimización de programación lineal que determina de manera simultánea la combinación RAT y número de recursos más apropiada para cada usuario, aprovechando los diferentes niveles de QoS requeridos por diferentes servicios en un entorno multimedia. Los resultados obtenidos muestran que la técnica propuesta obtiene un buen rendimiento y cumple de manera adecuada con las prioridades entre servicios. Un aspecto importante del esquema CRRM propuesto es que adapta las asignaciones de recursos de forma dinámica según la carga del sistema y de las demandas de QoS de los distintos servicios.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y fondos FEDER a través de los proyectos TEC2005-08211-C02-02 y MTM2005-09184-C02-02 y por el Ministerio de Fomento a través del proyecto T39/2006.

REFERENCIAS

- [1] L. Giupponi, et al., "A novel approach for joint radio resource management based on fuzzy neural methodology", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Marzo 2008.
- [2] M. C. Lucas-Estañ, J. Gozávez, J. Sánchez-Soriano, "Multi-channel radio resource distribution policies in heterogeneous traffic scenarios", en Proc. 66th IEEE VTC2007-Fall, pp. 1674-1678.
- [3] F. S. Hillier, G. J. Lieberman, *Introduction to operations research*, 7th edition, McGraw-Hill, 2001
- [4] ILOG CPLEX. Online: <http://www.ilog.es/products/cplex/>