

ALGORITMOS DE LINK ADAPTATION PARA LA TRANSMISIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL EN REDES DE COMUNICACIONES MÓVILES

Miguel López-Benítez
Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Miguel Hernández
miguel.lopez02@alu.umh.es

Javier Gozávez
Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Miguel Hernández
j.gozalvez@umh.es

Oscar Lázaro
Asociación Innovalia
olazaro@innovalia.org

Abstract – The design criteria of Link Adaptation algorithms has mainly concentrated on improving throughput performance. This design strategy can be appropriate for best-effort services, but its application to real-time services, with important constraints in terms of transmission delay and error rate, has been questioned. In this context, this paper presents and evaluates a new Link Adaptation algorithm designed to handle real-time transmissions. Its transport mode selection criteria is based on the throughput and transmission delay. Two variants of this initial algorithm, designed to further enhance the transmission delay or error rate performance, are also evaluated.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de los servicios de voz en los sistemas de comunicaciones móviles y la reciente incorporación de servicios multimedia están creando nuevos retos para los operadores móviles, obligándoles a implementar técnicas que permitan un aprovechamiento, cada vez más eficiente, de los escasos recursos radioeléctricos. Éste es el objetivo que persiguen las denominadas técnicas de gestión de recursos radio, entre las cuales se encuentra *Link Adaptation* (LA).

La base de LA consiste en evaluar de forma periódica la calidad del enlace radio y seleccionar, de entre un conjunto preestablecido, el modo de transporte que, bajo dichas condiciones, resulta óptimo de acuerdo a un criterio predefinido. Uno de los criterios más utilizados consiste en elegir el modo de transporte que proporciona la mayor cantidad de bits correctamente transmitidos por unidad de tiempo (*throughput*) [1]. Si bien este criterio puede resultar satisfactorio para servicios con escasos requisitos en términos de calidad de servicio (*best-effort*), su aplicación a servicios en tiempo real, con importantes exigencias de retardo y tasa de errores, resulta cuestionable, por lo que se han propuesto alternativas diferentes. En [2] se propone un algoritmo que pretende reducir el retardo de transmisión seleccionando el modo de transporte óptimo en función del tamaño del paquete a transmitir, factor que influye sobre dicho retardo. En [3] se presenta un algoritmo LA orientado a la consecución de una tasa de errores determinada. En [4] se describe otra aproximación distinta a la propuesta en [3] capaz de aproximarse con mayor fidelidad a la tasa de errores deseada.

El presente trabajo propone y evalúa un nuevo algoritmo LA cuyo criterio de selección del codificador óptimo considera de forma conjunta tanto el *throughput* como el retardo de transmisión, así como dos variantes diseñadas para mejorar, respectivamente, el retardo y la tasa de errores. El rendimiento de los algoritmos propuestos será evaluado considerando la transmisión de video H.263 en tiempo real.

II. ENTORNO DE SIMULACIÓN

A. General Packet Radio Service (GPRS)

El presente trabajo se basa en la interfaz radio del estándar GPRS, el cual contempla cuatro esquemas de codificación (CS), o modos de transporte, distintos (ver Tabla 1). Cada uno de ellos ofrece un grado de compromiso distinto entre tasa binaria de transmisión (bits de datos) y robustez ante errores (bits de redundancia). Por ello, el sistema GPRS ofrece la posibilidad de aplicar LA.

Esquema de codificación	Factor del código	Bits de datos (Carga útil)	Tasa binaria (kbps)
CS1	1/2	181	9.05
CS2	$\approx 2/3$	268	13.4
CS3	$\approx 3/4$	312	15.6
CS4	1	428	21.4

Tabla 1.- Parámetros de los esquemas de codificación de GPRS.

Esta investigación se centra en el caso en que se asigna un único *time-slot* a cada usuario. Las velocidades binarias alcanzables empleando un único *time-slot* por usuario podrían hacer cuestionable la transmisión de vídeo sobre GPRS. Sin embargo, cabe señalar al respecto, en primer lugar, que el objetivo del presente trabajo no es demostrar la viabilidad de la transmisión de vídeo sobre GPRS, sino evaluar de forma comparativa los algoritmos considerados, fin para el que GPRS resulta adecuado. Por otra parte, el funcionamiento de LA se basa en la calidad experimentada en el enlace radio. Para la correcta evaluación del rendimiento de LA resulta esencial el uso de interfaces avanzadas entre las simulaciones a nivel de enlace y a nivel de sistema que capturen con precisión la variabilidad de la calidad del enlace radio [5]. La disponibilidad de dichas interfaces para transmisiones *multislot* sería deseable para el estudio aquí realizado [6], pero dada su indisponibilidad, el presente trabajo se ha centrado en el caso de transmisiones *singleslot*, para el que dichas interfaces sí se hallan disponibles. Nuevamente, un escenario *singleslot* resulta suficiente para los objetivos de este trabajo.

B. Herramienta de simulación

Para este estudio se ha empleado un simulador de eventos discretos que funciona a nivel de ráfaga (*burst*), lo cual permite el modelado de las variaciones repentinas de la calidad del enlace radio, obteniendo así resultados precisos. El sistema modelado consiste en una red macrocelular en la que se estudia el enlace descendente. Las solicitudes de asignación de canal se satisfacen en el orden en que surgen y se resuelven eligiendo de forma aleatoria un canal disponible. Cada

usuario mantiene dicho canal hasta que recibe correctamente toda la información transmitida. Se ha implementado la movilidad de los usuarios dentro de cada sector, pero no se han implementado mecanismos de *handover*. Tampoco se han usado técnicas de control de potencia ni salto en frecuencia por su influencia sobre el funcionamiento de LA. La Tabla 2 resume los principales parámetros de la simulación. En [5] puede encontrarse una descripción detallada del simulador.

Parámetro	Valor
Tamaño de clúster	4 celdas
Radio de cada celda	1 km
Sectorización	120°
Interferencia modelada	1ª y 2ª corona cocanal
Número de celdas cocanales	25
Time-slots por sector	16
Usuarios por sector	12
Tipo de tráfico	H.263: 6 usuarios / sector WWW: 3 usuarios / sector E-mail: 3 usuarios / sector
Modelo de propagación	Okumura-Hata
Modelo de shadowing	Distribución log-normal Desviación estándar 6 dB Distancia de decorrelación 20m
Velocidad terminal móvil	50 km/h
Protocolo ARQ	Sólo para WWW e e-mail. Sin pérdidas ni errores en las confirmaciones
Tamaño de ventana ARQ	64 bloques RLC
Periodo de solicitud ARQ	16 bloques RLC

Tabla 2.- Parámetros del simulador.

C. Interfaces empleadas entre las simulaciones a nivel de enlace y las simulaciones a nivel de sistema

Las simulaciones de los sistemas de comunicaciones móviles suelen desglosarse en dos niveles con diferente grado de resolución temporal: nivel de enlace y nivel de sistema. A nivel de enlace se modela el enlace radio bit a bit, mientras que a nivel de sistema se modela la red de comunicaciones móviles. La interacción entre ambos niveles tiene lugar mediante el empleo de unas interfaces. Los resultados de una transmisión a nivel de enlace se representan de forma simplificada mediante un conjunto de tablas que reciben el nombre de *Look-Up Tables* (LUTs). Las interfaces empleadas en este trabajo [5] constan de dos tipos de LUTs: LUT-1 y LUT-2. Cada LUT-1 representa una CDF (función de distribución acumulativa) del BER (proporción de bits erróneos) para un valor concreto de CIR (relación señal a interferencia). A partir de la LUT-1 correspondiente al valor de CIR que experimenta una ráfaga durante su transmisión en el nivel de sistema, y haciendo uso de un proceso aleatorio, se extrae de la CDF un valor de BER para dicha ráfaga. El interés de este procedimiento radica en la posibilidad de modelar los efectos del desvanecimiento rápido sobre el BER e incluirlos así dentro de las simulaciones a nivel de sistema. Repitiendo este proceso con las cuatro ráfagas necesarias para transmitir un bloque RLC se obtienen cuatro valores de BER a partir de los cuales se calcula el valor medio y la desviación estándar del BER. Haciendo uso de la LUT-2 asociada al CS correspondiente se obtiene, a partir de estos dos valores, un determinado valor de BLER (proporción de bloques RLC erróneos), que se emplea en la simulación a nivel de sistema para determinar si un bloque RLC ha sido recibido con error o no.

D. Modelos de tráfico

Este trabajo se centra en la transmisión de datos en tiempo real, para lo cual se optó por un modelo de tráfico de vídeo H.263 con una tasa binaria media de 16kbps. No obstante, las simulaciones realizadas incluyen dos tipos más de tráfico: navegación web y correo electrónico.

Las fuentes de tráfico web y correo electrónico se implementan mediante un modelo intermitente (ON/OFF) [5] en el que se alternan periodos de actividad (transmisión de información) y periodos de inactividad. Para ambos modelos de tráfico, la transmisión de un nuevo paquete comienza sólo cuando toda la información del paquete previo se ha transmitido sin errores. El tiempo de actividad de estas fuentes dependerá, por lo tanto, de la calidad del enlace radio.

El modelo de tráfico de vídeo [7] contempla los tres tipos diferentes de tramas de vídeo H.263: I, P y PB. Dicho modelo captura de forma precisa las propiedades estadísticas del tráfico H.263 (tamaño y duración de las tramas de vídeo, correlación entre tamaño y duración, y frecuencia de transición entre los diversos tipos de tramas de vídeo). El modelado se implementa en dos niveles. El primero de ellos determina el tipo de trama a generar. Las tramas I se generan a intervalos de tiempo regulares, mientras que la generación de tramas P y PB se determina a partir de una cadena de Markov. Una vez establecido el tipo de trama de vídeo, el segundo nivel de modelado determina su tamaño y su duración.

III. ALGORITMOS LINK ADAPTATION

A. Algoritmo LA basado en throughput (AT)

Este algoritmo, propuesto en [1] y habitualmente utilizado en estudios que involucran el uso de LA, tiene como objetivo la maximización del *throughput* global del sistema. Por lo tanto, en cada nueva decisión acerca del CS que conviene emplear en función de la calidad del enlace radio, el algoritmo considerará óptimo aquel CS que proporcione el mayor *throughput*, definido según la expresión

$$\text{Throughput}_{CS_i} = R_{CS_i} \cdot (1 - \text{BLER}_{CS_i}) \quad (1)$$

donde R_{CS_i} y BLER_{CS_i} representan, respectivamente, la tasa binaria y el BLER para el codificador CS_i considerado.

B. Algoritmo LA basado en throughput y retardo (ATR)

En el criterio de decisión de este algoritmo interviene no sólo el *throughput* sino también el retardo, parámetro de vital importancia para servicios en tiempo real, que queda reflejado en el concepto de *retardo de trama*, definido como sigue. Sea una trama, de vídeo en el caso que nos ocupa, generada en el instante t_0 con un tamaño T y una duración D , de tal forma que la siguiente trama de vídeo se genera en $t_0 + D$. El instante en que finaliza la transmisión de la trama generada en t_0 puede expresarse como $t_0 + D + \mathbf{d}$, donde \mathbf{d} representa el retardo de trama anteriormente citado. Observar que el valor de \mathbf{d} repercute directamente sobre la calidad de servicio del tráfico de datos en tiempo real: si $\mathbf{d} < 0$ la trama habrá sido transmitida antes de que se genere la siguiente, mientras que si $\mathbf{d} > 0$ la transmisión de la trama de vídeo generada en t_0 no ha finalizado cuando se genera la siguiente trama, con la consecuente degradación de la calidad percibida por el usuario (retardo o pérdida de datos).

El empleo de ARQ puede acarrear un retardo inaceptable para servicios en tiempo real, por lo que no se considerará aquí su uso. Bajo esta condición, el retardo de trama \mathbf{d} depende, no del *throughput* experimentado durante su transmisión, sino de la tasa binaria R_{CSi} de los CS empleados. Para un determinado CS, el retardo de trama \mathbf{d}_{CSi} vendrá dado por

$$\mathbf{d}_{CSi} = \frac{T}{R_{CSi}} - D \quad (2)$$

donde se aprecia que una reducción del retardo de trama requiere el empleo de CS con menor protección ante errores.

El objetivo del presente algoritmo consiste en maximizar el *throughput* al mismo tiempo que se minimiza el retardo de trama \mathbf{d} . Esto último implica maximizar $1/|\mathbf{d}|$ cuando $\mathbf{d} > 0$ y maximizar $|\mathbf{d}|$ cuando $\mathbf{d} < 0$. Por lo tanto, el presente algoritmo considerará óptimo aquel CS que maximice el valor de la expresión (3a) cuando $\mathbf{d}_{CSi} > 0$ o que maximice el valor de la expresión (3b) cuando $\mathbf{d}_{CSi} < 0$.

$$\frac{\text{Throughput}_{CSi}}{\mathbf{d}_{CSi}} = \frac{\text{Throughput}_{CSi} \cdot R_{CSi}}{T - D \cdot R_{CSi}} \quad (3a)$$

$$\text{Throughput}_{CSi} \cdot |\mathbf{d}_{CSi}| = \text{Throughput}_{CSi} \cdot \left(D - \frac{T}{R_{CSi}} \right) \quad (3b)$$

Cada vez que se genere una nueva trama de vídeo, el algoritmo calcula, para cada CS, el retardo de trama según la expresión (2). Para aquellos CS con $\mathbf{d}_{CSi} > 0$ se evaluará la expresión (3a), mientras que para aquellos CS con $\mathbf{d}_{CSi} < 0$ se evaluará la expresión (3b). El algoritmo considerará óptimo aquel CS que proporcione el valor más elevado resultante de dicha evaluación, ya que ese será el CS capaz de proporcionar el mayor *throughput* y el menor retardo \mathbf{d} de forma simultánea. Una propiedad interesante del algoritmo es que en las tramas con mayor tamaño y/o menor duración se fomenta un mayor grado de utilización de los CS con mayor tasa binaria, hecho que favorece la reducción del retardo a expensas de un mayor riesgo de sufrir errores de transmisión.

C. Variante para mejorar el retardo (ATR-VR)

El objetivo de esta variante del algoritmo propuesto consiste en mejorar las estadísticas de retardo, transmitiendo una mayor cantidad de tramas a tiempo ($\mathbf{d} \neq 0$). Para ello sólo se permite el uso de aquellos CS cuya tasa binaria garantice una transmisión a tiempo de las tramas. Para una trama de tamaño T y duración D , la mínima tasa binaria R_t requerida para ser transmitida con $\mathbf{d} \neq 0$ es igual a $R_t = T/D$. El uso de aquellos CS cuya tasa binaria sea inferior a R_t quedará prohibido durante la transmisión de toda la trama. Si al aplicar el criterio de decisión del algoritmo ATR, la tasa binaria del CS seleccionado es mayor o igual a R_t , se utilizará dicho CS, pero si es menor, entonces se empleará en su lugar aquel CS con la mínima tasa binaria que sea igual o mayor que R_t . Si R_t es superior a la máxima tasa binaria disponible, entonces sólo se permitirá el uso del CS de mayor tasa binaria.

D. Variante para mejorar la tasa de errores (ATR-VE)

El objetivo de esta variante consiste en mejorar la calidad de las tramas transmitidas a tiempo ($\mathbf{d} \neq 0$) prolongando el tiempo de transmisión de dichas tramas hasta que \mathbf{d} sea lo más próximo a cero posible. Esta prolongación requiere un mayor grado de utilización de los CS con menor tasa binaria y, por tanto, con mayor protección ante errores, lo cual ha de redundar en una mejor calidad para las tramas transmitidas a

tiempo. Esta variante también emplea el criterio de decisión del algoritmo ATR. Si al aplicar dicho criterio, la tasa binaria del CS seleccionado es menor o igual a R_t , se utilizará dicho CS, pero si es mayor, se utilizará aquel CS cuya tasa binaria corresponda al valor mínimo de entre todas las tasas disponibles mayores que R_t (en este último caso, el CS definitivo podrá coincidir o no con el seleccionado por el criterio del algoritmo ATR). Observar que para una trama dada, la máxima tasa de transmisión permitida siempre será la mínima imprescindible para que dicha trama pueda transmitirse a tiempo.

IV. RENDIMIENTO DE LOS ALGORITMOS

Según se aprecia en la Tabla 3, el algoritmo ATR ofrece un *throughput* medio superior al del propio algoritmo AT. La mejora relativa es del 2.3%, y resulta especialmente significativa en aquellos casos más restrictivos: 8.3% y 7.4% para el *throughput* mínimo observado en el 95% y 99% de las muestras, respectivamente (ver Fig. 1). Las diferencias entre ATR-VR y AT son aun mayores: 6.4% para el valor medio, y 25.9% y 54.1% para el 95% y 99% de las muestras. Este hecho se debe no sólo al mayor porcentaje de utilización de los CS con mayor tasa binaria sino también a que el porcentaje de ocasiones en que la elección de dichos CS resulta ser óptima también es mayor (ver Tabla 4). Para ATR-VR se observa la mayor diferencia respecto a AT: el uso de CS-1 y CS-2 es casi nulo y el uso del CS óptimo es un 20% mayor.

Según muestra la Tabla 3, las prestaciones de retardo del algoritmo AT también son superadas por los algoritmos ATR y ATR-VR, los cuales reducen respectivamente un 4.3% y un 12.7% el valor medio del retardo normalizado, definido como el cociente entre tiempo requerido para transmitir un bloque de datos y tamaño de dicho bloque. La reducción respecto a AT del retardo normalizado máximo observado en el 95% de las muestras es del 18.8% para ATR y del 32.6% para ATR-VR. Llega a apreciarse una mejora de ATR-VR respecto a AT del 41.8% en el 99% de las muestras. Esta importante reducción del retardo normalizado se debe al mayor porcentaje de utilización de aquellos CS con mayor tasa binaria. En consecuencia, y según muestra la Tabla 5, ATR y ATR-VR transmiten, respectivamente, un 4.8% y 13.5% más de tramas sin retardo ($\mathbf{d} \neq 0$) que el algoritmo AT. Además, los algoritmos ATR y ATR-VR aumentan el tiempo mínimo sobrante en tramas de vídeo transmitidas a tiempo en un 9.1% y hasta en un 54.5%, respectivamente, en el 99% de las muestras.

Como contrapartida, el mayor porcentaje de uso de aquellos CS con menor protección ante errores origina un incremento del BLER en las tramas de vídeo recibidas con los algoritmos ATR y ATR-VR en comparación con AT, según muestra la Tabla 3. A pesar de ello, la Tabla 5 pone de manifiesto que los algoritmos ATR y ATR-VR consiguen transmitir un mayor porcentaje de tramas de vídeo sin retardo y con un BLER inferior al 5%, valor umbral por debajo del cual la degradación de la calidad de la imagen de vídeo H.263 resulta imperceptible por el ojo humano [8].

En la Tabla 3 se aprecia que el algoritmo ATR-VE consigue reducir un 4.85% el BLER ofrecido por el algoritmo AT y un 5.87% el ofrecido por el algoritmo ATR, proporcionando un valor próximo al 5% indicado en [8]. Este importante descenso del BLER fundamentalmente se debe, tal y como se aprecia en la Tabla 4, a la significativa reducción que se produce en el porcentaje de uso de CS4, el codificador más vulnerable de todos ante errores de transmisión.

Fomentando una menor utilización de CS4, el algoritmo ATR-VE prolonga el tiempo medio de transmisión, tal y como se pretendía, reduciendo de 43ms (AT) a 12.3ms el tiempo medio sobrante en tramas de video transmitidas a tiempo. Este incremento del tiempo medio de transmisión, lleva inherentemente asociado el incremento del retardo normalizado y el descenso del *throughput* reflejados en la Tabla 3. En efecto, según muestra la Fig. 1, ATR-VE ofrece en general un peor *throughput*. De hecho, el máximo *throughput* alcanzable es sensiblemente inferior. Sin embargo, en la Fig. 1 también se aprecia la existencia de una región en la cual el *throughput* ofrecido por ATR-VE mejora el ofrecido por AT. Esa región se justifica por el hecho de que cuando la calidad del enlace radio es suficientemente mala, el algoritmo ATR-VE, a pesar de transmitir una menor cantidad total de bits por segundo (tasa binaria), consigue transmitir una mayor cantidad de bits correctos por unidad de tiempo (*throughput*) que el algoritmo AT gracias al mayor uso de CS más robustos. Aunque el algoritmo AT transmite a tasas binarias más elevadas emplea CS menos robustos ante errores lo cual resulta en un su menor *throughput*.

La eficiencia de ATR-VE también queda reflejada en la Tabla 5. Se aprecia que ATR-VE incrementa el porcentaje de tramas sin retardo y con BLER $\leq 5\%$ un 10% respecto a AT y un 8.6% respecto a ATR, al mismo tiempo que incrementa, de entre las tramas transmitidas a tiempo, el porcentaje de ellas con BLER $\leq 5\%$ en un 18.4% respecto a AT y en un 20.6% respecto a ATR.

Por último, tanto el algoritmo ATR como sus variantes ATR-VE y ATR-VR solicitan un menor número de cambios de CS por segundo que AT (Tabla 3), gracias al mayor porcentaje de utilización del CS óptimo. Este hecho representa una reducción del 16%, 42% y 52%, respectivamente, en la carga de señalización del sistema asociada al uso de LA.

Parámetro	AT	ATR	ATR-VR	ATR-VE
Throughput (kbps)	16.56	16.94	17.62	14.71
BLER (%)	11.18	12.20	14.11	6.33
Retardo normalizado (ms / kbit)	55.62	53.21	48.55	65.26
Tasa cambio CS (Cambios / seg.)	4.69	3.94	2.24	2.74

Tabla 3.- Comparación del rendimiento de los algoritmos estudiados.

Algoritmo	CS-1	CS-2	CS-3	CS-4	CS óptimo
AT	6.62	7.14	26.40	59.82	65.99
ATR	3.37	2.91	27.98	65.72	71.16
ATR-VR	0.00	0.65	14.00	85.34	85.77
ATR-VE	2.60	39.54	38.01	19.84	80.14

Tabla 4.- Porcentaje de utilización de cada CS y del CS óptimo.

Parámetro	AT	ATR	ATR-VR	ATR-VE
% sin retardo ($d \leq 0$)	69.16	73.92	82.65	65.91
% sin retardo y BLER $\leq 5\%$	44.98	46.45	49.02	55.01
De sin retardo, % BLER $\leq 5\%$	65.04	62.84	59.31	83.47

Tabla 5.- Porcentaje de tramas transmitidas sin retardo, sin retardo y BLER $\leq 5\%$ y, de las tramas transmitidas sin retardo, porcentaje con BLER $\leq 5\%$.

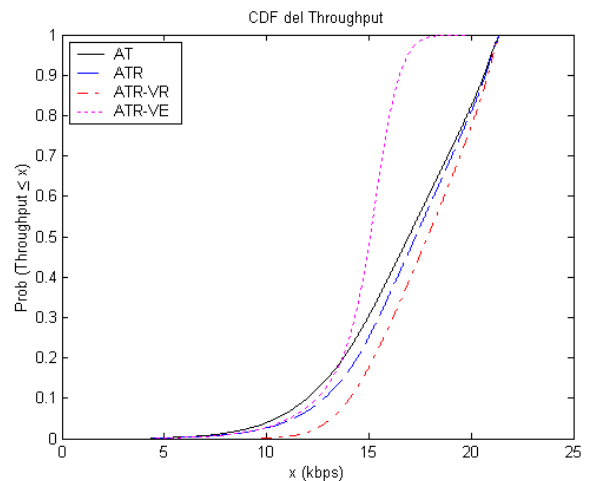


Figura 1.- CDF del *throughput* para los diversos algoritmos estudiados.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado nuevas estrategias de diseño de LA orientadas a la transmisión de datos en tiempo real. Los algoritmos propuestos se han evaluado con tráfico de vídeo H.263, aunque resultan igualmente aplicables a la transmisión de cualquier tipo de tráfico en tiempo real. El rendimiento de los algoritmos propuestos se ha comparado con el del algoritmo LA tradicional basado en la maximización del *throughput*. Los resultados obtenidos muestran que los criterios de diseño presentados pueden mejorar no sólo el *throughput* ofrecido por dicho algoritmo sino también el retardo de transmisión y la tasa de errores, al mismo tiempo que reducen la carga de señalización asociada al uso de LA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de Bancaja y de la Universidad Miguel Hernández para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] ETSI-SMG, "EDGE Feasibility Study, Work Item 184; Improved Data Rates through Optimized Modulation", Tdoc 97-331, Diciembre 1997.
- [2] W. Luo, K. Balachandran, S. Nanda y K. Chang, "Packet Size Dependent Link Adaptation for Wireless Packet Data", *Proc. IEEE Globecom*, pp. 53-56, Noviembre 2000.
- [3] K. K. Leung, P. F. Driessen, K. Chawla y X. Qiu, "Link Adaptation and Power Control for Streaming Services in EGPRS Wireless Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, n° 10, pp. 2029-2039, Octubre 2001.
- [4] J. Gozávez, M. López-Benitez y O. Lázaro, "Guaranteeing Quality of Service in Mobile Radio Networks by Means of Link Adaptation Algorithms", *Proc. IEEE ISWCS*, pp.188-192, Septiembre 2004.
- [5] J. Gozávez y J. Dunlop, "Link Level Modelling Techniques for Analysing the Configuration of Link Adaptation Algorithms in Mobile Radio Networks", *Proc. European Wireless*, pp. 325-330, Febrero 2004.
- [6] J. Gozávez y J. Dunlop, "On the Effect of Correlation in Multislot Link Layer Analysis for GPRS", *Proc. IEEE VTC-Fall*, pp. 444-450, Septiembre 2000.
- [7] O. Lázaro, D. Girma y J. Dunlop, "H.263 Video Traffic Modelling for Low Bit Rate Wireless Communications", *Proc. IEEE PIMRC*, pp. 2124-2128, Septiembre 2004.
- [8] L. Hanzo, P Cherriman y J. Streit, "Wireless Video Communications: Second to Third Generation Systems and Beyond", *IEEE Press*, 2001.