

*Resumen de la tesis doctoral*

# Análisis y diseño de algoritmos de gestión de recursos y de técnicas de control de admisión para sistemas de comunicaciones móviles basados en transmisión por paquetes

Realizada por: *M<sup>a</sup> Ángela Hernández Solana*  
profesora asociada del Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones  
(Universidad de Zaragoza)

Esta Tesis fue codirigida por: *Dr. Antonio Valdovinos Bardají*, Catedrático del área de Telemática en la Universidad de Zaragoza y *Dr. Fernando Casadevall Palacio*, Catedrático del área de Teoría de la Señal y Comunicaciones en la Universidad Politécnica de Cataluña,

y leída el *30 de Septiembre de 2005*, en el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña, obteniendo la calificación de *Sobresaliente Cum Laude por Unanimidad*.

## **MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS**

Desde la definición y despliegue de los primeros sistemas celulares analógicos a principios de los años 80, los sistemas móviles celulares han evolucionado de forma continua pasando por la digitalización de la transmisión en sistemas todavía pensados fundamentalmente para la transmisión de voz (sistemas de segunda generación 2G), hasta llegar a la definición de los actuales sistemas de tercera generación (3G), orientados a la transmisión de servicios multimedia. En esta evolución, la elección de CDMA (Code Division Multiple Access) como técnica de acceso para los sistemas celulares 3G especificados actualmente, el Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) y cdma2000, ha supuesto un reto tecnológico adicional.

En el momento de iniciar esta tesis, el estándar UMTS estaba todavía en la fase inicial Release (versión) 99. De hecho, desde entonces los trabajos del 3rd Generation Partnership Project (3GPP) y las especificaciones de UMTS no han parado de evolucionar partiendo de la definición de la arquitectura y funcionalidades básicas, para ir incluyendo los mecanismos y las funcionalidades que permitan realmente la provisión de servicios heterogéneos, con un aprovechamiento elevado de los recursos y elevada satisfacción por parte de los usuarios. Todavía se trabaja sobre las versiones 4 y 5, y están en marcha nuevas versiones (6 y 7). La motivación de estos trabajos es la de incrementar la capacidad con respecto a las primeras versiones del estándar y mejorar las prestaciones de los servicios orientados a la transmisión en modo paquete (por ejemplo reducir el retardo y elevar la tasa de transmisión). De hecho, la tendencia hacia la convergencia de los sistemas móviles e Internet hace pensar que la transmisión en modo paquete, incluyendo la de los servicios multimedia, representará una porción muy importante del tráfico soportado por los sistemas móviles de tercera y cuarta generación (4G).

Realmente, si se contempla el uso del sistema UMTS como red de acceso a una red IP (Internet Protocol) global con capacidad para transportar aplicaciones multimedia proporcionando QoS extremo a extremo, puede considerarse, dentro de la misma, la definición de QoS (QoS - Quality of Service) en distintos niveles, cada uno de ellos proporcionando distintos servicios portadores entre dos puntos de la red. Las características del acceso radio (ancho de banda limitado, inestabilidad del canal e interferencia) y la movilidad de los usuarios hacen que lograr la garantía de QoS sea más complicado en la parte radio que en la parte troncal y, por tanto, gran parte de los esfuerzos se concentran en la provisión de QoS en este entorno. La naturaleza y las dificultades de gestión del acceso radio aconsejan una separación entre los servicios portadores radio y los servicios portadores de la red troncal, en el sentido de que los mecanismos encargados de proporcionar QoS que se implementen deben permitir una evolución independiente de la parte radio para eliminar o minimizar el impacto que pueda tener la evolución de las tecnologías de transporte en la red fija sobre el acceso radio.

El estándar actual, en su parte radio, soporta tanto transmisión en modo circuito como en modo paquete con tasa variable, aunque contempla la conmutación de circuitos como el método natural para la transmisión de servicios en tiempo real. Sin embargo, como ya se ha comentado, conforme los servicios basados en IP cobran importancia, el estándar está evolucionando, modificando la transmisión sobre el canal dedicado, para conseguir mayores tasas de transmisión para los servicios “background”, “interactive” o “streaming”. La evolución se encamina hacia un escenario de soluciones todo IP tanto para servicios en tiempo real como no real, donde, como es natural, la transmisión en modo paquete es la más típica.

El trabajo desarrollado en esta tesis se centra en el acceso radio y, aunque no está restringido a UMTS, se usa esta tecnología como referencia. En particular el estudio se restringe al enlace ascendente y el modo FDD. Al inicio de la tesis, el contexto de la elección de la técnica CDMA como técnica de acceso para los sistemas 3G y la previsible evolución que debería producirse hacia la utilización de la transmisión en modo paquete como método para aumentar la eficiencia de los nuevos sistemas motivaron el interés por el análisis, propuesta y evaluación de nuevos mecanismos de control de tráfico adaptados a este nuevo contexto: “Redes CDMA con transmisión en modo paquete”.

Desde un punto de vista técnico, la utilización de la técnica de acceso CDMA incorpora el concepto de capacidad “Soft”, frente a la capacidad “Hard” asociada a los sistemas TDMA/FDMA

(Time/Frequency Division Multiple Access), donde el máximo número de usuarios depende del número de recursos físicos (slot-frecuencias). En CDMA el nivel de interferencia (en particular en el enlace ascendente) es el factor que limita la capacidad del sistema. Cuanto mayor es la carga permitida, mayor es el margen de interferencia demandado y menor es la cobertura real de las estaciones base (Nodos B según la terminología UMTS). En este contexto, la planificación de la cobertura y la capacidad y el control de la interferencia no pueden efectuarse independientemente.

Por lo tanto, definidos unos objetivos de capacidad y cobertura, las estrategias de gestión de recursos radio (RRM) deben asegurar el mantenimiento de los mismos. Esencialmente, la QoS se proporciona a través de una combinación de control de admisión (controla indirectamente la interferencia limitando el número de usuarios presentes en el sistema) y control de flujo a nivel de paquete (el scheduling y control de potencia coordinados entre sí balancean la interferencia ordenando las transmisiones de los distintos usuarios).

El objetivo fundamental de la tesis es analizar y desarrollar estrategias de gestión de recursos radio y particularmente procedimientos de control de admisión en sistemas multimedia con transmisión en modo paquete. Aspectos como el control de potencia, la priorización en el acceso al medio a través del scheduling de paquetes, control de admisión y garantía de QoS durante el handover son tratados en escenarios realistas que incluyen modelos de propagación de acuerdo con las recomendaciones del 3GPP, las limitaciones de potencia de transmisión del móvil, distintos grados y patrones de movilidad de los usuarios, así como distintos tipos de tráfico con diferentes requerimientos de caudal y de calidad en cuanto a la tasa de errores y retardo.

El control de admisión y fundamentalmente la definición de una métrica o límite adecuado para tomar las decisiones de admisión es, quizá, el aspecto más complejo y uno de los retos más importantes desde el punto de vista investigador, particularmente cuando se considera la técnica CDMA. En efecto, se debe hacer frente a diversos problemas: por una parte tratar con el carácter variable y estocástico de una capacidad, en este caso limitada por la interferencia, que impide mantener literalmente los planteamientos clásicos de admisión utilizados en redes TDMA/FDMA. En este tipo de redes los criterios de admisión típicamente consisten en comparar los recursos requeridos por las nuevas conexiones con los recursos disponibles, que en este caso son fijos y conocidos a priori. Por otra, el hecho de considerar la transmisión en modo paquete, implica la necesidad de obtener una caracterización adecuada del consumo de recursos radio asociado a las fuentes variables en un contexto en el que la capacidad también es variable. Todo ello, además, considerando un escenario con movilidad entre celdas.

Uno de los condicionantes más importantes de la mayor parte de los estudios sobre control de admisión es el carácter teórico o lo restrictivo de las condiciones de análisis y evaluación de muchas propuestas. Por este motivo, y dado que el control de admisión es el núcleo central de la tesis, el planteamiento del trabajo desarrollado es abordar el problema no sólo desde un punto de vista puramente teórico, sino fundamentalmente desde un punto de vista heurístico. Para ello se desarrolla una herramienta de simulación que permite emular el comportamiento de un sistema genérico móvil celular en el que estén presentes la capa física, la técnica y protocolo de acceso, y el control de admisión. El simulador, resultado implícito de la realización de la tesis, está desarrollado en C++ y pensado como una herramienta flexible que permita incorporar con facilidad nuevas propuestas, considerar distintos tipos de tráfico, patrones de movilidad y entornos de propagación.

En distintas fases de la tesis, la herramienta permite evaluar el comportamiento de distintos algoritmos de scheduling y obtener información útil para el establecimiento de un umbral adecuado para la admisión. Dicha herramienta ayuda a determinar aquellos aspectos que pueden tener mayor influencia sobre el rendimiento del sistema, así como aquéllos que pueden ser relevantes a la hora de establecer un determinado procedimiento de control.

Establecido un umbral de admisión más o menos efectivo, la provisión de QoS se centra en el desarrollo de políticas de admisión que minimicen la probabilidad de perder llamadas procedentes de traspaso (handover) y el riesgo de bloquear innecesariamente llamadas nuevas. Asimismo, soportar garantía de QoS para distintas clases de servicio requiere que el esquema sea capaz de integrar eficientemente predicción de movilidad y admisión. Los esquemas basados en la reserva fija de canales o capacidad de guarda y sus numerosas variantes no pueden adaptarse eficientemente a los

cambios en los patrones de tráfico, dada la naturaleza estocástica de los mismos. Por otra parte, a menudo la protección de las llamadas procedentes de traspaso tiene un coste excesivo en términos de probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas. Aunque los mecanismos dinámicos de control de admisión son más precisos, es difícil encontrar un mecanismo efectivo con múltiples servicios. El principal inconveniente es que cada tipo de servicio tiene sus propios requisitos de ancho de banda, parámetros de calidad al nivel de llamada y tasa de trasposos. El otro aspecto a tener en cuenta es la complejidad computacional asociada a la obtención de una solución analítica que permita dimensionar el sistema de una forma más o menos aproximada. La tesis busca soluciones adaptativas, implementadas de forma distribuida sobre un grupo de celdas, que contemplen de alguna forma métodos efectivos de localización, seguimiento y predicción de movimiento de los terminales, con objeto de determinar la cantidad de recursos a reservar. Al mismo tiempo, se buscan métodos analíticos que faciliten el dimensionado del sistema.

El objetivo global: desarrollar y analizar estrategias de control de congestión y admisión en sistemas multimedia con transmisión en modo paquete bajo condiciones realistas, puede dividirse en tres ámbitos de trabajo diferenciados a la vez que complementarios que se resumen en el siguiente apartado.

## **DESARROLLO**

### **1. Estudio, propuesta e implementación de estrategias de gestión de recursos a nivel de paquete para CDMA (trabajo reflejado en el capítulo 3 de la tesis).**

El trabajo en este ámbito se ha centrado en desarrollar la transmisión en modo paquete sobre los canales dedicados definidos en el estándar UMTS y particularmente en el enlace ascendente, donde el control de las transmisiones es más complejo y donde además se centra el interés por el desarrollo de mecanismos de control de admisión. La propuesta a nivel MAC y en particular la elección de las estrategias de scheduling finalmente evaluadas se efectúa después de haber hecho una valoración preliminar de la adecuación y viabilidad de las distintas alternativas en cuanto a protocolos y políticas de asignación de recursos (ver capítulo 2 de la tesis), escogiendo aquella que se consideraba más adecuada desde el punto de vista de la provisión de servicios con calidad garantizada.

La propuesta efectuada en la tesis y presentada ya en el AMOS ACTS'99 consiste en la implementación de un protocolo de asignación bajo demanda y control centralizado en la estación base para gestionar la transmisión en modo paquete sobre el canal dedicado, DPDCH/DPCCCH, tanto de servicios con y como sin restricciones temporales. La implementación de la propuesta se ha efectuado considerando la compatibilidad con la estructura MAC/RLC y los canales lógicos y físicos definidos en el estándar UMTS. Las características básicas de la implementación escogida, control centralizado en la estación base y scheduling rápido de paquetes, en coordinación con un criterio de asignación de potencias basado en minimizar la interferencia ocasionada sobre las otras celdas, permiten un control estricto de la interferencia que redundan en un incremento de la capacidad global del sistema. El procedimiento propuesto proporciona mejores prestaciones que el control autónomo por parte del móvil de las transmisiones considerado hasta el momento en las especificaciones de UMTS. Sólo recientemente, en el *release 06*, en lo que se denomina *Enhanced - DPDCH* (E-DPDCH), se contemplan como técnica de mejora para la transmisión en el enlace ascendente el scheduling controlado por el nodo B y un control más rápido de las transmisiones.

Se ha evaluado el comportamiento de distintas estrategias de scheduling considerando el mantenimiento de las garantías de retardo y tasa, las condiciones del canal radio y el mantenimiento del canal de control. En lo que respecta a la garantía del retardo, se ha considerado la combinación de prioridades estáticas y dinámicas. Las primeras para priorizar servicios con restricciones temporales frente a servicios sin restricciones temporales y las segundas para ordenar las transmisiones de los paquetes correspondientes a servicios de la misma categoría. Después de valorar distintas propuestas de la literatura, particularmente disciplinas de servicio utilizadas en ATM, se ha propuesto y evaluado una estrategia de servicio basada en el tiempo de vida de los paquetes que ha demostrado ser bastante efectiva para tratar de forma diferenciada servicios con distintos requerimientos de retardo. El tiempo de vida de cada paquete, discretizado en tramas, se calcula en función del retardo máximo que puede

tolerar el servicio y de la demora que lleva acumulada.

Con el fin de aumentar la eficiencia en la utilización de los recursos del sistema, se opta por un planteamiento de *scheduling dependiente de las condiciones del canal*, cuyas ventajas se evidencian en las simulaciones efectuadas. El principio es limitar, de acuerdo con una serie de criterios descritos en la tesis, las transmisiones de aquellos terminales que exigen un consumo excesivo de recursos, debido a sus malas condiciones de canal. Obviamente la demora se combina con procedimientos para la recuperación del retraso experimentado cuando las condiciones mejoran.

En lo referente al mantenimiento del canal de control, se han estudiado distintas alternativas. La transmisión sobre el canal dedicado, más fiable gracias al mantenimiento del control de potencia en lazo cerrado y ausencia de colisiones, requiere sin embargo un consumo de recursos extra debido al mantenimiento del canal de control aún cuando no se transmite información útil. Las mejores prestaciones se han obtenido limitando las variaciones en la asignación de los permisos de transmisión, de tal forma que las conexiones mantengan de forma continua el servicio durante periodos más o menos largos de tiempo, mientras lo permitan las restricciones de tiempo del conjunto de servicios que se multiplexan, y manteniendo a su vez el canal de control únicamente cuando se transmite sobre el canal de datos. En este contexto, para mantener el control de potencia en lazo cerrado en todas las transmisiones se considera conveniente la transmisión de un preámbulo antes de iniciar la transmisión del primer paquete de una ráfaga.

Más allá del objetivo inicial, evaluar estrategias de conmutación de paquetes para UMTS a este nivel, el objetivo último es disponer de un entorno de evaluación realista a partir del cual sea posible extraer información útil para determinar un umbral de admisión efectivo en sistemas celulares CDMA cuando se considere la transmisión en modo conmutación de paquetes para servicios con y sin restricciones temporales.

## **2. Estudio y propuesta de un umbral de admisión para asegurar la calidad de servicio (Capítulos 4,5 y Anexo A)**

Para determinar el umbral de admisión, se ha llevado a cabo un estudio crítico y exhaustivo de las distintas propuestas efectuadas en este campo, identificando las ventajas y limitaciones de cada una de ellas, así como los aspectos o ideas reutilizables. El conjunto de propuestas es amplio, incluso considerando una versión simple del problema: transmisión en modo circuito y uno o dos clases de servicio a lo sumo. El estudio, reflejado en el capítulo 4 de la tesis, ha abarcado un amplio número de propuestas englobadas bajo seis categorías distintas: *Número equivalente de usuarios; Control interactivo de potencia; SIR; Interferencia; Throughput; Ancho de banda efectivo*.

La mayor parte de estas propuestas se basan en el mantenimiento de la calidad de la señal en términos de *SIR* y a pesar de proporcionar información útil acerca de cómo evaluar o considerar los condicionantes de la transmisión en sistemas CDMA, no contemplan en realidad la transmisión de servicio multimedia aprovechando las ventajas asociadas a la transmisión en modo paquete. Muchos de los estudios se basan casi exclusivamente en aspectos relacionados con la transmisión en el canal radio y no tienen en cuenta el funcionamiento real del sistema a nivel MAC ni la garantía de QoS en términos de retardo. Las únicas propuestas al respecto se corresponden con algunos estudios basados en la utilización del ancho de banda efectivo, aunque éstas escasas contribuciones, en particular, consideran esquemas de transmisión TDMA, por lo que eluden uno de los condicionantes fundamentales del entorno CDMA: la variabilidad de la capacidad en función de la interferencia o del número de usuarios presentes en el sistema.

Considerando la escasez de propuestas que contemplan la conmutación de paquetes, en especial en CDMA, es importante determinar qué tipo de planteamiento presenta una mayor eficacia a la hora de asegurar la calidad en términos de *SIR*, una mayor capacidad para adaptarse a un esquema en el que se consideren y exploten las ventajas de la aplicación de un control de acceso al medio, independientemente de que se explote o no la tolerancia al retardo de las conexiones y una mayor capacidad para integrar a tráficos de distinta naturaleza.

La propuesta efectuada en la tesis, acorde con este último planteamiento, se basa en la

evaluación previa de los resultados obtenidos en el simulador C++ acerca del comportamiento del sistema a nivel de enlace/paquete para fundamentar la búsqueda de un umbral de admisión efectivo. Considerando la naturaleza estocástica del tráfico multimedia y los cambios en la capacidad disponible en cada trama, en la tesis se opta por considerar un umbral de admisión basado en la utilización del concepto de “*ancho de banda efectivo*” El concepto se aplica tanto para caracterizar tanto los recursos requeridos por una conexión durante todo el tiempo que permanece activa, como para caracterizar la capacidad disponible en el canal radio. Los resultados obtenidos en las simulaciones a nivel de enlace sugieren a priori la viabilidad de la propuesta. La determinación de no tiene por qué ser simple pero, si es posible, los beneficios de la utilización del concepto de ancho de banda efectivo son múltiples. Permite el mapeo de los parámetros de QoS asociados a la conexión en un único parámetro simple, simplifica la implementación y aumenta la eficiencia del control de admisión, simplifica el dimensionado y la planificación del sistema si es posible recurrir a técnica ya utilizadas en redes ATM, como la aproximación de Roberts y, facilita la aplicación de políticas de admisión para priorizar unos servicios frente a otros.

El planteamiento general de la propuesta efectuada en la tesis requiere, por un lado, la determinación de un parámetro, asociado con la interferencia, la *SIR*, la tasa o el factor de carga, entre otros posibles, que incluyendo además de la calidad (representada en términos de la probabilidad de error en la transmisión a nivel de paquete (*BLER*)) los requerimientos de retardo, represente los recursos demandados por la nueva conexión,  $c_{efectivo}$ , y, por otro, la determinación del límite de admisión,  $C_{umbral}$ , a utilizar en el algoritmo de decisión. Establecidos ambos, la nueva conexión será admitida si  $\sum_{\forall} c_{efectivo} + \Delta c \leq C_{umbral}$  con  $\Delta c = c_{efectivo}$ .

Elegido el parámetro  $C_{umbral} = I_{int\ ra} / I_{total} = (1 - \eta) / (1 + f)$ , el primer paso del trabajo desarrollado es caracterizar el comportamiento estadístico de la capacidad disponible trama a trama considerando las variaciones en las estadísticas del tráfico, del ratio entre la interferencia intracelular e intercelular,  $f$ , o las interferencias total ( $I_{total}$ ), intra ( $I_{int\ ra}$ ) o intercelular ( $I_{int\ er}$ ). El planteamiento, como tal, no difiere de otros trabajos ya analizados aunque, en este caso, la caracterización se efectúa a partir de la observación del comportamiento del sistema y no de estudios teóricos previos que sólo tienen en cuenta la propagación. Los resultados de las simulaciones muestran cómo la función densidad difiere claramente de la asociada a la distribución Gaussiana, habitualmente utilizada en muchos trabajos, obteniéndose una mejor caracterización estadística de la capacidad disponible en la celda a través de una función *Gamma generalizada* o una función *F generalizada*.

Dicha caracterización estadística de la capacidad disponible se ha utilizado posteriormente en la definición del “*ancho de banda efectivo*” y particularmente en la caracterización del servicio otorgado (trama a trama) a las distintas conexiones que se multiplexan. El cálculo del “*ancho de banda efectivo*” o “*capacidad efectiva*” asociada a los servicios, particularmente aquellos con restricciones temporales, se ha efectuado recurriendo a un modelo analítico propio que considera el funcionamiento específico del nivel físico y el nivel de enlace (capítulo 5). La tolerancia al retardo de las fuentes con restricciones temporales se contempla a través de la definición de una cota para la probabilidad de descarte (se asume descarte temprano de los paquetes que no cumplen los requerimientos de retardo). En una primera aproximación, parecía lógico intentar eludir la utilización de modelos analíticos exactos para caracterizar la ocupación de la cola o el servicio y recurrir a técnicas aproximadas ya desarrolladas como puedan ser la aproximación Gaussiana, el modelo de fluidos o la teoría de las desviaciones grandes para determinar el ancho de banda efectivo, sin embargo se ha observado que bien resultan en cotas excesivamente conservadoras o bien presentan bastante dificultades o inconvenientes en su adaptación.

El modelo se basa en la caracterización de la distribución estadística de la ocupación del buffer de almacenamiento de los paquetes y en la caracterización estadística de la probabilidad de que el servicio asignado a una conexión sea igual o superior al demandado para satisfacer las cotas de probabilidad de descarte.

Una vez determinada la expresión de la probabilidad de descarte para cada una de las

conexiones que comparten el canal, utilizando las expresiones en función de un número específico de conexiones admitidas en el sistema, queda por determinar el ancho de banda efectivo. Fijada una cota para la probabilidad de descarte, se examina el valor del número de conexiones que satisface la cota especificada. Obtenido el número máximo, la capacidad efectiva se obtiene como el cociente entre el valor promedio de la capacidad disponible y el número máximo de conexiones admisibles analizando el comportamiento en régimen estacionario.

El cómputo de la capacidad efectiva se efectúa considerando la presencia de un solo tipo de tráfico dentro de la celda, aunque la distribución de los móviles dentro de la misma, su movilidad y las condiciones de propagación asociadas a cada uno ellos son independientes. El objetivo es evaluar la viabilidad de la implementación de un esquema de admisión de carácter lineal, de tal forma que en un escenario de tráfico heterogéneo, la capacidad efectiva total consumida se obtenga a partir de la suma de los valores de capacidad o ancho de banda efectivo calculados de forma independiente para cada tipo de tráfico. Los resultados muestran que la desviación del umbral de admisión real con respecto al comportamiento lineal es pequeña y en cualquier caso puede manejarse definiendo un pequeño margen de guarda. La evaluación del comportamiento del umbral se ha efectuado considerando primero escenarios con un sólo servicio y después en escenarios con integración de distintos tipos de servicio en condiciones de distribución homogénea y heterogénea de tráfico entre celdas, obteniéndose en todos los casos unas buenas prestaciones desde el punto de vista de la seguridad del umbral escogido. Se garantiza la QoS en términos de probabilidad de descarte para los servicios con restricciones temporales, manteniendo al mismo tiempo un elevado aprovechamiento de los recursos disponibles en el sistema.

A priori el inconveniente del modelo presentado radica aparentemente en la necesidad de revisar constantemente los valores de capacidad efectiva en el caso de producirse cambios en las condiciones de funcionamiento del sistema. No obstante, se comprueba que dichos valores experimentan variaciones muy pequeñas cuando se producen cambios en la combinación de servicios que comparten los recursos del sistema e incluso cuando la distribución de carga entre celdas no es homogénea. Es un parámetro, a priori, mucho más estable que el nivel de interferencia o el número equivalente de usuarios, aunque la implementación real no debería eludir la consideración de un esquema adaptativo fundamentado en la utilización de un parámetro de control basado en medidas que active la actualización de los valores de  $C_{ef}$  considerados.

### ***3. Evaluación de políticas de admisión en sistemas CDMA para controlar el grado de servicio (Capítulo 6)***

A pesar de presentarse una propuesta a este respecto, el objetivo del trabajo reflejado en este campo no es tanto el estudio o propuesta de una política de admisión óptima, sino la evaluación del procedimiento de admisión propuesto en un contexto capaz de proporcionar prioridad a las llamadas de procedentes de handover frente a las llamadas nuevas.

Se ha considerado la implementación de una política de admisión basada en la reserva dinámica de recursos, siguiendo un esquema típico de post-reserva. Este tipo de esquema se consideró como el más atractivo después de efectuar un estudio exhaustivo de los distintos mecanismos considerados en la literatura para garantizar la QoS a nivel de llamada y, en particular, la continuidad de las llamadas procedentes de trasposos. La propuesta en sí no pretende ser óptima, pero sí lo suficientemente efectiva y realista desde un punto de vista de implementación.

El esquema propuesto para la evaluación se basa en reservas de carácter distribuido en función del comportamiento de movilidad de los usuarios. Cuando un terminal se encuentra a una cierta distancia de una celda candidata sobre la que efectuar un handover, se contabilizan peticiones de reserva en el controlador de la estación base que le da servicio. Dichas peticiones de reserva se intercambian entre las estaciones base periódicamente, efectuándose la reserva de recursos correspondiente en todas ellas. Las prestaciones de la propuesta dependen del grado y patrón de movilidad de los terminales, de forma que, a tenor de los resultados de la simulación, se observa la necesidad de ajustar convenientemente el tamaño del área de degradación para minimizar la tasa de falsas reservas y conseguir un mejor aprovechamiento de los recursos.

Aprovechando la utilización del concepto de " *ancho de banda efectivo* " a la hora de determinar del umbral de admisión, se ha evaluado la viabilidad de aplicar modelos analíticos de bajo coste computacional, utilizados en la red fija, para evaluar el comportamiento del sistema. El modelo aproximado de Roberts, adaptado para incorporar las particularidades asociadas a la estrategia de reserva variable considerada, ha proporcionado unos resultados bastante buenos en términos de adecuación del modelo al comportamiento "real" del sistema obtenido de las simulaciones, avalando una de las ventajas establecidas a priori con respecto a la utilización del concepto de " *ancho de banda efectivo* " en la definición del umbral.

Por último se han evaluado las prestaciones del umbral de admisión considerando la implementación de un esquema de gestión de trasposos " *Soft Handover* ". En este caso, el aprovechamiento de las ventajas de la implementación de " *Soft Handover* " en cuanto al aumento de la capacidad está directamente relacionado con la definición de un esquema eficiente de gestión de las transmisiones de los terminales en " *Soft Handover* ". Como propuesta, se ha considerado que todas las estaciones bases pertenecientes al " *Active Set* " del terminal pueden enviarle indicaciones de scheduling. Éste transmite de acuerdo con aquélla que implica una potencia de transmisión más pequeña para la misma tasa de transmisión. Con esta implementación, la calidad de la transmisión del terminal queda garantizada sin provocar incrementos inesperados en el nivel de interferencia observado por el resto de los terminales. Desde el punto de vista de la garantía de QoS a nivel de llamada, se ha constatado que la implementación de " *Soft Handover* " proporciona un método natural para favorecer la continuidad de las llamadas de handover frente al establecimiento de llamadas nuevas, proporcionando incluso mejores prestaciones que el método de reserva adaptativa propuesto a tal efecto.

## CONCLUSIONES

Se ha evaluado el comportamiento de distintas estrategias de scheduling considerando el mantenimiento de las garantías de retardo y tasa, las condiciones del canal radio y el mantenimiento del canal de control. En particular, las características básicas de la implementación escogida, control centralizado en la estación base y scheduling rápido de paquetes, en coordinación con un criterio de asignación de potencias basado en minimizar la interferencia ocasionada sobre las otras celdas, permiten un control estricto de la interferencia que redundo en un incremento de la capacidad global del sistema. El procedimiento propuesto proporciona mejores prestaciones que el control autónomo por parte del móvil de las transmisiones considerado hasta el momento en las especificaciones de UMTS.

Para la determinación del umbral de admisión, se ha llevado a cabo un estudio crítico y exhaustivo de las distintas propuestas efectuadas en este campo, identificando las ventajas y limitaciones de cada una de ellas, así como los aspectos o ideas reutilizables. El estudio de todas estas propuestas se ha conjugado con el análisis de los resultados obtenidos del funcionamiento del sistema a nivel de paquete, de tal forma que se han identificado los parámetros más atractivos para ser utilizados en la definición del umbral. El problema se ha orientado a través del concepto de " *ancho de banda efectivo* " o " *capacidad efectiva* " tanto para la caracterización de los recursos requeridos por las fuentes de tráfico como para la capacidad del canal radio. El umbral propuesto presenta un grado de estabilidad elevado permitiendo una utilización de los recursos del sistema elevada.

Para evaluar el comportamiento del umbral de admisión propuesto se ha considerado la implementación de una política de admisión basada en la reserva dinámica de recursos, siguiendo un esquema típico de post-reserva. Se ha verificado la viabilidad de aplicar modelos analíticos de bajo coste computacional, para evaluar el comportamiento del sistema, avalando una de las ventajas establecidas a priori con respecto a la utilización del concepto de " *ancho de banda efectivo* " en la definición del umbral. Finalmente se han evaluado las prestaciones considerando la implementación de mecanismos *Soft Handover* , definiéndose procedimientos de scheduling para esas situaciones.



## *Originalidad*

El aspecto más crítico y sobre el que se ha centrado la mayor parte del esfuerzo investigador de la tesis ha sido determinar un umbral de admisión fiable y efectivo que, independientemente de la política de admisión escogida o de la estrategia de handover utilizada, permitiera asegurar el mantenimiento de la calidad de servicio a nivel físico (BER, BLER), a nivel de paquete (retardo, tasa, probabilidad de descarte de paquetes) y a nivel de conexión (probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas y probabilidad de pérdida de llamadas de handover).

A pesar de que los sistemas móviles 3G y 4G evolucionan hacia la sustitución de los esquemas de transmisión en modo circuito, habitualmente utilizados en las redes móviles, por las ventajas en cuanto a eficiencia de utilización de recursos que proporcionan los esquemas de transmisión en modo paquete, se puede decir que escasean los estudios que consideran la ventaja introducida en eficiencia por este tipo de transmisión a la hora de establecer un umbral de admisión, en especial cuando la tecnología de acceso es CDMA y cuando el esquema de conmutación por paquetes se aplica tanto a servicios sin restricciones temporales como a servicios en tiempo real. En el caso de las redes 3G basadas en TDMA/FDMA los estudios son más abundantes, si bien es cierto que escasean también los que contemplan adecuadamente de forma conjunta la variabilidad del entorno móvil y la variabilidad de las fuentes. De hecho, con frecuencia lo que ocurre es que la mayor parte de los estudios se centran sólo en esquemas de control de admisión para garantizar la QoS a nivel de conexión en un entorno multimedia, lo que denominamos políticas de admisión, con lo cual se elude el principal problema, el establecimiento del umbral efectivo de admisión. Como ya se ha comentado en el resumen, muchos de los estudios para determinar el criterio de admisión efectuados sobre CDMA se basan casi exclusivamente en aspectos relacionados con la transmisión en el canal radio y no tienen en cuenta el funcionamiento real del sistema a nivel MAC.

Uno de los aspectos diferenciadores del trabajo realizado en esta tesis, es que la propuesta y el diseño del control de admisión y más concretamente la terminación de un umbral de admisión fiable (aspecto considerado más crítico) se efectúa considerando de forma conjunta el comportamiento, en condiciones realistas, de las estrategias de gestión de recursos que operan a nivel de enlace (control de potencia, carga, MAC y scheduling) y de conexión.

La propuesta se basa en la evaluación previa de los resultados obtenidos acerca del comportamiento del sistema a nivel de paquete. Se busca obtener beneficio del control que las estrategias de gestión de recursos que actúan al nivel de paquete ejercen sobre el tráfico y la interferencia. Esto exige incorporar el retardo, variaciones de retardo y probabilidad de pérdida como parámetros de QoS en el análisis, lo que ya implica necesariamente una mejora en la caracterización del comportamiento del nivel de enlace, si se compara con la mayor parte de las propuestas efectuadas en la literatura. En general, en éstas, únicamente se consideran aspectos de transmisión a nivel físico y, en el mejor de los casos, se tiene en cuenta la implementación real del control de potencia. A continuación se detallan las principales contribuciones efectuadas

### **Estudio, propuesta e implementación de estrategias de gestión de recursos a nivel de paquete para CDMA (trabajo reflejado en el capítulo 3 de la tesis).**

Las contribuciones de la tesis desde el punto de vista de originalidad para en el caso del nivel MAC deben contemplarse en el contexto temporal en el que fueron realizadas.

La propuesta de gestión de recursos a nivel de paquete consiste en la implementación de un protocolo de asignación bajo demanda y control centralizado en la estación base para gestionar la transmisión en modo paquete sobre el canal dedicado. La idea básica de la propuesta, ya planteada en el AMOS ACTS'99, es gestionar las transmisiones de los distintos usuarios aprovechando la tolerancia al retardo de muchos de los servicios, para reducir en cada trama la interferencia observada por el resto de los usuarios. Como consecuencia de dicha reducción, se puede transmitir a velocidades más altas, aumentando la utilización de los recursos del sistema. Además, para soportar calidades de servicio diferenciadas el scheduler de la estación base implementa disciplinas de servicio de carácter dinámico orientadas a establecer un reparto equitativo de los recursos disponibles en función de las peticiones específicas de QoS efectuadas por las conexiones. El scheduling es una función de asignación de

recursos directamente asociada a la selección del formato de transporte. La selección, efectuada dentro de un conjunto de formatos preestablecidos se lleva a cabo dependiendo de la demanda de la fuente y de las condiciones del acceso radio. La selección se efectúa cada  $10ms$  (duración de la trama UMTS) o con una cadencia más lenta, aunque para una gestión más efectiva de la interferencia y una respuesta más rápida conviene la definición de un intervalo ( $TTI$ ) pequeño, por lo que se considera únicamente el uso de  $TTI = 10ms$ . Para incrementar la eficiencia y disminuir el retardo, la tasa de transmisión puede incrementarse durante los periodos de baja carga, considerando un formato de transporte con menor ganancia de procesado. De esta forma, en cada trama, el scheduler es responsable de ordenar las transmisiones de los paquetes correspondientes a las distintas conexiones de acuerdo con los requerimientos de tasa y dentro de sus tolerancias al retardo, mientras que el objetivo del criterio de asignación de potencias es garantizar la BLER de las transmisiones simultáneas.

Comparando la propuesta de la tesis con el estándar, en las primeras versiones de éste (release 99, R03 y R05) únicamente se consideran la transmisión sobre el canal dedicado y la selección de los formatos de transporte gestionada de forma autónoma por el propio móvil, utilizando únicamente los mensajes de señalización del controlador de recursos radio (RRC) para establecer el conjunto de formatos de transporte (TFCS) dentro del cual puede hacerse la elección. Sólo recientemente, en el *release06* y *07*, en lo que se denomina *Enhanced - DPDCH* (E-DPDCH), se contemplan como técnica de mejora para la transmisión en el enlace ascendente dos aspectos: el scheduling controlado por el nodo B (Estación Base) y la consideración de un  $TTI$  de menor tamaño (hasta el momento normalmente se consideraban  $TTI$  de 20ms, 40ms o incluso más). La motivación de las propuestas del 3GPP acerca de estas pautas de mejora coincide plenamente con la propuesta ya presentada en esta tesis. Según la línea de trabajo que se sigue actualmente, reduciendo la autonomía del móvil y permitiendo a la estación base (en conjunción con el controlador de red radio -RNC) un rápido control de los instantes y formatos de transporte a utilizar se puede conseguir un uso más eficiente de los recursos del sistema garantizando la QoS, todo ello gracias a una ordenación de las transmisiones que permite un mejor control de la interferencia o, lo que es lo mismo, de la carga en el sistema. Por otra parte, el hecho de utilizar un  $TTI$  pequeño posibilita una mayor frecuencia y una menor demora en el periodo de actualización del conjunto de formatos de transporte, lo que redundará en una mejora de la QoS.

En este sentido la propuesta efectuada a nivel MAC, en su momento fuera de las especificaciones del estándar, resulta ahora adecuada para la evaluación de las estrategias de control de admisión en un contexto de evolución hacia redes All IP en el que la transmisión en modo paquete debe ser la predominante.

#### **Estudio y propuesta de un umbral de admisión para asegurar la calidad de servicio (Capítulos 4,5 y Anexo A)**

Después de efectuar un estudio crítico y exhaustivo de las distintas propuestas efectuadas en este campo identificando las ventajas y limitaciones de cada una de ellas, así como los aspectos o ideas reutilizables, se propone umbral de admisión basado en el concepto de ancho de banda efectivo. Este tipo de planteamiento, a priori, parecía ofrecer procedimientos simples y flexibles para la integración de servicios de distinta naturaleza, facilitando asimismo la planificación y el dimensionado del sistema. Además, los resultados obtenidos en las simulaciones a nivel de enlace avalaban la viabilidad de la propuesta.

La precisión y la aplicabilidad de los métodos propuestos en la literatura en esta línea, tanto para redes fijas como para redes móviles, dependen de las suposiciones efectuadas en el modelo. El principal problema de las propuestas existentes, aplicadas al contexto de CDMA, es que los modelos considerados sólo son aplicables al mantenimiento de la *SIR* y no consideran el retardo. Los análisis para TDMA, algo más abundantes, tienen el inconveniente de considerar la independencia entre las variaciones de la capacidad y las de las fuentes, mientras que en CDMA, en realidad, existe una correlación entre el número de usuarios y la capacidad de servicio.

La propuesta desarrollada en la tesis, se basa en el desarrollo de un modelo propio que combina procedimientos basados en medidas y en modelos. Difiere en este sentido de las propuestas anteriores

ya que éstas se basan fundamentalmente en el estudio de la viabilidad de la utilización de métodos ya definidos en el contexto de redes fijas, que a menudo no son capaces de capturar todo el conjunto de variables que intervienen en el problema. Por lo general la definición del ancho de banda efectivo en esos casos se realiza en condiciones muy idealizadas del comportamiento del canal y la capacidad radio. No obstante no debe desecharse como vía futura el profundizar más en la adaptación/modificación de alguno de estos métodos aproximados a las particularidades del entorno CDMA.

El cálculo del "ancho de banda efectivo" se basa en la garantía de QoS a nivel de paquete: la probabilidad de error en la transmisión a nivel de paquete (*BLER*), el retardo y la probabilidad de descarte de los paquetes superado dicho retardo. Su obtención se hace considerando la naturaleza estocástica del tráfico multimedia y los cambios en la capacidad disponible en cada trama. El planteamiento para la obtención del ancho de banda efectivo requiere:

Caracterización de la capacidad disponible: La diferencia fundamental con otros trabajos reside en que, la caracterización se efectúa a partir de la observación del comportamiento del sistema a nivel de enlace y no solo de estudios teóricos previos que sólo tienen en cuenta la propagación.

Estimación de la capacidad de servicio asignada a cada conexión en una trama, una vez determinados los factores principales que limitan la transmisión en función del número de conexiones y del comportamiento estadístico de la agregación de fuentes

Desarrollo de un modelo analítico que relaciona dicha capacidad de servicio con la probabilidad de experimentar una determinada cota de retardo. Dicho modelo considera la existencia de buffers de almacenamiento asociados a cada conexión de carácter finito. (aspecto raramente presente, incluso en las propuestas de TDMA).

## **Evaluación de políticas de admisión en sistemas CDMA para controlar el grado de servicio (Capítulo 6)**

En general, muchas de las propuestas de la literatura asumen unos límites de scheduling perfectamente caracterizados y acotados sobre los cuales se evalúa el impacto que las variaciones de carga debidas a la movilidad de los usuarios tienen sobre la QoS a nivel de llamada (probabilidad de pérdida y de bloqueo) sin considerar en ningún caso el funcionamiento del sistema a nivel de enlace ni la garantía de QoS. Al incluir estas simplificaciones el problema que se resuelve es equivalente al de una red TDMA y por tanto el interés se centra en determinar políticas de admisión óptimas. Una vez establecido un umbral de admisión, determinar una política de admisión, que proporcione una buena utilización de los recursos dentro del sistema, es un problema más simple de manejar ya que pueden reaprovecharse muchas de las ideas y los resultados obtenidos previamente en la literatura. Sin embargo, sin la implementación del sistema completo, contemplando el funcionamiento tanto a nivel de enlace/paquete como a nivel de conexión, no puede obtenerse una evaluación del comportamiento de la red, en este caso UMTS, en unas condiciones próximas al comportamiento real del sistema. En el caso de las redes CDMA, el movimiento no solo provoca cambios en las demandas de capacidad de los terminales, sino también en la capacidad disponible tanto en la celda origen como en la celda destino, lo que añaden una variable más al problema, la propia determinación del umbral.

La aportación de la tesis en este sentido radica en que la evaluación de las políticas de admisión realmente se hace considerando o monitorizando la QoS a nivel físico, de paquete, y de conexión. A pesar de efectuarse una propuesta de reserva adaptativa, la principal contribución del trabajo es que permite obtener una evaluación del procedimiento y umbral de admisión propuesto en un contexto capaz de proporcionar prioridad a las llamadas de procedentes de handover frente a las llamadas nuevas. Además permite valorar las ventajas de la utilización del concepto de ancho de banda efectivo en el desarrollo de modelos analíticos y el uso de aproximaciones definidas en la red fija en el dimensionado de sistemas.

Por último se propone un esquema de gestión a nivel de paquete para las conexiones que se encuentran en Soft Handoff que permite controlar la interferencia.

## Resultados

Como objetivo inicial de la tesis se había planteado compensar algunos de los condicionantes fundamentales de la mayor parte de los estudios que hasta el momento podemos encontrar en la literatura, particularmente en el área del control de admisión: Como se ha comentado ya, estos estudios consideran el análisis de la capacidad y el tratamiento del control de admisión desde un punto de vista bastante teórico y aislado, contemplando únicamente aspectos relacionados con la transmisión en el canal radio y sin considerar realmente el comportamiento del sistema a nivel de enlace. De modo que, un resultado implícito de la realización de la tesis ha sido la implementación de un simulador de sistema desarrollado en C++, que permite evaluar distintas estrategias de gestión de recursos radio en la red UMTS (control de potencia, control de carga, acceso al medio y scheduling de las transmisiones de los distintos usuarios, control de admisión y control de los mecanismos de *Handover*) y del que se puede extraer información útil tanto para el diseño del control de tráfico a nivel de paquete (scheduling) y de llamada (control de admisión). El simulador, pensado como una herramienta flexible, permite incorporar con facilidad nuevas propuestas, considerar distintos tipos de tráfico, con distintos requerimientos de QoS a nivel de paquete (retardo, tasa, probabilidad de descarte de paquetes) y a nivel de conexión, patrones de movilidad y entornos de propagación.

Los objetivos iniciales de la tesis resumidos en las tres grandes líneas descritas en los apartados anteriores han alcanzado ampliamente, desarrollándose un estudio especialmente profundo en el campo del control de admisión y particularmente en la determinación de umbrales de admisión efectivos. Los resultados concretos de la tesis en cuanto a las propuestas efectuadas se desglosan a continuación:

### **Estudio, propuesta e implementación de estrategias de gestión de recursos a nivel de paquete para CDMA .**

Sobre la propuesta efectuada de control centralizado en la estación base, se ha evaluado el comportamiento de distintas estrategias de scheduling considerando el mantenimiento de las garantías de retardo y tasa, las condiciones del canal radio y el mantenimiento del canal de control.

En el capítulo 3 de la tesis se presenta una serie de resultados que ilustran el comportamiento de las propuestas efectuadas en este nivel, en términos de retardo y probabilidad de descarte de paquetes. La evaluación se efectúa en escenarios realistas que incluyen modelos de propagación de acuerdo con las recomendaciones del 3GPP, distintos grados y patrones de movilidad de los usuarios, así como distintos tipos de tráfico con diferentes requerimientos caudal y de calidad en cuanto a la tasa de errores y retardo. Para la evaluación se ha escogido un modelo de red con una topología de celdas regulares. El área de servicio está dividida en 19 celdas hexagonales, cada una de ellas servida por una estación base localizada en el centro de la celda. Se recurre a la técnica de *wrap-around* para evitar el efecto borde. Aunque el sistema está implementado de tal forma que admite distintos tipos de tráfico, con distintas estadísticas, se ha considerado un modelo genérico de servicio ráfagas con restricciones temporales conjuntamente con un modelo *W.W.W* (*World Wide Web*) para los servicios sin restricciones temporales. Para el modelado de las prestaciones a nivel físico, en cuanto a la calidad de la transmisión, se han considerado los resultados obtenidos de simulaciones *off-line* que proporcionan una descripción de tasa de error en el bit (*BER*) y en el bloque (*BLER*) en función de la relación señal útil/señal interferente ( $E_b/N_o$ ) a la entrada del receptor. Se ha adoptado el modelo de propagación macrocelular, incluyendo desvanecimientos lentos (*shadowing*), así como desvanecimientos rápidos y multicamino de acuerdo con los propuestos en las especificaciones del 3GPP.

Los resultados ofrecen de forma secuencial una visión de los distintos aspectos tratados partiendo desde las consideraciones más simples hasta llegar a las propuestas finales en las que se basa el scheduling finalmente utilizado en la evaluación y búsqueda de un umbral de admisión. Siguiendo este esquema, en primer lugar se presenta una serie de resultados que permiten obtener una valoración comparativa de estrategias de scheduling tradicionales como "*Round Robin*" y la estrategia

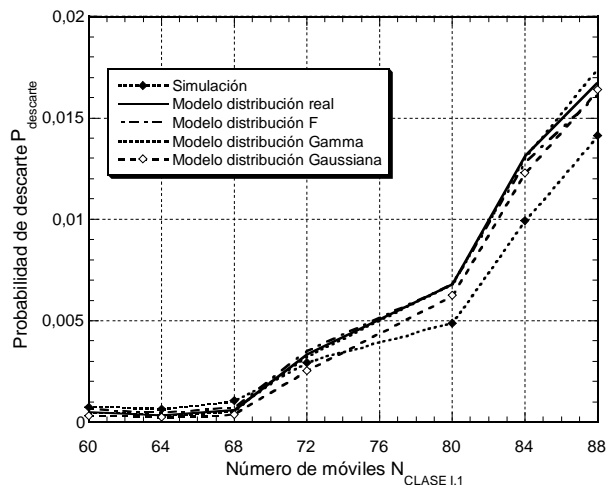
"*tiempo de vida*", combinadas con la asignación de prioridades estáticas y considerando dos alternativas básicas con respecto al mantenimiento del canal de control. Obviamente en todo momento los resultados contemplan los errores en la estimación del canal, asumiendo los casos de funcionamiento con o sin control potencia en lazo abierto. Se evidencian las mejores prestaciones de la estrategia "*marca temporal*" en cuanto al mantenimiento de la QoS en las situaciones más adversas. Un estudio detallado de los parámetros medidos en la simulación (p- ej: variaciones del ratio entre la interferencia inter e intracelular) sugiere la necesidad de limitar las variaciones en la asignación de los permisos de transmisión o los formatos de transporte utilizados para elevar la eficiencia. Se define un nuevo parámetro de prioridad que se combina con la marca asociada al tiempo de vida para conseguir este fin. Se presentan entonces una serie de resultados que permiten verificar las ventajas del algoritmo de "*marca temporal*" modificado. Sobre el algoritmo modificado se constata la conveniencia de limitar la transmisión de los terminales que experimentan malas condiciones de canal.

### Estudio y propuesta de un umbral de admisión para asegurar la calidad de servicio

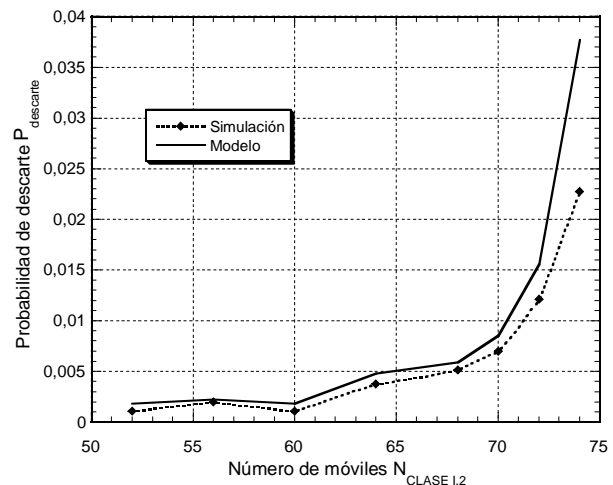
El capítulo 4 y Anexo A de la tesis, presenta un estudio crítico y exhaustivo de un amplio número de propuestas sobre umbrales de admisión en CDMA, englobadas bajo seis categorías distintas: basadas en número equivalente de usuarios, control iterativo de potencia, SIR, nivel total de potencia o interferencia recibido en la estación base, throughput y ancho de banda efectivo. El estudio no sólo se limita a la propuestas pensadas para transmisión en modo paquete, ya que el objetivo es identificar todos aquellos aspectos reutilizables en el establecimiento de un umbral de admisión eficiente en CDMA. Asimismo se incluyen en el estudio algunas propuestas para TDMA que sí consideran la transmisión en modo paquete y algunas propuestas efectuadas en el ámbito de redes fijas. Se propone finalmente un umbral basado en el concepto de ancho de banda efectivo. El trabajo combina el análisis teórico, la simulación por ordenador, la caracterización estadística de ciertas variables estocásticas del sistema, como la capacidad disponible y el desarrollo de modelos analíticos o semi-analíticos.

En el capítulo 5 de la tesis, se presentan una serie de resultados obtenidos mediante simulaciones, que permiten valorar la bondad del umbral de admisión propuesto. El objetivo de las pruebas efectuadas es cuantificar su comportamiento considerando primero escenarios con un solo servicio y después escenarios con integración de distintos tipos de servicios en condiciones de distribución homogénea y heterogénea de tráfico entre celdas. Además, se evalúan los beneficios de considerar un umbral basado en el concepto de ancho de banda efectivo frente a otros esquemas como los basados en la interferencia, utilizados frecuentemente en la literatura como base para el estudio de políticas de admisión.

En primer lugar, se comparan las probabilidades de demora y descarte obtenidas en la simulación del sistema con los resultados obtenidos con el modelo. La comparación se efectúa considerando únicamente el funcionamiento del sistema a nivel de enlace.



**Figura 1** Probabilidad de descarte. (Tráfico homogéneo con  $D_{max} = 300ms$ .)



**Figura 2** Probabilidad de descarte. (Tráfico homogéneo con  $D_{max} = 150ms$ .)

Los resultados muestran cómo el modelo propuesto se ajusta bastante bien a los resultados obtenidos de la simulación del sistema a pesar de las aproximaciones efectuadas. En la Figura 1 y Figura 2, a modo de ejemplo, se muestran algunos de los resultados obtenidos para dos servicios con restricciones temporales de 300ms y 150ms respectivamente.

Una vez determinado el ancho de banda efectivo asociado a un determinado tipo de servicio (sin considerar la implementación control de admisión alguno), el objetivo es evaluar la estabilidad del umbral. Para efectuar la evaluación se considera la política de admisión más simple: el reparto completo (*CS : Complete Sharing*), para lo cual el modelo de tráfico se amplía considerando no sólo el nivel de paquete, sino también el nivel de conexión. El proceso de generación de una conexión en la celda  $k$  se modela como un proceso de Poisson independiente con una tasa media de llegada  $\lambda_k$ . La generación de las llamadas nuevas se produce de forma uniformemente distribuida dentro de la zona de servicio de la celda, mientras que en una primera aproximación se considera la implementación de un estrategia de handover de tipo *hard - handover*, definiéndose una región de histéresis. La duración de la llamada está exponencialmente distribuida con un tiempo medio  $1/\mu_k$ .

La evaluación del comportamiento se efectúa en términos de la capacidad de mantener la calidad de la transmisión dentro de los límites de retardo especificados para los distintos tipos de servicio. Los resultados muestran que el umbral garantiza la QoS a nivel de paquete consiguiendo además una alta utilización de los recursos del sistema. Además los valores asociados a los anchos de banda efectivos pueden obtenerse para cada tipo de servicio bajo consideraciones de tráfico uniforme, aplicándose un control de admisión de carácter lineal al considerar la integración de servicios de distinta naturaleza. Se observa como la pequeña desviación del umbral de admisión real con respecto al comportamiento lineal puede compensarse definiendo un pequeño margen de guarda..

Comparando las ventajas de la técnica propuesta frente a otros esquemas como los basados en la interferencia frecuentemente utilizados en la literatura y usados a menudo como base para el estudio de políticas de admisión, se concluye que mientras los umbrales basados en la interferencia requieren una adaptación continua del umbral para adecuarse a los condicionantes del sistema, a las características del tráfico y en particular a los diferentes requerimientos de calidad de los distintos servicios, los valores de "ancho de banda efectivo" resultan ser parámetros con una estabilidad muy elevada, experimentando variaciones muy ligeras. Aunque los valores deban obtenerse en base a modelos estocásticos y semi-analíticos, el análisis exacto no es necesario en cada escenario y los valores obtenidos asumiendo distribuciones de tráfico homogéneas en cuanto a tipos de servicio pueden utilizarse al considerar la mezcla de servicios, independientemente de si la distribución de tráfico entre las celdas es homogénea o es heterogénea. El hecho de que el umbral sea estable no implica que se puede eludir en su implementación real un esquema adaptativo, fundamentado en la utilización de un parámetro de control basado en medidas, que active la actualización de los valores de ancho de banda efectivos considerados.

### **Evaluación de políticas de admisión en sistemas CDMA para controlar el grado de servicio**

El esquema de reserva adaptativa se ha mostrado efectivo para tratar de forma diferenciada las llamadas según su tipo (llamadas nuevas o de handover). En cuanto al desarrollo de modelos analíticos simples que faciliten el dimensionado, el modelo aproximado de Roberts, adaptado para incorporar las particularidades asociadas a la estrategia de reserva variable considerada, ha proporcionado unos resultados bastante buenos en términos de adecuación del modelo al comportamiento "real" del sistema obtenido de las simulaciones. Esto avala una de las ventajas establecidas a priori con respecto a la utilización del concepto de "ancho de banda efectivo" en la definición del umbral.

Considerando el sistema de scheduling centralizado, cuando el terminal se encuentra en "Soft Handover", en propuesta efectuada, el terminal escoge de entre las asignaciones de scheduling recibidas de las estaciones base a las que está enganchado aquella que implica una potencia de transmisión más pequeña para misma tasa de transmisión. Este algoritmo permite asegurar que la calidad de servicio se mantiene para todos los usuarios, ya que se garantiza que el nivel de interferencia recibido en las estaciones involucradas no supera el valor estimado a priori.

## Aplicabilidad

El trabajo desarrollado en la tesis se enmarca plenamente en el contexto de la propuesta de mejoras para la adaptación de los sistemas actuales 3G a los escenarios All IP definidos en el contexto de redes 4G. El diseño de mecanismos de gestión de recursos para garantizar la calidad de servicio se complica aún más cuando las redes evolucionan desde los tradicionales esquemas de conmutación de circuitos a los esquemas de conmutación de paquetes y particularmente cuando la técnica de acceso es CDMA. Técnica CDMA combinada con la transmisión en modo paquete proporciona gran flexibilidad para tratar de forma diferenciada distintos tipos de servicios con calidades de servicios determinadas. Sin embargo el poder explotar dicha flexibilidad requiere de un diseño más complejo y una coordinación más eficiente entre todas aquellas estrategias de gestión de recursos que operan en el acceso radio (control de potencia, control de carga a través de MAC/Scheduling, control de admisión, gestión de handover, etc).

El trabajo desarrollado en esta tesis, que combina el estudio teórico, la simulación y el desarrollo de modelos analíticos, proporciona una estimación preliminar de las ventajas que puede tener la implementación por ejemplo de un control centralizada en las estaciones base y fundamentalmente el diseño de mecanismos de control de admisión basado en el concepto del ancho de banda efectivo.

A pesar de que el planteamiento inicial pretendía ser genérico para cualquier red celular basada en la técnica de acceso CDMA, el hecho de tomar como referencia desde el inicio el estándar UMTS, ha motivado que se hayan tenido en cuenta muchas de las restricciones prácticas impuestas por un sistema real. Esto facilita la adaptación de las propuestas, que obviamente atendiendo a que los resultados obtenidos lo han sido únicamente por simulación, tienen carácter de estudio de viabilidad.

En los que se refiere por ejemplo al umbral de admisión, como se ha comentado implementación real debería incluir algún esquema adaptativo fundamentado en la utilización de un parámetro de control basado en medidas que active la actualización de los valores de ancho de banda efectivos considerados. En la figura se muestra un posible esquema, que se inspira en una propuesta de Dziong (ver referencia [Dziong96] en la tesis) para un planteamiento de umbral basado en su caso en el nivel de interferencia.

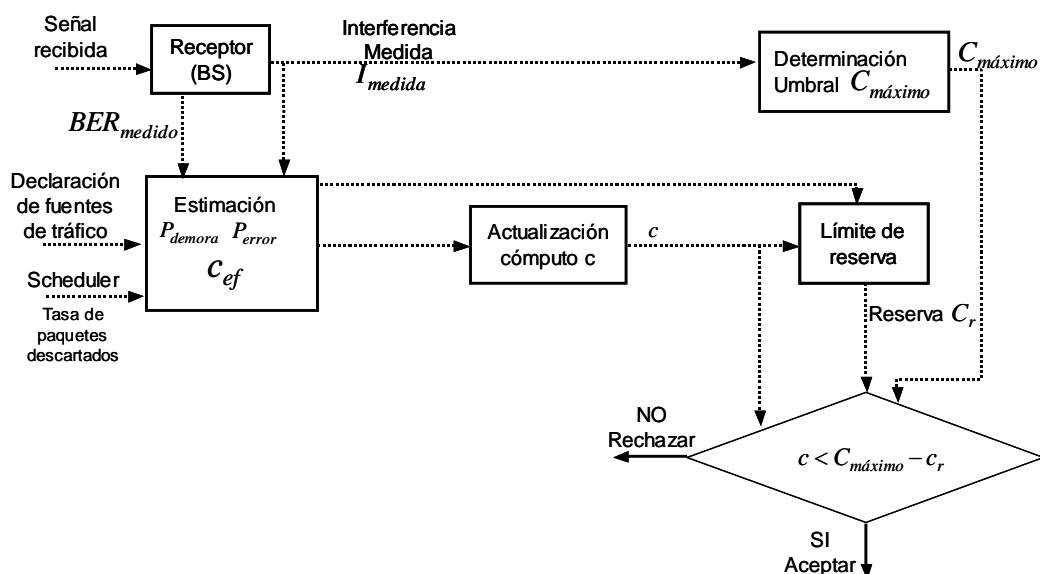


Figura 3 Esquema de funcionamiento.

Los trabajos más significativos, resultantes de la realización de esta tesis doctoral (publicados fundamentalmente entre los años 2001 y 2004), han tenido cabida en un par de proyectos financiados por un operador de telefónica móvil dentro de un programa de desarrollo de UMTS.

## ANEXO

### Proyectos o contratos de investigación

El fruto de la experiencia adquirida durante desarrollo de la tesis, particularmente en la gestión de recursos a nivel MAC/Scheduling y a en control de admisión, se refleja en dos proyectos en colaboración con Telefónica móviles de España en el ámbito del programa de desarrollo de UMTS, en el que se ofrecen los resultados ampliados de estos trabajos y en los cuales la autora de la tesis desarrolla su actividad y actúa como responsable de los módulos correspondientes.

- Implementación de un sistema de telemonitorización en vehículos de emergencias médicas sobre una red UMTS" Telefónica Móviles de España 2003-2004 (Universidad de Zaragoza).
- "Servicios avanzados de telemedicina sobre UMTS: Demostración sobre una plataforma de pruebas en un escenario IPv6 y propuesta de gestión de recursos del acceso radio" Telefónica Móviles de España. 2004-2005 (Universidad de Zaragoza).

La tesis se desarrolló originalmente en el ámbito de dos proyectos CICYT.

- "Técnicas de Acceso en Modo Paquete para Comunicaciones Móviles Celulares" Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) ref. nº TIC 98-0684, 1998-2001 (Universidad Politécnica de Cataluña).
- Desarrollo de una plataforma de simulación integrada UMTS: Aplicación a sistemas móviles de emergencia médicas. Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) ref. nº CICYT TIC2001-2481, 2002-2004 (Universidad de Zaragoza)

éste último de carácter interdisciplinar en el que se definen dos grandes líneas de actuación: el desarrollo de una aplicación telemédica sobre UMTS y otra investigadora en el ámbito de la gestión de recursos radio sobre UMTS. Es en esta última, donde la autora de la tesis desarrolla su actividad siendo responsable de las tareas y módulos correspondientes.

**Resultados (publicaciones en revistas y congresos a los que ha dado lugar el trabajo de la tesis):**

### CONGRESOS

- (1) A. Hernández, Fernando Casadevall, "Scheduling and Quality of Service in W-CDMA", Proceedings AMOS ACTS MOBILE SUMMIT, Sorrento (Italia).1999, pp. 795-800.
- A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall, "Scheduling with Quality of Service Constraints for Real-Time and Non-Real-Time Traffic in W-CDMA.", Proceedings IEEE Wireless Personal Multimedia Communications WPMC'01 Aalborg (Dinamarca), 2001, pp 1543-1548.
- A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall. "Multimedia Traffic Management for Packetized Uplink Transmission in WCDMA UMTS", Proceedings European Wireless 2002. Florencia (Italia), 2002, pp. 426-432.
- (2) A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall. "Performance Analysis of Packet Scheduling Strategies for Multimedia Traffic in WCDMA.", Proceedings IEEE VTC'2002 Spring, Birmingham, Alabama (USA), 2002, pp. 155-159.
- (3) A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall. "Capacity Analysis and Call Admission Techniques for CDMA Packet Transmission Systems", Proceedings IEEE/IFIP MWCN'02, Estocolmo (Suecia) 2002, pp. 355-359.
- A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall, "Capacity Analysis for Uplink Connection Admission



- Control in CDMA Packet Transmission Systems” , Proceedings IEEE PIMRC'02 Lisboa (Portugal) 2002, pp. 668-672.
- A. Hernández, A. Valdovinos “Uplink Admission Control for Multimedia Packet Transmission in CDMA”, COST 273 Lisboa (Portugal) 2002, pp- 1-14
  - (4) A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall. “Uplink Call Admission Control Techniques for Multimedia Packet Transmission in UMTS WCDMA System” Proceedings: IEE 5th European Personal Mobile Communications Conference 2003, Glasgow (UK), pp. 209-213.
  - (5) A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall. Capacity “Analysis and Performance Evaluation of Call Admission Control for Multimedia Packet Transmission in UMTS WCDMA System” Proceedings IEEE WCNC 2003 New Orleans (USA), pp. 1550-1555.
  - J. R. Gallego, A. Hernández, M. Canales, A. Valdovinos, “Adaptive Multimedia Traffic Multiplexing for Dedicated Channels in the UMTS System, IEEE Symposium on Computers and Communications, Alejandría (Egipto) 2004, pp. 448-453.
  - M. Canales, A. Hernández, J.R. Gállego, A. Valdovinos, “Performance Evaluation of Adaptive Resource Sharing Strategies for UMTS Multiservice Mobiles”, IEEE VTC'04 Spring Milan (Italia), 2004, pp. 1579-1583.
  - A. Hernández, A. Valdovinos, F. Casadevall. “QoS and Radio Resource Management in Multimedia Packet Transmission for 3G Wireless IP Networks” Proceedings IEEE VTC'04 Spring Milan (Italia), 2004, pp. 1983-1987.
  - A. Hernández Solana, A. Valdovinos Bardají, “Scheduling and Call Admission Control Schemes in Soft Handoff for Packet Switched Transmission in WCDMA Networks”, Proceedings IEEE VTC'04 Fall, Los Ángeles (Estados Unidos), 2004, pp.3486-3490.
  - A. Hernández Solana, A. Valdovinos Bardají, “Threshold Schemes Comparison for Call Admission Control in 3G Packet-Based CDMA Wireless Networks”. Proceedings WPMC'04, Abano Terme (Italia), 2004, pp. 421-426.

## REVISTAS

- M. Canales, A. Hernández, J.R. Gállego, A. Valdovinos, “Adaptive Resource Sharing Strategies for UMTS Multiservice Mobiles” Kluwer Telecommunications Systems, 2005, pp. 151-167.
- J.R. Gállego, A. Hernández, M. canales, J. Lafuente, A. Valdovinos, J. Fernández, “Performance Analysis of Multiplexed Medical Data Transmission for mobile Emergency Care Over the UMTS Channel” IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine. Marzo 2005, pp. 13-22.

## Referencias de otros autores a los artículos publicados

### Referencia (5)

- G. S. Paschos, I. D. Politis, S. A. Kotsopoulos, “A Quality of Service Negotiation-Based Admission Control Scheme for WCDMA Mobile Wireless Multiclass Services”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 54, no. 5, September 2005, pp. 1875-1886 (Referencia [15]).
- E. Wallenius “Control and Management of Multi-Access Wireless Networks”, Jyväskylä University Printing House, 2005, ISSN 1456-5390. (Referencia [77])

### Referencia (4)

- K. Jun, S. Kang, “Bandwidth Sharing of Low Priority Services for Efficient Call Admission Control in Cellular Networks”, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3462, Jan 2005, pp. 1379 - 1382 (Referencia [3])
- K. Jun, S. Kang, “Call Admission Control for Next Generation Cellular Networks Using on

- Demand Round Robin Bandwidth Sharing”, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3421, January 2005, pp. 543 – 550 (Referencia [5])
- D. H. Kim, K. Jun, “The Effect of the QoS Satisfaction on the Handoff for Real-Time Traffic in Cellular Network”, Lecture Notes in Computer Science, Volume 3726, October 2005, pp. 1106 - 1111 (Referencia [6])

### Referencia (3)

- H. Sun, C. Williamson, “Simulation Evaluation of Call Dropping Policies for Stochastic Capacity Network”, SCS International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems, July 2005, (Referencia [9]).
- A. Lakas, F. Sallabi, M. Boulmalf, K. Shuanib, “A Proactive Resource Management in 3G Networks, Proceedings IEEE Seventh IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks (MWCN’05), 2005 (Referencia [10])
- A. Lakas, F. Sallabi, M. Boulmalf, K. Shuanib, “Proactive QoS Provisioning in Wireless Networks” 6th UAEU Annual Research Conference, 24-26 April 2005, Al-Ain, UAE (Referencia [11]).

### Referencia (2)

- Mischa Schwartz, Mobile Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005, ISBN 0521843472 (Referencia Solana pp.440)
- B. Xu, Z. Gao, W. Tang, S. Li, “A Robust Packet Scheduling Strategy for Packet Services over Dedicated Channels in WCDMA System”, IEEE VTC’04 Fall, Los Angeles (USA), Sep 2004, pp. 4854-4858, (Referencia [4]).
- B. Xu, Z. Gao, W. Tang, Z. Li, Z. Xu, X. li, “A novel packet scheduling strategy for packet service over downlink dedicated channels in WCDMA Systems” . Proceedings IEEE ICCAS Conference, June 2004, pp.462-466 (Referencia [7]).

### Referencia (1)

- M. H. Ahmed, H. Yanikomeroglu, S. Mahmoud, “Interference Management using Basestation Coordination in Broadband Wireless Access Networks”, Wiley Wireless Communications and Mobile Computing, 2006. (Referencia [1]).
- M. H. Ahmed, H. Yanikomeroglu, S. Mahmoud, D. Falconer, “Scheduling of Multimedia Traffic in Interference - Limited Broadband Wireless Access Networks”, the 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC’02), October 2002, pp. 27-30 (Referencia [1]).