

# Control de admisión y gestión de recursos en movilidad en sistemas móviles 4G

## RESUMEN

Esta propuesta se enmarca dentro de la intensa actividad investigadora que en el ámbito de desarrollo de los sistemas móviles celulares de banda ancha se está llevando a cabo. En concreto, se centra en los estándares que contemplan movilidad total, marco en el que se pone de manifiesto un uso generalizado de técnicas OFDMA y en el que los sistemas con más potencial, la familia de los IEEE802.16 y LTE-A (Long Term Evolution- Advanced) de 3GPP, todavía en fase de estandarización, mantienen unos objetivos (en cuanto a servicios, cobertura y capacidad) y planteamientos de tecnología de base bastante similares. En este contexto, el trabajo fin de máster propuesto se centra en el desarrollo de mecanismos eficientes de gestión de recursos en la interfaz radio (RRM: Radio Resource Management). En concreto, el trabajo se centra en la revisión del estado del arte y especificación de mecanismos de control de admisión, desarrollados sobre la base de las prestaciones arrojadas por las estrategias de gestión de recursos radio, en despliegues convencionales (macrocelulares).

El trabajo implica la caracterización de la capacidad disponible (límites de operación del sistema) impuesta por las estrategias de gestión de recursos a nivel de paquete, la caracterización del consumo de capacidad de los terminales y la definición de criterios de admisión. En general, será un aspecto a tener en cuenta el hecho de que la cantidad de recursos temporales y frecuenciales necesarios para satisfacer un determinado servicio está condicionado, de forma específica por el comportamiento de las estrategias de RRM a nivel de paquete (scheduling frecuencial y temporal, en conjunción con el esquema de coordinación y gestión multicelular de recursos e interferencia). No obstante, a pesar de que el diseño de estas estrategias está dirigido a igualar consumos y servicios alcanzados en toda la cobertura, lo cierto es que el consumo es mayor para los usuarios del “exterior” de la celda o, de forma más realista, los situados en zonas de malas condiciones de canal o interferencia. Esto es, el consumo será dependiente de la zona en la que se encuentre el terminal. Por otra parte, el movimiento de los terminales será un aspecto a tener en cuenta para ajustar la estimación de capacidad.

Por otra parte, el uso de una estimación de consumo, obtenida en condiciones controladas, garantizaría, conjuntamente con la aplicación de un control de admisión, la calidad de servicio a escala temporal de paquete, bajo la suposición de un reparto promedio más o menos estático de recursos. Sin embargo, la estimación puede desviarse significativamente si se producen cambios en las condiciones de distribución de carga debido bien a la movilidad de terminales o a la activación y desactivación de servicios. Estos cambios repercuten en cambios globales en las condiciones de distribución de interferencia, en consecuencia también en cambios de la calidad observada y por tanto en el número de bloques de recursos radio necesarios para mantener la satisfacción de un servicio. Las variaciones no solo afectan al terminal que accede y a aquellos con los que se multiplexa su tráfico, sino que se propaga a otros nodos y terminales, pudiendo producirse, si no se controlan los efectos, una degradación global del servicio. Todos estos

aspectos serán tenidos en cuenta de forma explícita en el diseño del control de admisión. En esta línea, el trabajo fin de master incluye la consideración de procedimientos de gestión de recursos, incluido la aplicación de estrategias de reserva adaptativa y preventiva de recursos, en situaciones de movilidad (handover).

Para llevar a cabo el trabajo fin de máster, se partirá de un simulador programado en C++ sobre el que se implementarán las distintas propuestas para posteriormente ser evaluadas a través de las estadísticas recogidas. Finalmente, se expondrán las conclusiones extraídas del análisis de los resultados obtenidos.

# Índice de Contenidos

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. PRESENTACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA TESIS FIN DE MÁSTER .....	3
1.3. METODOLOGÍA DE LA TESIS FIN DE MÁSTER.....	4
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA .....	5
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>6</b>
<b>SISTEMA</b> .....	<b>6</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	6
2.2. CARACTERÍSTICAS DEL DESPLIEGUE DEL SISTEMA.....	7
2.3. CAPA FÍSICA.....	8
2.4. PROCEDIMIENTOS DE GESTIÓN DE RECURSOS.....	10
2.4.1. <i>Mecanismo de coordinación de la interferencia</i> .....	10
2.4.2. <i>Scheduling</i> .....	13
2.5. MODELO DE MOVILIDAD .....	14
2.6. MODELADO DE CONEXIONES.....	15
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>16</b>
<b>CONTROL DE ADMISIÓN</b> .....	<b>16</b>
3.1. DEFINICIÓN Y CONTEXTO.....	16
3.2. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE CAC.....	19
3.2.1. <i>Estimación de carga</i> .....	20
3.2.2. <i>Propuesta básica de admisión</i> .....	23
3.2.3. <i>Políticas de admisión dirigidas al tratamiento diferenciado de servicios o tipos de llamadas</i> .....	36
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>47</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>47</b>
<b>ANEXO A</b> .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.1. INTRODUCCIÓN .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.2. TIPOS DE SERVICIO .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.3. CONTROL DE ADMISIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.3.1. <i>Tipos de Control de Admisión (CAC)</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.3.1.1 <i>Estáticos</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.3.1.2 <i>Dinámicos</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.4. DESCRIPCIÓN DE DISTINTOS ALGORITMOS DE CAC ENCONTRADOS EN LA LITERATURA .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
A.4.1. <i>Control de admisión local básico</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.4.2. <i>Incorporación de mecanismo que evita usuarios que monopolizan los recursos</i> . ¡Error! Marcador no definido.	
A.4.3. <i>Reserva de recursos estática aplicando esquema “fraccional”</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.4.4. <i>Reserva de recursos estática para handover y CAC adaptado a la posición del usuario</i> . ¡Error! Marcador no definido.	
A.4.5. <i>CAC dinámico. Decisión basada en QoS y GoS</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.4.6. <i>CAC dinámico con inclusión del retardo como criterio de QoS</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.4.7. <i>CAC dinámico y adaptado a cada posible tipo y naturaleza de servicio</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.4.8. <i>Utilización del balanceado de carga</i> .....	¡Error! Marcador no definido.
A.4.9. <i>Balanceado de carga aplicando un método distinto</i> .....	¡Error! Marcador no definido.

A.4.10. Control de congestión.....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
A.4.11. Mecanismo que considera explícitamente el esquema de coordinación de interferencias aplicado... <b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>	

<b>ANEXO B.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
---------------------	--------------------------------------

<b>DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
---------------------------------------	--------------------------------------

B.1. INTRODUCCIÓN .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
B.2. CAPA FÍSICA.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
B.2.1. Tecnologías de capa física.....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.2. Modelado del canal radio y la interferencia.....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.2.1 Pérdidas de propagación .....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.2.2 Desvanecimientos lentos.....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.2.3 Desvanecimientos rápidos .....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.2.4 Ruido gaussiano .....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.3. Características de transmisión y recepción .....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.3.1 Transmisión de la estación base.....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.3.2 Recepción del terminal.....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.2.4. Modelado de los CQIs .....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>
B.3. MODELADO DE CONEXIONES Y PROCESOS ARQ .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
B.4. MODELO DE FUENTE DE TRÁFICO .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
B.5. DESCRIPCIÓN TÉCNICA .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
B.5.1. Estructura de clases de la plataforma de simulación.....	<b><i>¡Error! Marcador no definido.</i></b>

<b>ANEXO C.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
---------------------	--------------------------------------

<b>PRUEBAS ADICIONALES .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
----------------------------------	--------------------------------------

C.1. INTRODUCCIÓN .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
C.2. ESTIMACIÓN EN EL CONSUMO DE CAPACIDAD .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
C.3. VALORES ADICIONALES DEL ESTUDIO DEL IMPACTO DEL PARÁMETRO $\Xi$ .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
C.4. ESTUDIO DEL PERIODO ÓPTIMO EN LA RESERVA DINÁMICA Y LOCAL .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

<b>ACRÓNIMOS.....</b>	<b>49</b>
-----------------------	-----------

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>51</b>
--------------------------	-----------

# Índice de tablas

<b>Tabla 1-1 - Clases de QCI (QoS Class Identifier) definidas.....</b>	<b>2</b>
<b>Tabla 3-1 - Parámetros de las simulaciones.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 3-2 – Parámetros de configuración del sistema .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 3-3 - Consumo medio por zona .....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 3-4 - Nomenclatura utilizada en las políticas de admisión .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 3-5 - Condiciones utilizadas en la política de admisión .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 3-6 - Valores de consumo simulados .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 3-7 – Política de admisión para la configuración 1.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 3-8 - Política de admisión para la configuración 2 .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla A-1 - Nomenclatura más utilizada en las publicaciones .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla A-2 - Casos por los cuales se puede lanzar un proceso de control de admisión .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla B-1 - Parámetros relacionados con la capa física y sus valores .</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla B-2 - Modelos de propagación multicamino .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla B-3 - Parámetros de VoIP .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla B-4 - Parámetros del tráfico de video en tiempo real .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

# Índice de figuras

Figura 1-1 – Metodología utilizada .....	4
Figura 1-2 - Diagrama de Gantt de la tesis fin de máster .....	4
Figura 2-1 - Ejemplo de la técnica wrap-around para 19 celdas .....	7
Figura 2-2 - División de la celda en zonas .....	8
Figura 2-3 - Reúso Frecuencial Fraccional con Ordenación y Potencia Adaptativa (FFRopa) .....	12
Figura 2-4 - Ejemplo de adaptación de la potencia en FFRopa .....	13
Figura 3-1 - Consumo medio por usuario.....	22
Figura 3-2 - Probabilidad de dropping para diferentes cargas .....	23
Figura 3-3 – Resultados de la estimación de consumo para valores medios .....	27
Figura 3-4 – Resultados de la estimación de consumo para valores altos .....	27
Figura 3-5 – Resultados de la estimación de consumo para valores bajos .....	28
Figura 3-6 – Resultados de la estimación de consumo para valores promedio en toda la celda ..	29
Figura 3-7 – Consumo de valores medios aplicando generación heterogénea .....	29
Figura 3-8 – Consumo valores promedio en toda la celda aplicando generación heterogénea....	30
Figura 3-9 –Resultados para el CAC base fijando $\xi = 1$ .....	31
Figura 3-10 - Resultados para el CAC base fijando $\xi = 2$ .....	31
Figura 3-11 - Resultados para el CAC base fijando $\xi = 3$ .....	32
Figura 3-12 - Resultados para el CAC base usando sólo un criterio de admisión en zona 2 .....	33
Figura 3-13 - CAC base, un criterio de admisión en zona 2 aplicando generación heterogénea ...	33
Figura 3-14 –Resultados utilizando bloqueo para CAC en zona, sector y celda .....	34
Figura 3-15 –Resultados utilizando bloqueo para CAC sólo en celda .....	35

<b>Figura 3-16 - CAC con bloqueo sólo en celda aplicando movimiento sesgado hacia zona 2 .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 3-17 - Dropping y bloqueo para reserva de recursos estático. Configuración 1 .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 3-18 - Dropping y bloqueo para reserva de recursos estático. Configuración 2 .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 3-19 – Comparativa entre las configuraciones de reserva estática y CAC base .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 3-20 - Resultados para la reserva de recursos dinámico local periodo 50s. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 3-21 – Resultados para la reserva de recursos dinámico local periodo 70s. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 3-22 - Comparativa entre las configuraciones de reserva dinámica local y CAC base .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 3-23 - Resultados para la reserva de recursos dinámica distribuido margen 2 .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 3-24 - Resultados para la reserva de recursos dinámica distribuido margen 3 .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 3-25 – Resultados para la reserva de recursos dinámico distribuida margen 4 .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 3-26 - Comparativa entre configuraciones de reserva dinámica distribuida y CAC base ...</b>	<b>45</b>
<b>Figura A-1 - Esquema de decisión del algoritmo 3 .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-2 - Algoritmo de ajuste del parámetro <math>\lambda</math> .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-3 - Algoritmos de canal de guarda .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-4 - Distribución de la celda en anillos .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-5 - Diagrama de decisión del algoritmo .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-6 - Esquema de modificación del umbral <math>Th_{HO}</math> .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-7 - Diagrama de decisión .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-8 - Distribución de los RBs utilizando SFR .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-9 - Distribución de los recursos en 3 sectores .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-10 - Redistribución de los recursos hacia el exterior .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-11 - Redistribución de los recursos hacia el interior .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-12 - Redistribución de los recursos hacia el interior .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-13 - Redistribución de los recursos en el caso 2 .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura A-14 - Redistribución de los recursos en el caso 3 .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

---

<b>Figura B-1 - Esquema general del simulador .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura B-2 - Espectro de un sistema OFDMA .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura B-3 - Distribución de las subportadoras OFDM en LTE FDD .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura B-4 - Ejemplo de propagación multicamino .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura B-5 - Patrón de radiación .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura B-6 - Modelo temporal de generación de CQIs .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura B-7 - Esquema de clases del simulador .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura B-8 - Representación de los 7 canales de cada UE .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura C-1 - Probabilidad de dropping para la estimación del consumo media y alta .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura C-2 - Resultados para el CAC base fijando <math>\xi = 4</math>.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura C-3 - Resultados para el CAC base fijando <math>\xi = 5</math>.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura C-4 - Resultados para el CAC base fijando <math>\xi = 6</math>.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura C-5 - Comparación entre la reserva dinámica local y el CAC base para valores pequeños .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura C-6 - Comparación entre la reserva dinámica local y el CAC base para valores grandes .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Presentación

En los últimos años hemos sido testigos del gran desarrollo en el mundo de las redes de acceso celular, del ya obsoleto GSM, pasamos a GPRS, el cual sería el preludeo de la tecnología de acceso a redes celulares que vino años más tarde, comercialmente llamada 3G. Esta tecnología prometía un acceso ubicuo a internet a unas tasas inimaginables años atrás que cubrirían las necesidades de todo tipo de usuarios. Años más tarde y debido a un crecimiento feroz del número de usuarios y de las demandas de datos requeridas, comenzó, por una parte, el desarrollo de lo que serían las redes celulares de nueva generación y por otra, la mejora de 3G para aumentar su capacidad. Los esfuerzos en esta última línea dieron como resultado evoluciones ampliamente usadas actualmente como son HSDPA, HSUPA y HSPA+.

Sin embargo, la creciente demanda de servicios por parte de los usuarios sigue sin detenerse y existen estudios que indican que este crecimiento no va a ralentizarse. Cisco Systems, en su último informe sobre las tendencias globales de tráfico IP del 2011[1] publica que el tráfico de datos a través de redes móviles crecerá 26 veces entre 2010 y 2015 y alcanzará los 6,3 exabytes mensuales en 2015. Es por ello que la implantación de una nueva red de acceso que cumpla con los requerimientos de estos usuarios se hace cada vez más urgente. La tecnología LTE (Long Term Evolution), y su evolución LTE-Advanced, suponen la nueva generación de redes de acceso celular y en ellas tienen puestas sus esperanzas las operadoras móviles mundiales que miran con preocupación los datos de ciudades como Nueva York, donde el número máximo asumible de usuarios 3G ya ha sido sobrepasado en alguna ocasión.

LTE-Advanced es la tecnología candidata del 3GPP (Third (3rd) Generation Partnership Project) para el llamamiento que en 2007 realizó la ITU con objeto de estandarizar a nivel mundial la que sería la nueva generación de redes de comunicaciones móviles conocida como IMT-Advanced. Esta evolución requiere, entre otros aspectos, de una total compatibilidad con las tecnologías previas y unas tasas de pico de hasta 100 Mbps para entornos de alta movilidad y 1 Gbps para baja movilidad [2]. La otra tecnología candidata es el estándar IEEE 802.16m, presentada por el IEEE y más conocida como WiMAX.

LTE, es un proyecto impulsado por el ETSI y el 3GPP, cuyo objetivo principal era lograr dar servicio a más usuarios que la tecnología 3G proveyéndolos de altas capacidades tanto uplink como downlink. Comenzó su andadura en 2004 y en el verano de 2009 fue probado satisfactoriamente por primera vez. Países como Suecia, ya han finalizado parte de su despliegue y ya es posible

utilizar versiones iniciales de esta tecnología en aquellos países. Técnicamente, LTE supone una revolución puesto que evoluciona la capa física, el acceso radio y la arquitectura, buscando una jerarquía lo más plana posible y basada completamente en IP. De este modo, se logra reducir retardos y aumentar la compatibilidad con los servicios proporcionados por internet.

Una de los puntos en los que LTE (y LTE-Adv) más han evolucionado con respecto a 3G ha sido en todo lo relacionado con la calidad de servicio (QoS). El propósito es lograr garantizar de manera eficiente la QoS de los diferentes servicios que pueden ser consumidos por los usuarios: audio/video streaming, voz sobre IP (VoIP), etc. Tiempo atrás, las únicas funcionalidades ofrecidas a los usuarios eran las llamadas de voz y el envío de mensajes cortos (SMS), con lo cual la gestión de recursos era mucho más sencilla. En estos momentos, existe una gran heterogeneidad en los servicios que un usuario puede demandar a la red celular, debido al gran éxito de plataformas de propósito general como Android o iOS. Por ello, LTE, define seis tipos de QoS, los cuales tratan de cubrir todas las posibilidades existentes. La tabla 1 las especifica, indicando el retardo máximo asumible en las capas RLC (Radio Link Control) y MAC (Medium Access Control) (L2PDB) y el ratio máximo de paquetes perdidos asumible (L2PLR).

**Tabla 1-1** - Clases de QCI (QoS Class Identifier) definidas

QCI	Bearer type	L2PDB	L2PLR	Example services
1	GBR	Low (<50ms)	Low (<10 <sup>-6</sup> )	RT: Gaming
2	GBR	Medium (<100ms)	High (<10 <sup>-3</sup> )	RT: Voice, Video (live)
3	GBR	High (<300ms)	Low (<10 <sup>-6</sup> )	RT: Video (playback)
4	Non-GBR	Low (<50ms)	Low (<10 <sup>-6</sup> )	NRT: SIP/SDP (IMS signalling)
5	Non-GBR	Medium (<100ms)	High (<10 <sup>-3</sup> )	NRT: Web browsing RT: Interactive gaming
6	Non-GBR	High (<300ms)	Low (<10 <sup>-6</sup> )	NRT: Bulk data transfer RT: Video (playback)

Debido a esta heterogeneidad, la gestión de recursos en LTE es mucho más compleja de lo que era en anteriores redes de acceso celular y debe aprovechar los distintos requerimientos para lograr una diversidad multiusuario y obtener una eficiencia máxima de los recursos, lo cual significa poder dar servicio al máximo número de usuarios proveyéndoles de la QoS solicitada por cada uno de ellos.

En entornos de movilidad, la gestión de recursos añade un grado de dificultad. Por una parte, la demanda de recursos tiende a ser muy cambiante a causa de la variabilidad del canal experimentado. Por otra parte, las estaciones base ya no sólo deben satisfacer a sus usuarios si no que deben prever posibles traspasos celulares, más conocidos como handovers. En estos escenarios, el control de admisión cobra relevancia y es esencial para mantener al sistema dentro de los parámetros de carga y usuarios asumibles.

Los usuarios esperan que la estación base (BS) les proporcione un servicio estable y garantizado durante toda su conexión. Sin embargo, debido a que el número de recursos es limitado, tratar de maximizar el número de usuarios servidos por la estación base puede degradar la capacidad ofrecida a todos ellos. Para evitar estas situaciones, el control de admisión, cada vez que una nueva conexión requiera servicio, comprobará que la celda podrá asumir esa nueva carga sin degradar la QoS de las conexiones existentes. En caso de no permitir la entrada a la nueva conexión, ésta sería bloqueada y por tanto se perdería.

Se distinguen dos situaciones en las que la conexión queda descartada por falta de recursos: bloqueo de nuevas conexiones o pérdida de conexiones por handover. El primer tipo se refiere a la situación en la cual aparece una solicitud de conexión dentro de la celda que no puede comenzar por falta de recursos, mientras que la segunda se refiere a las conexiones pertenecientes a un usuario, que debido a su movilidad, recibe mejor calidad de señal de otra celda y realiza un cambio a ésta. Si la celda objetivo, en ese momento, no posee recursos suficientes, la conexión será descartada. Desde el punto de vista del usuario, es más frustrante perder la conexión una vez ésta había comenzado, que no poder empezarla. Consecuentemente, los mecanismos de control de admisión deben priorizar de alguna manera las conexiones de handover para así lograr reducir el número de pérdidas de este tipo de conexiones lo máximo posible.

## **1.2. Objetivo y alcance de la tesis fin de máster**

Esta tesis fin de máster se centra en el análisis, simulación y comparación de distintos controles de admisión recogidos del estado del arte actual para la tecnología LTE. Para ello, se realizará primero una caracterización de la capacidad disponible en la celda y del consumo de capacidad que efectúan los terminales, además de una definición de los criterios de admisión a aplicar. Estos, serán diseñados con el objetivo de lograr una integración óptima con las demás estrategias de gestión de recursos y una mejora que permita reducir la probabilidad de pérdida de conexión y bloqueo entre otras estadísticas. En concreto, se pueden definir los siguientes objetivos:

- Revisión del estado del arte referente a los mecanismos de control de admisión en redes de acceso móvil de última generación.
- Caracterización del consumo y capacidad requerida por los usuarios.
- Definición de distintos criterios de admisión teniendo muy presente las limitaciones que las estrategias RRM (Radio Resource Management) imponen.
- Implementación en un simulador C++ de los controles de admisión diseñados para la obtención de estadísticas y posterior comparación.
- Comparación de resultados y obtención de conclusiones.

### 1.3. Metodología de la tesis fin de máster

Esta tesis fin de máster se ha desarrollado siguiendo una metodología común a todas las investigaciones que utilizan alguna plataforma software para obtener resultados. La figura 1, muestra la metodología utilizada.

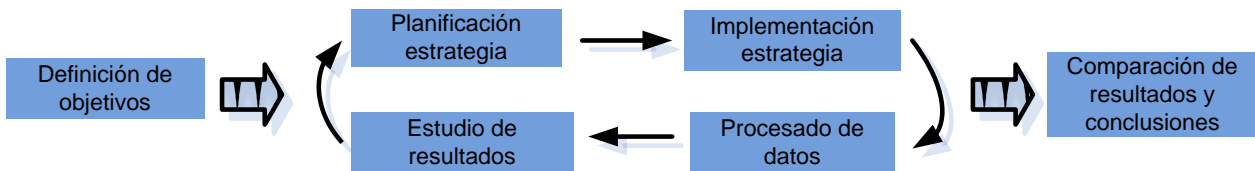


Figura 1-1 – Metodología utilizada

Esta metodología comienza definiendo unos objetivos, es decir, qué se está buscando y con qué medios va a conseguirse. Tras ello, comienza el bucle en el cual se va probando cada estrategia a simular. Primero, se razona y planifica esta estrategia. Tras ello, se programa en el simulador y se lanza la simulación. Por último, se recogen los datos, se procesan y se hace un estudio de cómo ha evolucionado el sistema tras aplicarle esta estrategia. Una vez terminado el ciclo, se comienza con una nueva estrategia a estudiar.

Esta tesis fin de máster se desarrolló desde enero hasta septiembre del 2011. El trabajo realizado se dividió en siete tareas: documentación y estudio del estado del arte, estudio del simulador, mejora del simulador, realización de pruebas, comparativa y conclusiones y redacción de la memoria. La figura 2, indica la distribución de todas estas tareas durante el tiempo en un diagrama de Gantt.

Id.	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	2011								
				ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	
1	Documentación y estado del arte	03/01/2011	15/02/2011	■								
2	Estudio del simulador	15/02/2011	29/04/2011			■	■					
3	Mejora del simulador	25/03/2011	06/06/2011				■	■	■			
4	Realización de pruebas	25/05/2011	10/08/2011						■	■	■	
5	Comparativa y conclusiones	01/07/2011	19/08/2011								■	■
6	Redacción de la memoria	11/07/2011	01/09/2011									■

Figura 1-2 - Diagrama de Gantt de la tesis fin de máster

## 1.4. Organización de la memoria

La memoria se divide en 4 capítulos. El primero se corresponde con la presente introducción, donde se hace una presentación de esta tesis fin de máster, se especifican los objetivos y la metodología seguida.

Los siguientes capítulos tratan de describir el sistema y los distintos controles de admisión implementados para finalmente extraer conclusiones.

El **capítulo 2** describe el sistema en el cual se aplican los controles de admisión implementados en esta tesis fin de máster. Este capítulo permite entender mejor todos los mecanismos y parámetros relevantes del sistema que modela la red de acceso celular LTE.

El **capítulo 3** presenta detalladamente los controles de admisión diseñados y simulados en esta tesis fin de máster. Además, en él se discuten y razonan los resultados obtenidos para posteriormente realizar comparaciones.

Finalmente, el **capítulo 4** recoge las conclusiones obtenidas tras la realización de esta tesis fin de máster y se indican posibles mejoras que pueden servir como sugerencias para líneas futuras.

Asimismo, se añaden 3 anexos. El **anexo A**, se corresponde con un amplio resumen sobre el estado del arte actual de los controles de admisión en las redes de acceso celulares más avanzadas. El **anexo B** completa el capítulo 2 realizando una descripción más extensa del sistema, centrándose en mecanismos que, por razones de espacio, no han podido ser explicados en el cuerpo de la memoria. En él, además, se especifican detalles técnicos relacionados con el simulador como la arquitectura de clases empleada. Por último, en **anexo C** recoge resultados de pruebas que no han podido ser incluidas en el cuerpo de la memoria por falta de espacio y cuyo conocimiento puede ser útil para la comprensión completa del trabajo realizado.

# Capítulo 2

## Sistema

### 2.1. Introducción

En este capítulo se va a realizar una pequeña descripción del sistema en el cual se realizan las diferentes pruebas que se verán en los capítulos posteriores. El sistema empleado ha sido programado en un simulador en el cual se añadirán los mecanismos a probar. El simulador se trata de un software desarrollado en C++, que integra todas las funcionalidades de capa física y MAC de la tecnología LTE en el enlace descendente. Su objetivo es permitir un análisis detallado de las propuestas que se programen en él relativas a cualquier mejora que se considere posible en algún tipo de mecanismo incluido en LTE para el enlace descendente. Dentro de las limitaciones de cualquier simulador, trata de ser lo más realista posible incluyendo todo tipo de procedimientos definidos a nivel físico, modelos de propagación de acuerdo a recomendaciones del 3GPP, distintos tipos de tráfico, etc. De hecho, contempla todos los procedimientos de las capas física (L1) y MAC (L2) del enlace necesarios para el mantenimiento de una conexión de datos entre la estación base y el terminal móvil.

Debido al elevado número de aspectos que interactúan en el sistema sobre el que se aplica el control de admisión, en el capítulo 2 simplemente van a describirse los aspectos más relevantes del sistema considerado, relacionados con el control de admisión y que por tanto son esenciales que el lector conozca. Para más información sobre los detalles de implementación de los procedimientos y parámetros de configuración del nivel físico y de enlace, así como sobre la estructura del simulador, se insta al lector a dirigirse al anexo B en el cual existe una explicación mucho más detallada.

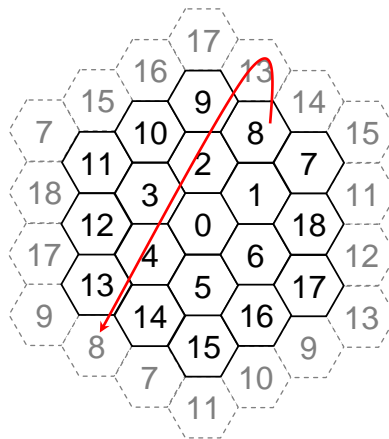
El trabajo fin de máster se centra en el diseño del control de admisión para el enlace descendente de un sistema de banda ancha OFDMA (Orthogonal Frequency Downlink Multiple Access) LTE, y en particular en el esquema de duplexado FDD. Tal y como se discutirá en el capítulo 3, dicho diseño implica dos aspectos. Por una parte, se requiere una buena estimación tanto de la carga que en un momento determinado está experimentando la celda como del consumo que va a tener una nueva conexión que solicita recursos. Por otra, para proporcionar un tratamiento diferenciado a distintas clases de usuarios y servicios, se debe establecer cómo usar los datos obtenidos en la estimación de consumo u otros para tomar la decisión sobre si aceptar o rechazar la petición de conexión. Dado que tanto el consumo de recursos para satisfacer las demandas de tasa y retardo de un servicio, como la carga soportable en el sistema (número de usuarios) viene determinada por el diseño y comportamiento no solo de la capa física del sistema sino también de las estrategias de gestión de recursos radio, en los siguientes subapartados se detallan los aspectos más relevantes de la implementación de la capa física y de las estrategias RRM. En concreto, se detallan la naturaleza de los recursos a repartir, las estrategias de coordinación intercelular

consideradas en el sistema y las estrategias de scheduling de recursos y selección dinámica de tasa. Todos estos aspectos además de estar interrelacionados, condicionan no solo la capacidad del sistema de proporcionar QoS diferenciada sino también el número máximo de usuarios soportables satisfaciendo los requisitos de QoS.

## 2.2. Características del despliegue del sistema

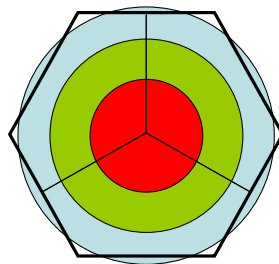
Se considera un sistema multicelular formado por 19 celdas hexagonales y trisectorizadas, si bien es posible contemplar otros esquemas de sectorización. La estación base se coloca en el centro de la celda y la distancia entre estaciones base, denominada *ISD* (Inter-Site Distance) está configurada para ser 1732 m. En cuanto a la configuración del despliegue de los sectores de la celda, la plataforma de simulación permite elegir la dirección de máxima radiación de la antena (o antenas) del sector, asumiéndose, a priori, que ésta corresponde al centro de la zona de cobertura del sector.

En las simulaciones se hace uso de la técnica de *wrap-around* para evitar el efecto borde. Esto permite emular el efecto de una red de celdas de grandes dimensiones con un conjunto reducido de las mismas, de modo que las estadísticas pueden tomarse en todas las celdas del escenario. Básicamente, la técnica *wrap-around* se basa en la replicación virtual del cluster de  $N$  celdas de forma circular de modo que las celdas que en el cluster original se encuentran en extremos opuestos (y por tanto incorreladas por distancia) aparecen ahora como celdas vecinas, generándose interferencias mutuas. En la figura 2-1 aparece esta técnica ejemplificada.



**Figura 2-1** - Ejemplo de la técnica *wrap-around* para 19 celdas

A efectos de evaluación de resultados y como soporte al diseño de las estrategias de control de admisión, cada celda se considera virtualmente dividida en tres anillos concéntricos de igual área, tal y como se muestra en la figura 2-2. Estos anillos son denominados zonas.



**Figura 2-2** - División de la celda en zonas

Gracias a esta división, se facilita la tarea del procesado de datos ya que se podrá controlar mucho más fácilmente la distancia de los usuarios a la estación base. Asimismo, será posible configurar cargas de usuarios diferentes para cada zona o limitar los movimientos de los usuarios a un área concreta, de manera que se puedan llevar a cabo análisis más complejos. El número de usuarios que pueblan la celda dependerá de la tasa de generación de conexiones que se utilice, de la duración de las llamadas y del movimiento que experimenten los usuarios. Todos estos datos son configurables en el simulador.

## 2.3. Capa física

El enlace descendente del sistema LTE se basa en tecnología OFDMA. OFDMA permite el reparto de recursos radio en dos dimensiones (tiempo y frecuencia) que la capa MAC repartirá entre los distintos usuarios de la forma más eficiente posible. A grandes rasgos, el ancho de banda total del sistema ( $BW$ ) se divide en  $N_{FFT}$  subportadoras OFDM ortogonales (no hay interferencia entre ellas), separadas entre sí  $\Delta f$  Hz. De todas estas subportadoras, sólo  $N_{used}$  transmiten potencia, dejando subportadoras libres a ambos lados del ancho de banda (bandas de guarda) para limitar las interferencias en canales adyacentes. Además, parte de las subportadoras se usan para transmitir señales piloto que permiten realizar la estimación de canal en recepción.

A nivel temporal, a partir de la unidad temporal menor de información, el símbolo OFDM, la transmisión se organiza en un entramado jerárquico con distintos niveles. Siguiendo el estándar LTE, la transmisión de mayor nivel se denomina trama y tiene una duración de 10 ms. Una trama se divide en 10 subtramas de duración 1 ms, que definen la periodicidad del scheduler. Esto es, en cada subtrama es posible señalar una nueva asignación de recursos (scheduling) a nivel frecuencial y temporal. Por tanto la subtrama constituye el intervalo de actualización (TTI: Transmisión Time Interval). Cada subtrama se divide 2 slots y cada uno de éstos en 7 ó 6 símbolos OFDM (en nuestro caso 7), dependiendo del tipo de prefijo cíclico utilizado (normal o extendido, respectivamente). Señalización y datos se multiplexan temporalmente, de tal forma que los primeros símbolos (3 como máximo) se dedican a control y los restantes a la transmisión de datos.

Tomando como base este mapa bidimensional de recursos, en un instante determinado es posible transmitir simultáneamente información hacia o desde varios usuarios de la celda, multiplexando dicha información en distintas subportadoras OFDM. Idealmente, el mecanismo de acceso OFDMA permitiría realizar cualquier reparto de subportadoras entre usuarios y con la granularidad



deseada. De hecho, desde el punto de vista de la gestión de recursos radio, una de las principales características es la flexibilidad en la asignación de recursos, es decir, la flexibilidad en la cantidad de recursos que pueden asignarse a cada usuario, lo que se traduce en el soporte de multitud de tipos de tráfico y calidades de servicio diferentes.

El máximo beneficio de un sistema OFDMA se extrae cuando la asignación de subportadoras tiene en cuenta las condiciones de canal para los distintos usuarios. En general, el objetivo es asignar a cada usuario aquellas subportadoras en las que observará mejores condiciones de canal, y por tanto en las que será posible utilizar esquemas de modulación y codificación más altos y en consecuencia tasas de transmisión más elevadas. Sin embargo, mantener un grado de flexibilidad elevado, implica una cantidad de señalización desmesurada para cubrir cualquier posibilidad. Por este motivo, siguiendo las recomendaciones de LTE, las asignaciones de recursos se hacen utilizando bloques de recursos radio (RB) como unidad mínima de asignación. El RB está compuesto de  $N_{SC}$  subportadoras durante  $N_s$  símbolos OFDM consecutivos, sobre los que se usa el mismo esquema de modulación y codificación y la misma potencia. En concreto, 12 subportadoras ocupando toda la subtrama (14 símbolos menos 3 de señalización y el equivalente a 1 para el mapeado de las señales de referencia, esto es: 10 símbolos).

En este trabajo, se ha considerado un ancho de banda de 5 Mhz, lo cual resulta en la existencia de 27 RBs para repartir en cada celda. Para conocer más, dirigirse la tabla B-1 del anexo B.

En OFDMA, y dado que los recursos frecuenciales son ortogonales entre sí, no existe interferencia intracelular, ya que los recursos frecuenciales y temporales son repartidos por el scheduler localizado en la estación base entre los distintos usuarios bajo su dominio. Sin embargo, el comportamiento de los sistemas OFDMA depende fuertemente de la implementación de los algoritmos de asignación de recursos, siendo los principales aspectos de diseño de estos algoritmos el intentar explotar al máximo la diversidad multiusuario y multicanal para mejorar la eficiencia espectral, considerar las características del tráfico y requisitos de servicio para garantizar la QoS y el reparto equitativo entre los usuarios.

Por otra parte, para poder maximizar el uso del espectro disponible, el objetivo de la mayoría de los sistemas 4G es realizar un despliegue con un factor de reuso frecuencial igual a la unidad (todas las celdas utilizan el mismo ancho de banda). Esto implica la existencia de una fuerte interferencia intercelular (ICI). La ICI degrada severamente el rendimiento de los usuarios, especialmente el de los situados en los bordes de las celdas, debido a los bajos niveles de relación señal a ruido más interferencia (SINR), lo que generalmente limita la tasa de datos obtenible y define el esquema de codificación y modulación (MCS) a emplear.

Todo esto justifica la necesidad de aplicar mecanismos de control de la interferencia que mejoren el comportamiento de las transmisiones en el exterior de la celda. Entre ellos destacan los mecanismos de coordinación, que imponen ciertas restricciones en la asignación de recursos (generalmente frecuencia y potencia) en ciertas áreas de la celda. Dichas restricciones tienen que ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar las estrategias de scheduling frecuencial y de asignación de potencia. Sin embargo, no debe olvidarse que cuantas más restricciones se aplican, mayor es la reducción de la ICI pero menor es la utilización del sistema, porque existe un equilibrio entre

reducción de ICI y accesibilidad. La implementación específica de estos esquemas, que deberá ser tomada en cuenta a la hora de diseñar las estrategias de control de admisión, se incluye en el siguiente subapartado.

Desde el punto de vista de la implementación de la capa física, las simulaciones efectuadas consideran de forma explícita la interferencia, utilizando un modelado realista de las condiciones de canal de acuerdo con las recomendaciones de LTE. En concreto, se considera el efecto del ruido, pérdidas de propagación, desvanecimientos lentos y desvanecimientos rápidos y los patrones de radiación de las antenas transmisoras y receptoras. En el anexo B, se incluyen algunos detalles de implementación.

Por otra parte, la asignación de recursos en la función de scheduling se basa en la estimación de canal en el enlace descendente. Desde este punto de vista, el sistema considera de forma explícita los errores en la estimación de canal derivados de los procedimientos de medida en el móvil y retardo en los procedimientos de notificación y procesado en la estación base. En el anexo B, se incluyen detalles sobre la implementación del proceso de monitorización del canal.

## **2.4. Procedimientos de gestión de recursos**

Como ya se ha dicho, la tesis fin de máster se centra en el estudio de los controles de admisión pero es necesario conocer otros procesos relacionados con la gestión de recursos como el mecanismo de coordinación de interferencias o sobre cómo se reparten los recursos entre los distintos usuarios (scheduling). La elección de éstos afecta directamente a los resultados, por lo que es lógico diseñar el control de admisión pensando en cómo va a ser el scheduling o los mecanismos de gestión de la interferencia. El simulador tiene implementadas varias propuestas de coordinación y scheduling, limitándose la descripción a los procedimientos empleados en las simulaciones.

### **2.4.1. Mecanismo de coordinación de la interferencia**

Los mecanismos de coordinación de interferencias mejoran las prestaciones ofrecidas para los usuarios del exterior de la celda a costa de una reducción en la accesibilidad de los recursos radio. Los esquemas de coordinación establecen los límites de operación de las estrategias de scheduling y determinarán también desde el punto de vista de los mecanismos de control de admisión, la disponibilidad de recursos en cada zona del sistema. Por este motivo, es importante tener en cuenta su diseño. En cualquier caso, no debe olvidarse que la capacidad global depende del diseño conjunto del esquema de coordinación y scheduling (incluido la selección adaptativa de tasa). Es importante diseñar algoritmos de asignación de scheduling que tengan en cuenta dichas restricciones y al mismo tiempo sean capaces de obtener el máximo beneficio del espectro disponible.

Las simulaciones llevadas a cabo han utilizado como mecanismo de coordinación el algoritmo conocido como reuso frecuencial fraccional con ordenación y adaptación de potencia (FFRopa: Fractional Frequency Reuse Ordered and Power Adaptive). Dicho esquema es una variante del

---

algoritmo FFR (Fractional Frequency Reuse) con sectorización en el exterior, que es una técnica de coordinación de interferencias ampliamente aceptada en el contexto de redes celulares basadas en OFDMA. La idea básica de FFR es la división del ancho de banda del sistema en dos subbandas: una interior y otra exterior, esta última reservada para los usuarios que se encuentran en el exterior de la celda. Después se aplican diferentes grados de reuso en cada subbanda dentro del sistema multicelular. Existen diferentes variantes de implementación, las más conocidas Partial FFR y Soft FFR. En Partial FFR los usuarios del interior utilizan la misma subbanda en todas las celdas mientras que la subbanda exterior se divide en otras tres subbandas. Éstas, son ortogonales y cada una es utilizada por una celda vecina de manera que cada celda utiliza una porción diferente y ortogonal a sus vecinas. Así, se forma una estructura de cluster de tamaño 3, con reuso 1 en el interior y 3 en el exterior de la celda.

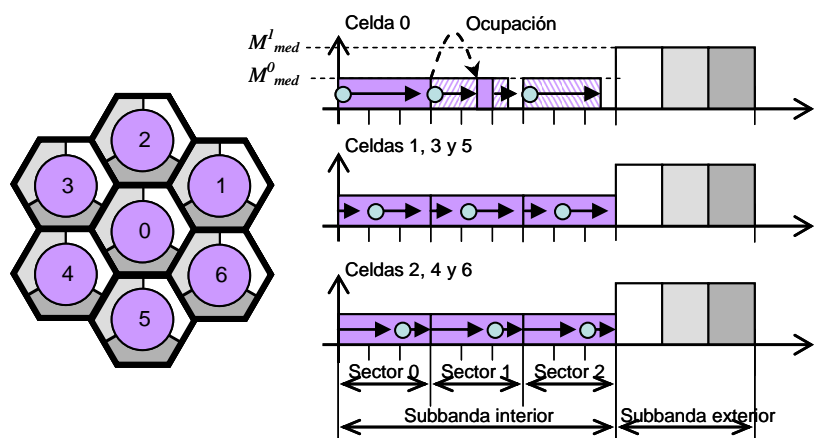
A diferencia de Partial FFR, en Soft FFR todo el ancho de banda puede utilizarse en cada celda, ajustando el nivel de reuso mediante la coordinación de potencia en las subbanda interior y exterior. En concreto, la subbanda exterior transmite con más potencia que la interior. Sobre la base de estos esquemas se pueden encontrar todavía múltiples variaciones. Por ejemplo, en redes tri-sectorizadas se puede aplicar sectorización en el acceso a la subbanda exterior. FFRopa se basa precisamente en este principio. Hay que tener en cuenta que, tanto en las implementaciones básicas de Partial FFR con o sin sectorización y Soft FFR, no existen restricciones en la asignación de RBs, lo que permite ajustar los RBs asignados a cada sector en función de su carga. Sin embargo, esta flexibilidad se traduce también en variabilidad de la interferencia, particularmente en condiciones de baja carga, ya que la potencia de transmisión en cada RB sólo se transmitirá en el sector al que pertenece el terminal receptor del RB. Esto es, la interferencia en un RB determinado no proviene siempre del mismo sector, lo que introduce un nuevo efecto de variabilidad en la interferencia que provocará un mayor número de errores a la hora de estimar las condiciones en las que se encuentra el usuario.

Para limitar este efecto, el esquema FFRopa intenta mantener de forma estable las asignaciones de RBs en cada sector. Así, la subbanda interior se divide a su vez en tres subbandas, cada una de las cuales se preasigna de forma preferente a un sector de la celda. Además, en condiciones de baja carga, se estima el número de RBs a utilizar intentando mantener las asignaciones en el conjunto de RBs estimado dentro de la subbanda preferente, procediendo a su ampliación de forma ordenada solo en caso de necesidad. La ocupación comienza en un RB distinto para celdas contiguas, como se observa en la figura 2-3 de modo que si la carga del sistema es poca, no se producen interferencias. Cuando un sector ha asignado todos los RBs de su subbanda, comienza a ocupar RBs de las subbandas de otros sectores, siguiendo también en estos casos la ordenación de asignación de RBs. Desde el punto de vista de la coordinación en potencia, al igual que en soft FFR, se define una máscara de potencia distinta para los recursos exteriores e interiores de modo que en los RBs considerados como exteriores se permite transmitir con una potencia superior, con lo cual, estos RBs previsiblemente serán usados para los usuarios más alejados de la celda. La sectorización de esta banda impedirá que usuarios muy próximos pero pertenecientes a distintas celdas puedan recibir información en el mismo RB, minimizando la interferencia, tal y como puede observarse en la figura 2-3. Por otro lado, los RBs interiores serán utilizados por todos los usuarios aunque la máscara de potencia será mucho menor, hecho que implica que sean usados principalmente por los usuarios más cercanos a la estación base. Todas las simulaciones

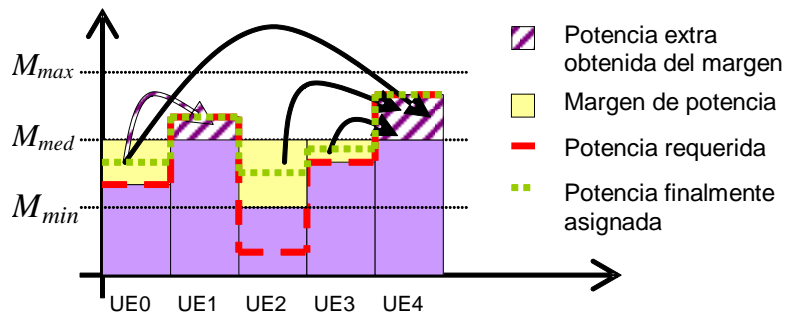
ejecutadas han establecido 18 RBs para el interior y 9 para el exterior, es decir, 3 RBs exteriores para cada sector. Las máscaras de potencia para cada subbanda se han calculado teniendo en cuenta que en ningún caso, utilizando todos los RBs disponibles en la celda, se puede superar el nivel de potencia máxima de transmisión en la estación base fijado por el estándar (en este caso  $P_{MAX}=43dBm$ ).

Por otra parte, la tasa (esquema de MCS) que puede ser utilizada en cada RB en las transmisiones dirigidas a cada usuario viene condicionada por el nivel de SINR alcanzable en recepción. El esquema de MCS se selecciona adaptativamente, manteniendo siempre como requisito la satisfacción de un nivel de SINR que limite la tasa de error en la transmisión de un paquete a una tasa de BLER (Block Error Rate) que en nuestro caso se ha establecido en 0.01. En principio, se transmite con la máxima MCS posible que determina tanto el nivel de SINR como la disponibilidad de datos. En caso de no poder satisfacer los requisitos de SINR para a la modulación más baja, el RB no puede ser asignado al usuario.

Por último, el término de potencia adaptativa se refiere a la adaptación de potencia que se hace en función de las condiciones que presenta cada canal, de manera que será posible mejorar la eficiencia en la distribución de potencia disponible en la estación base entre los distintos usuarios de la celda. Hay que tener en cuenta que, a priori, el esquema básico lleva a cabo una asignación de potencia constante, es decir, la misma potencia de transmisión es asignada a todos los RBs de la misma subbanda ( $M_{med}$ ). Sin embargo, esta restricción en potencia supone que determinados usuarios no reciban una asignación porque su potencia requerida exceda, aunque sea en una pequeña cantidad, el valor de la máscara  $M_{med}$ . Es por esto que en el algoritmo FFRopa se incorpora un mecanismo de un ajuste acotado de la potencia. De este modo, cuando un usuario requiera una potencia inferior a  $M_{med}$  (UE0 en figura 2-4), la diferencia contribuye a crear un margen de potencia para asignar una potencia de transmisión superior a  $M_{med}$  a usuarios en peores condiciones (UE1 en figura 2-4). La adaptación de potencia se circunscribe, limitada a unos márgenes ( $M_{max}$  y  $M_{min}$ ), únicamente a la subbanda interior, puesto que en la exterior es preferible estabilizar la interferencia lo máximo posible, con lo que se mantiene la asignación con potencia constante.



**Figura 2-3** - Reúso Frecuencial Fraccional con Ordenación y Potencia Adaptativa (FFRopa)



**Figura 2-4** - Ejemplo de adaptación de la potencia en FFRopa

## 2.4.2. Scheduling

Como ya se ha especificado, el proceso de scheduling está centralizado en la estación base, y se lleva a cabo con una periodicidad de 1ms. La asignación de recursos (frecuencia, potencia y tasa de transmisión), se realiza teniendo en cuenta información de la calidad del canal y otros parámetros dependientes del tráfico, como el estado de los buffers, y la prioridad de los usuarios, que dependerá, entre otros factores, de los parámetros de calidad de servicio del tipo de servicio.

Con dos dominios claros de priorización, el dominio temporal (TD: Time Domain) y el frecuencial (FD: Frequency Domain), la función del scheduling incluye la selección de los bloques físicos asignables, junto con la selección del esquema de modulación y codificación más apropiado y la potencia de transmisión. El dominio temporal trata de determinar los usuarios o UEs (User Equipment) que deben recibir servicio en un determinado periodo de scheduling (atendiendo a criterios de tráfico o de calidad de canal), mientras que el dominio frecuencial establece la asignación específica de recursos frecuenciales a los usuarios previamente seleccionados o priorizados.

Por lo general, el objetivo del scheduling temporal es conseguir un equilibrio entre el throughput global y un reparto equitativo de recursos, mientras que el scheduling frecuencial trata de maximizar el throughput. Aunque la mayor eficiencia se conseguiría con la aplicación conjunta de un criterio de scheduling TD y FD, la viabilidad práctica de la implementación pasa por la aplicación secuencial. El scheduling temporal sólo se ocupa de clasificar a los usuarios en orden de prioridad para transmitirlos (atendiendo, por ejemplo, a la cantidad de servicio recibido y los parámetros de QoS negociados), para posteriormente asignar los recursos frecuenciales a dichos usuarios en función de las condiciones de canal en el scheduling frecuencial.

Existen infinidad de políticas scheduling temporal para realizar la ordenación. En concreto, en esta tesis fin de máster se ha utilizado la expresión (1).

$$prior = \frac{\text{retardo\_max} - \text{retardo}}{\text{retardo\_max}} \quad (1)$$

Es decir, en cada TTI, se comprueba el tiempo que queda para que el paquete más antiguo del usuario pierda validez, normalizándolo al valor del máximo asumible, por lo que la variable *prior* estará entre 0 y 1. El orden de prioridad por tanto será inverso, de modo que el usuario que tenga el paquete con la menor prioridad, será tratado como el más urgente.

Debe añadirse que el sistema soporta procesos correctores de errores ARQ (Automatic Report Request) que realizan retransmisiones de los paquetes recibidos erróneamente. Estas retransmisiones tienen preferencia y por ello el scheduler siempre tratará de enviarlos antes que los paquetes que todavía no han sido transmitidos. El apartado B.3 del anexo B da más información sobre estos procesos ARQ.

Una vez los usuarios están ordenados por prioridad, se realiza el scheduling frecuencial o, dicho de otro modo, se asignan los RBs a cada usuario. Para ello, lo primero que se analiza es la potencia que el usuario necesita para recibir un servicio conforme a su tasa con la máxima MCS posible. En caso de que la potencia requerida esté por encima de la de la máscara en algún RB, la MCS será disminuida hasta encontrar el valor que permita la transmisión. Tras ello, en función de la máscara escogida (si es interior o exterior), se realiza la asignación buscando entre los RBs vacíos asignables el que proporciona la mayor CIR (Carrier to Interference Ratio). Por último, se comprueba si el usuario tiene más datos para transmitir en cuyo caso se intenta aumentar la MCS y se actualiza el consumo de potencia.

## 2.5. Modelo de movilidad

Conocer el patrón de movimiento que siguen los terminales es esencial para poder realizar un análisis del sistema en escenarios de handover puesto que la movilidad de los terminales es clave. El modelo que se incluye por defecto se basa en desplazar el móvil con una velocidad constante  $v$  parametrizable a lo largo de una determinada dirección. La velocidad del terminal utilizada en las simulaciones ha sido 3 Km/h (modela a un viandante). Para lograr realismo, la dirección del terminal es modificada cada 300 segundos aleatoriamente entre -30 y 30 grados. Además, en el momento en el cual la dirección deba cambiar por quinta vez consecutiva, el terminal aleatoriamente toma una nueva dirección que incluso puede ser la contraria. Evidentemente, el periodo de tiempo escogido dependerá de la velocidad a la cual se mueven los terminales.

A partir de aquí, existen tres tipos de movilidad definidos en el sistema:

**Movilidad estática:** El terminal puede moverse pero dentro de su sector y zona. Por lo tanto, durante toda la conexión, el terminal se mantendrá en la misma zona y sector simulando un escenario “cuasi-estático”. Cuando el terminal alcanza la frontera entre dos zonas o sectores, su dirección es modificada 180 grados y por tanto se da la vuelta.

**Movilidad local:** El terminal puede moverse libremente dentro de su celda, es decir, puede realizar handovers entre zonas y sectores. Eso sí, el handover entre celdas no está permitido por lo que si llega a la frontera de la celda, el terminal girará 180 grados para volver a introducirse en ella, lo cual impide que un usuario cambie de celda.

**Movilidad total:** El terminal puede moverse libremente por todo el sistema multicelular. Los únicos límites que existen son las celdas de wrap-around a las cuales, lógicamente, no podrá entrar. En este escenario, el terminal puede comenzar la conexión en una celda y acabarla en otra distinta.

Gracias a esta flexibilidad en el tipo de movilidad, ha sido posible realizar análisis distintos que han ayudado a comprender con más certeza todas las situaciones que se iban dando para las pruebas realizadas.

## 2.6. Modelado de conexiones

La definición del funcionamiento de las conexiones es clave para comprender los resultados obtenidos y modelar el sistema. El simulador permite la implementación de multitud de modelos de tráfico basados en modelos definidos en el 3GPP que trasladan de manera fiel el comportamiento del tráfico de conexiones reales como VoIP, navegación Web, etc.

En función del modelo de tráfico considerado en cada caso, cada paquete de datos generado se divide en un número entero de bloques de datos denominados Transport Units (TUs), que es la cantidad mínima de datos que se puede transmitir en el sistema cuando un usuario recibe una asignación de recursos. Por tanto, el tamaño del TU se fija como la cantidad de datos que se transmiten en un RB (la unidad mínima de asignación de recursos del sistema) cuando se utiliza la MCS más baja del sistema (con modulación menos eficiente y la codificación más robusta). Una vez fragmentado el paquete en TUs, añadiendo ceros de relleno en el último fragmento si fuera necesario, los TUs se insertan en el buffer de salida de la conexión a la espera de ser transmitidos

Para estas simulaciones se ha utilizado un patrón a ráfagas. En el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del anexo B pueden encontrarse otros modelos programados que no han sido usados. El patrón a ráfagas define una fuente de tráfico de dos estados: estado de actividad (ON), en el que se genera un paquete de longitud  $L$  (en este caso fijado en 240 bits) cada TTI, y un estado de silencio (OFF), el que no se generan paquetes. El paquete de longitud  $L$  se divide en 2 TUs. El tiempo de permanencia en cada estado se asume exponencial de medias  $T_{ON}$  (30 ms) en el estado activo y  $T_{OFF}$  (90 ms) en el estado de silencio. El factor de actividad del tráfico ( $\alpha$ ) se define por tanto como  $(T_{ON} + T_{OFF})/T_{OFF}$ . El número de transiciones ON-OFF se define como una variable exponencial de media  $h$  (en este caso se establece en 10 transiciones). Los paquetes de datos están limitados temporalmente por una cota máxima de retardo  $D_{max}$  TTIs (50ms), tras la que los paquetes se descartan.

# Capítulo 3

## Control de admisión

### 3.1. Definición y contexto

El control de admisión (CAC) es uno de los mecanismos empleados por las redes de acceso celular para la gestión de recursos. En LTE, LTE-Advanced y IEEE 802.16m, el módulo del control de admisión está definido dentro de la capa RRM, junto a otros mecanismos de gestión de recursos como el scheduler. Para comprender de forma precisa su función, introducimos una breve explicación del contexto.

En LTE, la estación base es la encargada de gestionar los recursos y por tanto de decidir cuánto ancho de banda y potencia asigna a cada conexión. Para tomar esta decisión, debe tener en cuenta multitud de aspectos y variables como el esquema de coordinación de interferencias aplicada, la SINR que está experimentando cada terminal, la QoS requerida por cada terminal, etc. Para adaptarse a las variaciones de canal y de tráfico de forma flexible, buscando el máximo aprovechamiento posible de los recursos del sistema, las decisiones de scheduling se toman cada 1 ms, es decir, cada TTI.

El diseño de las estrategias de scheduling centrado en la satisfacción de la QoS requerida por cada terminal, no tiene una solución óptima inmediata. De hecho, las soluciones propuestas en la literatura y en esta TFM (Tesis Fin de Máster) son propuestas subóptimas, siendo más eficientes aquellas que admiten un mayor número de usuarios en el sistema satisfaciendo una determinada cota de QoS para el conjunto de todos ellos. La diversidad de tipos de QoS que pueden encontrarse en el sistema es muy amplia y el ancho de banda que usa la estación base finito. Cada tipo de servicio tiene requisitos potencialmente distintos tanto de tasa como de retardo máximo asumible o errores que deben ser garantizados siempre, de lo contrario, las conexiones se perderían o se degradarían demasiado, hecho que traerá consigo un descontento por parte de los usuarios. Por ello, y debido a que los recursos son limitados, si la estación base acepta todas las conexiones que solicitan recursos, puede llegar a un punto en el que exista más demanda que recursos, lo cual resultará en una degradación de todas las conexiones proporcional al desequilibrio creado. Esta situación debe ser evitada en todo momento y para ello se utiliza el mecanismo de control de admisión.

El control de admisión tiene la tarea de rechazar o aceptar nuevas conexiones considerando distintas variables como el estado de la carga en la celda, la QoS requerida por la nueva conexión, etc, de manera que garantice un servicio aceptable a todos los terminales servidos. Por tanto, cuando una conexión solicita servicio de la estación base, el control de admisión evalúa la conveniencia o no de aceptarla y para ello debe ser capaz de estimar la capacidad disponible y el



impacto que la admisión de la nueva conexión tiene en el consumo global de recursos y QoS resultante. Esta estimación puede no ser simple ya que el comportamiento de las estrategias de RRM puede ser diferente dependiendo de la combinación de servicios que coexisten en la celda, de la distribución espacial de usuarios dentro de la misma y condiciones de canal que estén experimentando. Por último, el control de admisión, aún asumiendo la capacidad de llevar a cabo de forma óptima dicha estimación, admite la aplicación de múltiples políticas de admisión, para priorizar el acceso a los recursos de determinados servicios o clases de conexiones (conexiones procedentes de un handover o conexiones nuevas).

Los estándares de redes de acceso celular dejan la implementación de los controles de admisión abierta, tal y como hacen con otros mecanismos de gestión de recursos. En términos generales, el control de admisión engloba dos aspectos: cálculo de la capacidad consumida y definición de la política de admisión a aplicar. El primero de ellos tiene como objetivo llevar cuenta de los recursos que las conexiones en curso están consumiendo y estimar los recursos que serán consumidos por las nuevas conexiones (conexiones nuevas o provenientes de un handover) que soliciten servicio a la estación base. Estos cálculos pueden basarse en distintos parámetros de las conexiones como el canal que está experimentando el terminal, la distancia a la estación base, las características estadísticas del tráfico y requisitos de calidad de servicio del servicio asociado a la conexión. Adicionalmente, en el caso de sistemas de conmutación de paquetes, una estimación ajustada del consumo, necesariamente dependerá de la propia implementación de las estrategias de asignación de recursos y de la capacidad de éstas para conseguir el máximo aprovechamiento posible del multiplexado estadístico de las fuentes, manteniendo la QoS. En definitiva, depende de la capacidad de aproximar los límites de la región del scheduling del sistema, para lo cual se puede optar por el desarrollo de modelos o procedimientos basados en medidas. Analizando las propuestas recientes de investigación sobre control de admisión, centradas en sistemas OFDMA (en el anexo A se puede encontrar un estudio detallado), y aunque este tema no se ha abordado con suficiente profundidad en esos estudios, se identifican tres variantes principales para realizar la estimación de capacidad.

La primera de éstas [4,5,6] es la más común y estima el número de recursos requeridos por la nueva conexión en función de la tasa requerida por el servicio transportado y la tasa que puede transmitirse en cada RB (dependiente de la MCS que puede ser utilizada). La tasa requerida dependerá, entre otros, del canal experimentado por lo que podría derivarse directamente de los indicadores de canal (CQI: Channel Quality Indicator) que envía el terminal a la estación base. Este método también se usa para estimar el número de recursos utilizados por las conexiones en curso y por tanto para el cálculo del consumo en la celda. La segunda variante manejada [7], y utilizada en esta tesis fin de máster, se basa en obtener una estimación promedio del consumo de capacidad para cada tipo de servicio en función de la zona en la cual se encuentra el usuario, a diferencia del método anterior en el que la estimación se hace a nivel individual para cada conexión. La propuesta presentada en [7] maneja esta variante, pero no se especifica el procedimiento seguido para la obtención de dicha estimación. En este trabajo fin de master la estimación se basará en el análisis de resultados del comportamiento del sistema, efectuados off-line, para distintas condiciones de carga. Por último, la alternativa restante [8], calcula la capacidad consumida en la celda por las conexiones en curso utilizando medidas de la capacidad requerida por éstas en una ventana temporal (medida histórica). Para lograr ser capaces de seguir

cambios bruscos, se combina esta medida con la medida de capacidad requerida en el TTI específico a través de un peso, cuyo valor refleja la confianza dada a la estimación de capacidad requerida hecha en ese TTI. La estimación de la capacidad requerida por la nueva conexión se realizará de forma similar a la explicada en la primera variante, ya que no existirán medidas previas de la capacidad requerida.

El segundo aspecto del control de admisión, como se ha indicado, se refiere a las políticas de admisión. Éstas, definen las condiciones que deben darse en el sistema para que la conexión sea aceptada. Estas condiciones podrán ser globales o diferenciadas para cada tipo de tráfico, de modo que sea posible priorizar unas conexiones respecto a otras. Para su definición, generalmente son utilizadas las estimaciones de consumo de recursos explicadas anteriormente. El objetivo final de estas políticas es evitar que se sobrepase la capacidad total de la celda y se logre la distribución deseada de los recursos entre tipos de tráfico. Para ello, existen multitud de estrategias en la literatura, las cuales son divididas en dos grandes grupos en función de si la política reserva recursos para cierto tipo de conexiones o no. Si no se realiza esta reserva [4], la política se reduce a comprobar si existen más recursos libres que recursos requeridos por la nueva conexión. En general, la reserva de recursos viene motivada por dos causas. La primera es evitar que conexiones con mal canal o requisitos muy exigentes monopolicen los recursos ya que este tipo de conexiones tienden a consumir mucho más. Por ello, existen controles de admisión [5,8,9] que limitan la presencia de estas conexiones reservando recursos para conexiones no tan avariciosas. La segunda, se refiere al objetivo de minimizar al máximo las conexiones en curso perdidas, lo cual es una tarea muy complicada a no ser que se realice una reserva de recursos para las conexiones de handover. Por ello, la mayor parte de las políticas de admisión realizan esta reserva, la cual puede seguir dos estrategias: reserva estática [10,12], en la que los recursos reservados son siempre los mismos durante toda la simulación, o dinámica. Esta última estrategia adapta el número de recursos reservados a la evolución del sistema y de hecho, puede subdividirse en dos tipos, en función de dónde proviene la información utilizada para decidir el número de recursos que deberán ser reservados. Si la información es exclusiva de la celda, la reserva se define dinámica y local [10]. Por el contrario, si se utiliza información de las celdas vecinas, la reserva se considera dinámica y distribuida. Otro tipo de priorización para minimizar la pérdida de conexiones en curso que puede llevarse a cabo y que se recoge en la literatura [6] es la utilización de un buffer de espera, el cual almacena durante un periodo de tiempo las conexiones que no han podido ser aceptadas para realizar el handover por falta de recursos, a la espera de que puedan lograrlo en sucesivos TTIs. En determinadas ocasiones, esa falta de recursos puede ser puntual y dar un margen de tiempo podría solucionar la pérdida. Asimismo, cabe destacar, en esa misma referencia [6], la definición de un control de admisión que implementa sus políticas teniendo en cuenta de forma explícita los mecanismos de gestión de recursos (en concreto el esquema de coordinación frecuencial para controlar el ICI aplicado), tal y como se ha hecho en esta tesis fin de máster.

Para más información, el anexo A incluye una descripción más detallada de distintas propuestas de controles de admisión que atañen tanto a la aplicación de políticas como a la estimación de recursos.

Todos los controles de admisión comentados anteriormente, por muy distintos que sean, comparten unos objetivos comunes relacionados con la maximización del número de usuarios servidos y la provisión de la mayor calidad posible. No debe olvidarse que la operadora que explota la red busca maximizar sus beneficios, los cuales son de alguna manera proporcionales al número de usuarios servidos y a la calidad de servicio suministrada. En términos ingenieriles, estas metas resultan en:

- Minimizar la probabilidad de bloqueo de conexiones nuevas en la medida de lo posible.
- Minimizar la probabilidad de pérdida de conexiones en curso. En este último caso se trata de minimizar la probabilidad de desactivar conexiones en curso por no poder garantizar la calidad de servicio en la celda en la que están alojadas o por no obtener recursos suficientes en la celda destino al efectuar un handover.
- Garantizar a los usuarios la mínima QoS requerida durante toda la conexión y, en caso de ser posible, proporcionarles una mayor capacidad que derive en una máxima utilización de los recursos.

Estos objetivos son complicados de lograr conjuntamente ya que, generalmente, la consecución de uno de ellos supone el empeoramiento de otro. Por tanto, es necesario llegar a un compromiso que globalmente consiga la mayor eficiencia. Por ejemplo, como se ha apuntado anteriormente, bastantes algoritmos de control de admisión reservan recursos para posibles traspasos intercelulares, lo cual minimiza la probabilidad de pérdida de conexiones que realizan handovers pero impide la máxima ocupación de recursos posible, bloqueando innecesariamente el establecimiento de nuevas conexiones.

## **3.2. Análisis y evaluación de las propuestas de CAC**

Como se ha dicho, el diseño de un control de admisión engloba dos aspectos: cómo se calcula el consumo de recursos y qué política de admisión se practica. Partiendo del análisis del estado del arte de las propuestas efectuadas en la literatura para sistemas OFDMA, el propósito de esta TFM es por una parte abordar en primer lugar el diseño de un CAC seguro que garantice la QoS y posteriormente evaluar el impacto de políticas de priorización de servicios o tipos de llamadas (handover). Como paso previo al diseño de las propuestas de control de admisión se aborda el problema de la estimación de carga, evaluando el comportamiento de las estrategias de RRM sin considerar la aplicación del CAC (apartado 3.2.1). Sobre la base de las estimaciones efectuadas se plantea un control de admisión lineal para valorar la eficiencia de dichas estimaciones (apartado 3.2.2), valorando distintos criterios de admisión condicionados por la implementación práctica de las estrategias de RRM y en particular de las estrategias de gestión de interferencia. Finalmente, se plantea la aplicación de políticas de admisión dirigidas al tratamiento diferenciado de servicios y/o clases de llamadas (3.2.3).

En la siguiente tabla se muestran parámetros esenciales para una mejor comprensión del entorno en el cual se enmarcan las simulaciones. La duración de las conexiones, velocidad de los terminales y tasa de las nuevas conexiones se mantendrán constantes durante todas las

simulaciones. La tasa de conexiones de handover entre celdas es un parámetro que dependerá de cada simulación, puesto que este tipo de conexión no se genera directamente, sino que se creará en función del patrón de movimiento y de las condiciones de canal experimentadas con respecto a su estación base y estaciones vecinas. Como consecuencia, el número de conexiones de handover en el sistema será sustancialmente menor al número de nuevas conexiones, tal y cómo puede observarse en la tabla. Los valores obtenidos de tasa de conexiones de handover son una media de las tasas obtenidas para varias simulaciones.

**Tabla 3-1** - Parámetros de las simulaciones

Parámetro	Valor
Duración de la simulación	3000 s. (+ 500s. de transitorio)
Duración de las conexiones	120 s.
Velocidad de los terminales	3 Km/h
Media de usuarios por celda simulado	90, 99, 108, 117 y 126 usuarios
Tasa de nuevas conexiones por celda	$\frac{\text{Media de usuarios por celda}}{\text{Duración de las conexiones}}$
Tasa de conexiones de handover entre celdas [Conexión de handover /1s.]	90 Usuarios por celda -> 0.04082 99 Usuarios por celda -> 0.04188 108 Usuarios por celda -> 0.04225 117 Usuarios por celda -> 0.04305 126 Usuarios por celda -> 0.04358

### 3.2.1. Estimación de carga

Como se ha comentado, el primer objetivo es estimar de forma efectiva la carga que en un momento determinado está experimentando la celda y el consumo que va a tener una nueva conexión que solicita recursos. El problema se aborda con un planteamiento análogo al usado en [7]. Dado que el consumo medio de recursos de un terminal, para un mismo servicio, depende de la calidad del canal y de interferencia que experimenta, y ésta está, en términos generales, determinada por la distancia a la estación base (no debe olvidarse que la distancia es un parámetro clave para las pérdidas en el canal y por consiguiente, para el consumo de recurso), se plantea una estimación de la demanda usando un modelo de anillos concéntricos. Es decir, se deriva una estimación para cada una de las tres zonas comentadas en el capítulo 2, y representada en la figura 2-2.

De este modo, en primera instancia, el cálculo del consumo global de la celda  $C_g$ , se realizará utilizando la expresión (2), en la cual  $N_{act}(z)$  se corresponde con el número de usuarios activos en la zona  $z$ ,  $\alpha$  es el factor de actividad del tráfico definido en el apartado 2.6 y  $C_{med}(z)$  es el consumo medio de RBs necesarios para la transmisión de un paquete, calculado para la zona  $z$ .

$$C_g = \sum_{z=0}^2 N_{act}(z) * \alpha * C_{med}(z) \quad (2)$$

La estimación se obtiene a partir del análisis de las prestaciones obtenidas en distintas condiciones de carga sobre un sistema en el que no se aplica control de admisión. El sistema funciona de

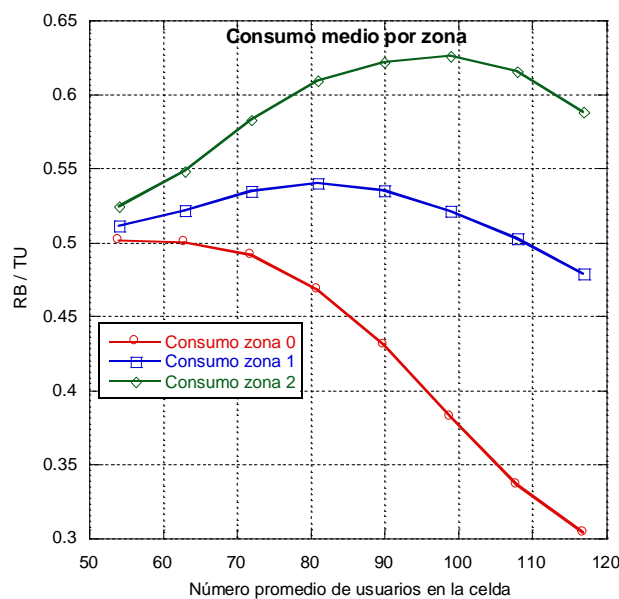
acuerdo con las estrategias de gestión de recursos descritas en el capítulo 2 y considerando los procedimientos de nivel físico y enlace (incluidos los procedimientos de monitorización del canal y ARQ) en las condiciones descritas en el anexo B. La tabla 3.2 contiene los principales parámetros de configuración del sistema.

**Tabla 3-2 – Parámetros de configuración del sistema**

Parámetros		Valores				
Despliegue celular		19 celdas trisectorizadas. Técnica wrap-around				
Distancia entre estaciones base		1732 m				
Modelo de propagación		$L = 128.1 + 37.6 \log_{10} d (km)$ (leer B.2.2.1)				
Desviación de los desvanecimientos lentos		8dB				
Distancia de coherencia de los desvanecimientos lentos		50m				
Correlación de los desvanecimientos		0.5				
Ruido térmico		-174dBm/Hz				
Factor de ruido del receptor		5dB				
Frecuencia central		2,5GHz				
Ancho de banda del sistema		5MHz				
Periodo de scheduling (TTI)		1ms				
Número de RBs		27				
Tamaño del RB		12 subportadoras OFDM durante 1 TTI				
Modelo de desvanecimientos Rayleigh		Velocidad del T_UE (km/h)	Modelo de desvanecimientos Rayleigh (leer B.2.2.3)			
		3	Pedestrian-A extendido			
Modelo del espectro Doppler		Jakes				
Potencia máxima transmitida en la BS		43dBm				
Ganancia de antena en la BS		15dB				
Patrón de radiación horizontal de antena en la BS		70º(-3dB) con 20 dB de front-to-back ratio				
Ganancia de antena en la BS		0dB				
Ganancia de diversidad en transmisión		3dB				
Ganancia de diversidad en recepción		3dB				
Subframe duration (TTI)		1ms				
ARQ delay ( $\Delta_{ARQ}$ )		6 ms				
Intervalo temporal entre CQIs ( $T_{CQI}$ )		1 ms				
Ventana de promediado para CQI ( $W_{CQI}$ )		4 ms				
Retardo CQI ( $\Delta_{CQI}$ )		2 ms				
<b>Máscaras de potencia por RB (dBm/RB)</b>						
Máscara	$M_{med}$	$M_{max}$	$M_{min}$			
Subbanda interior	26 dBm	29 dBm	23 dBm			
Subbanda exterior	31 dBm	31 dBm	31 dBm			
<b>Esquemas de MCS (SINR umbral y tasa de datos para cada MCS)</b>						
MCS index	0	1	2	3	4	5
MConfiguration	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 1/2	64QAM 3/4
Info bits per RB	120	180	240	360	480	540
SINR umbral	10,2dB	14 dB	17,5 dB	21,4 dB	27,4 dB	29,5 dB
MCS index	0	1	2	3	4	5
<b>Modelo de Trafico (Modelo ON-OFF)</b>				Periodos de ON- OFF exponencialmente distribuidos.		
Parámetros		Valores				
		Perfil Ráfaga				
Factor de actividad ( $\alpha$ )		1/4				
Duración media periodo ON ( $T_{ON}$ )		30ms				
Duración media periodo OFF ( $T_{OFF}$ )		90ms				
Tasa promedio requerida por conexión		240 bits/TTI				

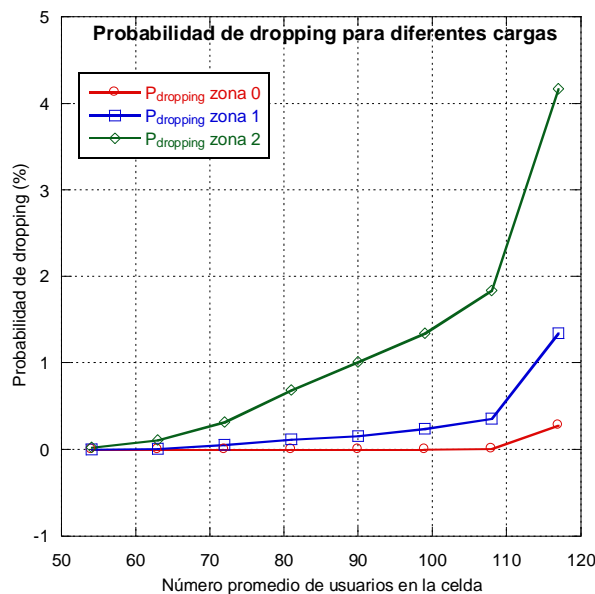
Cota de retardo ( $d_{max}$ )	50ms
-------------------------------	------

Como se ha comentado anteriormente, el consumo promedio de recursos depende de las condiciones de canal e interferencia que experimentan los usuarios, obteniéndose de forma simplificada una estimación promedio por zona, pero también de la distribución espacial de usuarios y servicios en la zona de cobertura de la celda y, como es obvio de la propia implementación de las estrategias de gestión de recursos. Dado que el objetivo de este TFM es abordar en una primera aproximación el diseño de estrategias de CAC, la estimación (basada en los resultados obtenidos en simulaciones) se aborda inicialmente en un escenario de distribución uniforme de usuarios y servicios. Para controlar la estimación heurística de consumo medio de los usuarios por zonas, las pruebas de simulación se llevan a cabo en un escenario de movilidad estática (los usuarios se mueven de forma restringida dentro de su zona y sector) para diferentes cargas de usuarios por celda. En los resultados se obtuvo el consumo medio de los usuarios de cada zona en unidades de RB/TU para distinto número medio de usuarios por celda. En realidad, dado que cada paquete generado en el periodo de actividad de la fuente, tiene una longitud promedio de 2TUs en las simulaciones realizadas, el consumo medio durante el periodo de actividad finalmente se traduce en RB/paquete.



**Figura 3-1 - Consumo medio por usuario**

Como puede observarse, el consumo no es constante y varía en función de la carga que hay en el sistema. Cuando la carga es grande, el consumo medio disminuye debido a que si la estación base consigue transmitir a un usuario, probablemente tenga bastantes TUs en el buffer acumulados de modo que, si puede, usará una modulación más eficiente que transmitirá más información en el mismo RB. Para elegir qué consumo aplicar se analiza la probabilidad de dropping (descarte) para cada número medio de usuarios por celda, representada en la figura 3-2.



**Figura 3-2** - Probabilidad de dropping para diferentes cargas

Asumiendo que la probabilidad de dropping (descarte) debe mantenerse por debajo del 1% para garantizar una calidad de servicio mínima, a partir de la gráfica se observa que el número máximo de usuarios soportables es 90 usuarios en media, escogiéndose los valores de consumo que hay para ese nivel de ocupación. En cualquier caso, la estimación de consumo final es el resultado de multiplicar el consumo estimado en la transmisión del paquete por el factor de actividad de las fuentes. Esto es, asumiendo un consumo de 1,24318 RBs, el consumo real de una conexión activa es de  $\alpha \cdot 1,24318$  RBs.

**Tabla 3-3** - Consumo medio por zona

Zona	Consumo (RB/TU)	Consumo (RBs)
0	0.4302	0.8604
1	0.53477	1.06954
2	0.62159	1.24318

Estos valores son bastante conservadores debido a que en situaciones de alta carga, como se ha visto, el consumo puede ser menor. Por ello, una parte de las simulaciones se centra en evaluar los resultados para distintos valores de consumo.

### 3.2.2. Propuesta básica de admisión

Para el diseño de este control de admisión se han tenido en mente las restricciones que imponen otros mecanismos de gestión de recursos de modo que se logre la máxima eficiencia posible. En concreto, en el sistema simulado, la coordinación de interferencias limita el uso de ciertos recursos lo cual debería ser tenido en cuenta de cara a diseñar las políticas de control de admisión. Como ya se explicó, en cada celda existen 27 RBs, 18 de los cuales son utilizados para el interior y los otros 9 para el exterior. Estos últimos, además, están sectorizados de modo que cada sector

tiene 3 RBs disponibles. Los RBs exteriores son los recursos que transmiten con una mayor máscara de potencia por lo que es muy probable que la mayor parte del tiempo sean los únicos recursos consumidos por los usuarios de la zona 2. Consecuentemente, se ha decidido utilizar una política de admisión que tenga en cuenta la zona en la que se encuentra el usuario que solicita recursos. Concretamente, la política de admisión aplica una condición para todas las zonas y además, una segunda condición a la zona 2 relacionada con estos 3RBs exteriores.

La tabla 3.4 resume el conjunto de variables que se manejarán en la definición matemática de esta propuesta y las distintas variantes que se definirán posteriormente.

**Tabla 3-4** - Nomenclatura utilizada en las políticas de admisión

Símbolo	Significado
$N_{con}$	Número de RBs que están siendo utilizados por las conexiones en la celda
$N_{req}$	Número de RBs que se considera que utilizará la nueva conexión
$N_{con\_zona2}$	Número de RBs que están siendo utilizados por las conexiones en la zona 2
$N_{total}$	Número total de RBs que dispone la celda en cada subtrama

Utilizando la nomenclatura anterior, los criterios de admisión aplicados en cada zona se especifican en la tabla 3.5. Como puede observarse, los usuarios de las zonas 0 y 1 van a poder usar 18 RBs interiores más los 3 RBs exteriores del sector en el que se encuentran, es decir, pueden usar hasta 21 RBs. Los usuarios de la zona 2 podrán usar esos 21 RBs también pero en la mayor parte de los casos sólo podrán utilizar, debido a la calidad de la señal recibida, los exteriores, por ello la segunda condición. Aun así, si estos usuarios tuvieran un buen canal y no estuvieran excesivamente alejados, podrían usar RBs del interior, por lo que se añade un margen  $\xi$ . El valor de este margen para este control de admisión será 2.

**Tabla 3-5** - Condiciones utilizadas en la política de admisión

Zona	Condición
0	$N_{con} + N_{req} \leq 21$
1	$N_{con} + N_{req} \leq 21$
2	$N_{con} + N_{req} \leq 21$ y $N_{con\_zona2} + N_{req} \leq 3 + \xi$

En una primera fase, para comprobar la bondad de la estimación, la aplicación del criterio de admisión se restringe a un escenario en el que no se contempla la movilidad de terminales entre zonas o sectores dentro de la propia celda o entre celdas. Esto es, el criterio de admisión aplica exclusivamente a la generación de conexiones nuevas. Los resultados de dicha evaluación se incluyen en el anexo C. En las simulaciones siguientes, la evaluación se efectúa en un sistema en el que se admite la libre movilidad del usuario dentro de la celda. En este caso, salvo que se indique lo contrario, se ha contemplado que cuando un usuario cambie de sector o zona deba pasar un control de admisión. Al cambiar de zona, varía su consumo por lo que las condiciones en las cuales se aprobó su entrada en el sistema habrán cambiado y por ello puede ser útil aplicar el control de admisión entre zonas. El control de admisión entre sectores también puede ser útil,



---

principalmente si el usuario estaba en la zona 2, ya que los RBs exteriores pueden estar ocupados, y en ese caso, la demanda de recursos sobrepasaría los límites del sistema en la zona 2.

Cabe destacar que para la comparación de los diferentes CAC se emplea la probabilidad de dropping o descarte de paquete de las conexiones en cada zona, la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones en cada zona y la probabilidad de pérdida de conexión por cambio de sector, zona y celda (handover). La probabilidad de dropping se calcula como el número de TUs perdidos por superar la cota máxima de retardo permitido, dividido para el número de TUs generados. Por otro lado, las probabilidades de bloqueo se obtienen como el número de conexiones bloqueadas dividido por el número de conexiones generadas. Por último, las probabilidades de pérdida se obtienen como el número de conexiones que no han logrado el cambio de sector, zona o celda entre el número de conexiones que lo han intentado.

A partir de la propuesta básica recogida en la tabla 3.5, en este subapartado y en base a los resultados introducidos, se irán modificando distintos aspectos de este control de admisión base para estudiar cuales son los cambios que mejores resultados proporcionan. Los mecanismos de gestión de recursos, parámetros de configuración del sistema, modelos de movilidad y tráfico se mantendrán fijos, centrando las modificaciones en parámetros y criterios que regulan el proceso de admisión. Todas las propuestas presentadas se caracterizan por no abordar el tratamiento diferenciado de conexiones nuevas y de handover. La inclusión de políticas dirigidas a gestionar la movilidad entre celdas se aborda en el subapartado 3.2.3.

### *3.2.2.1. Impacto de la estimación del consumo de capacidad*

Uno de los parámetros que puede ser modificado es el consumo medio por zona. En el apartado 3.2.1 se calculó este valor siguiendo un razonamiento válido pero puede que no sea el óptimo debido a que por ejemplo, puede no ser correcto asumir que los usuarios van a usar en media una modulación que permite enviar dos TU por RB. Además, en un entorno de movimiento, se añaden fenómenos con los que no se contaba antes y que previsiblemente harán cambiar los resultados.

Para evaluar la validez de la estimación efectuada, se ha tomado la probabilidad de dropping (descarte), al tiempo que se analiza la probabilidad de bloqueo de nuevas conexiones y de pérdida en los distintos trasposos, para distintas condiciones de carga ofrecida. Como es lógico, alcanzar los límites de scheduling del sistema implica la consideración de niveles de carga ofrecida elevados, lo que se traduce en tasas de bloqueo muy elevadas. Estas tasas no son deseables en despliegues reales lo que implica que debería redimensionarse el sistema. No obstante, el estudio es deseable en la medida que permite valorar la fiabilidad de las estimaciones efectuadas.

En la tabla 3-6 se muestran los valores utilizados.

**Tabla 3-6** - Valores de consumo simulados

Tipo de valores	Consumo zona 0	Consumo zona 1	Consumo zona 2
Bajos	0,82	1,02	1,19
Medios	0,8604	1,06954	1,24318
Altos	0,905	1,1	1,29
Promedios en toda la celda	1,0577	1,0577	1,0577

El estudio se ha llevado a cabo tomando como referencia cuatro vectores diferentes de consumo. En primer lugar los valores medios se corresponden con la estimación por zonas derivada del análisis del sistema a nivel de enlace. Los valores altos, corresponden con una sobreestimación conservadora de la demanda de capacidad. A partir de los resultados derivados en los primeros análisis incluidos en el anexo C, se consideró la conveniencia de sobreestimar ligeramente el consumo para garantizar la QoS. No obstante, como se verá a continuación, en este escenario la sobreestimación no es necesaria ya que el patrón de movilidad de los terminales hace que la probabilidad de mantener malas condiciones de canal o interferencia se alivie. Las figuras 3.3 y 3.4 ilustran los valores obtenidos en ambos casos. En estas figuras, las curvas con leyenda  $P_{\text{bloqueo zona } i}$  se corresponden con la probabilidad de bloqueo de nueva conexiones en la zona  $i$ . Adicionalmente, las curvas con leyenda  $P_{\text{perdida HO (Handover) intercelda}$ ,  $P_{\text{perdida CAC interzonas e intersector}}$  se corresponden respectivamente con la probabilidad de pérdida de conexión por handover entre celdas, al aplicar CAC en el cambio de zonas y en CAC en el cambio de sector dentro de la misma celda. Como puede observarse y es previsible, conforme el valor del consumo previsto se incrementa, la probabilidad de dropping disminuye y el bloqueo aumenta. La causa es que al considerar un mayor consumo, el control de admisión permitirá la entrada a menos conexiones, como se observa en las probabilidades de bloqueo, lo cual disminuirá la carga de usuarios servidos y por tanto la probabilidad de dropping, al haber menos usuarios para el mismo número de recursos.

En ambos casos, la probabilidad de dropping se sitúa por debajo de los límites máximos tolerables, lo que sugiere la posibilidad de considerar un nivel más bajo (subestimación) de consumo que permita reducir los elevados niveles de bloqueo, particularmente en la zona 2 (los resultados se ilustran en la figura 3.5).

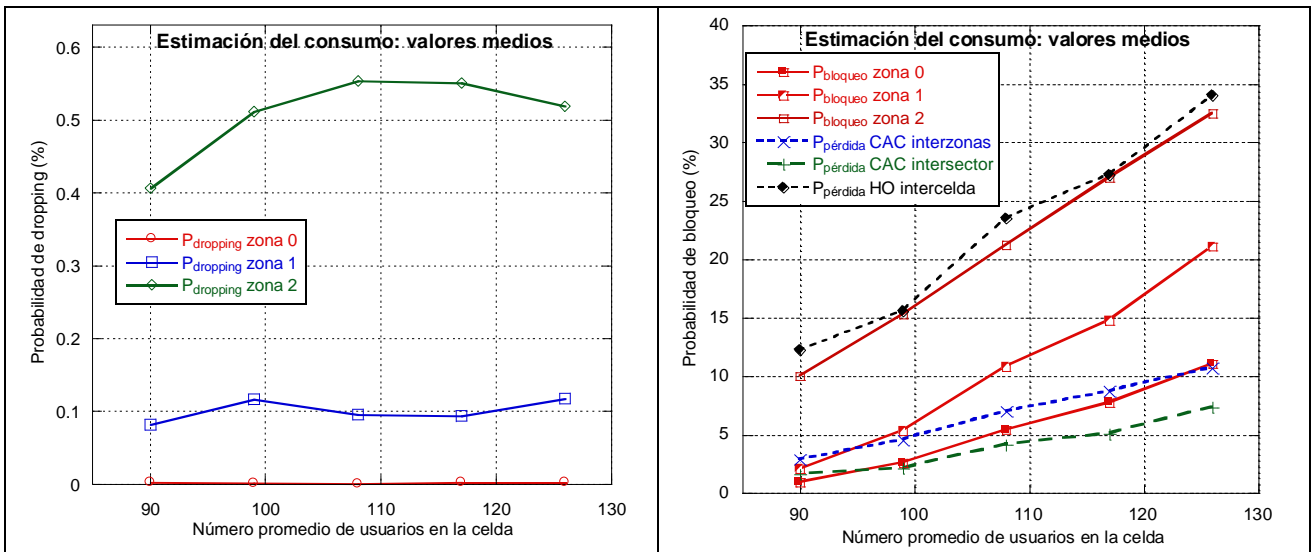


Figura 3-3 – Resultados de la estimación de consumo para valores medios

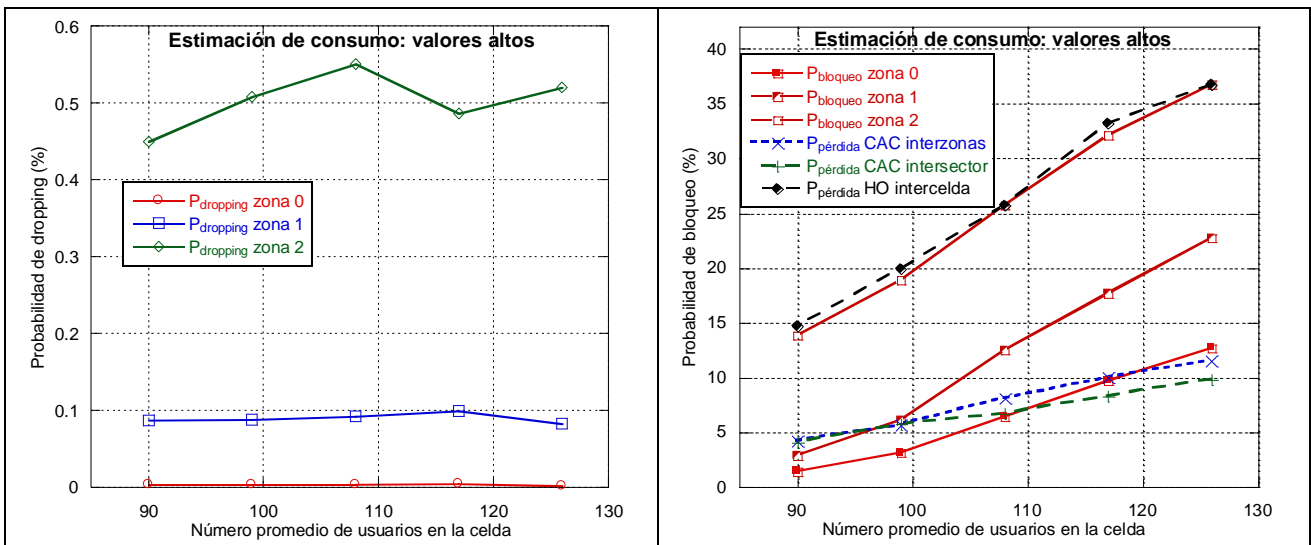


Figura 3-4 – Resultados de la estimación de consumo para valores altos

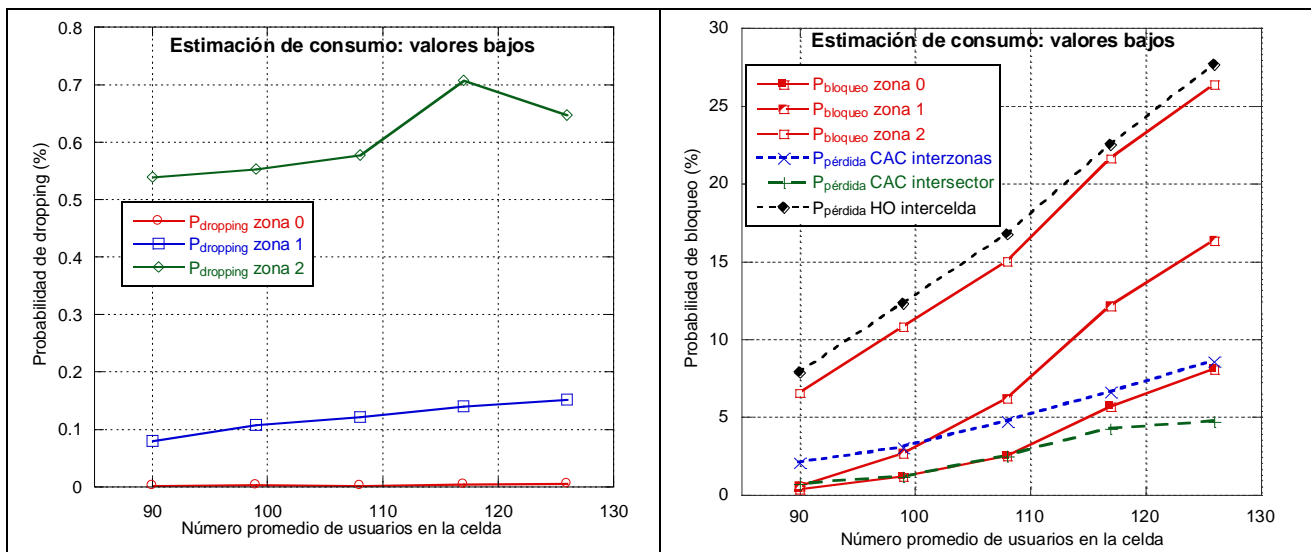


Figura 3-5 – Resultados de la estimación de consumo para valores bajos

Cabe destacar el hecho de que en los tres casos, la probabilidad de pérdida por handover sea muy similar al bloqueo de nuevas conexiones en zona 2, lo cual es razonable dado que las conexiones provenientes de un handover van a introducirse siempre en la zona 2 de la celda y por ello comparten el mismo consumo medio de recursos y se aplica la misma política de admisión que a las nuevas conexiones localizadas en esta zona. El hecho de que en algún caso, por ejemplo en la figura 3-5, la probabilidad de pérdida por handover sea algo mayor se debe a que el número de handovers es notablemente menor al de conexiones generadas, cómo ya se explicó, lo cual impide que la resolución de los valores medidos sea tan buena como en la probabilidad de bloqueo. En caso de que el número de handovers fuera superior, los valores obtenidos serían mucho más similares.

Finalmente, a efectos comparativos, se ha evaluado la aplicación de una estimación promedio de consumo, única para todas las zonas de la celda (figura 3.6). Es decir, el consumo de los usuarios de la zona 0 se sobreestima mientras que el de la zona 2 se subestima. El consumo de la zona 1 es similar. Esto lleva al sistema a permitir la entrada a muchos más usuarios de la zona 2 y a restringirla a usuarios de la zona 0, lo cual debería significar una degradación en los resultados globales debido a que los usuarios de esta zona son más propensos a consumir muchos recursos por su mal canal. Sin embargo, en la figura 3-6 se observa que la probabilidad de dropping no es más alta que en los casos anteriores aunque sí que la probabilidad de bloqueo de todas las zonas se iguala. La razón se encuentra en que el número de usuarios admitidos en la zona 2 ha aumentado pero no excesivamente, ya que se recuerda que para lograr ser aceptada, una conexión en la zona 2 debe satisfacer dos condiciones. Además, la utilización de recursos en los anteriores casos no era muy alta por lo que existía todavía lugar para más conexiones sin que el sistema se saturara completamente.

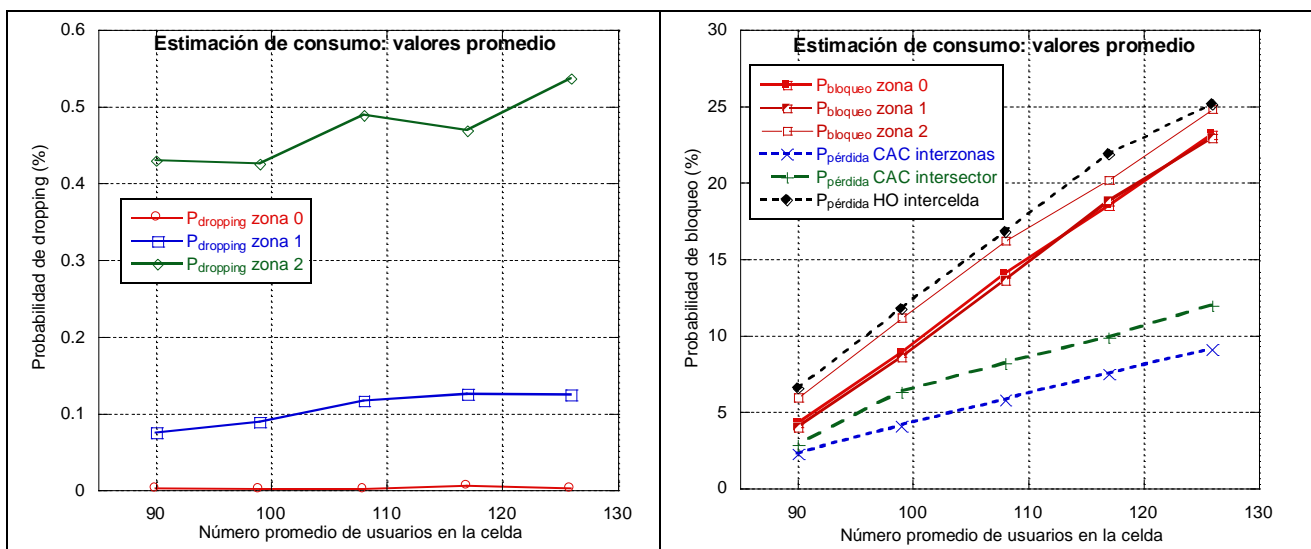


Figura 3-6 – Resultados de la estimación de consumo para valores promedio en toda la celda

El escenario analizado anteriormente es favorable en la medida en que la distribución de generación de tráfico es uniforme en el sistema. Para comprobar los problemas que trae el subestimar los recursos consumidos por los usuarios de la zona 2, se ha hecho una prueba en la que la generación de conexiones deja de ser homogénea y pasa a ser heterogénea de modo que la probabilidad de generarse en las distintas zonas es:

$$zona\ 0 = 25\% \quad zona\ 1 = 25\% \quad zona\ 2 = 50\%$$

Para comparar, se ha simulado este escenario con consumos medios dependientes de la zona (figura 3.7). y consumos promedio iguales para todas las zonas (figura 3.8), cuyos resultados se muestran a continuación.

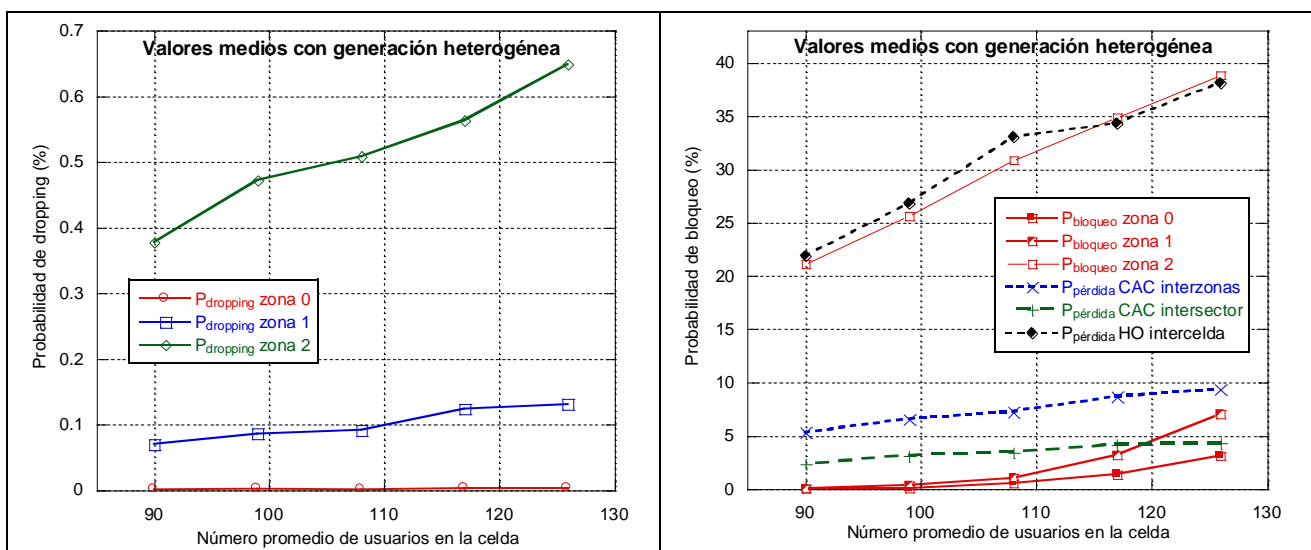
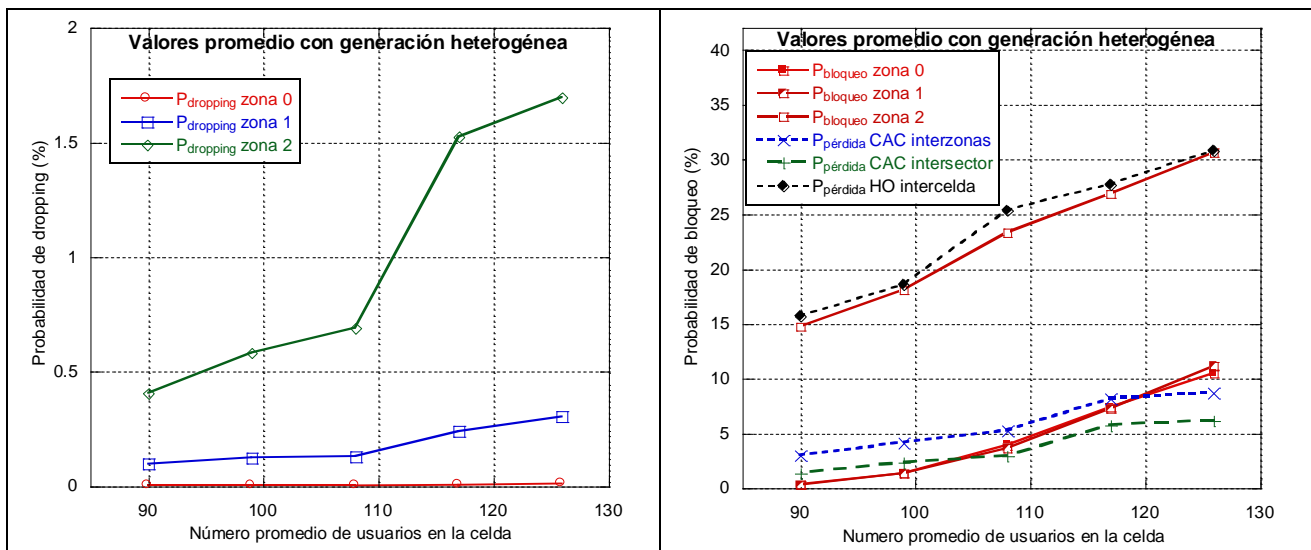


Figura 3-7 – Consumo de valores medios aplicando generación heterogénea



**Figura 3-8 – Consumo valores promedio en toda la celda aplicando generación heterogénea**

Se observa rápidamente como al subestimar los recursos consumidos por los usuarios de la zona 2, la probabilidad de dropping aumenta notablemente y para altas cargas es mayor al 1%. Esto es debido a que en este caso, el número de usuarios pertenecientes a la zona 2 es bastante mayor que el número de usuarios de otras zonas y al consumir mucho más, llegan a monopolizar los recursos. Utilizando consumos diferenciados por zonas se evita este monopolio y la probabilidad de dropping se mantiene en unos niveles asumibles.

**3.2.2.2. Impacto del parámetro  $\xi$  aplicando CAC en sector, zona y celda**

Otro de los valores que puede ser modificado es el umbral de la segunda condición de la política de admisión aplicada en la zona 2. Para ello, se han realizado simulaciones para tres valores de  $\xi$ , en concreto para 1, 2 y 3. En el anexo C, donde se extiende este estudio para valores superiores, se comprueba cómo a partir de 3 los cambios son mínimos. Como hasta ahora, estas simulaciones han utilizado un número diferente de usuarios por celda y en un entorno de movilidad total. Las figuras 3-9, 3-10 y 3-11 muestran los resultados.

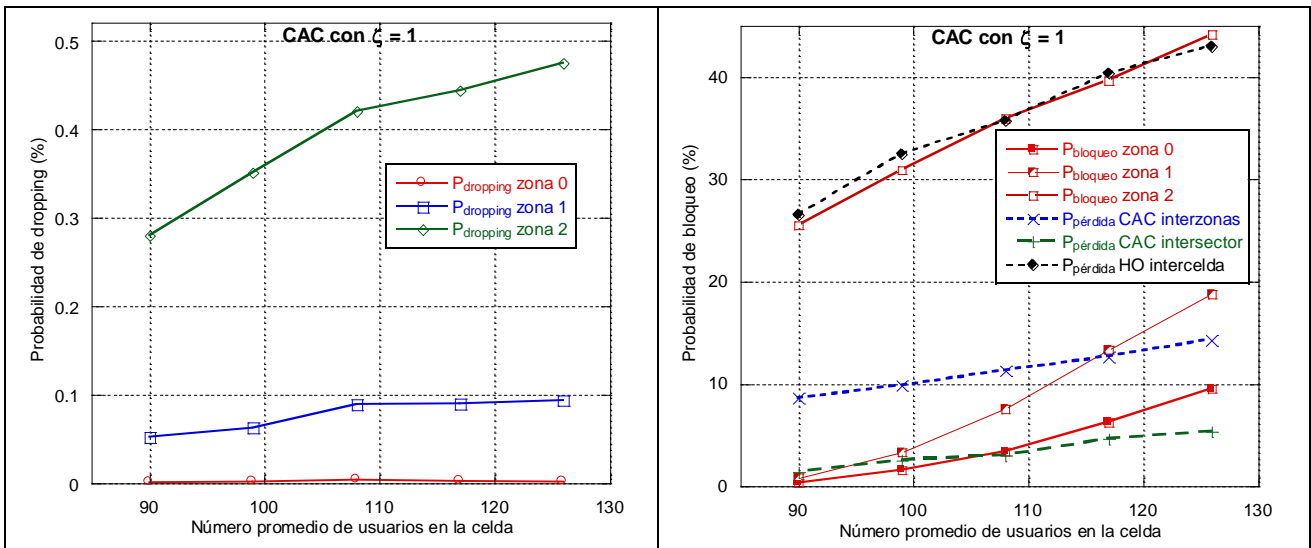


Figura 3-9 –Resultados para el CAC base fijando  $\xi = 1$

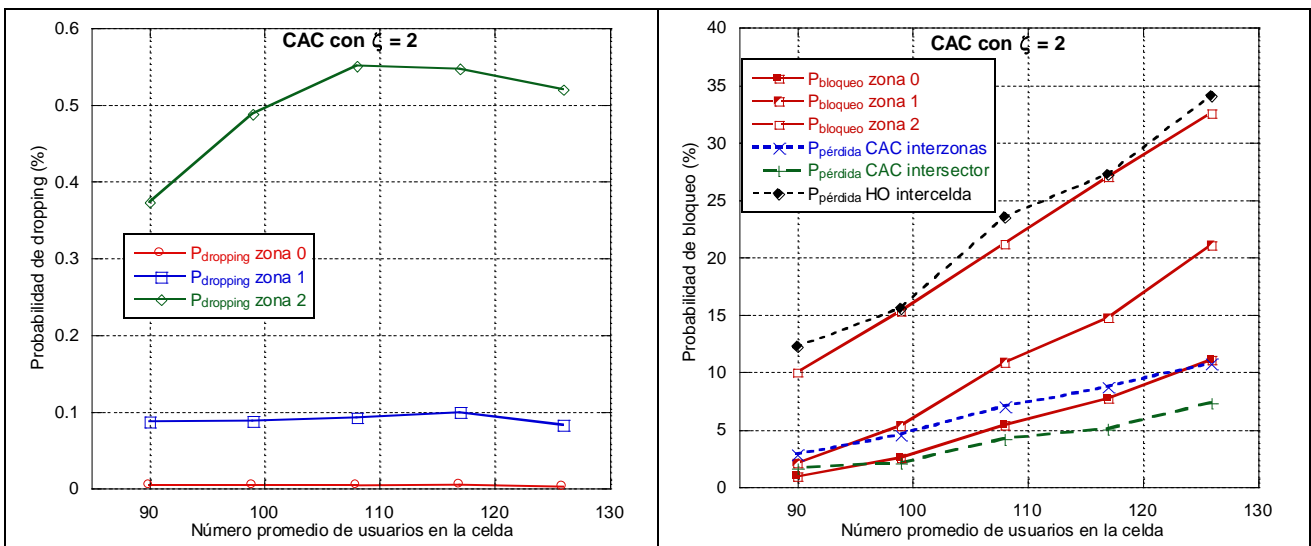


Figura 3-10 - Resultados para el CAC base fijando  $\xi = 2$

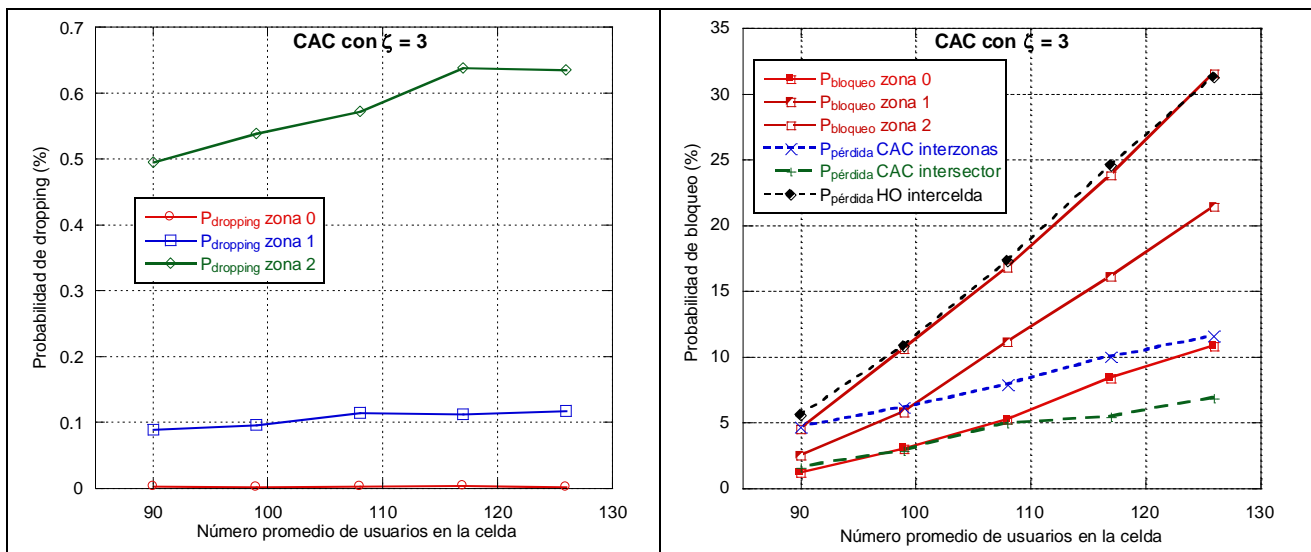


Figura 3-11 - Resultados para el CAC base fijando  $\xi = 3$

Los resultados que se obtienen indican que la probabilidad de dropping es mayor conforme  $\xi$  aumenta. Esto es lógico debido a que aumentar esta variable supone ser más permisivos con los usuarios de la zona 2, que recordemos son los que requieren más recursos. En cualquier caso, el nivel de descarte se mantiene por debajo de los límites permitidos. Como se observa en las gráficas de la probabilidad de bloqueo, se produce una reducción bastante acusada de la probabilidad de bloqueo en la zona 2 conforme  $\xi$  aumenta.

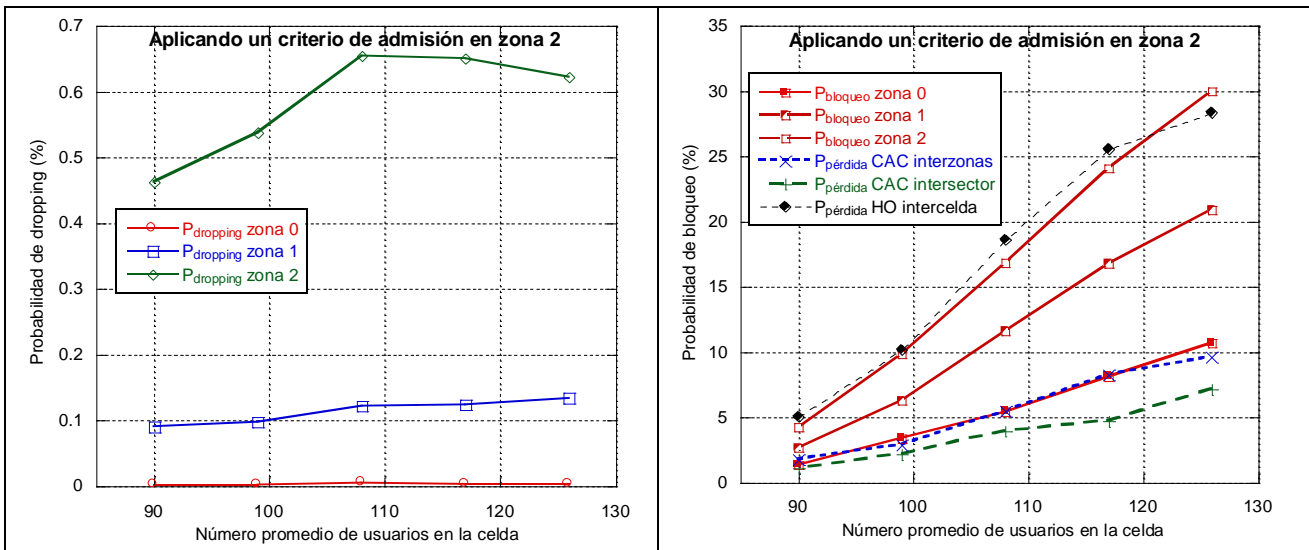
3.2.2.3. Esquema modificado. Aplicación de un único criterio de admisión en la zona 2.

El CAC que se ha definido como base utiliza dos condiciones para los usuarios que requieran recursos en la zona 2. Así, se adapta a las condiciones impuestas por la coordinación de interferencias, tal y como se ha explicado al principio de este subapartado. En línea con las modificaciones realizadas y a efectos comparativos, se trata de comprobar la respuesta del sistema en caso de que la política de admisión fuera común a todas las zonas, eliminando la condición adicional para los usuarios de zona 2, tanto de nuevas conexiones como de conexiones provenientes de un handover. Por tanto, en todas las zonas únicamente se utiliza la condición que consideraba el conjunto de recursos globales accesibles en un determinado sector, es decir, la condición (3):

$$N_{con} + N_{req} \leq 21 \quad (3)$$

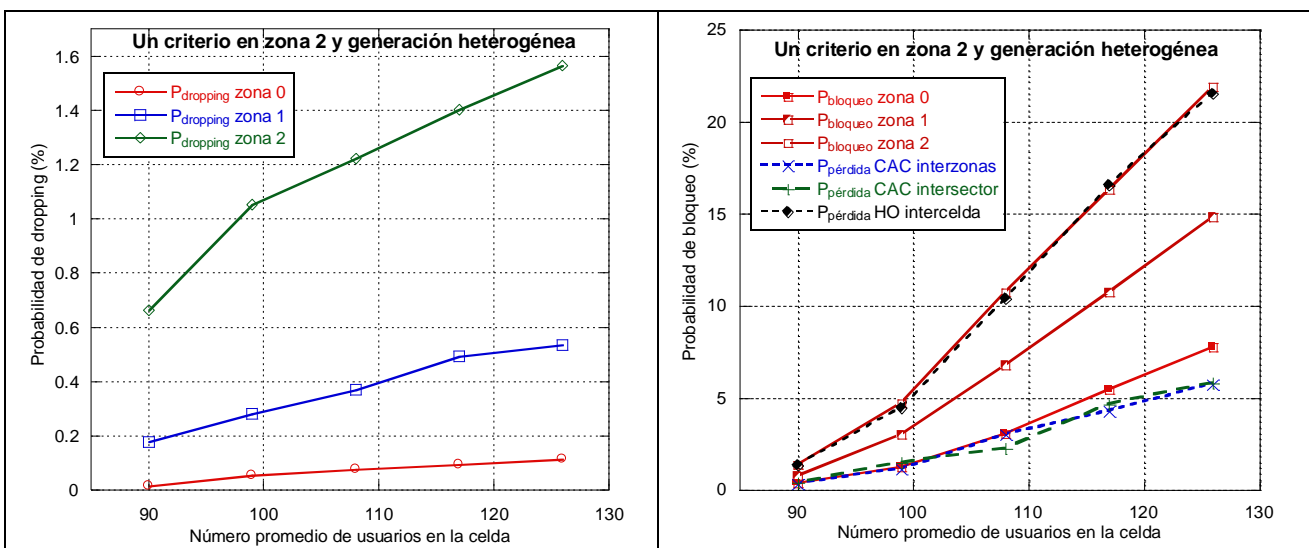
A priori, este control de admisión debería permitir la entrada a un mayor número de usuarios pertenecientes a la zona 2, lo cual debería degradar las prestaciones globales al ser éstos los usuarios que más consumen. La figura 3-12 muestra los resultados obtenidos.





**Figura 3-12 - Resultados para el CAC base usando sólo un criterio de admisión en zona 2**

Se observa que la probabilidad de pérdida por handover y la de bloqueo de nuevas conexiones en zona 2 ha mejorado significativamente, debido a la menor exigencia en la política de admisión para los terminales más alejados. Por otro lado, la probabilidad de dropping ha empeorado pero continúa dentro de los márgenes requeridos, lo cual no cumple exactamente con lo predicho. Debe recordarse que la generación de nuevas conexiones en la celda es homogénea, razón que añadida al hecho de que los usuarios de la zona 2 requieran un consumo más elevado que el de otras zonas, supone que la presencia de este tipo de usuarios sea menor en el sistema. Tal y como se ha hecho en el apartado 3.2.2.1, se ha evaluado este esquema de CAC en un entorno de generación heterogénea de usuarios, de manera que la mayor parte de éstos se creen en la zona 2. Esto debería degradar gravemente los resultados obtenidos, como se aprecia en la figura 3-13.



**Figura 3-13 - CAC base, un criterio de admisión en zona 2 aplicando generación heterogénea**

Efectivamente, se demuestra que el CAC probado puede presentar problemas ante escenarios de de naturaleza heterogénea, ya que no evita la presencia excesiva de usuarios en zona 2. La probabilidad de dropping se degrada por encima del 1% y además no parece que se estabilice por lo que se asume que continuaría subiendo para más carga.

3.2.2.4. Impacto de una única admisión a nivel de celda vs. admisión por zona y/sector.

Otro de los aspectos que puede modificarse sobre el control de admisión para comprobar su funcionamiento es el número de controles de admisión aplicados sobre un terminal a medida que se mueve en la celda. En la propuesta inicial se utilizan 3 controles de admisión: en zona, sector y celda. En este apartado se va a proceder a comparar los resultados del CAC base con un escenario en el cual sólo se aplica control de admisión en la celda, además del control de admisión aplicado al activar la conexión. En este caso, y a pesar de que no se lleva a cabo la admisión cuando el terminal se mueve de una zona a otra, sí se actualiza la estimación del consumo global considerando los valores estimados para cada zona.

Los resultados deberían ser peores cuando no se aplica control de admisión en sector y zona debido a que no existe ningún control dentro de la celda para los usuarios que se muevan hacia la zona 2. Si muchos usuarios siguieran un patrón de alejamiento o estando en zona 2 fueran a un sector cuyos RBs externos estuvieran siendo utilizados, los recursos demandados podrían superar a los ofertados, lo cual aumentará de manera considerable la probabilidad de dropping. En todo caso, como el movimiento de los usuarios es homogéneo, se espera que el número de usuarios que se muevan hacia la zona 2 y hacia la zona 0 sea similar, por lo que la demanda de recursos quedará equilibrada. Las figuras 3-14 y 3-15 muestran los resultados.

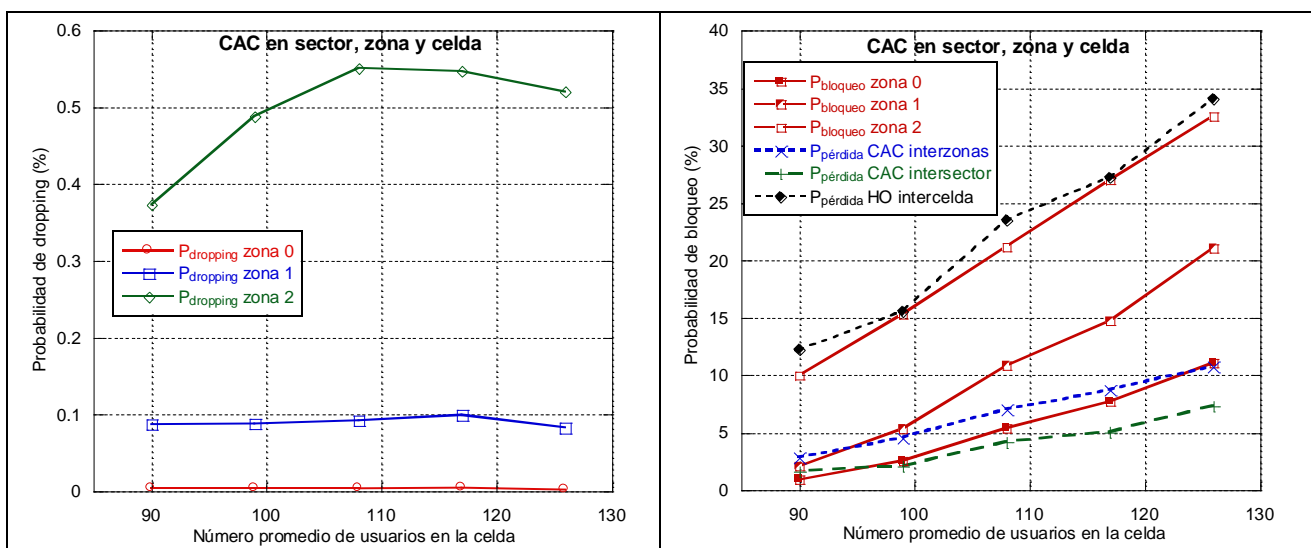


Figura 3-14 –Resultados utilizando bloqueo para CAC en zona, sector y celda

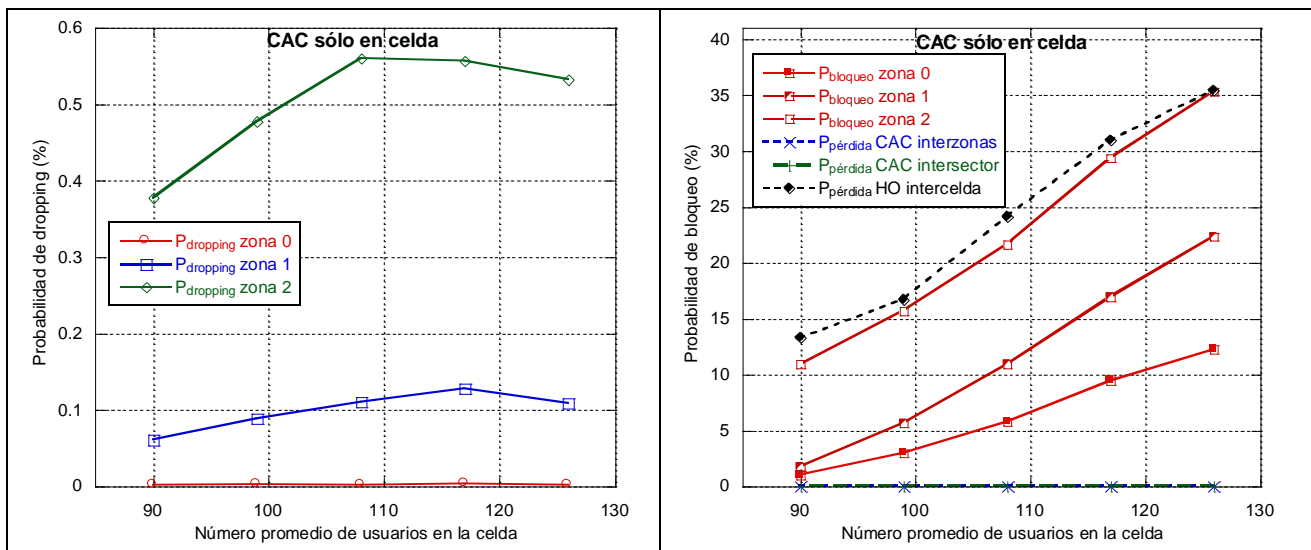


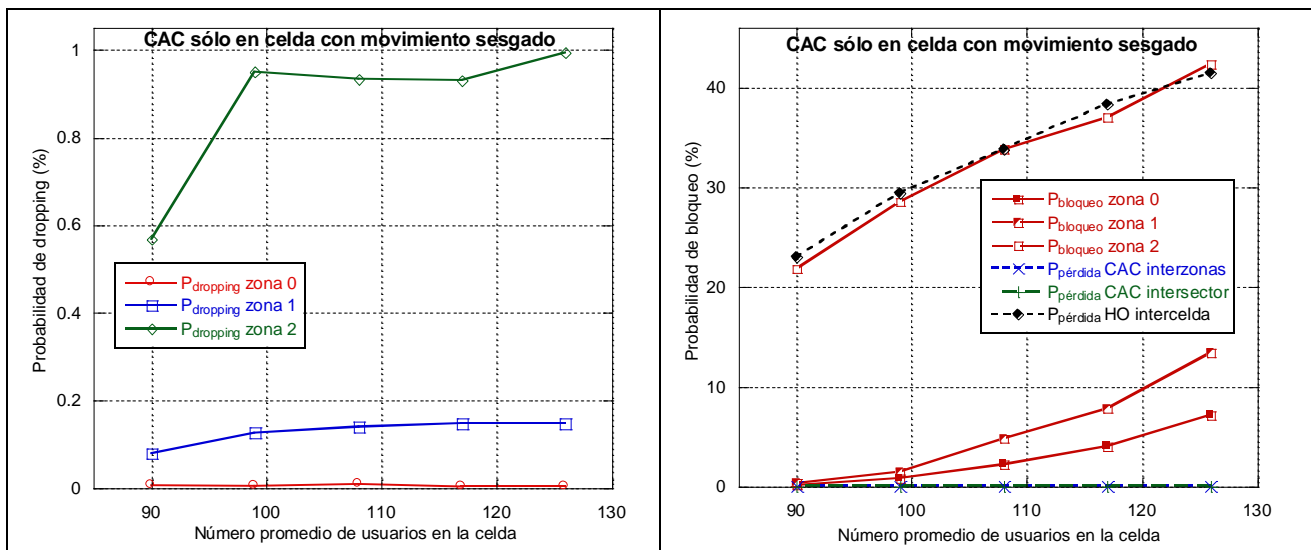
Figura 3-15 –Resultados utilizando bloqueo para CAC sólo en celda

Como se había previsto, los resultados son bastante parecidos sobre todo en la probabilidad de dropping. El bloqueo cambia levemente y la probabilidad de pérdida por handover aumenta ligeramente. Este aumento simplemente aparece por el hecho de que habrá más usuarios, ya que el CAC en zona y sector ya no descarta conexiones. Puede observarse en la figura 3.14 que las probabilidades de bloqueo en zona y sector en el esquema de control de admisión básico son bajas por lo que dejar de practicarlo no ofrece cambios significativos.

Para comprobar el razonamiento expuesto en cuanto a la degradación de la probabilidad de dropping, se ha simulado este control de admisión en un escenario en el cual el movimiento se sesga de modo que los usuarios tiendan a consumir más recursos conforme avanza el tiempo de conexión. Para ello, se añaden las siguientes limitaciones al patrón del movimiento de los usuarios:

- Los usuarios de la zona 2 no podrán abandonar esta zona durante toda su conexión aunque sí tienen permitido el handover a otra celda.
- El ángulo de dirección que toman los usuarios de la zona 0 y 1 será tal que siempre se alejen de la celda. Este alejamiento no tiene por qué ser en dirección radial, por lo que existirán usuarios que se alejen muy lentamente y otros muy rápidamente.

En este escenario los resultados deberían salir peores aplicando un control de admisión sólo en la celda, ya que los usuarios de la zona 2 acabarían monopolizando los recursos. La figura 3-16 los muestra.



**Figura 3-16 - CAC con bloqueo sólo en celda aplicando movimiento sesgado hacia zona 2**

La probabilidad de dropping se degrada pero no excesivamente y sigue dentro de los parámetros requeridos. El número de usuarios de la zona 2 ha aumentado y de hecho es mayor en media que en las otras zonas, pero en el escenario simulado el número de conexiones nuevas y de handover sobre la zona 2 no alcanza los niveles impuestos en el escenario heterogéneo simulado en la figura 3-13. A pesar de que el umbral de QoS se mantiene, los resultados obtenidos corroboran que la admisión de nuevas llamadas debe efectuarse considerando los consumos específicos en la zona de acceso. Adicionalmente, dependiendo del patrón de movimiento conjunto de los terminales, puede ser necesaria la aplicación de un control de admisión dinámico que reconsidere la admisión de la conexión al moverse dentro de la celda o, alternativamente, la especificación de un criterio de admisión que no solo considere el nivel de consumo del usuario en la zona de acceso, sino su movimiento futuro hacia otras zonas de la celda.

### 3.2.3. Políticas de admisión dirigidas al tratamiento diferenciado de servicios o tipos de llamadas.

Aunque el ámbito de los análisis abordados en esta TFM se ha limitado a un escenario monoservicio y se mantendrá restringido a él, el objetivo es explorar las prestaciones de distintas estrategias dirigidas a proporcionar un tratamiento diferenciado a las llamadas procedentes de handover. Como ya se ha explicado, es preferible que un usuario no pueda comenzar una conexión a que el sistema la permita y, durante su curso, se pierda por falta de recursos en la red. Por ello, es esencial aplicar algún mecanismo de reserva que prevea las conexiones de handover que van a requerir recursos de la celda, lo cual puede realizarse de diferentes maneras como se verá a continuación.

La reserva de recursos, tal y como se ha dicho y se explica en mayor detalle en el apartado A.3.1 del anexo A, puede ser dividida en estática o dinámica dependiendo de si mantiene el número de

recursos reservados constante o lo adapta a la evolución del sistema. En [7,14], los autores se decantan por la estrategia estática, es decir, durante toda la simulación habrá un número determinado de recursos que sólo podrán ser utilizados por las conexiones provenientes de un handover, lo cual permite una reserva efectiva y sencilla pero tiende a ser tremendamente ineficiente. Por otro lado, la reserva dinámica reservará recursos del sistema para las conexiones de handover en función de cómo evoluciona el sistema y del número de handovers que la estación base estima. Para ello, requiere información adicional la cual puede venir de la propia celda o de celdas vecinas. Si proviene de la propia celda, se trata de una reserva dinámica y local, estrategia que se utiliza en [9]. Por otro lado, si la información proviene de las celdas vecinas, la reserva se define como dinámica y distribuida.

Este apartado trata, en primer lugar, de evaluar propuestas preliminares de reserva basadas en los tres enfoques descritos anteriormente con la finalidad de obtener una comparativa de todas ellas. En segundo lugar, se pretende valorar la modificación de algunos de los parámetros contenidos en cada propuesta de reserva de recursos y así escoger la alternativa que mejores resultados ofrezca.

Para ser capaces de lograr una buena comparación de las propuestas, los resultados posteriores incluyen una nueva medida denominada grado de servicio (GoS), que se define con la expresión 4.

$$GoS = P_{bloqueo} + 10 * P_{pérdida\_HO} \quad (4)$$

donde  $P_{bloqueo}$  es la probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas y  $P_{pérdida\_HO}$ , la probabilidad de perder una llamada al efectuar un handover entre celdas. Esta medida dará una idea de las conexiones que no pueden ser servidas bien por bloqueo o descartadas por falta de recursos. Debe destacarse que esta medida está ponderada, dando mayor peso a la probabilidad de pérdida de llamadas de handover.

### 3.2.3.1. Reserva estática

El primer esquema a evaluar se trata de la reserva estática de recursos, la cual se basará en una reserva de recursos exteriores. Tal y como se mencionó en el apartado 3.2.2, en cada celda existen 18 RBs interiores y 9 RBs exteriores, los cuales están sectorizados en tres sectores. Por tanto, los usuarios de cada sector pueden repartirse hasta 21 RBs. La reserva estática propuesta reservará recursos exteriores dado que una conexión proveniente de handover previsiblemente consumirá este tipo de recursos. Para ello, al igual que en [7] o [14], se modifica el umbral de la política de admisión y se hace dependiente del tipo de conexión: nueva conexión o conexión de handover. En concreto, tomando como base la propuesta de admisión inicial con un margen  $\xi=2$ , se prueban dos configuraciones reservando 1 y 2 RBs respectivamente. La tabla 3-7 y 3-8 indica cómo quedan las condiciones de las políticas de admisión utilizadas en la zona 2.

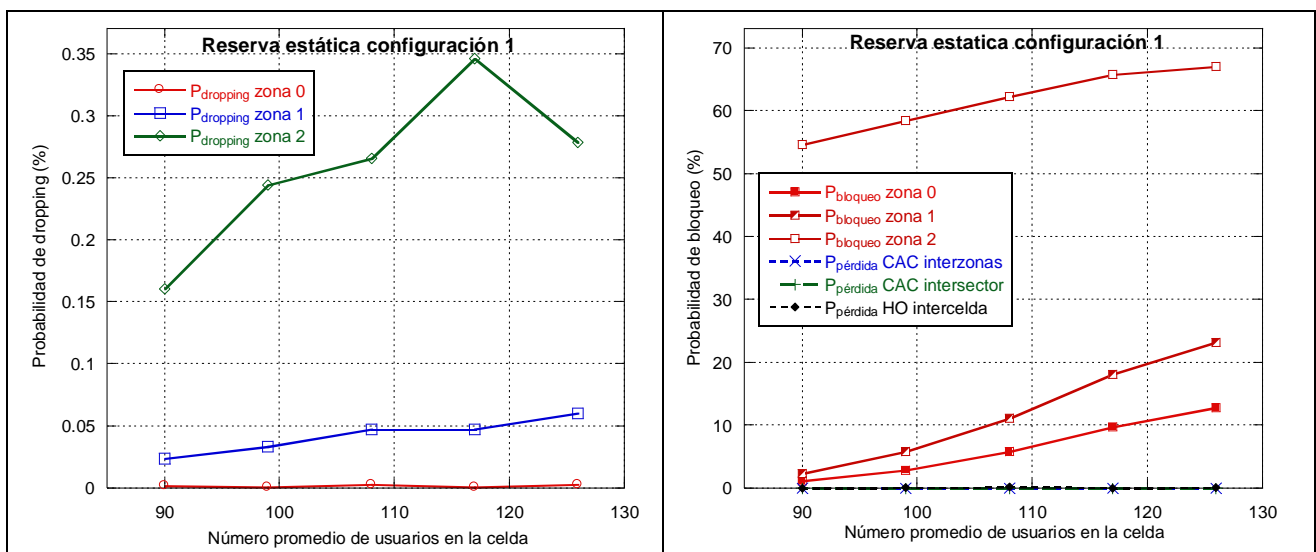
**Tabla 3-7 – Política de admisión para la configuración 1**

	Para nuevas conexiones	Para conexiones de handover
Condición 1	$N_{con} + N_{req} \leq 19$	$N_{con} + N_{req} \leq 21$
Condición 2	$N_{con\_zona2} + N_{req} \leq 3 + 0$	$N_{con\_zona2} + N_{req} \leq 3 + 2$

**Tabla 3-8 - Política de admisión para la configuración 2**

	Para nuevas conexiones	Para conexiones de handover
Condición 1	$N_{con} + N_{req} \leq 20$	$N_{con} + N_{req} \leq 21$
Condición 2	$N_{con\_zona2} + N_{req} \leq 3 + 1$	$N_{con\_zona2} + N_{req} \leq 3 + 2$

Para realizar un análisis completo de ambas estrategias, las figuras 3.17, 3.18 representan para la configuración 1 y 2, respectivamente las probabilidad de bloqueo y pérdida, así como la probabilidad de descarte de paquetes. La figura 3.19 presenta una comparación entre ambas estrategias y el CAC base.



**Figura 3-17 - Dropping y bloqueo para reserva de recursos estático. Configuración 1**

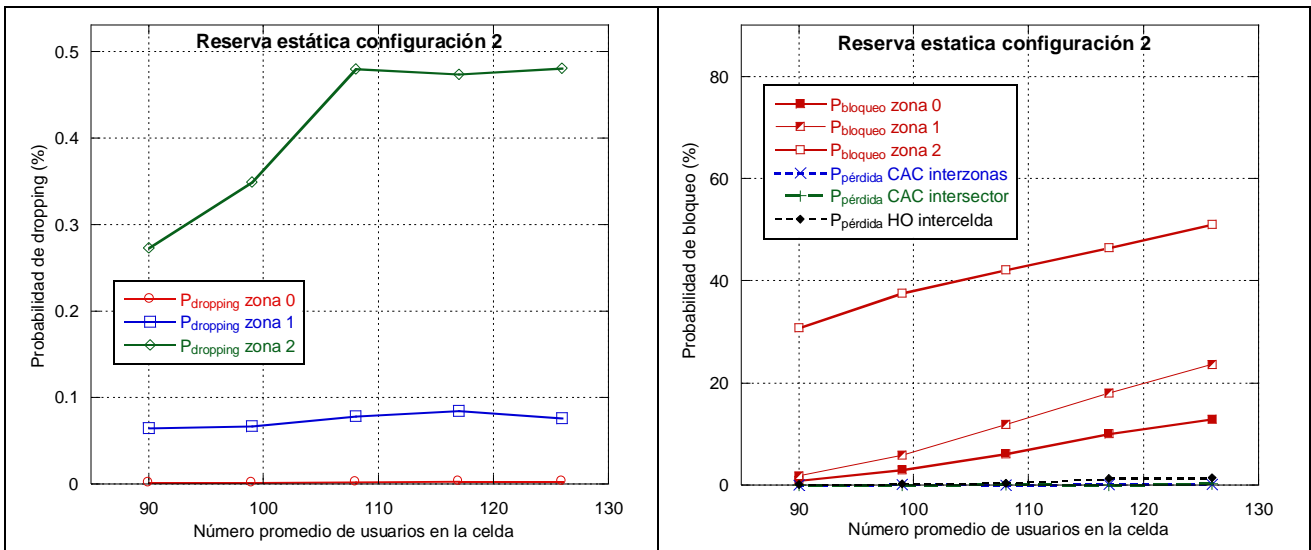


Figura 3-18 - Dropping y bloqueo para reserva de recursos estático. Configuración 2

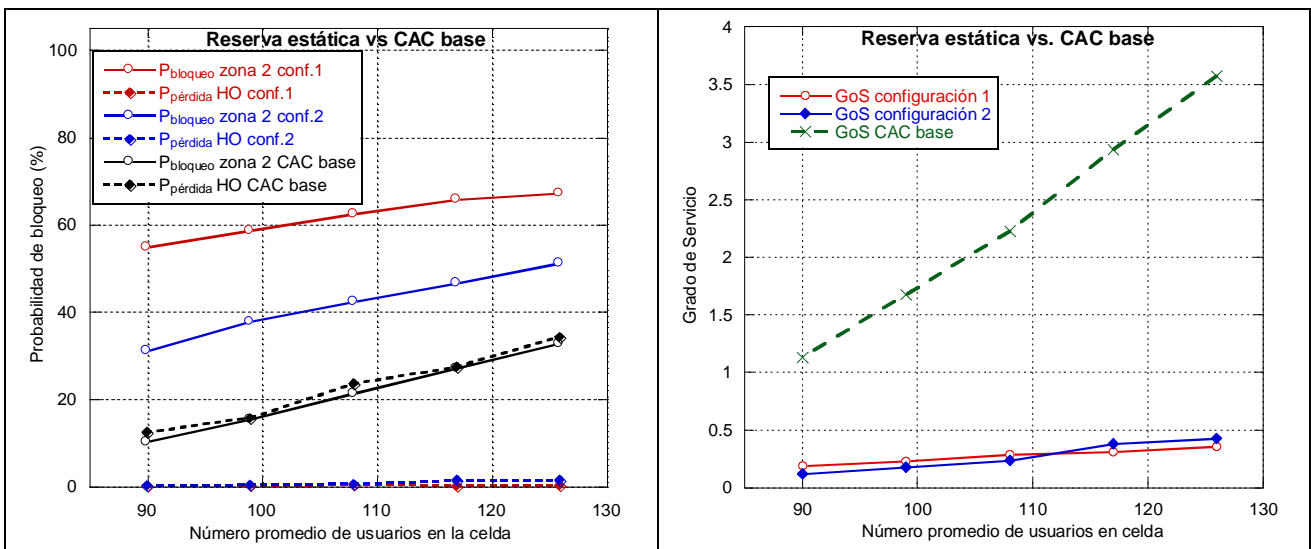


Figura 3-19 – Comparativa entre las configuraciones de reserva estática y CAC base

Puede observarse un muy notable descenso de la probabilidad de pérdida por handover, que llega a eliminar casi por completo la pérdida de conexiones por handover. Por tanto, se logra el objetivo de reducir y casi eliminar el número de conexiones perdidas. Sin embargo, la probabilidad de bloqueo en la zona 2, aumenta significativamente y para la configuración 1 llega a más del 60%, lo cual es inadmisibles. El grado de servicio (ver gráfico 3.19) mejora considerablemente. Sin embargo, no debe olvidarse que la medida no tiene en cuenta el tratamiento recibido por las conexiones dependiendo de la zona de acceso.

Si se analiza el porcentaje medio de RBs vacíos para un promedio de 108 usuarios en celda, se obtiene un alarmante 20.9462% para la configuración 1 y 13.6908% para la configuración 2. El CAC base, para el mismo nivel de carga, presenta un porcentaje de 9.18776%. La causa de esta mala utilización que repercute fundamentalmente en el grado de accesibilidad proporcionado a los usuarios que están situados en la zona 2, se fundamenta en el hecho de que en los periodos en los cuales no exista una conexión que requiera un handover, los recursos reservados para éstas se mantendrán vacíos. Por ello, utilizar un CAC con reserva estática degrada bastante la utilización, sobre todo conforme aumenta el número de recursos reservados.

Para corregir las deficiencias de los CAC estáticos se exploran a continuación la aplicación de esquema de CAC dinámicos que reservan recursos en función de la evolución del sistema.

### 3.2.3.2. *Reserva dinámica local*

La reserva dinámica local, como se ha explicado, utiliza información únicamente de la propia celda para tomar la decisión sobre cuántos recursos reservar. La propuesta en esta TFM se basa en tratar de realizar una predicción de la tasa de handover utilizando información histórica. Es decir, el algoritmo trata de predecir cuántas conexiones de handover van a solicitar recursos durante un periodo utilizando información sobre el número de handovers ocurridos en periodos anteriores. La idea detrás de este algoritmo se discute en [9].

Uno de los aspectos esenciales a fijar es la longitud del periodo de observación. Un periodo pequeño supondrá un mejor seguimiento de la tasa pero puntualmente el efecto sobre la reserva puede ser la sobreestimación o subestimación de la demanda futura. Un periodo largo, por otra parte, dará una medida mucho más estabilizada y real pero será incapaz de seguir, en periodos cortos, posibles cambios bruscos. Tras la realización de diferentes pruebas recogidas en el anexo C, se concluyó que un periodo alrededor de 60s era bastante acertado. Para evitar posibles medidas incongruentes, se decidió usar una media aritmética para actualizar el valor de la tasa, de modo que la nueva tasa estuviera basada en medidas antiguas y nuevas, tal y como expresa la siguiente ecuación.

$$\lambda_{media}(w) = (\lambda_{media}(w-1) + \lambda_{nueva})/2 \quad (5)$$

$\lambda_{media}(w)$  es la estimación de tasa utilizada para el periodo  $w$  y  $\lambda_{nueva}$  es la tasa medida en ese mismo periodo.

Finalmente, en función de la tasa obtenida en cada periodo, el CAC reservará recursos para las conexiones de handover previstas en el siguiente periodo. Cada vez que una nueva conexión proveniente de handover llegue, uno de los recursos reservados dejará de serlo puesto que habrá arribado la conexión que se había predicho.

Para observar la importancia que tiene la decisión del periodo a elegir, se han simulado dos configuraciones, la primera con un periodo de 50s y la segunda con un periodo de 70s, cuyos resultados son mostrados en las figuras 3.20 y 3.21. En la figura 3.22 se comparan las



probabilidades de bloqueo en zona 2, la pérdida por handover y el GoS de ambas variantes junto con el CAC base.

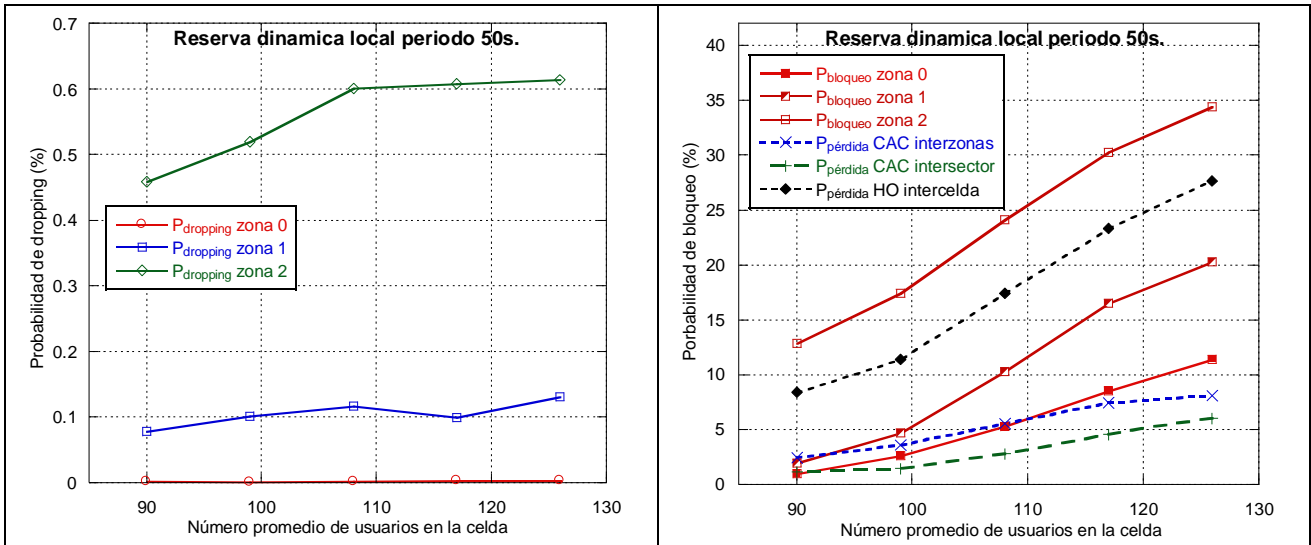


Figura 3-20 - Resultados para la reserva de recursos dinámico local periodo 50s.

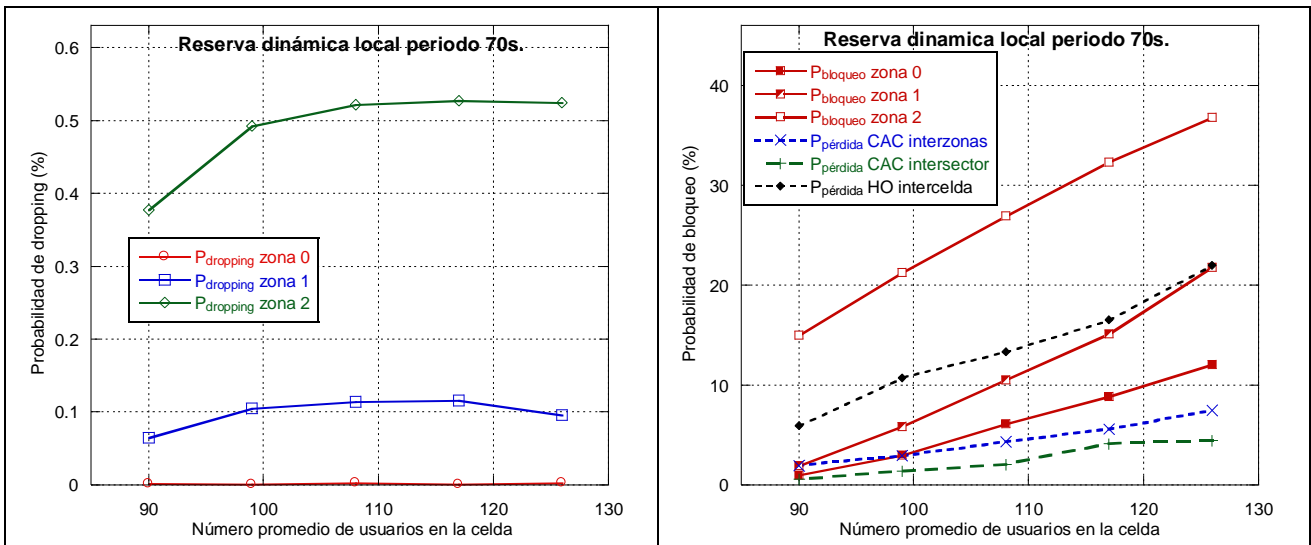
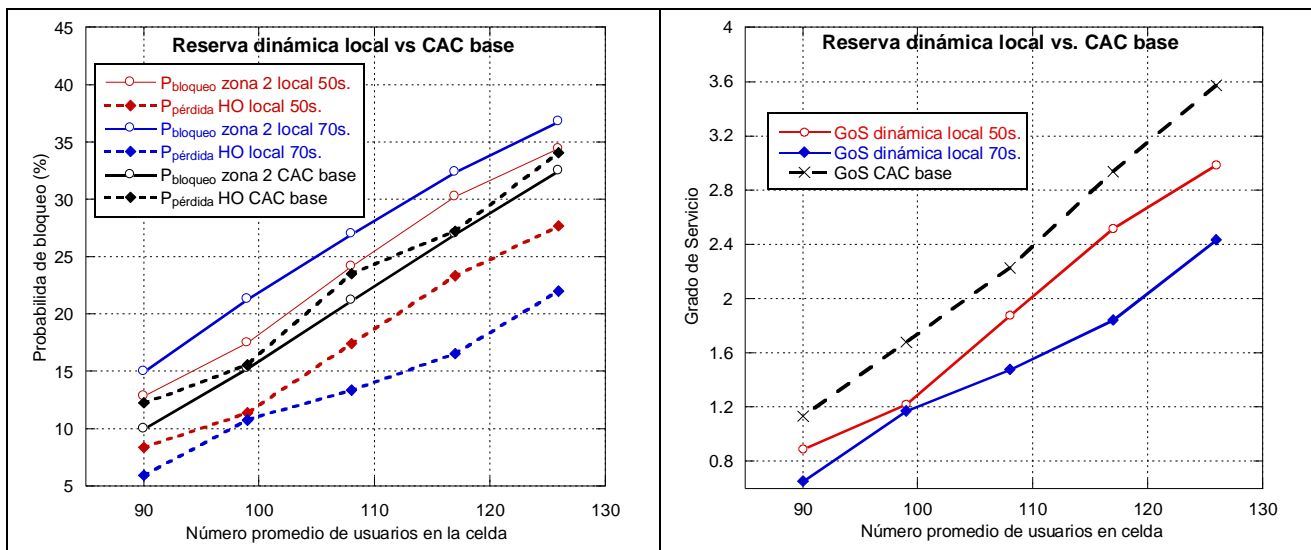


Figura 3-21 – Resultados para la reserva de recursos dinámico local periodo 70s.



**Figura 3-22** - Comparativa entre las configuraciones de reserva dinámica local y CAC base

En la parte izquierda de la figura 3-22, los resultados muestran como el bloqueo de usuarios en zona 2 es mayor cuanto mayor es el periodo. Debe tenerse en cuenta que de no producirse el handover en el periodo de reserva, el sistema habrá reservado recursos inútilmente durante ese periodo, por lo que cuanto mayor sea éste, peor utilización experimentará el sistema. Por otra parte, un mayor periodo arroja una menor probabilidad de pérdida de conexión por handover ya que, como se ha apuntado anteriormente, el número de handovers predicho tenderá a ser más estable.

Si se observa el grado de servicio, se obtiene una mejora respecto al caso del CAC base, superior para el periodo mayor. Esta medida refleja el descenso de la probabilidad de pérdida de handover. A pesar de que la mejora no es tan grande como en la reserva estática, hay que destacar que el GoS, tal y como se ha definido, no contempla la especificidad del CAC que se ha diseñado por zonas. Por tanto, un criterio adicional de bondad, puede ser observar la degradación de la probabilidad bloqueo en la zona 2 y la mejora de la probabilidad de pérdida por handover. Asimismo, si se analiza el porcentaje medio de RBs vacíos, se comprueba como éste se ha reducido con respecto a la reserva estática de recursos y ha pasado a ser 9.9409% para el periodo de 50s. y 10.7629% para el periodo de 70s. , unos valores altos pero más cercanos a los obtenidos en el escenario normal.

### 3.2.3.3. Reserva dinámica distribuida

La otra opción relacionada con la reserva dinámica es la que utiliza información de las celdas vecinas. Existen controles de admisión dinámicos y distribuidos en la literatura que se fundamentan en avisar a las celdas vecinas, con un tiempo suficiente, de la petición de recursos por parte de un usuario al cual están sirviendo pero que va a moverse a otra celda. De este modo, la celda vecina tendría tiempo para reservar recursos antes de la llegada del nuevo usuario, reduciendo substancialmente el tiempo que el recurso no es utilizado por estar reservado sin aumentar la probabilidad de pérdida por handover. Muchas de estas propuestas se apoyan en

mecanismos de predicción de movimiento, más o menos sofisticados. El alcance de la propuesta evaluada en esta TFM, se limita a explorar de forma muy preliminar las ventajas potenciales de este tipo de reserva, tomando como base un esquema de predicción simple, basada exclusivamente en la presencia de un terminal en un área de potencial handover.

Para comprender cómo se realiza el aviso, es necesario entender el funcionamiento completo del proceso de handover realizado en el simulador. El terminal, cada cierto tiempo, realiza medidas de la SINR que recibe de las celdas vecinas. Cuando durante  $\delta$  medidas recibe en media una SINR considerablemente mayor que la de su estación base, la estación base tomará la decisión de que el terminal debe realizar un handover. Para lanzar el aviso a la vecina, la estación base esperará a recibir un número de medidas cercano a  $\delta$ , de manera que exista una probabilidad alta de que en poco tiempo el terminal comience este proceso. En concreto, se utiliza un margen de modo que cuando el número de medidas correctas obtenidas es  $\delta$  menos un margen, se ejecutará el aviso. Debe señalarse que las reservas están asociadas a un terminal concreto, es decir, la reserva se anula en el momento en que el terminal asociado ejecuta el handover. En caso de que no se lleve a cabo el handover, transcurrido un cierto tiempo (se establece un contador, ajustado al margen seleccionado), la reserva de recursos se anula.

En realidad, la reserva se ejecuta ya cuando el handover es inminente con lo cual la mejora en la probabilidad de pérdida y degradación de la probabilidad de bloqueo, no es esperable que sea significativa. En cualquier caso, el margen es un parámetro de configuración clave ya que debe ser suficientemente grande como para que dé tiempo a generarse espacio libre en la celda vecina pero no excesivo como para que demasiadas nuevas conexiones no puedan crearse por falta de espacio. En esta tesis fin de máster se han considerado tres configuraciones que aplican un margen distinto para poder realizar una comparación. El simulador está configurado para realizar handovers cuando aparecen 10 medidas ( $\delta=10$ ) consecutivas, espaciadas 0,4s (400TTIs). Para la simulación de CAC con reserva dinámica y distribuida, se ha considerado que el aviso se produzca cuando el usuario lleve 8, 7 y 6 medidas, es decir, con un margen de 2, 3 y 4 medidas respectivamente. Los resultados asociados a la probabilidad de bloqueo de conexiones nuevas (por zonas) y de pérdida de llamadas de handover, conjuntamente con medidas sobre el mantenimiento de la QoS a nivel de paquete (probabilidad de descarte), se muestran en las figuras 3.23, 3.24 y 3.25. La figura 3.26 incluye la comparación entre los distintos márgenes de las probabilidades de bloqueo en zona 2, de pérdida por handover y el grado de servicio.

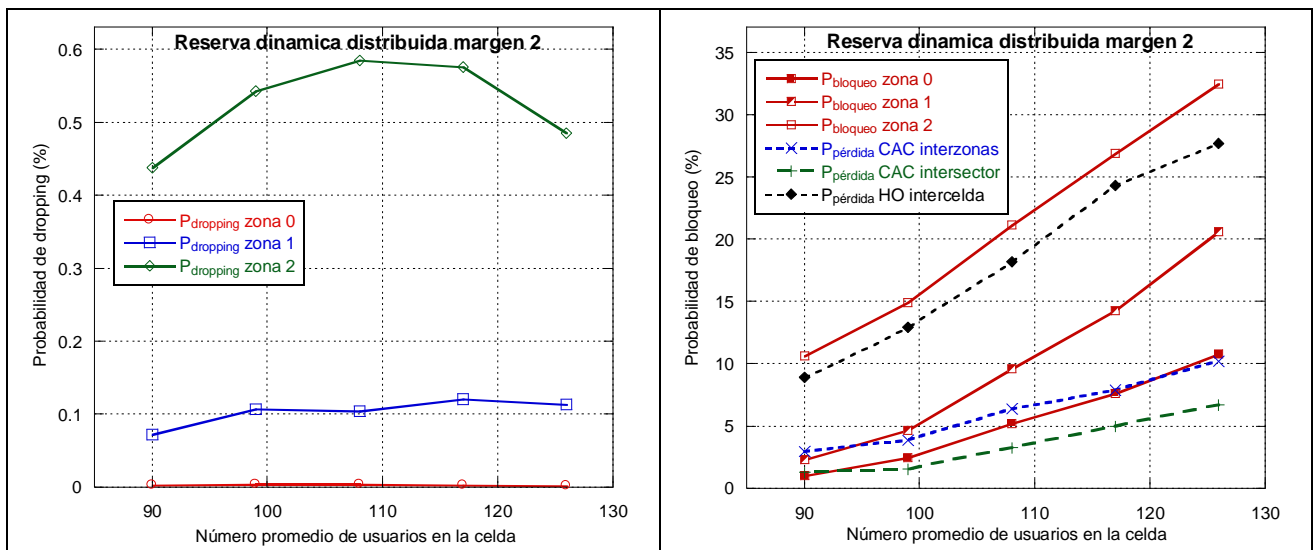


Figura 3-23 - Resultados para la reserva de recursos dinámica distribuido margen 2

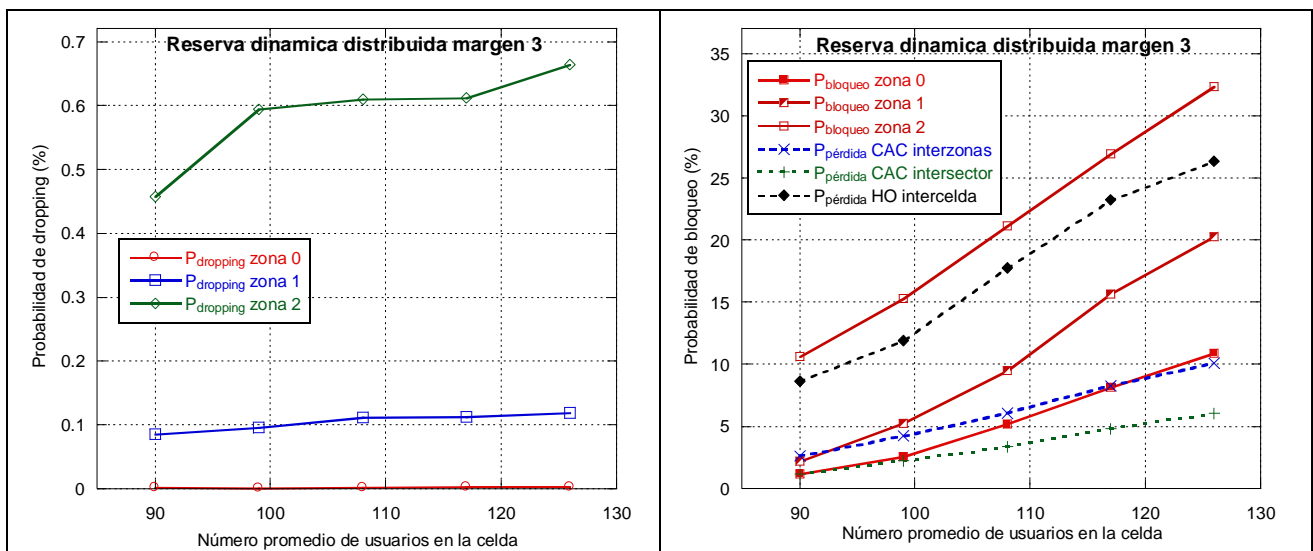


Figura 3-24 - Resultados para la reserva de recursos dinámica distribuido margen 3

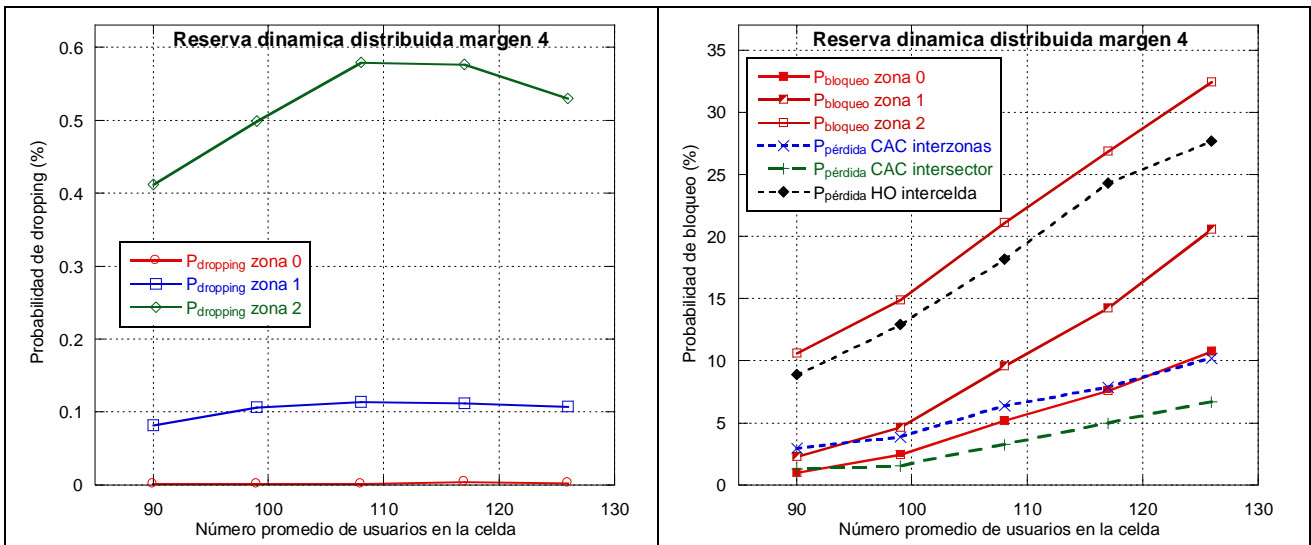


Figura 3-25 – Resultados para la reserva de recursos dinámico distribuida margen 4

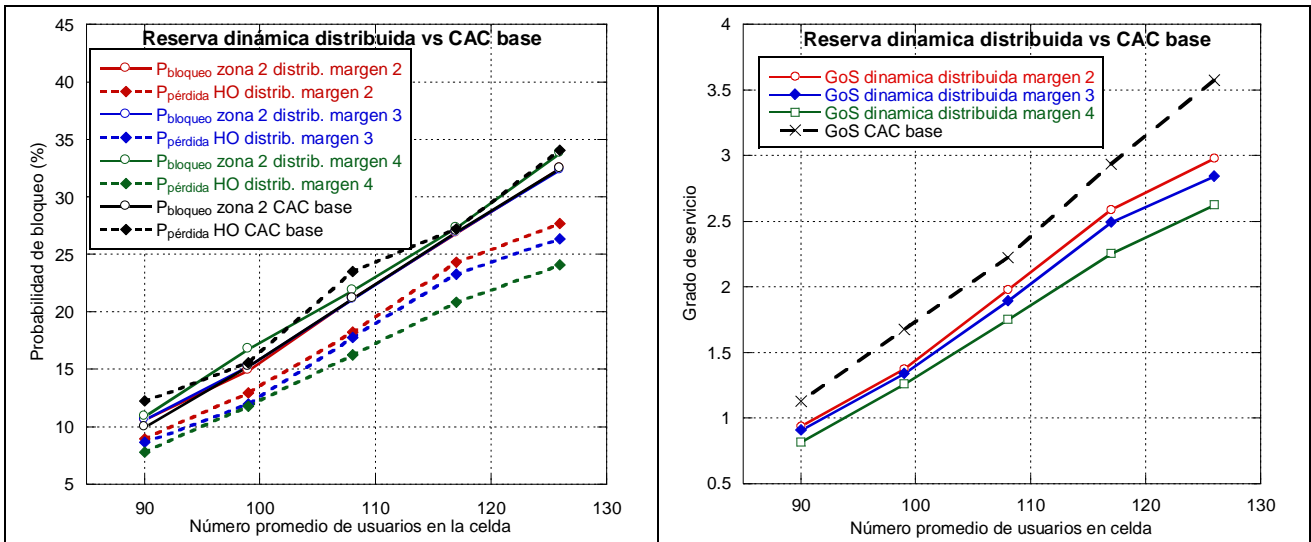


Figura 3-26 - Comparativa entre configuraciones de reserva dinámica distribuida y CAC base

Como puede observarse, incrementar el margen supone disminuir la probabilidad de pérdida por handover a cambio de aumentar muy ligeramente la probabilidad de bloqueo, particularmente en la zona 2. En consecuencia el grado de servicio mejora. Estos resultados son razonables ya que un margen mayor supone reservar durante más tiempo recursos, lo cual repercute en una mayor facilidad para que aparezcan recursos libres por conexiones finalizadas pero también un mayor bloqueo a posibles nuevas conexiones. Respecto a la utilización, el algoritmo presenta unos valores de 9.2545%, 9.40092% y 9.44438% para respectivamente los casos de margen 2, 3 y 4, similar al del CAC base.

Finalmente, si se realiza una comparación de todos los CAC con reserva de recursos evaluados, se aprecia rápidamente como el caso dinámico y distribuido es el que arroja mejores resultados en términos de utilización, ya que logra unos valores similares a los del CAC base. La mejora en la

probabilidad de pérdida es menos significativa que en los otros dos métodos como puede también observarse. Aunque el grado de servicio es una medida habitual del grado de eficacia de las distintas propuestas, como se ha comentado ya, la definición de grado de servicio no contempla de forma explícita las peculiaridades del sistema, en cuanto al tratamiento diferenciado de las llamadas dependiendo de la zona en la que se lleva a cabo la solicitud de admisión. En este sentido, aunque el grado de servicio en la estrategia estática es bueno desde un punto de vista numérico, conlleva un incremento muy importante de la probabilidad de bloqueo en la zona 2, por lo que no es deseable.

# Capítulo 4

## Conclusiones

Esta tesis fin de máster ha hecho un estudio de distintos algoritmos de Control de Admisión centrados en la redes de acceso móvil de última generación LTE. El control de admisión es un mecanismo definido en la capa RRM cuya actividad es esencial para poder satisfacer los requisitos de conexión de todos los usuarios. Además, debido a la creciente demanda, estos mecanismos deben evolucionar hacia algoritmos más eficientes que logren maximizar el número de usuarios servidos y se integren satisfactoriamente con todos los mecanismos de gestión de recursos de LTE.

El propósito del trabajo llevado a cabo ha sido evaluar varias propuesta de control de admisión tomando como base los enfoques más habituales encontrados en la literatura y adaptándolos al entorno LTE. En este sentido, dentro del TFM se ha realizado una revisión de las propuestas que se están llevando a cabo en el contexto de desarrollo de los sistemas 4G basados en la técnica de acceso OFDMA. La propuesta y evaluación se ha efectuado considerando de forma explícita el comportamiento de los mecanismos de gestión de recursos como el scheduler o el coordinador de interferencias implementados en el sistema. En concreto, se han propuesto esquemas en los que la admisión está condicionada a la zona de acceso del terminal (dentro de la cobertura de la estación base) y diseñada de forma coherente con la distribución y esquema de asignación de recursos frecuenciales que se aplica en los esquemas de coordinación de interferencia intercelular aplicados. Adicionalmente, se han explorado de forma preliminar algunas propuestas de políticas de admisión dirigidas al tratamiento diferenciado de conexiones nuevas y de handover.

Como punto de partida, todos los controles de admisión propuestos basan la estimación de consumo de un terminal a partir de medidas del valor promedio de consumo asociado a los terminales de una clase de servicio, dependiendo de la zona en la cual se encuentra. Para ello se han definido 3 zonas concéntricas. Las medidas, obtenidas a partir de simulaciones off-line del comportamiento del sistema, han mostrado ser adecuadas para la implementación de un control de admisión seguro, es decir, capaz de garantizar la QoS de las conexiones. En lo que se refiere al criterio de admisión, se ha mostrado la conveniencia de considerar criterios de admisión diferentes dependiendo de la zona de acceso, en comparación con la aplicación de criterios de admisión únicos a nivel de celda. Se ha evaluado el impacto de aplicar controles de admisión intracelda, incluyendo una evaluación de los resultados obtenidos para distintos valores de la estimación de consumo y recursos disponibles en cada zona.

En lo que se refiere a la implementación de políticas de admisión, se han evaluado distintos enfoques de reserva estática y dinámica dirigidos a priorizar el acceso de las llamadas de handover, estudiando el impacto de distintos parámetros de configuración. A pesar de que las propuestas efectuadas representan una primera aproximación al problema, los resultados muestran claramente la conveniencia de apostar por esquema dinámicos de reserva.

Respecto a las líneas futuras, el siguiente paso sería profundizar en el diseño de un control de admisión basado en la adaptación de sus parámetros en función de la evolución del sistema [8]. Otro aspecto importante, sería ampliar el estudio para considerar conexiones con distintos requisitos de QoS, lo que impone un escenario de diseño mucho más desafiante. El objetivo sería no solo adaptar las reservas, sino también los parámetros como el consumo medio por zona o los umbrales definidos, de forma dinámica en función de las estadísticas sobre QoS basadas en las medidas recogidas de forma dinámica por la estación base.



# Acrónimos

<b>3GPP</b>	Third (3rd) Generation Partnership Project
<b>ARQ</b>	Automatic Report Request
<b>BE</b>	Best Effort
<b>BLER</b>	Block Error Rate
<b>BS</b>	Estación Base
<b>CAC</b>	Call Admission Control
<b>CINR</b>	Carrier to Interference and Noise Ratio
<b>CIR</b>	Carrier to Interference Ratio
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator
<b>DL</b>	Downlink
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>FFR</b>	Fractional Frequency Reuse
<b>FFRopa</b>	Fractional Frequency Reuse Ordered and Power Adaptive
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FIFO</b>	First In First Out
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>GoS</b>	Grade of Service
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>HO</b>	Handover
<b>HSDPA</b>	High-Speed Downlink Packet Access
<b>HSPA+</b>	High-Speed Packet Access
<b>HSUPA</b>	High-Speed Uplink Packet Access
<b>ICI</b>	InterCarrier Interference
<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunication
<b>ISD</b>	InterSite Distance
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LTE-Adv</b>	Long Term Evolution Advanced
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MCS</b>	Modulation and Coding Scheme
<b>nrtPS</b>	Non-Real Time Polling Service
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>QCI</b>	QoS Class Identifier
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RB</b>	Resource Block
<b>RLC</b>	Radio Link Control
<b>RRM</b>	Radio Resource Management
<b>rtPS</b>	Real Time Polling Service
<b>SFR</b>	Soft Frequency Reuse
<b>SINR</b>	Signal to Interference and Noise Ratio

<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>SPUC</b>	Signal Processing Using C++
<b>SON</b>	Self-Optimizing Networks
<b>TFM</b>	Tesis Fin de Máster
<b>TTI</b>	Transmission Time Interval
<b>TU</b>	Transport Unit
<b>UE</b>	User Equipment
<b>UGS</b>	Unsolicited Grant Service
<b>VoIP</b>	Voice over IP

---

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cisco Systems “Entering the Zettabyte era” White paper. 1 de Junio 2011.
- [2] ITU-R Recommendation M.1645
- [3] IEEE Std. 802.16e-2005
- [4] SJ. Bae; JJ Lee; BG. Choi; S. Kwon; MY. Chung. “A Resource-estimated Call Admission Control Algorithm in 3GPP LTE System”. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seoul, Korea 2009, pp. 250-260.
- [5] C. Kosta; T. Sodunke; M. Shaterid; R. Tafazolli. “Two-stage Call Admission Control Policy for LTE Systems”. ACM, New York, NY, USA pp 1101-1105 2010
- [6] Zhaoxin Lu, Hui Tian, Qiaoyun Sun, Bo Huang, Shuqin Zheng, “An Admission Control Strategy for Soft Frequency Reuse Deployment of LTE Systems”. Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010 7<sup>th</sup> IEEE
- [7] Duk Kyung Kim, David Griffith, Nada Golmie. “A Novel Ring-Based Performance Analysis for Call Admission Control in Wireless Networks”. IEEE Communications letters, vol. 14, nº4, Abril 2010.
- [8] R.Kwan, R. Arnott, M. Kubota., “On radio Admission Control for LTE Systems”. Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd, 2010, 1-5
- [9] M. Ghaderi; R.Boutaba. “Call Admission Control in Mobile Cellular Networks: A Comprehensive Survey”. School of Computer Science, University of Waterloo
- [10] BG. Choi; MY. Chung; JJ. Lee “Delay-aware call admission control algorithm in 3GPP LTE system” TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, 2009, pp. 1-6
- [11] Khitem Ben Ali, Faouzi Zarai, Lotfi Kamoun, “Reducing handoff dropping probability in 3GPP LTE Network”, Second International Conference on Communications and Networking (ComNet), 2010. Enero 2011.
- [12] Raymond Kwan, Rob Arnott, Robert Paterson, Riccardo Trivisonno, Mitsuhiro Kubota, “On Mobility Load Balancing for LTE Systems”, Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd. Octubre 2010.
- [13] Raymond Kwan, Rob Arnott, Robert Paterson, Riccardo Trivisonno, Mitsuhiro Kubota, “On Pre-emption and Congestion Control for LTE System” Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd. Octubre 2010.
- [14] Abdelai EL BOUCHTI, Said EL KAFHALI, Abdelkrim HAQIQ. “Performance Modelling and Analysis of Connection Admission Control in OFDMA based WiMAX System with MMPP Queuing”. World of Computer Science and Information Technology Journal (WCSIT), Vol 1, No 4, 148-156, 2011.
- [15] K. Spaey, B. Sas, C. Blondia , “Self-Optimising Call Admission Control for LTE Downlink”
- [16] C.-J. Chang, P.-C. Huang, and T.-T. Su, “A channel borrowing scheme in a cellular radio system with guard channels and finite queues,” in *Proc. IEEE ICC'96*, vol. 2, Dallas, USA, June 1996, pp. 1168–1172.

[17] D. Levine, I. Akyildiz, and M. Naghshineh, "A resource estimation and call admission algorithm for wireless multimedia networks using the shadow cluster concept," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, Feb. 1997.

[18] R. Ramjee, R. Nagarajan, D Towsley, "On optimal call admission control in cellular networks", in Proc, IEEE INFOCOM'96, vol1, San Francisco, CA, Marzo 1996, pp43-50.