

UPC

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
DE TELECOMUNICACIÓ

**Contribución a la caracterización de los mecanismos de
acceso y traspaso en sistemas móviles celulares basados en
transmisión de paquetes**

Tesis Doctoral presentada en la
Universitat Politècnica de Catalunya
para la obtención del título de
Doctor Ingeniero de Telecomunicación
Autor: **Ramon Ferrús Ferré**
Director: **Dra. Pilar Díaz Romero**



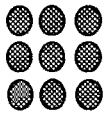
Biblioteca Rector Gabriel Ferraté
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

14003709A4

•T 00/14



UPC

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
DE TELECOMUNICACIÓ

**Contribución a la caracterización de los mecanismos de
acceso y traspaso en sistemas móviles celulares basados en
transmisión de paquetes**

Tesis Doctoral presentada en la
Universitat Politècnica de Catalunya
para la obtención del título de
Doctor Ingeniero de Telecomunicación
Autor: **Ramon Ferrús Ferré**
Director: **Dra. Pilar Díaz Romero**

A Mar

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente el apoyo y dedicación de la directora de la Tesis, Pilar Díaz, así como la colaboración y los ánimos de los demás miembros del Grupo y de los compañeros con los que he coincidido durante el camino hasta tan ansiada meta.

Pero sobretodo quiero expresar mi agradecimiento a Mar y a mi familia, sin cuya ayuda y comprensión este trabajo no hubiera sido posible.

Finalmente querría añadir una mención especial a la madre de Mar y dedicarle también a ella el presente trabajo, porque estoy seguro de que se habrá alegrado.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES

1.1.	HACIA LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN.....	1-1
1.2.	UN POCO DE HISTORIA.....	1-6
1.3.	EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS 2G.....	1-9
1.4.	IMT-2000.....	1-12
1.5.	¿CUARTA GENERACIÓN?.....	1-17

CAPÍTULO 2. MECANISMO DE TRASPASO EN SISTEMAS CELULARES

2.1.	INTRODUCCIÓN.....	2-1
2.2.	NECESIDAD DEL <i>HANDOVER</i>	2-1
2.3.	ESCENARIOS DE APLICACIÓN DEL <i>HANDOVER</i>	2-2
2.3.1.	<i>Macroceldas</i>	2-2
2.3.2.	<i>Microceldas y picoceldas</i>	2-3
2.3.3.	<i>Estructura multicapa y hot spots</i>	2-5
2.3.4.	<i>Satélites</i>	2-7
2.4.	ETAPAS DIFERENCIADAS EN UN MECANISMO DE TRASPASO.....	2-7
2.5.	FASE DE MEDIDAS.....	2-8
2.6.	INICIACIÓN Y DECISIÓN DEL <i>HANDOVER</i>	2-10
2.6.1.	<i>Parámetros utilizados en los criterios de decisión</i>	2-10
2.6.2.	<i>Criterios de decisión</i>	2-11
2.6.3.	<i>Protocolos de handover</i>	2-15
2.7.	EJECUCIÓN DEL <i>HANDOVER</i>	2-16
2.7.1.	<i>Plano de señalización</i>	2-16
2.7.2.	<i>Plano de transmisión</i>	2-18
2.8.	PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE LOS MECANISMOS DE <i>HANDOVER</i>	2-18
2.9.	<i>HANDOVER</i> COMO FUNCIONALIDAD DE GESTIÓN DE RECURSOS RADIO.....	2-19
2.9.1.	<i>Control de potencia</i>	2-19
2.9.2.	<i>Asignación dinámica de canales</i>	2-20
2.9.3.	<i>Control de admisión</i>	2-20
2.10.	ARQUITECTURA DE RED Y <i>HANDOVER</i>	2-21

2.11.	HANDOVER EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR PAQUETES.....	2-24
2.12.	CONCLUSIONES.....	2-25

CAPÍTULO 3. ACCESO MÚLTIPLE PARA TRANSMISIÓN EN MODO PAQUETE

3.1.	INTRODUCCIÓN.....	3-1
3.2.	TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE.....	3-1
3.3.	PROTOCOLOS DE ACCESO MÚLTIPLE.....	3-4
3.4.	ACCESO POR DIVISIÓN EN TIEMPO (TDMA).....	3-6
3.4.1.	<i>Generalidades</i>	3-6
3.4.2.	<i>Gestión del acceso múltiple en TDMA</i>	3-9
3.4.3.	<i>Plataforma FRAMES Modo 1</i>	3-10
3.4.4.	<i>Protocolo PRMA++</i>	3-12
3.4.5.	<i>Adaptación de PRMA-- a FRAMES Mode 1</i>	3-14
3.4.6.	<i>Tráfico de voz</i>	3-15
3.4.7.	<i>Tráfico de datos</i>	3-25
3.4.8.	<i>Conclusiones del análisis realizado</i>	3-31
3.5.	ACCESO POR DIVISIÓN EN CÓDIGO (CDMA).....	3-32
3.5.1.	<i>Técnicas de espectro ensanchado (SS)</i>	3-32
3.5.2.	<i>Generalidades de un sistema DS/CDMA</i>	3-33
3.5.3.	<i>Wideband CDMA</i>	3-36
3.5.4.	<i>Transmisión de paquetes</i>	3-38
3.5.5.	<i>Mecanismo de acceso aleatorio</i>	3-40
3.5.6.	<i>Análisis de los mecanismos propuestos</i>	3-41
3.5.7.	<i>Consideraciones de diseño</i>	3-42
3.5.8.	<i>Resultados</i>	3-48
3.5.9.	<i>Conclusiones del análisis realizado</i>	3-69
3.6.	CONCLUSIONES.....	3-71

CAPÍTULO 4. TRASPASOS HARD, SOFT Y MACRODIVERSIDAD EN SISTEMAS CELULARES

4.1.	INTRODUCCIÓN.....	4-1
4.2.	TÉCNICAS DE DIVERSIDAD.....	4-2
4.3.	IMPLEMENTACIÓN DE MACRODIVERSIDAD EN EL ENLACE ASCENDENTE Y DESCENDENTE.....	4-3
4.4.	VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	4-3
4.4.1.	<i>Capacidad y calidad de servicio</i>	4-4
4.4.2.	<i>Margen de fading</i>	4-5
4.4.3.	<i>Control de potencia y party effect</i>	4-5
4.4.4.	<i>Efecto 'ping-pong'</i>	4-6
4.4.5.	<i>Continuidad de servicio de la capa física</i>	4-7
4.4.6.	<i>Macrodiversidad y Arquitectura</i>	4-8
4.4.7.	<i>Macrodiversidad y servicios de paquetes</i>	4-12

4.5.	CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO CELULAR ANALIZADO	4-13
4.5.1.	<i>Modelado de los mecanismos soft handover y hard handover</i>	4-13
4.5.2.	<i>Modelo de propagación</i>	4-16
4.6.	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA MACRODIVERSIDAD EN EL ENLACE ASCENDENTE	4-18
4.6.1.	<i>Planteamiento del problema</i>	4-18
4.6.2.	<i>Análisis para diferentes mecanismos de traspaso</i>	4-19
4.6.3.	<i>Metodologías de cálculo de la interferencia normalizada</i>	4-23
4.6.4.	<i>Resultados y conclusiones</i>	4-30
4.7.	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA MACRODIVERSIDAD EN EL ENLACE DESCENDENTE	4-39
4.7.1.	<i>Planteamiento del problema</i>	4-39
4.7.2.	<i>Consideraciones sobre el control de potencia en el enlace descendente</i>	4-40
4.7.3.	<i>Enlace descendente sin control de potencia</i>	4-42
4.7.4.	<i>Enlace descendente con control de potencia</i>	4-58
4.7.5.	<i>Comparación de prestaciones en función del control de potencia</i>	4-70
4.8.	INFLUENCIA DEL MECANISMO DE TRASPASO EN EL RETARDO DE TRANSMISIÓN PARA SERVICIOS DE DATOS	4-72
4.8.1.	<i>Estimación del retardo</i>	4-73
4.8.2.	<i>Cálculo de la E_b/N_0 requerida</i>	4-74
4.8.3.	<i>Obtención de la función densidad de probabilidad de E_b/N_0</i>	4-75
4.8.4.	<i>Resultados</i>	4-78
4.9.	INCIDENCIA DEL TIPO DE <i>HANDOVER</i> EN EL DIMENSIONADO DE LA ZONA DE COBERTURA	4-81
4.9.1.	<i>Planteamiento general</i>	4-81
4.9.2.	<i>Cálculo del margen de potencias en caso de Hard Handover</i>	4-83
4.9.3.	<i>Cálculo del margen de potencias en caso de Soft Handover</i>	4-93
4.9.4.	<i>Efecto del retardo en la conexión en el margen de fading</i>	4-98
4.9.5.	<i>Resultados y comparación con otras metodologías</i>	4-101
4.10.	CONCLUSIONES	4-103
A-I.	CÁLCULO DE LA MEDIA Y VARIANZA DE LA INTERFERENCIA NORMALIZADA EN EL ENLACE ASCENDENTE PARA MECANISMOS <i>HARD HANDOVER</i> CON MARGEN DE HISTÉRESIS	4-105
A-II.	SIMULACIONES DE MONTE CARLO PARA EL ENLACE ASCENDENTE	4-115
A-III.	CÁLCULO DEL VALOR MEDIO DE LA INTERFERENCIA NORMALIZADA EN EL ENLACE DESCENDENTE	4-122
A-IV.	CÁLCULO MEDIA Y VARIANZA DE LA ASIGNACIÓN DE POTENCIA EN EL ENLACE DESCENDENTE	4-128
A-V.	SIMULACIONES DE MONTE CARLO PARA EL ENLACE DESCENDENTE CON CONTROL DE POTENCIA	4-135
A-VI.	CÁLCULO DE LAS EXPRESIONES PARA LA DETERMINACIÓN DEL MARGEN DE <i>FADING</i>	4-140

CAPÍTULO 5. ARQUITECTURA DE RED BASADA EN TRANSMISIÓN DE PAQUETES

5.1.	INTRODUCCIÓN	5-1
5.2.	INTEGRACIÓN DE TRÁFICO DE PAQUETES Y CIRCUITOS	5-1
5.3.	FUNCIONES RADIODEPENDIENTES Y RADIOINDEPENDIENTES. CONCEPTO DE RED DE ACCESO	5-3
5.4.	EVOLUCIÓN HACIA UMTS	5-5

5.5.	ARQUITECTURA GLOBAL UMTS/IP.....	5-7
5.6.	TERMINACIÓN DE LA CAPA IP EN UMTS.....	5-9
5.7.	ARQUITECTURA Y MECANISMOS DE TRANSMISIÓN EN UTRAN.....	5-10
5.7.1.	<i>Descripción del modelo de referencia e interfaces de UTRAN.....</i>	5-10
5.7.2.	<i>Arquitectura de la interfaz radio en UTRAN.....</i>	5-11
5.7.3.	<i>Arquitectura de la interfaz I_u.....</i>	5-19
5.7.4.	<i>Arquitectura de las interfaces I_{ur} y I_{ub}.....</i>	5-20
5.7.5.	<i>Plano de transporte dentro de UTRAN.....</i>	5-21
5.8.	ARQUITECTURA Y MECANISMOS DE TRANSMISIÓN EN GPRS.....	5-22
5.8.1.	<i>Descripción del modelo de referencia e interfaces del GPRS.....</i>	5-22
5.8.2.	<i>Plano de transmisión y de señalización.....</i>	5-24
5.8.3.	<i>Arquitectura de la interfaz radio (U_m).....</i>	5-25
5.8.4.	<i>Arquitectura de la interfaz G_b.....</i>	5-33
5.9.	CONCLUSIONES.....	5-34

CAPÍTULO 6. GESTIÓN DE MOVILIDAD EN REDES DE PAQUETES

6.1.	INTRODUCCIÓN.....	6-1
6.2.	GESTIÓN DE MOVILIDAD EN LOS SISTEMAS DE TERCERA GENERACIÓN.....	6-2
6.2.1.	<i>Introducción.....</i>	6-2
6.2.2.	<i>Movilidad global.....</i>	6-3
6.2.3.	<i>Movilidad local.....</i>	6-14
6.3.	GESTIÓN DE MOVILIDAD EN GPRS.....	6-18
6.3.1.	<i>Introducción.....</i>	6-18
6.3.2.	<i>Contexto para la gestión de la movilidad de un terminal.....</i>	6-18
6.3.3.	<i>Contexto para la gestión de sesiones de datos PDP (Packet Data Protocol).....</i>	6-21
6.3.4.	<i>Operación conjunta de los contextos MM y PDP.....</i>	6-23
6.3.5.	<i>Procedimientos para la gestión de contextos PDP.....</i>	6-25
6.3.6.	<i>Procedimientos para la gestión de movilidad.....</i>	6-25
6.4.	CONSIDERACIONES SOBRE EL CONTROL DEL TRASPASO EN REDES DE PAQUETES.....	6-30
6.5.	CONCLUSIONES.....	6-31

CAPÍTULO 7. ESQUEMA PROPUESTO PARA EL ESTUDIO DEL TRASPASO EN REDES DE PAQUETES

7.1.	INTRODUCCIÓN.....	7-1
7.2.	ARQUITECTURA DE REFERENCIA.....	7-1
7.3.	MODELADO DEL PLANO DE TRANSPORTE.....	7-3
7.4.	DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS IDENTIFICADOS EN EL MODELO.....	7-6
7.4.1.	<i>Entorno de propagación y movilidad.....</i>	7-6
7.4.2.	<i>Capa física.....</i>	7-8
7.4.3.	<i>Módulo RLC/MAC.....</i>	7-11

7.4.4. Interfaz módulo LLC-RLC/MAC.....	7-13
7.4.5. Módulo LLC.....	7-14
7.4.6. Interfaz módulo IP-LLC.....	7-16
7.4.7. Módulo IP.....	7-17
7.5. DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO DE TRASPASO CONSIDERADO.....	7-18
7.6. TRASPASO INTRA-RLC/MAC.....	7-19
7.6.1. Planteamiento.....	7-19
7.6.2. Resultados.....	7-20
7.7. TRASPASO INTRA-LLC.....	7-25
7.7.1. Planteamiento.....	7-25
7.7.2. Resultados.....	7-27
7.8. TRASPASO INTRA-IP E INTER-IP.....	7-34
7.8.1. Planteamiento.....	7-34
7.8.2. Resultados.....	7-36
7.9. CONCLUSIONES.....	7-40
A-I. CAPA DE ENLACE LLC (<i>LOGICAL LINK CONTROL</i>).....	7-42

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

GLOSARIO DE SIGLAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



INTRODUCCIÓ

“Multimedia, servicios personalizados, móviles, banda ancha, Internet, crecimiento, ...” son algunas de las palabras clave que podemos emplear en el inicio de este informe para tratar de reflejar lo que acontece actualmente en el campo de las telecomunicaciones. Lo difícil a veces es conjuntarlas y conseguir ese comienzo reconfortante. Pero aunque pueda parecer contradictorio, uno tiene la sensación de que cualquier combinación resulta posible.

Y es que la expectación que se está creando estos últimos años acerca de las posibilidades en torno a los sistemas de comunicaciones móviles e Internet, parecen más propias de un relato de ciencia-ficción que no de lo que podría ser un intento de empezar a catalogar un amplio abanico de servicios y aplicaciones que, seguramente, van a formar parte de nuestra vida cotidiana en un futuro muy próximo. Pero..., ¿cuál de las dos observaciones está más próxima a la *realidad*? Probablemente haya disparidad de opiniones, y posiblemente existan argumentos para defender ambas posturas.

El número de usuarios de telefonía a través de los sistemas móviles de segunda generación ha experimentado un crecimiento desorbitado en los últimos años. Del uso inicial de los teléfonos celulares más enfocado al ámbito de los negocios y de la empresa o al ámbito de las fuerzas de seguridad, se ha pasado a una situación donde el teléfono móvil empieza a formar parte de ese grupo de utensilios a los que habitualmente recurrimos en nuestra actividad diaria.

La telefonía sigue siendo el servicio mayoritario ofrecido a través de las redes celulares, relegando el acceso a servicios de datos a unos porcentajes muy reducidos. No obstante, las previsiones indican un crecimiento de éstos últimos, alentado en parte por las perspectivas de poder ofrecer acceso radio a la multitud de servicios y expectativas existentes en Internet. Así pues, el alto grado de penetración experimentado por la telefonía celular, así como las prometedoras perspectivas abiertas en torno a la provisión de acceso a Internet, están condicionado el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones para intentar afrontar el ambicioso reto de conseguir una plataforma global, integrada, de servicios multimedia, a la que pueda accederse de forma personalizada mediante una gran gama de terminales móviles adaptados a las más variadas necesidades.

Dentro de este mundo de tan rápida evolución y tan elevadas perspectivas, nuestro particular interés ahora se centra en presentar el marco de referencia en que se ha desarrollado el trabajo de investigación expuesto en la presente Tesis Doctoral.

La estandarización del esquema de acceso radio para los futuros sistemas de telecomunicación está a punto de ser una realidad. En el calendario propuesto por ITU para llevar a cabo la elaboración del estándar, se prevé que las primeras versiones de las especificaciones técnicas puedan estar disponibles a principios del año 2000. Pero la llegada de la tercera generación, conocida bajo el concepto IMT-2000 dentro de ITU y como UMTS en el ámbito europeo, no está supeditada únicamente a la incorporación del nuevo sistema de acceso radio, sino que existe una marcada tendencia de migración de los sistemas móviles actuales hacia la provisión de los diferentes servicios y prestaciones ambicionados en el sistema IMT-2000/UMTS.

Por tanto, el sistema IMT-2000/UMTS se plantea como una convergencia de diferentes sistemas y nuevas tecnologías que, paulatinamente, van armonizando sus características para poder llegar a conseguir una única plataforma global de telecomunicaciones. Y una de las directrices seguidas en dicha convergencia es la adopción de las denominadas técnicas de transmisión en modo paquete en sustitución de las actuales soluciones basadas en conmutación de circuitos. Algunos de los argumentos esgrimidos a favor de la incorporación de mecanismos de transmisión en modo paquete son los siguientes:

- La posibilidad de realizar un uso más eficiente de los recursos radio disponibles. La asignación fija durante el transcurso de toda una conexión puede resultar completamente ineficiente para servicios a ráfagas o con tasas de transmisión fluctuantes.
- Mayor flexibilidad a la hora de integrar tráfico de diferente naturaleza, como por ejemplo, voz, datos, señales de vídeo, etc.
- La mayor imbricación de las tecnologías de la información (IT), orientadas a paquetes, en las tecnologías de telecomunicaciones.
- La integración paulatina de las redes de acceso móviles a una plataforma troncal basada en transmisión de paquetes como es Internet.

La implantación generalizada de tecnologías de transmisión en modo paquete todavía no se plantea como una realidad en los próximos años, sobretudo en la red fija, donde la estructura troncal prevista para las primeras etapas de IMT-2000/UMTS es una red GSM/ANSI-41 evolucionada. No obstante, la aparición de servicios como GPRS está despejando el terreno hacia dicha meta.

El trabajo desarrollado en la presente Tesis Doctoral puede enmarcarse dentro del estudio de la aplicación de técnicas de transmisión en modo paquete en sistemas móviles celulares. Particularmente se abordan aspectos concernientes al acceso múltiple en la interfaz radio y a la gestión de movilidad, especialmente en torno al mecanismo de traspaso, dentro de redes celulares basadas en transmisión por paquetes.

A continuación se describe de forma más detallada el contenido de cada uno de los capítulos que integran la presente Tesis.

En el Capítulo 1, “Sistemas de comunicaciones móviles” se proporciona una visión global del estado actual de los sistemas de comunicaciones móviles y del papel determinante que juegan dentro de la denominada sociedad de la información. Así mismo, se describe brevemente el camino seguido desde la aparición comercial de los primeros sistemas celulares nacionales o regionales hasta la panorámica ofrecida actualmente bajo IMT-2000.

En el Capítulo 2, “Traspaso en sistemas celulares”, se describen algunos aspectos asociados al mecanismo de *handover* en redes celulares con el objetivo de presentar un amplio marco de referencia que permita poner de manifiesto la problemática inherente al mismo.

En el Capítulo 3, “Acceso múltiple para transmisión en modo paquete”, se presenta un estudio realizado sobre diferentes esquemas de transmisión en modo paquete en dos plataformas de referencia, una ilustrativa de un acceso basado en TDMA y otra basada en CDMA. Respecto al acceso TDMA, se propone y analiza la aplicación del protocolo PRMA++ para servicios de voz y datos en la plataforma de acceso radio especificada en el proyecto europeo FRAMES y conocida como FMA1. En el caso de CDMA, la plataforma abordada corresponde a la propuesta europea WCDMA para IMT-2000. En este caso se ha analizado el compromiso existente entre diferentes modos de transmisión propuestos para servicios de datos de baja velocidad.

En el Capítulo 4, “Traspasos *hard*, *soft* y macrodiversidad en sistemas celulares”, se abordan diferentes aspectos de la utilización de macrodiversidad en un sistema CDMA, ventajas e inconvenientes, y se describe un planteamiento analítico para el cálculo de probabilidades de desbordamiento y retardos en los enlaces ascendente y descendente. El modelo de análisis considerado está basado en la caracterización de la interferencia del enlace ascendente y descendente, éste último sin control de potencia. En el enlace descendente con control de potencia se utiliza la potencia asignada como parámetro comparativo. Finalmente se estudia la influencia del mecanismo de traspaso adoptado en el margen de *fading* necesario y su repercusión en el tamaño del área de cobertura. Con ello, el objetivo principal del capítulo consiste en constatar algunas de las consecuencias derivadas de la implementación de mecanismos de macrodiversidad en sistemas celulares y proporcionar un análisis

comparativo, en términos de capacidad, QoS, retardo y área de cobertura, que permita disponer de información adicional para valorar la adopción de esquemas *soft* o *hard*.

En el Capítulo 5, “Arquitectura de red basada en transmisión de paquetes”, se plantea una posible arquitectura global para la prestación de servicios basados en la transmisión de paquetes dentro del concepto UMTS/IMT-2000. Para ello, se analiza el esquema GPRS y la propuesta europea UTRAN para identificar los diferentes elementos necesarios, sus funcionalidades y los planos de transporte considerados para la transferencia de información de usuario y de señalización. El objetivo del capítulo es presentar el marco de referencia necesario para justificar la elección del modelo estudiado en el capítulo 7, donde se analizan las prestaciones de un esquema de traspaso basado en mecanismos de reelección de celda, en una arquitectura de red diseñada para la transmisión en modo paquete.

En el Capítulo 6, “Gestión de movilidad en redes de paquetes”, se abordan diferentes soluciones propuestas actualmente para ofrecer movilidad global, es decir, movilidad entre diferentes redes de acceso, así como aspectos de movilidad local en redes de paquetes. Posteriormente se estudia más detalladamente la gestión de movilidad del sistema GPRS para, finalmente, apuntar algunas consideraciones sobre los esquemas de traspaso en redes de paquetes.

En el Capítulo 7, “Esquema propuesto para el estudio del traspaso en redes de paquetes”, tomando la arquitectura y la gestión de movilidad presentados como marco de referencia en los anteriores capítulos, se expone un estudio sobre las prestaciones de un mecanismo de traspaso en función de las entidades funcionales del plano de transporte involucradas. Para ello, partiendo del plano de transporte de una posible arquitectura de un sistema basado en transmisión de paquetes, se propone un modelo de estudio basado en el análisis de las implicaciones derivadas del cambio o actualización de alguna de las entidades de dicho plano de transporte como consecuencia de la ejecución de un traspaso. Bajo dicha perspectiva, el traspaso se clasifica en función de las entidades funcionales que deben ser modificadas o actualizadas.

Finalmente, en el Capítulo 8, “Conclusiones y líneas futuras de investigación” se destacan los resultados más importantes obtenidos en el presente trabajo y se aportan algunas consideraciones sobre posibles líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE COMUNICACIONES

MÓVILES

1.1. Hacia la sociedad de la información.

Uno de los pilares básicos en la construcción de la denominada *sociedad de la información* es la disponibilidad de una infraestructura en telecomunicaciones que permita concentrar gran parte de los desarrollos futuros en la provisión y gestión de contenidos. El concepto de sociedad de la información intenta plasmar la progresiva concentración y aparición de un gran número de actividades en torno a la elaboración, distribución y organización de la información, y no únicamente desde el punto de vista de la economía de servicios, referida habitualmente como economía de la información, sino también como vehículo hacia un aumento de la calidad de vida.

Algunos estudios sobre la incorporación de las nuevas tecnologías, así como su impacto y aceptación, sitúan la 'llegada' de la sociedad de la información a finales de la primera década del nuevo milenio, tras haberse superado tres etapas previas [Cornella96]. El punto de partida de la primera de ellas se identifica en la incorporación, a nivel corporativo e institucional, de grandes computadoras para procesamiento y almacenaje de la información, y se denomina etapa de las organizaciones. La segunda etapa se inicia con el lanzamiento del PC al mercado en 1981, y su objetivo se centra en la proliferación de equipamiento informático a nivel personal, ya sea en el trabajo, en la escuela o en casa. Dicha etapa recibe el nombre de etapa de los individuos. Finalmente, en la tercera etapa, denominada etapa de la conectividad, los objetivos principales radican en la creación de la infraestructura necesaria para poder acceder a la sociedad de la información, también denominada en este contexto etapa de los contenidos. Según dichos estudios, actualmente se estaría finalizando la etapa de los individuos y se entraría progresivamente en la etapa de la conectividad, extendiéndose esta última hasta finales del 2010. Pero la realidad actual se ha encargado de acelerar dicho proceso y, a puertas del año 2000, podemos pronosticar un acceso prematuro a dicha sociedad de la información. Dos de los motores que están impulsando la llegada de la sociedad de la información son Internet y las comunicaciones móviles personales.

El crecimiento experimentado en los últimos años por el mercado de las comunicaciones móviles está sobrepasando incluso las estimaciones más optimistas (véase Figura 1-1). El número de usuarios de sistemas celulares a finales del año 1998 se estimaba en 305 millones a nivel mundial, con un

crecimiento del 49% respecto al año 1997 [EMC99]. El sistema GSM, en sus versiones 900, 1800 y 1900, contaba con un 45% del mercado global, es decir, 138 millones de usuarios distribuidos por más de 129 países. La barrera de los 100 millones de usuarios se había alcanzado seis años después de la implantación del primer sistema GSM comercial. El resto de sistemas digitales, el IS-54/136 y el IS-95 norteamericanos y el PDC japonés, se repartían la cifra de 76 millones de usuarios, quedando todavía una gran cuota de mercado, cerca de 90 millones de usuarios, distribuida entre los sistemas celulares analógicos (AMPS, TACS). Si se fijan criterios comparativos únicamente en función de las cuotas de mercado de los sistemas digitales, GSM abarca un 65% del volumen total, ascendiendo al 75% si se compara únicamente con los sistemas americanos IS-54/136 y IS-95, ya que el sistema PDC únicamente está implantado en Japón.

El crecimiento experimentado por GSM es todavía más espectacular que el ofrecido en la visión de conjunto (véase Figura 1-2). Durante el año 1998 el número de usuarios ha aumentado cerca de un 90%. El mercado GSM está distribuido principalmente en Europa, cerca de un 70%, pero con cuotas de mercado importantes en países asiáticos. En China, uno de los grandes mercados potenciales, se prevé más de 20 millones de usuarios móviles a finales del año 2000, 75% de los cuales pueden ser GSM. Y siguiendo con previsiones, el número global de usuarios estimados a finales del año 2000 puede sobrepasar la cifra de los 500 millones, y para contrastar un poco el montante de dicha cantidad, únicamente puntualizar que la población estimada en el mundo es de aproximadamente 6000 millones de habitantes, un gran porcentaje de la cual se encuentra en países todavía en vías de desarrollo.

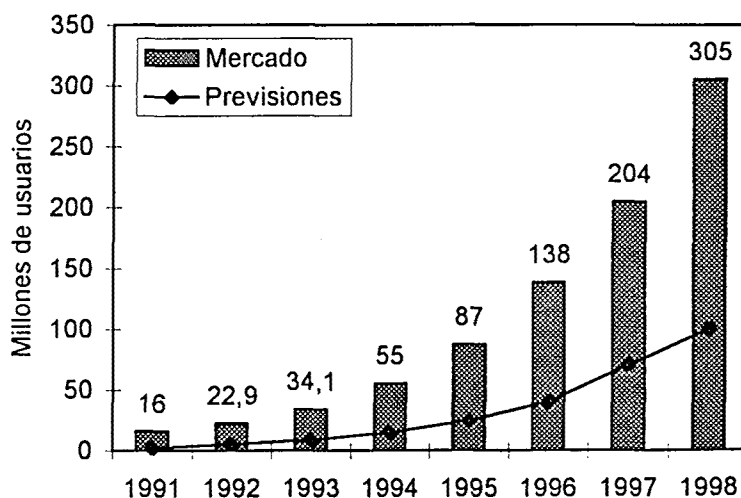


Figura 1-1. Evolución del número de usuarios de sistemas celulares global. Los datos corresponden a estimaciones y valores de mercado (Fuente ECM World Cellular Database).

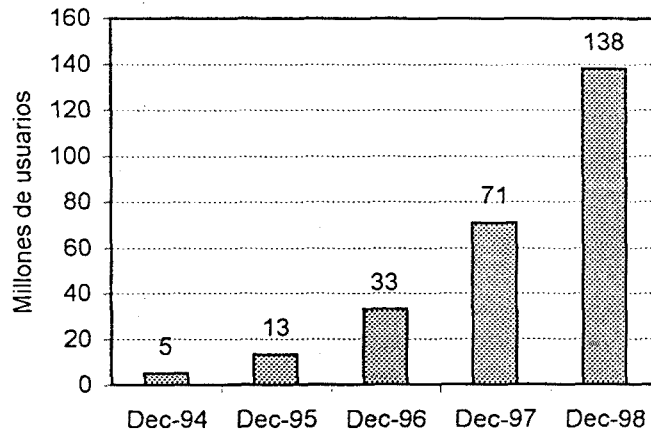


Figura 1-2. Crecimiento del número de usuarios GSM (Fuente: ECM World Cellular Database).

El éxito de los sistemas celulares se atribuye a varios aspectos, entre ellos la incorporación de nuevos servicios de valor añadido y la captación de un mercado de ocio, especialmente jóvenes entre 18 y 25 años. A modo de ejemplo, el servicio de tarjetas pre-pago en GSM, que representa un 11% de los usuarios, genera casi la tercera parte de los ingresos de las compañías operadoras.

El crecimiento experimentado por Internet también ha sobrepasado muchas de las expectativas más optimistas. La utilización de Internet, así como las tecnologías asociadas, se ha extendido en el ámbito profesional, a través de la utilización de *intranets* y demás redes corporativas para acceder a información compartida, en el ámbito educacional, mediante la progresiva incorporación de contenidos y métodos de trabajo alrededor de redes privadas virtuales, en el ámbito cultural y de ocio, ofreciéndose acceso a información divulgativa sobre los temas más variopintos, en el ámbito comercial y de negocios, habilitando el denominado comercio electrónico que, conforme aumenta la convicción de seguridad en la información gestionada, aumenta progresivamente. Todo ello sin olvidar aspectos como el teletrabajo, la publicidad a través de Internet, el intercambio electrónico de documentos y un largo etcétera de posibilidades ofrecidas a través de *la red*.

En un estudio de previsión de mercado efectuado por OVUM, y cuyos principales resultados se compendian en [OVUM98], se refleja una progresiva implantación del acceso a Internet tanto en el ámbito profesional como en el ámbito residencial o doméstico. Los índices de penetración se representan en la Figura 1-3. Las previsiones apuntan a un aumento paulatino y uniforme en los dos ámbitos, constatándose que el número de suscripciones de acceso a Internet desde los hogares familiares sobrepasa considerablemente los valores estimados para las empresas. Para finales del año 2000, el índice de penetración a nivel mundial se sitúa en torno al 13% de los hogares, mientras que su utilización en las empresas se estima en torno al 7-8%, representado ambas cantidades un 4-5% de la población mundial.

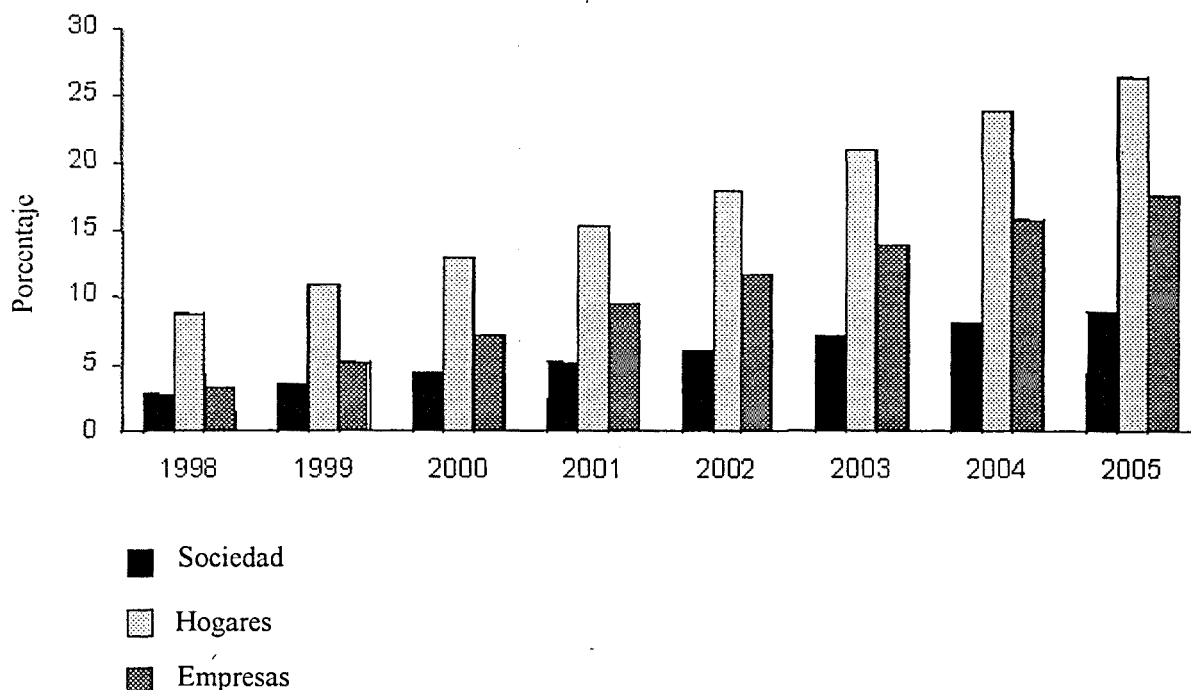


Figura 1-3. Índice de penetración estimado de Internet (Fuente: OVUM)

Internet, concebida en sus inicios como una red exclusivamente de datos, está sufriendo una transformación hacia el concepto de red integrada de servicios multimedia, donde la transmisión conjunta de voz, vídeo y datos pasa a ser el referente principal. De esta forma, a los servicios de correo electrónico y aplicaciones de navegación por contenidos en hipertexto, se les suman servicios de difusión y vídeo bajo demanda (estándares MPEG-II) y servicios audiovisuales y multimedia (H.323, VoIP). La implantación de dichos servicios conlleva la adopción de nuevos protocolos que permitan su aplicación, así como mecanismos para garantizar un criterio de calidad de servicio y operación en tiempo real (RTP, Real Time Protocol, RSVP, Resource Reservation Protocol, MBONE, Multicasting Backbone, etc.)

La evolución de las comunicaciones móviles y la progresiva implantación de Internet no pueden analizarse completamente por separado. Es más, aunque en un principio ambos sectores podrían plantearse como entornos de aplicación complementarios, la posibilidad de acceder a todo el amplio abanico de posibilidades que ofrece Internet a través de la flexibilidad y grado de personalización ofrecido mediante un terminal móvil, conlleva la aparición de una fuerte sinergia entre ellos que, a su vez, conduce a un aumento de las perspectivas alcanzables. Y resultado de dicha sinergia es la progresiva demanda de servicios multimedia y de datos ofrecidos mediante los sistemas de comunicaciones móviles, lo que recibe el nombre de *wireless data* e incluso *wireless Internet*. Además, el aumento de prestaciones de los terminales móviles puede conducir a la aparición de

muchos otros servicios, algunos de ellos ya utilizados hoy en día, que aprovechen información sobre la movilidad de los usuarios.

El porcentaje de accesos a servicios de datos a través de sistemas celulares es, hoy en día, todavía bastante reducido. A modo de ejemplo, se estima que únicamente el 1% o 2 % de usuarios GSM utilizan servicios de datos. Entre las razones que justifican dicha situación encontramos la percepción de lentitud en el acceso (las velocidades típicas en celulares son de 9.6kbits/s-14.4kbits/s), tarifas elevadas en comparación con las prestaciones ofrecidas y diversos problemas de incompatibilidad y flexibilidad en los equipos y aplicaciones destinadas a permitir el acceso desde PCs o equipos portátiles. Sin embargo, las perspectivas de desarrollo de los sistemas celulares y las expectativas ofrecidas desde Internet, están pronosticando un considerable incremento en el campo de los servicios de datos desde sistemas de comunicaciones móviles. En [Konhäuser99] se prevé que, en el año 2005, el número de usuarios de datos en GSM habrá ascendido al 15-20%.

La limitación de los sistemas celulares actuales, a fin de cubrir la incipiente demanda pronosticada, está forzando la introducción, en un plazo de 2 a 5 años, de los denominados sistemas de tercera generación (3G). El camino hacia la 3G viene marcado por la especificación de nuevos estándares y por la incorporación de facilidades adicionales en los sistemas 2G que permitan disponer de soluciones aceptables en plazos de tiempo relativamente cortos. La introducción del acceso por paquetes GPRS (General Packet Data Service) y del protocolo WAP (Wireless Access Protocol) son dos claros exponentes de dicha evolución, referida a veces como 2.5G.

La tendencia de globalización de la economía existente en la actualidad requiere de la disponibilidad de normativas y estándares comunes que permitan fijar un escenario de operación a nivel mundial. El sector de las telecomunicaciones juega un papel crucial dentro de dicha globalización, ya que constituye el vehículo o plataforma de referencia para multitud de servicios y aplicaciones, en todos los ámbitos que pueden favorecerse de la existencia de un mercado unificado, y consecuentemente, de la introducción de economías de escala. La ITU (International Telecommunication Union), dependiente de las Naciones Unidas, es el organismo responsable de establecer dicho marco de referencia global dentro de los sistemas de telecomunicación.

Otro aspecto a tener en cuenta es la aparición de terminales móviles concebidos específicamente para proporcionar acceso a los diferentes servicios. Actualmente, los PCs portátiles son los terminales más utilizados para acceder a Internet. Sin embargo, la tendencia evoluciona hacia terminales de dimensiones más reducidas que puedan ofrecer las prestaciones requeridas de una forma más flexible y cómoda para el usuario. Dentro de dicha gama de terminales se encuentran las PDA (Personal Digital Assistant) y los denominados SmartPhones, terminales de voz con capacidad de representación gráfica de contenidos de Internet específicamente adaptados.

A continuación se recoge una breve descripción de la evolución experimentada por los sistemas celulares, desde su aparición comercial en la década de los 80 hasta las prestaciones ofrecidas actualmente, para dar paso seguidamente, a la concepción del sistema 3G especificado en ITU como IMT-2000 y al proceso que se está siguiendo en la estandarización del acceso radio.

1.2. Un poco de historia...

Los sistemas celulares de primera generación empezaron a implantarse a principios de los años 80, aunque su concepción y planificación se remonta a las décadas de los 40 y 60 respectivamente [Calhoun88]. Están basados en tecnología analógica, con modulación FM para las señales de voz, y su finalidad básica consiste en proporcionar un servicio de telefonía móvil automática (TMA). En Europa, la inexistencia de una política común en el marco de las telecomunicaciones derivó en la aparición de múltiples normas incompatibles entre sí. Entre ellos podemos destacar TACS (Total Access Communication Systems), NMTS (Nordic Mobile Telephone Systems) y German System C. Paralelamente, en Estados Unidos se especificó la norma AMPS (Advanced Mobile Phone System), sistema que sirvió de referencia al TACS desarrollado en Reino Unido, y al sistema implantado por la NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) en Japón. En España, Telefónica introdujo el servicio TMA-450, basado en el sistema nórdico NMT en la banda de los 450MHz, durante el año 1982, ampliándolo posteriormente en la banda de 900MHz con tecnología TACS bajo la denominación TMA-900A, ya llegado el año 1990.

La introducción de los sistemas celulares de primera generación fue planteada como la solución a la problemática de escasez de recursos, propia de los sistemas de telefonía radio existentes en aquel momento. Particularmente, los predecesores de los sistemas celulares estaban basados en el concepto de ubicar un único transmisor de gran potencia para conseguir coberturas de hasta 50-70 Km. El sistema IMTS (Improved Mobile Telephone Service), uno de los más desarrollados tecnológicamente en la década de los sesenta y que permitía ofrecer un servicio TMA bi-direccional, full-duplex y con marcación directa, disponía de 12 y 11 canales en las bandas de 450 MHz y 150MHz respectivamente. A modo de ejemplo, en 1976 en la ciudad de New York había un total de 545 usuarios de un sistema con 12 radiocanales, experimentando probabilidades de bloqueo en la hora cargada de hasta el 50% [Lce89]. No obstante, la aceptación de los primeros sistemas celulares planteó serios inconvenientes en sus inicios, hasta el punto que, en una cita recogida en [Calhoun88] y atribuida al director en jefe del departamento de Desarrollo Celular de Motorola en 1985, éste auguraba el debacle de los sistemas celulares como uno de los desastres más costosos en términos de ingeniería y marketing nunca vistos. Los motivos que rodearon esta desafortunada declaración estaban justificados en su momento. En Estados Unidos, el índice de penetración del servicio de telefonía móvil celular era inferior al 1% a mediados de los años 80 [Calhoun88]. Las posibles causas esgrimidas giran en torno a problemas de coste, tanto de terminales como de infraestructura, problemas de gestión, regulación no acertada al

respecto por los órganos competentes, demanda insuficiente y otra vez, escasez de recursos. La solución a la situación planteada vino de la mano de la tecnología digital aplicada a los sistemas celulares.

Los sistemas digitales de comunicaciones móviles, denominados de segunda generación, son los que se encuentran operativos actualmente, junto con los analógicos de primera generación, constituyendo uno de los segmentos de mayor crecimiento y aceptación dentro del sector de las telecomunicaciones. Los esquemas digitales, además de solucionar al menos hasta la fecha el problema de la capacidad, han sido concebidos bajo un planteamiento completamente diferente a sus antecesores. Particularmente en Europa, las directrices políticas marcadas desde el seno de la Comisión Europea, han derivado en la elaboración de estándares comunes que han jugado un papel fundamental en favor de la integración y armonización del mercado europeo en el sector de las telecomunicaciones. Particularmente, el proceso de estandarización se lleva a cabo en ETSI (European Telecommunication Standards Institute), organización dependiente de la Comisión Europea que integra miembros de más de 50 países, entre los cuales se encuentran administraciones, fabricantes, operadores, proveedores de servicios y usuarios del sector. Pero la gestión de la Comisión Europea no se limita a proporcionar un marco común de operación, sino que se ha procedido al control y supervisión de la implantación coordinada de los nuevos servicios en los distintos países miembro. Además, se han establecido planes para la coordinación del espectro frecuencial a través del ERC (European Radiocommunication Committee), se ha supervisado el proceso de liberalización de algunos mercados, entre ellos España, y se han fomentado numerosos proyectos de investigación, desarrollo y aplicación de las nuevas tecnologías, dentro del marco de los programas RACE I y II (Research in Advanced Communications in Europe), ACTS (Advanced Communications Technologies and Services), aparte de otras acciones europeas dentro de los programas COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research).

En Estados Unidos, la introducción de los sistemas digitales de segunda generación no ha experimentado el mismo grado de cohesión conseguido en la comunidad europea, derivando en la adopción de dos estándares incompatibles basados en tecnologías TDMA y CDMA. Los organismos EIA (Electronic Industries Association) y TIA (Telecommunications Industry Association) elaboraron las especificaciones del estándar digital IS-54 (Interim Standard 54), compatible con el sistema AMPS analógico pero con una capacidad estimada varias veces superior. Posteriormente, en Julio de 1993 se adoptó en Estados Unidos el primer sistema basado en tecnología CDMA, bajo la norma IS-95 (Interim Standard 95), augurando incrementos de capacidad de hasta un factor 10 respecto al sistema analógico. Por otra parte, el sistema desarrollado en Japón dentro de la segunda generación se denomina PDC (Personal Digital Cellular) y es similar al estándar IS-54. En la Tabla 1-1 se detallan las principales características de los sistemas mencionados.

Las capacidades de transmisión de datos en los sistemas GSM, IS-136 y CDMA, se limita a 9.6 kbits/s y 14.4 kbits/s. Adicionalmente, y asociado al sistema IS-136, el sistema celular de transmisión de datos CDPD (Cellular Digital Packet Data) proporciona velocidades de transmisión de hasta 19.2 kbits/s. Otros mecanismos de transmisión de datos disponibles son los servicios de mensajes cortos, con capacidades de comunicación muy limitadas en cuanto al volumen de información.

Tabla 1-1. Principales características de los sistemas digitales celulares de segunda generación.

	GSM/DCS-1800 PCS-1900	IS-54/136	PDC	EIA/TIA IS-95
Banda frecuencial	900/1800/1900	800/1900	700/1500	800/1900
Duplexado	FDD	FDD	FDD	FDD
Técnica de acceso	F/TDMA	F/TDMA	F/TDMA	F/CDMA
Separación canales	200 khz	30 khz	25 khz	1250 khz
Velocidad radio	270.8 kbits/s	48.6 kbits/s	42 kbits/s	1.2288Mchips/s
Duración trama	4.615ms	40 ms	20 ms	20 ms
Canales/portadora	8	3	3	-
Modulación	GMSK	$\pi/4$ -DQPSK	$\pi/4$ -DQPSK	BPSK/QPSK

Además de los sistemas celulares del servicio móvil terrestre, existen actualmente una gran variedad de sistemas para proporcionar acceso radio a usuarios móviles. En el segmento de las comunicaciones inalámbricas nos encontramos con los estándares digitales de segunda generación, como son el DECT europeo, el PHS en Japón y el PACS en Estados Unidos. La aplicación de dichos sistemas se concentra en entornos domésticos, residenciales y cada vez más, en entornos profesionales. Principalmente ofrecen un servicio de voz en configuraciones WPABX (Wireless Private Automatic Branch Exchange) pero también pueden soportar servicios de datos en modo circuito de hasta 64 kbits/s. Otro ámbito de aplicación lo constituyen las redes locales inalámbricas, enfocadas básicamente a proporcionar funcionalidades equivalentes a las soluciones cableadas con las ventajas asociadas de rapidez de instalación y facilidad de reconfiguración. Actualmente, existen dos estándares de redes locales: IEEE 802.11 y HIPERLAN (High Performance European Radio LAN) de ETSI. Ambos estándares cubren la capa de acceso al medio y la capa física del modelo de referencia OSI (Open systems Interconnection) para interconexión de sistemas abiertos. IEEE 802.11 opera en la banda de

2.4 Ghz con velocidades de hasta 2 Mbits/s, mientras que HIPERLAN transmite en las bandas 5.15-5.30 GHz y 17.1-17.2GHz con velocidades de hasta 23.5Mbits/s.

En aras a disponer de diferentes servicios en un mismo terminal, existen muchos productos con capacidad de acceso a diferentes sistemas, conocidos como terminales multimodo, los cuales pueden incluso ofrecerse en distintas bandas frecuenciales. Sin embargo, la solución de terminales multimodo capaces de acceder a varios sistemas independientes entre sí, no se presenta como la más atractiva dentro de la concepción de los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, aunque también se está abordando dicha posibilidad mediante el uso de tecnologías *software radio*.

1.3. Evolución de los sistemas 2G.

Paralelamente al proceso de estandarización del sistema 3G, los sistemas 2G continúan incorporando nuevas funciones para poder ofrecer algunos de los servicios planteados dentro del concepto IMT-2000. En la Figura 1-4 se ilustra el camino que están siguiendo los tres principales sistemas actuales en la migración hacia IMT-2000.

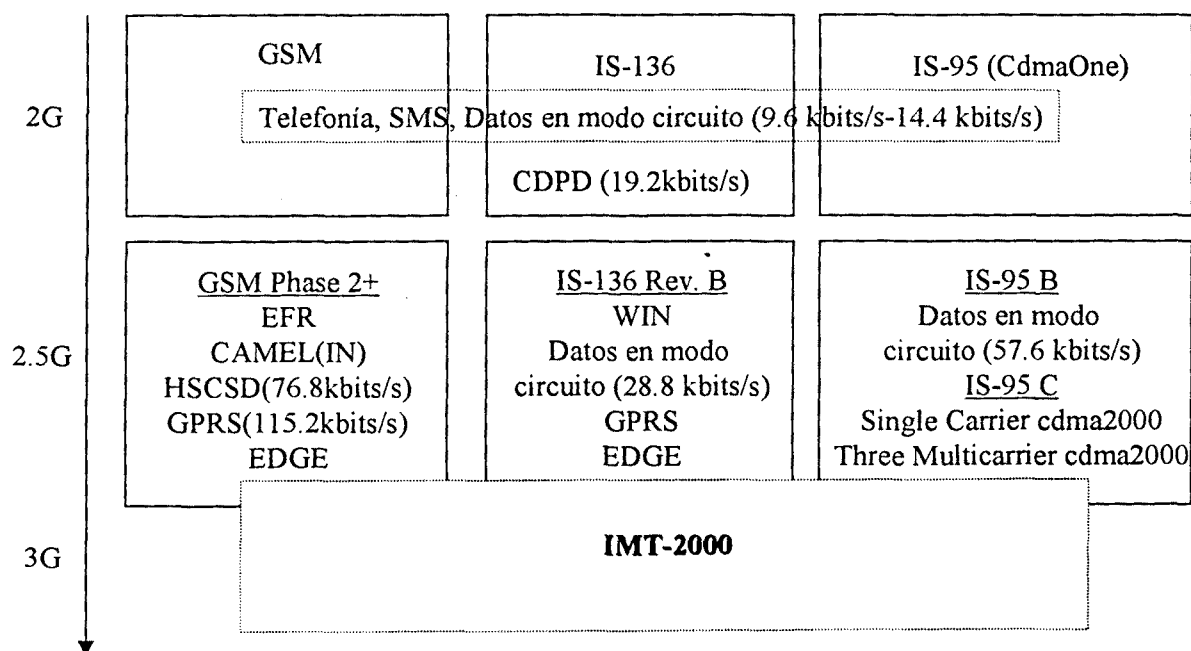


Figura 1-4. Evolución de los sistemas actuales hacia la tercera generación

A continuación se comentan algunas de las avances más significativos que se están perfilando actualmente en distintos foros y organismos internacionales.

- **HSCSD (High Speed Circuit Switched Data)**

Tanto el sistema GSM como el IS-136 utilizan circuitos dedicados sobre un único slot de la trama TDMA. HSCSD permite la asignación simultánea de múltiples slots para aumentar la velocidad de transmisión hasta valores de 28.8 kbits/s y, probablemente, hasta 76.8 kbit/s. Su introducción en algunas redes celulares se prevé para finales de este año o principios del 2000, aunque existe una apreciación general de que la mayoría de los operadores están optando por la implantación de GPRS.

- **GPRS (General Packet Radio Service)**

GPRS es un nuevo servicio añadido a las redes GSM en aras a proporcionar un acceso eficiente a redes de paquetes desde las redes celulares. GPRS está basado en transmisión en transmisión por paquetes tanto en el acceso radio como en la red de transporte. En las especificaciones se contempla la interconexión de la red GPRS a redes IP y X.25. La provisión del servicio GPRS supone la incorporación de una infraestructura adicional en la red del operador. Dicha infraestructura está formada por nodos GSN (GPRS Support Node) interconectados entre sí a través de una red IP. GPRS abre las puertas a posibilitar un uso continuo de los recursos, ya que el terminal puede estar conectado durante intervalos de tiempo considerables si la tarificación se centra en torno al volumen de información, y la transmisión de la información puede realizarse evitando los tiempos de establecimiento de llamada y con velocidades instantáneas de hasta 115 kbits/s. En los capítulos 5 y 6 se proporciona información adicional sobre la arquitectura del sistema y sobre los mecanismos de gestión de movilidad previstos.

GPRS no sólo está siendo adoptado por las redes GSM sino que TIA/EIA en Estados Unidos está adaptando las especificaciones de GPRS al sistema IS-136, denominado GPRS-136 [Faccin99].

- **EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)**

EDGE, actualmente en proceso de estandarización en TIA TR45.3 y ETSI SMG, especifica el diseño de una capa física común para los sistemas GSM y IS-136 que permita la provisión de servicios avanzados, previstos dentro de la tercera generación, a través de las actuales estructuras celulares evolucionadas. EDGE utiliza esquemas de modulación multinivel (8-PSK) en canalizaciones de 200 khz. La estrategia de diseño seguida en EDGE se basa en aprovechar al máximo la infraestructura proporcionada por el sistema GSM/GPRS. EDGE incluye dos modos de operación: EGPRS, basado en transmisión de paquetes, y ECSD, basado en conmutación de

circuitos. Los servicios portadores considerados en ambos modos, paquete y circuito, permiten velocidades por slot de hasta 69.2 kbits/s y 38.8 kbits/s respectivamente.

- **CAMEL (Customized Applications for Mobile Network Enhanced Logic)**

La tecnología de redes inteligentes IN permite la introducción de servicios de valor añadido en las actuales redes celulares. CAMEL intenta normalizar una plataforma para la creación de nuevos servicios IN capaces de ofrecerse a través de redes diferentes a la del propio terminal, normalmente denominadas redes visitadas. De esta forma, los terminales que tengan habilitado el roaming en otras redes pueden acceder a sus servicios personalizados de forma transparente. CAMEL es uno de los primeros pasos hacia el concepto VHE (Virtual Home Environment) introducido en la siguiente sección.

A todas ellas, hay que añadirles la introducción de codificadores de voz más eficientes (Recomendación G.728 ITU, GSM Enhanced Full Rate), sistemas de antenas inteligentes, algoritmos de asignación dinámica de canales en sistemas TDMA (MACA, Mobile-Assisted Channel Allocation para IS-136), y un largo etcétera de modificaciones que pueden resultar en una convergencia continuada y difusa hacia las capacidades planteadas dentro de la tercera generación.

Otro campo de innovación importante en la evolución hacia la tercera generación consiste en el diseño de plataformas de servicios, así como de sus correspondientes APIs (Application Programming Interfaces), para permitir el desarrollo de aplicaciones de la forma más transparente posible a la realidad del acceso radio. Entre las principales plataformas se encuentran:

- **WAP (Wireless Access Protocol)**

WAP es un protocolo que permite el acceso a contenidos de Internet y servicios avanzados. La definición de WAP se está llevando a cabo en el WAP Forum, organismo fundado por Ericsson, Nokia, Motorola y Unwired Planet. En Abril del 1998 ya estaba disponible la primera versión. WAP está formado por un conjunto de protocolos que intentan maximizar la eficiencia en la transmisión de información del tipo *hipermedia*. Para ello, los contenidos HTML se transforman previamente a un nuevo lenguaje denominado WML (Wireless Mark-Up Language) optimizado para la transferencia en canales con limitaciones de ancho de banda. Una característica fundamental de WAP es su independencia del mecanismo de transporte (GSM, IS-136, CDPD, GPRS, CDMA,...). Muchos operadores han apostado por la incorporación de WAP en sus redes ya que se presenta como uno de los aspectos que pueden disparar el acceso a Internet desde redes celulares.

- **MExE (Mobile Execution Environment)**

MExE es el nombre del proyecto que se está desarrollando en ETSI para permitir la carga dinámica de software específico en los terminales móviles. La arquitectura considerada en MExE es una arquitectura cliente-servidor, donde el cliente reside en el terminal móvil y dispone de una cierta capacidad de ejecución de programas, capacidad dependiente del terminal pero accesible a través de una serie de APIs normalizadas. Los programas utilizados para la provisión de servicios no tienen porqué estar residentes en el propio terminal móvil, sino que pueden descargarse de un servidor de red. Al igual que WAP, el mecanismo de transporte utilizado es independiente de la especificación de MExE, consiguiéndose por tanto una elevada flexibilidad.

1.4. IMT-2000

Entre los principales objetivos planteados dentro del concepto IMT-2000 podemos destacar:

- Sistema global. Diseño de un estándar global que permita la integración de diferentes sistemas y terminales, así como la potenciación de un mercado global con equipos compatibles y economías de escala.
- Integración de una gran variedad de servicios específicos de áreas residenciales, entornos celulares y entornos de oficina y negocios.
- Capacidad de soportar servicios avanzados multimedia con parámetros de calidad de servicio comparables a las redes fijas.
- Provisión de servicios personalizados (PCS). Aplicación del concepto de movilidad de usuario y de terminal de forma que se permita desligar el destinatario de la información del terminal utilizado para ello.
- Portabilidad de servicios (Virtual Home Environment). Permitir que el usuario pueda acceder a sus servicios personalizados a través de redes diferentes a la suya propia, garantizando la máxima transparencia en la provisión del servicio.
- Además de la componente terrestre, utilización de una estructura de satélites con posibilidad de acceso directo que permita garantizar una cobertura global.
- Provisión de servicios portadores con capacidad similar a un acceso básico ISDN (144kbits/s) en entornos macrocelulares, de hasta 384 kbits/s en entornos de microceldas y pudiendo llegar hasta los 2 Mbits/s en entornos de interiores.

- Flexibilidad en la gestión de recursos radio que permita tanto aprovechar eficientemente el espectro asignado como posibilitar la competencia en una misma banda frecuencial.
- Bajo coste de servicios y terminales.

Los estudios sobre un sistema global de comunicaciones personalizadas empezaron en ITU durante 1986, cuando comenzó a vislumbrarse el potencial que podría ofrecer un sistema global en vez de múltiples esquemas nacionales o regionales. En la conferencia WARC-92 (World Administrative Radio Conference 1992) se identificó una banda frecuencial de 230MHz para la implantación del sistema IMT-2000 a nivel mundial. Posteriormente, en la conferencia WARC del año 95 se introdujeron algunas modificaciones en las bandas asignadas para la componente por satélite (MSS, Mobile-Satellite Services) en la Región 2 (Caribe y América) y se adelantó el plazo de disponibilidad de las bandas frecuenciales al año 2000, previamente fijado para el año 2005 por la WARC-92, excepto en la Región 2 donde se mantiene el mismo plazo temporal. En la Figura 1-6 se representan las bandas reservadas por ITU y la configuración correspondiente adoptada en Europa.

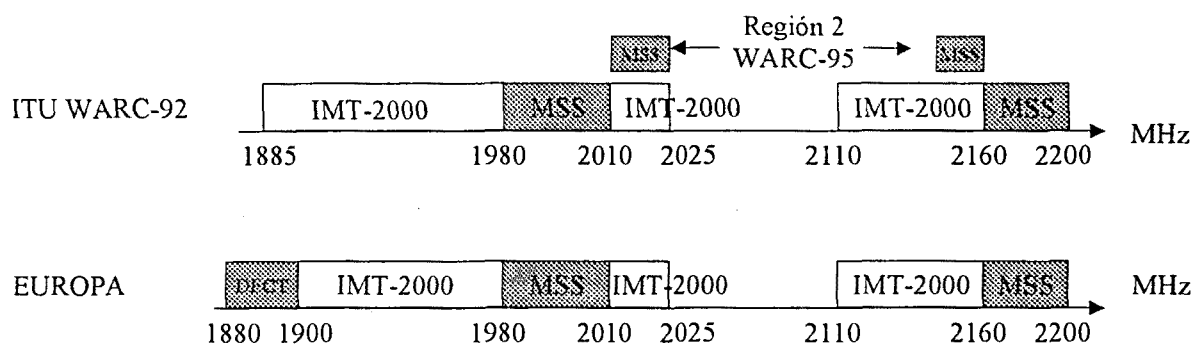
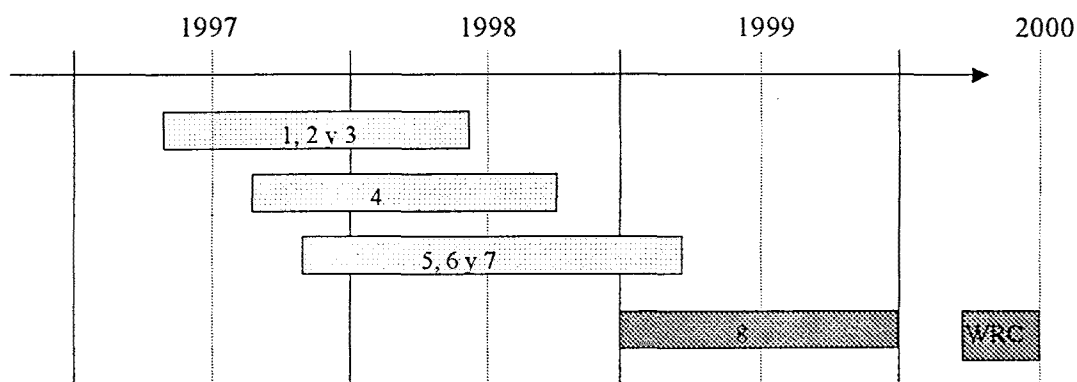


Figura 1-6. Disponibilidad de frecuencias para IMT-2000

La regulación del proceso de estandarización del futuro sistema de tercera generación denominado IMT-2000, conocido previamente como FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication System), se está llevando a cabo dentro del grupo TG 8/1 (Task Group 8/1) perteneciente al grupo de estudio 8 de ITU-R (ITU Radiocommunication Sector), encargado de servicios móviles, así como en otros grupos de estudio de la ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) encargados de la estandarización de redes.

En Europa, la visión de sistema de tercera generación se ha ido desarrollando bajo el concepto de UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) y MBS (Mobile Broadband System). Los programas RACE y ACTS han permitido situar a Europa en una posición privilegiada dentro del proceso de estandarización global auspiciado por ITU. Concretamente, los aspectos abordados dentro del programa ACTS, dentro de diferentes proyectos de cooperación, giran en torno al desarrollo de

nuevas aplicaciones y servicios, definición de plataformas de acceso radio y de estructura de red, y concepción y desarrollo de nuevas tecnologías. Los resultados de muchos de dichos proyectos han conformado la postura seguida en el proceso de estandarización por el comité técnico SMG (Special Mobile Group) de ETSI



- 1, 2 y 3. Petición, desarrollo y envío de las propuestas RTT.
4. Evaluación de RTTs.
5. Revisión externa a la evaluación.
6. Análisis de prestaciones en base a los parámetros de evaluación.
7. Estudio de los resultados de evaluación y consenso en los parámetros de diseño.
8. Desarrollo de la descripción detallada de la interfaz radio.

Figura 1-7. Calendario previsto en ITU para la estandarización de la interfaz radio del sistema IMT-2000.

Los puntos de partida considerados a la hora de plantear la concepción del estándar IMT-2000 pueden agruparse en torno a dos aspectos principales [ITU]:

1. Permitir la coexistencia e interoperabilidad del sistema IMT-2000 con los sistemas 2G actuales y sus posibles evoluciones con el fin de aumentar la flexibilidad de los operadores. Este enfoque permite una transición gradual hacia la tercera generación que, aún manteniendo un punto de convergencia a largo plazo, puede divergir en el camino entre regiones, naciones e incluso operadores diferentes.
2. Permitir diferentes estrategias a la hora de acomodar el espectro utilizado para proporcionar servicios IMT-2000. De esta forma, es decisión del operador, país o región, la posibilidad de ofrecer los nuevos servicios en bandas ya utilizadas o bien recurrir de entrada a las bandas frecuenciales reservadas por ITU.

El procedimiento de estandarización empezó a principios de 1997 con una petición de propuestas formulada por ITU a los diferentes organismos de estandarización regionales. En la Figura 1-7 se ilustra el calendario adoptado en ITU hasta disponer de una primera versión técnica detallada de las

interfaces seleccionadas. El plazo de recepción finalizó en Junio del 1998 con un total de 15 propuestas, denominadas genéricamente RTTPs (Radio Transmission Technology Proposals), contabilizando también las referentes a la descripción de la interfaz radio para el acceso por satélite.

En la Tabla 1-3 se detallan las propuestas presentadas para el segmento terrestre y su organismo de emisión correspondiente.

Tabla 1-3. Propuestas enviadas a ITU para la estandarización del acceso radio del sistema IMT-2000.

Propuestas	Descripción	Procedencia
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications	ETSI Project DECT
UWC-136	Universal Wireless Communications	USA TIA TR45.3
WINS W-CDMA	Wireless Multimedia and Messaging Services Wideband CDMA	USA TIA TR46.1
TD-SCDMA	Time-Division synchronous CDMA	China CATT
W-CDMA	Wideband CDMA	Japan ARIB
W-CDMA II	Asynchronous DS-CDMA	S. Korea TTA
UTRA (W-CDMA y TD-CDMA)	UMTS Terrestrial Radio Access	ETSI SMG2
NA: W-CDMA	North American: Wideband CDMA	USA T1P1-ATIS
CDMA 2000	Wideband CDMA (IS-95)	USA TIA TR45.5
W-CDMA I	Multiband Synchronous DS-CDMA	S. Korea TTA

También en 1997, ITU aprobó de la recomendación ITU-R M.1225 que habría de servir como marco de referencia para la evaluación de las RTTPs. Todas las propuestas presentadas, exceptuando la propuesta basada en DECT y la UWC-136, están basadas en un acceso múltiple por código de secuencia directa (DS-SS). Dichas propuestas presentan varias características comunes, entre las cuales destacan [Zeng99]:

- Todos son sistemas CDMA de banda ancha (Wideband CDMA), a excepción de la propuesta china basada en CDMA de banda estrecha (1.1136 Mchips/s).

- Permiten detección coherente en el enlace ascendente mediante la incorporación de símbolos piloto. Permiten el uso de técnicas de diversidad espacial en dicho enlace.
- Control rápido de potencia en lazo cerrado en el enlace descendente.
- Permiten la ejecución de traspasos entre portadoras a frecuencias diferentes (interfrequency handover).

Por otro lado, las diferencias básicas entre ellos consisten en:

- Velocidades de transmisión en chips/s.
- Sincronización de las estaciones de las estaciones de base.
- Multiplexación temporal o por código del canal piloto en el enlace descendente.
- Adopción de sistemas multiportadora.

La propuesta UWC-136 es la evolución del sistema IS-136, con la adopción de nuevos esquemas de modulación en canales de 30 kHz, así como la adición de nuevas canalizaciones (200 kHz y 1.6 MHz) para acomodar servicios de mayor velocidad [Austin99].

La mayoría de las propuestas soportan ambos modos de duplexado FDD y TDD. La introducción del duplexado TDD se debe básicamente a dos motivos principales: la existencia de bandas no simétricas en la especificación frecuencial de ITU, véase Figura 1-6, y la mejor utilización espectral en el caso de escenarios de implantación donde exista una elevada asimetría entre el tráfico cursado en el enlace descendente y en el enlace ascendente, característica importante en los servicios de datos ofrecidos a través de Internet.

La necesidad de converger hacia una solución de consenso ha derivado en la creación de varios proyectos de cooperación entre los diferentes organismos involucrados en el proceso de estandarización. Entre ellos, el 3GPP (Third Generation Partnership Project), formado por ETSI, ARIB, CWTS, T1, TTA y TTC, se encarga de elaborar las especificaciones técnicas referentes a la propuesta UTRA para ambos modos de operación, FDD y TDD, y una red troncal derivada de GSM. Por otra parte, el grupo 3GPP2 formado por ARIB, TTA y TTC se encarga de promover la interfaz de acceso radio cdma2000 y una red troncal evolucionada del actual estándar de movilidad utilizado en IS-136 y IS-95, denominado ANSI/TIA/EIA-41. Adicionalmente, un gran número de operadores y fabricantes ha constituido otro grupo de trabajo, conocido como OHG (Operators Harmonization Group), en aras a formular propuestas y facilitar la convergencia de las soluciones adoptadas en los diferentes proyectos de cooperación.

Tal como se representa en la Figura 1-7, la fecha prevista para disponer de una solución consensuada se sitúa a finales del año 1999. A pesar de los diferentes intereses estratégicos y económicos de las grandes compañías y administraciones participantes en los diferentes foros de estandarización, y sirva de ejemplo las diferencias que han mantenido Qualcomm y Ericsson, dos de las compañías más importantes en la fabricación de tecnología CDMA, en temas sobre la explotación de los derechos de la propiedad intelectual, parece que la solución final se perfila de la siguiente forma:

- Un único estándar con varios modos de acceso múltiple concebidos para cubrir diferentes entornos de operación según el país o región de aplicación.
- Tres modos de acceso basados en CDMA: Modo FDD 1 (basado en UTRA WCDMA), Modo FDD 2 (basado en el esquema multiportadora de CDMA2000) y Modo TDD (basado en TD/CDMA).
- Un modo de acceso FDD/TDD TDMA según UWC-136.
- Redes troncales evolucionadas de GSM MAP y ANSI-41 que permitan la interconexión entre ellas con la máxima transparencia posible.

Con todo ello, el despliegue de los primeros sistemas IMT-2000 está previsto para principios del año 2001, sujeto lógicamente a los condicionantes de mercado en los diferentes países y regiones y a la saturación de capacidad de los sistemas implantados actualmente.

1.5. ¿Cuarta generación?

Y como no sería de extrañar, ante la proximidad de la aparición de los esquemas 3G, muchas miradas empiezan ya a redirigirse hacia la generación venidera (4G?). IMT-2000 podrá ofrecer velocidades de transmisión de hasta 2 Mbits/s, bajo unas determinadas condiciones de movilidad y entorno de propagación. Los sistemas móviles futuros están concebidos en torno a la idea de cubrir el hueco existente entre los servicios accesibles desde IMT-2000 y posibles servicios multimedia con requerimientos de ancho de banda mucho mayores ofrecidos exclusivamente a través de redes de acceso fijas. El concepto de sistema de banda ancha, entendiéndose por banda ancha velocidades superiores a 2 Mbits/s, se forjó paralelamente al de UMTS en el proyecto MBS (Mobile Broadband System) desarrollado dentro del programa RACE I. En dicho proyecto se identificaron las bandas de 40 y 60 GHz como posibles bandas de operación y se realizaron los primeros estudios de propagación. Posteriormente, MBS tuvo su continuación en RACE II, y dentro del programa ACTS, el proyecto SAMBA propuso la construcción de un demostrador para validar el diseño y prestaciones del sistema MBS. MBS se plantea como un sistema celular capaz de ofrecer velocidades de 155 Mbits/s a usuarios móviles desplazándose a velocidades considerables. La convergencia entre IMT-2000 y MBS se

conseguiría a partir de la compartición de una misma red troncal. Además del desarrollo del sistema, MBS contempla las posibilidades de aceptación y demanda de mercado de un sistema de dichas características, apuntando hacia finales de la primera década del nuevo milenio como posible inicio de introducción de los sistemas de banda ancha MBS.

Finalmente, en la Figura 1-8 se ilustra una representación utilizada recientemente en [Prögler99] para poner de manifiesto el ámbito de operación de los sistemas 3G frente a la aparición y concepción de esquemas con prestaciones mucho más ambiciosas.

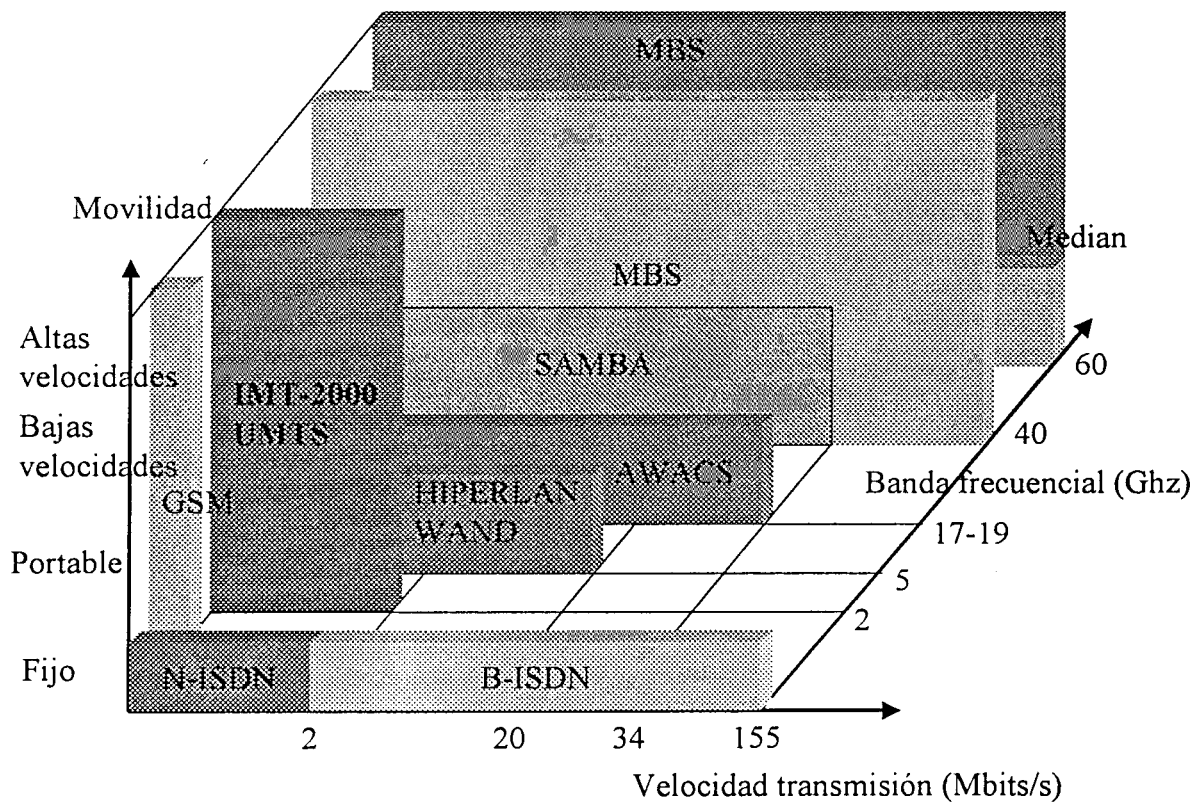


Figura 1-8. GSM y Tercera generación en contexto.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. MECANISMO DE TRASPASO

EN SISTEMAS CELULARES

2.1. Introducción

El mecanismo de traspaso, o *handover*, es un procedimiento esencial en los sistemas celulares. Una posible definición de traspaso sería la siguiente: "Cambio del punto de acceso de un terminal móvil a la red de un sistema celular durante el transcurso de una conexión". El objetivo primordial del traspaso consiste en enmascarar la estructura del sistema celular, de forma que el usuario pueda percibir una continuidad de servicio en todo el área de cobertura del sistema. El diseño del mecanismo de traspaso incide considerablemente en el grado de calidad (QoS) de los servicios ofrecidos, así como en el dimensionado de capacidad del sistema. El número de variables a tener en cuenta en el diseño de un protocolo de traspaso se dispara cuando se plantea la visión de sistema ambicionada para la tercera generación: acceso a servicios multimedia con requisitos de calidad de servicio (QoS), y cobertura global con, probablemente, sistemas heterogéneos y estructuras celulares de varias capas (HCS).

En este capítulo se describen algunos aspectos asociados al mecanismo de *handover* con el objetivo de presentar un amplio marco de referencia, no exhaustivo, que permita poner de manifiesto los retos que se plantean, así como contrastar ventajas y limitaciones de los diferentes aspectos a considerar dentro del procedimiento de traspaso.

2.2. Necesidad del *handover*.

El principal propósito del *handover* consiste en evitar la interrupción de una conexión cuando el terminal móvil se está alejando de la zona de cobertura de la estación de base que utiliza como punto de acceso. La percepción de calidad que ofrecería el sistema en caso contrario se vería muy deteriorada. Los traspasos que obedecen a esta causa se conocen con el nombre, en terminología GSM, de '*rescue handover*' [Mouly92], donde la probabilidad de perder la conexión es muy elevada en caso de mantener el mismo radiocanal. El mecanismo de restablecimiento de llamada, donde después de un corte apreciable en la conexión (10-20s) el móvil vuelve a establecer un canal dedicado con el sistema, podría verse como un caso extremo de '*rescue handover*'.

Aparte del deterioro de calidad existen otros motivos que pueden derivar en la ejecución de un *handover*. Podría darse el caso de tener un enlace dedicado con calidad aceptable pero que fuera

necesario liberarlo debido al nivel de interferencia generado en otros radiocanales del sistema. De esta forma, la asignación de radicales podría obedecer a algún algoritmo de maximización de capacidad, o equivalentemente en sistemas celulares, minimización de interferencias, que obligara a efectuar trasposos en conexiones con calidad aceptable. Dicho *handover* se denomina '*confinement handover*'.

Tanto el '*rescue handover*' como el '*confinement handover*' obedecen a criterios de calidad y optimización de potencia de transmisión en los canales radio. Pero criterios de distribución de tráfico y asignación de recursos pueden también derivar en la necesidad de efectuar un *handover*. Los trasposos así ocasionados se conocen como '*traffic handover*' y su finalidad principal es la optimización de los recursos del sistema frente a situaciones esporádicas de congestión de alguna celda o bien por las propias necesidades de planificación/redistribución de tráfico del operador del sistema.

Dichos criterios de *handover* pueden ser utilizados en un sistema celular conjuntamente, aunque es importante constatar el compromiso existente en intentar optimizar la aplicación de los tres objetivos.

2.3. Escenarios de aplicación del *handover*

La planificación y estructura de un sistema celular depende en gran modo, aparte de la tecnología utilizada, de las características de tráfico de los servicios ofrecidos (distribución espacial, tasas, calidad de servicio) y de las características de propagación de la zona de cobertura (zonas rurales, urbanas, interiores). Tal situación deriva en multitud de entornos con restricciones completamente diferentes en cuanto a las prestaciones de los procedimientos de *handover* necesarios. A continuación se detallan las peculiaridades más relevantes, desde el punto de vista del *handover*, de diferentes escenarios: macroceldas, microceldas, superposición macroceldas/microceldas (HCS), 'hot spots' y sistemas de satélites. En la Figura 2-1 se presenta una visión de lo que podría ser una configuración típica de cobertura global donde pueden confluir varios niveles de celdas en una misma área de servicio.

2.3.1. Macrocelas.

La provisión de cobertura celular mediante macroceldas se refiere al uso de estaciones de base emplazadas en puntos elevados y con potencias de transmisión considerables. Las áreas de cobertura que se consiguen de esta forma son celdas con radios de pocos kilómetros hasta, incluso, celdas de 35 km soportadas en las especificaciones GSM. La utilización de macroceldas no está restringida únicamente a zonas rurales sino que también las zonas metropolitanas pueden ser adecuadamente cubiertas utilizando montajes de macroceldas. La característica más relevante, en términos de *handover*, es la relativamente suave transición de potencia entre celdas adyacentes, de forma que las áreas de solapamiento son, por lo general, bastante elevadas. La mayoría de algoritmos de *handover*

propuestos en la literatura para entornos macrocelulares tienen la peculiaridad de tolerar un cierto retardo en la fase de iniciación del *handover* a fin de reducir el número de *handovers* innecesarios [Murase91]. Una componente importante de dicho retardo es debida a la implementación de mecanismos de promediado de los valores de potencia y los parámetros de calidad a fin de mitigar el efecto de las fluctuaciones de los desvanecimientos. Por otro lado, dicho retardo conduce a situaciones donde los terminales móviles no se encuentran conectados a través de la celda que proporciona mejor cobertura. Este efecto de imbricación entre celdas adyacentes se conoce mediante el nombre de 'cell dragging' [Tripathi98]. La planificación de los sistemas de primera y segunda generación celulares está basada básicamente en zonas de cobertura macrocelulares. Para estos sistemas, los nodos de gestión del mecanismo de *handover* (decisión, ejecución) están prácticamente centralizados en entidades de la parte fija de la red, obteniendo así un control completo sobre la gestión de los recursos radio. Pero tal centralización conduce a retardos adicionales en la decisión y ejecución del *handover* en sistemas con alta densidad de tráfico.

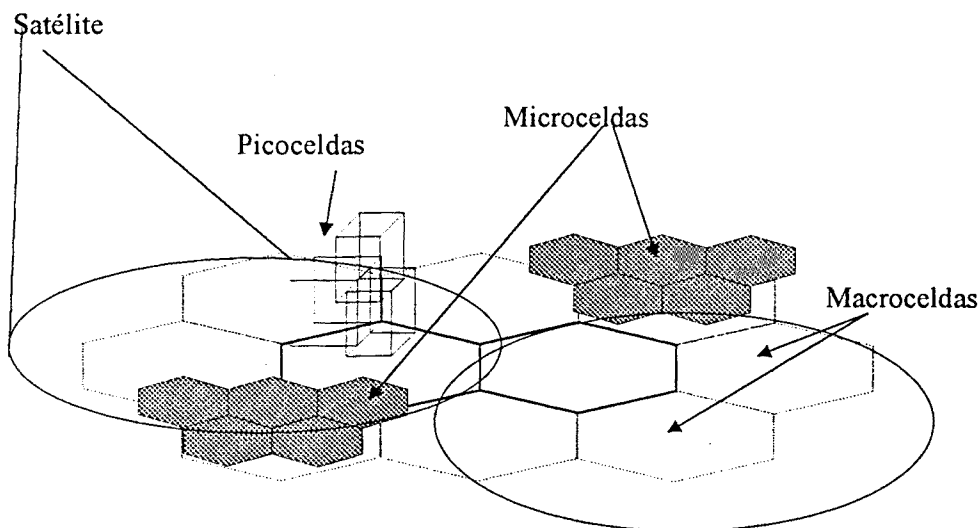


Figura 2-1. Escenario estructurado en diferentes capas de celdas.

2.3.2. Microceldas y picoceldas

La introducción de microceldas es ineludible para incrementar la capacidad de un sistema celular en entornos con alta densidad de tráfico [Tripathi98][Steele95]. El objetivo de las celdas microcelulares es limitar la cobertura de una estación de base a zonas no muy extensas como podría ser una única calle o la intersección de varias. Existen varias clasificaciones para referenciar diferentes entornos microcelulares. En [Tripathi98] hablan de entornos microcelulares de una, dos y tres dimensiones para referirse a la cobertura de una carretera o una única calle, un grupo de calles adyacentes y edificios con varias plantas respectivamente. En el mismo artículo también se referencia una clasificación expuesta en [Shapira94] donde se clasifican las microceldas como 'hot spots' (áreas de servicio

puntuales con mayor densidad de tráfico), *clusters* de microceldas contiguos y celdas 3-D para interiores de edificios.

La planificación de microceldas se basa en la ubicación de las antenas transmisoras a pocos metros del suelo, normalmente por debajo de la altura de los edificios colindantes. De esta forma se consigue un confinamiento de potencia en zonas de 100-200 metros en cada una de las calles iluminadas por la estación de base. Los modelos de propagación más utilizados son modelos de doble pendiente y el modelo de tierra plana. En [Grimlund91] citan cambios en la pendiente de propagación que pueden oscilar desde d^{-2} antes del punto de inflexión hasta d^{-8} en las zonas más alejadas. De todas formas, las condiciones de propagación son muy dispares porque dependen en cada caso de las características de los edificios y calles que forman el entorno de implantación. Un problema adicional típico de los entornos microcelulares es el denominado 'corner effect'. El 'corner effect' se refiere al aumento brusco de la atenuación del enlace radio (20-30 dB) en distancias de pocos metros (10-20 m) y básicamente se debe a la pérdida de visibilidad directa con la estación de base. En la Figura 2-2 se ilustra dicho efecto.

Las dispares condiciones de propagación en entornos microcelulares, y particularmente el 'corner effect', inciden directamente en el diseño de las estrategias de traspaso. Normalmente para caracterizar los mecanismos de *handover* se recurre a la distinción entre *handovers* LOS (line-of-sight) y *handover* NLOS (non-LOS). En un *handover* LOS las estaciones de base involucradas tienen visibilidad directa entre ellas, al contrario de lo que ocurre en *handovers* NLOS. Por ello, en *handovers* LOS puede ser conveniente retardar el instante óptimo de ejecución del *handover* a fin de mitigar las fluctuaciones de los desvanecimientos y así evitar *handovers* innecesarios. En cambio, en *handover* NLOS interesa realizar una conmutación rápida a la nueva estación de base porque el enlace con la estación de base antigua muy probablemente no va a recuperarse [Pollini96].

Además de las características de propagación, el patrón de ubicación de las celdas y la distribución de los recursos radio entre las estaciones de base de un sistema microcelular también influyen en las prestaciones del *handover*. En [Gudmun92] se definen una serie de teselaciones aplicables a un entorno microcelular simétrico conocido normalmente como 'Manhattan grid'. Particularmente se plantean escenarios con patrones de celdas: half-square (HS), full-square (FS) y rectangulares (R). Los patrones HS consisten en la ubicación de estaciones de base omnidireccionales en todas las intersecciones de las calles, de forma que una estación de base proporciona cobertura hasta aproximadamente la mitad de las calles en los cuatro sentidos. Los patrones FS son similares a los anteriores extendiendo la zona de cobertura en cada una de las calles hasta la siguiente intersección de forma que las estaciones de base se ubican cada dos intersecciones. En la Figura 2-2 se muestra una teselación FS en dicho entorno microcelular. En los patrones rectangulares las estaciones de base cubren únicamente una calle, de forma que existen dos teselaciones independientes de celdas para cubrir las calles según su orientación vertical u horizontal. Análogamente a la definición de la

distancia de re-uso entre celdas co-canal empleada en las teselaciones hexagonales típicas de entornos macrocelulares, se puede definir también una distancia de re-uso para acotar la mínima separación entre celdas co-canal o bien utilizar una distancia de re-uso LOS definida como la distancia mínima entre las cuatro celdas co-canal con visibilidad directa, ya que los focos de interferencia dominantes provienen de tales estaciones LOS [Gudmun92]. Incluso, las prestaciones en términos de relación señal a interferencia (SIR) para un mismo patrón microcelular pueden ser bastante diferentes en los canales ascendente y descendente para *handovers* NLOS [Ostling94].

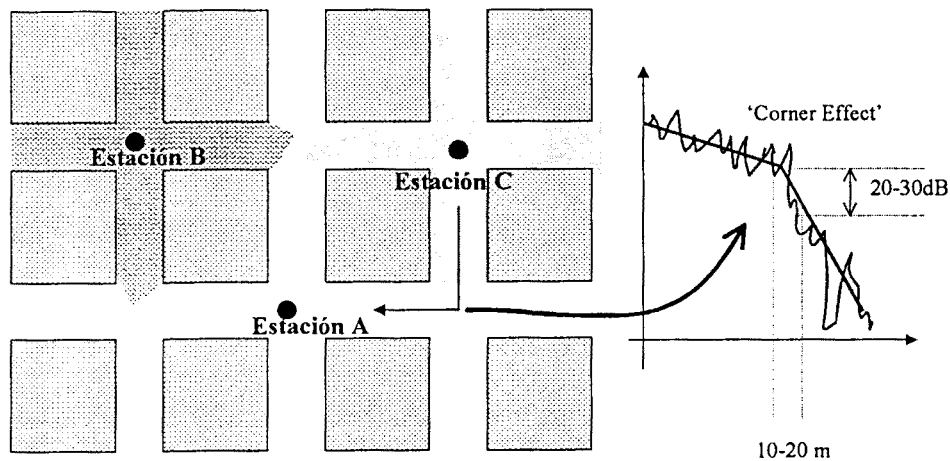


Figura 2-2. Ejemplo de una teselación FS en un entorno 'Manhattan grid'.

Por otra parte, las variaciones de la densidad de tráfico ofrecido, altamente probables en entornos microcelulares, desaconsejan el uso de técnicas de asignación fija de recursos (FCA) frente a mecanismos de asignación dinámica (DCA). En tal caso, las estrategias de *handover* y la asignación de recursos deberían operar coordinadamente para optimizar las prestaciones, tal como se indica en la sección 2.9.2.

2.3.3. Estructura multicapa y *hot spots*

Las planificaciones basadas en macroceldas o en microceldas no son, en ningún modo, excluyentes. Al contrario, la propia implantación de los sistemas celulares de segunda generación y la futura inclusión de los esquemas de tercera generación propicia la aparición de estructuras celulares superpuestas sobre una misma área de servicio. Tales configuraciones multicapa suelen conocerse también como Hierarchical Cell Structures (HCS) o bien Macrocell/Microcell Overlays. Básicamente el objetivo de la capa de macroceldas consiste en proporcionar cobertura en todo el área de servicio mientras que la capa de microceldas se destina a cubrir aquellas zonas con mayor intensidad de tráfico (*hot spots*). Las zonas de cobertura de las agrupaciones microcelulares no tienen porqué ser contiguas entre ellas. En

dichos casos, la capa macrocelular debe permitir garantizar la continuidad de las conexiones entre zonas de cobertura microcelular. De esta forma, las estructuras multicapa permiten incrementar la capacidad del sistema mediante la implantación de microceldas a la vez que evitan el aumento de la tasa de *handovers* al poder gestionarse éstos de forma conjunta entre ambas capas.

Entre los aspectos más relevantes de las estructuras multicapa podemos apuntar:

- La elección de la tecnología radio utilizada en las diferentes capas de celdas. La adopción de sistemas CDMA y/o TDMA para el nivel macrocelular y microcelular, ya sea compartiendo la misma banda frecuencial o bien funcionando como sistemas ortogonales, condiciona los mecanismos de ejecución del *handover*. Tecnologías diferentes repercuten en la complejidad de los terminales móviles que deberían poder operar en modo dual. TDMA sobre TDMA es posible pero aparecen problemas de sincronización a nivel de slot y trama que limitan la capacidad de los terminales móviles de efectuar mediciones en las diferentes capas. CDMA sobre CDMA en la misma banda frecuencial no es aplicable para conseguir una estructura HCS sino que se consigue una teselación con celdas no uniformes pero de un solo nivel [Shapira94].
- Asignación de los móviles a las diferentes capas. Cuando un móvil establece una conexión en un punto con cobertura apropiada desde diferentes capas, debe gestionarse un criterio de asignación de dicho móvil al nivel más adecuado. De la misma forma, cuando un móvil requiere un *handover*, existe la problemática de mantener la conexión en el mismo nivel o cambiarlo a una capa superior, en previsión de reducir posibles futuros *handovers*, o bien a una capa inferior, si se intuye una probabilidad muy baja de requerirse un nuevo traspaso. Los criterios de asignación y reasignación pueden basarse en estimaciones de la velocidad de los terminales y en contadores de permanencia en una determinada situación (*dwell timers*), o bien, pueden estar directamente condicionados por algoritmos de gestión y distribución de tráfico.

Podría pensarse en algoritmos de *handover* que penalizaran el traspaso a una macrocelda mediante la utilización de márgenes de histéresis elevados y en cambio, facilitarían el traspaso a microceldas reduciendo dicho margen de histéresis. Pero para evitar que usuarios con velocidades elevadas fueran traspasados a microceldas, con la consiguiente probabilidad de requerir nuevos traspasos, se podrían emplear penalizaciones de tiempo antes de aplicar las citadas reducciones en los márgenes de histéresis.

- Realización de *handovers* entre capas. Los algoritmos de decisión de *handover* deben considerar las diferentes particularidades que se presentan al permitirse la realización de *handovers* entre celdas de la misma capa pero también entre celdas de capas diferentes. De esta forma, podemos encontrarnos con traspasos entre macroceldas, entre microceldas, de macro a microcelda y de

micro a macrocelda, todos con parámetros de optimización diferentes que deben ser gestionados por las estrategias de *handover* adoptadas.

2.3.4. Satélites

Los sistemas por satélite podrían constituir la capa superior en estructuras HCS. Los sistemas de órbita baja (LEO) y media (MEO) presentan una serie de ventajas sobre los sistemas geoestacionarios (GEO) de cara a cumplir con los requisitos planteados para los sistemas de tercera generación. Entre dichas ventajas nos encontramos con retardos de propagación mucho más reducidos, cobertura global que permite incluir las zonas de mayor latitud y posibilidad de utilizar terminales más manejables, debido básicamente al mejor balance de potencias en comparación con el exhibido en los sistemas geoestacionarios. No obstante, el continuo movimiento de los satélites LEO y MEO respecto al planeta conducen a la aparición de nuevas problemáticas a la hora de abordar el traspaso. La cobertura proporcionada por los satélites se estructura en haces, denominados *spotbeams*, que barren la superficie terrestre a gran velocidad. Por tanto, aún permaneciendo el terminal completamente estático, el movimiento de los satélites obliga a realizar constantemente traspasos de la conexión entre *spotbeams* de un mismo satélite, así como traspasos entre satélites adyacentes dentro de la constelación. Además, en caso de utilizarse enlaces directos entre satélites para encaminar la conexión a la estación terrestre adecuada, surge la necesidad de realizar traspasos de las propias conexiones internas utilizadas en la constelación conforme las posiciones relativas entre satélites se van modificando.

2.4. Etapas diferenciadas en un mecanismo de traspaso.

De forma general, el procedimiento de *handover* puede desglosarse en tres etapas diferenciadas: etapa de medidas, etapa de iniciación y/o decisión y etapa de ejecución. En la Figura 2-3 se representan dichas etapas.

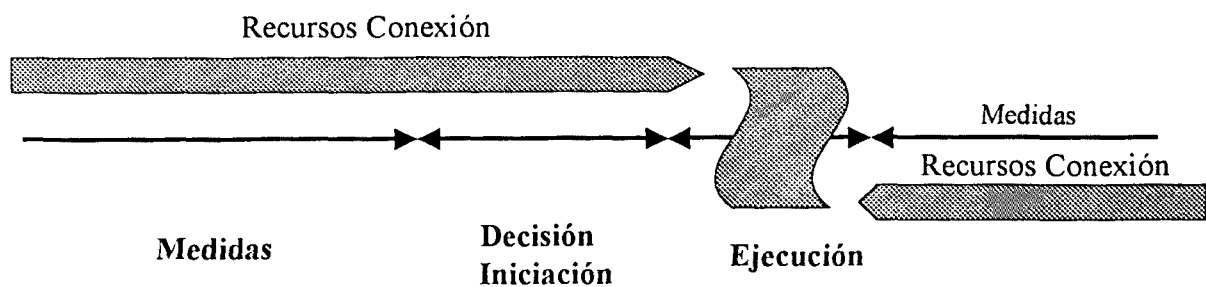


Figura 2-3. Etapas asociadas al mecanismo de traspaso.

Las funciones asociadas a cada una de las etapas se detallan a continuación:

- **Fase de medidas.** Para poder decidir la necesidad de realizar un *handover*, el sistema debe contar con una serie de medidas que proporcionen información sobre el nivel de potencia recibida y calidad, tanto de su enlace activo como de las posibles estaciones de base candidatas a acoger la conexión en curso. Debido a la variabilidad de las condiciones de propagación en los canales radio es necesaria la utilización de algoritmos de promediado adecuados para reducir la aleatoriedad de los parámetros utilizados en la decisión del traspaso. De esta forma, existe un compromiso entre la duración mínima de un promediado adecuado y la necesidad de disparar el procedimiento de *handover* rápidamente en entornos muy fluctuantes o bien en zonas cubiertas con estaciones base poco distanciadas entre sí (pico y micro celdas). Otro aspecto a tener en cuenta es la implementación del proceso de monitorización de otras estaciones que puede ser diferente en función de la técnica de acceso utilizada.
- **Fase de iniciación/decisión.** En esta etapa se realiza la decisión de realizar un *handover* a partir de las medidas de potencia y/o calidad del enlace activo y de las estaciones de base vecinas. Dichas medidas, junto con información de gestión de tráfico (capacidad disponible, densidad de usuarios) y los parámetros habilitados en el sistema a efectos de controlar el mecanismo de decisión (márgenes de histéresis, contadores de tiempo, niveles de potencia umbral) constituyen la base de funcionamiento de los algoritmos de decisión que pueden estar ubicados en el terminal móvil, en la red fija o bien en ambos. Dentro de la fase de decisión también debe considerarse el algoritmo utilizado para la elección de la celda o conjunto de celdas candidatas a establecer el nuevo enlace.
- **Fase de ejecución.** Finalmente, una vez se ha decidido la necesidad de realizar un *handover*, debe enviarse la señalización adecuada para ejecutar el cambio de canal y debe procederse a la conmutación de los recursos destinados a transmisión de la información del terminal móvil. La duración de la fase de ejecución es uno de los requisitos a minimizar, así como el garantizar la integridad de la información transportada para servicios de datos.

En las siguientes secciones, 2.5, 2.6 y 2.7, se analizan más detalladamente los procedimientos y parámetros de diseño más relevantes en cada una de las tres etapas identificadas en el mecanismo de traspaso.

2.5. Fase de Medidas

El terminal móvil o la estación de base, o bien ambos, deben obtener las medidas necesarias para poder decidir sobre la necesidad de realizar un traspaso. Básicamente pueden realizarse los siguientes tipos de mediciones [Noerpel97]:

- Cálculo de la potencia recibida (RSSI). Contiene el efecto de posibles interferencias co-canal y del ruido térmico. Sus márgenes de variación pueden ser elevados, del orden de 80-100 dB.
- Cálculo de la relación entre potencia útil e interferencia más ruido (SIRN). La estimación del valor puede resultar más o menos compleja en función de la tecnología utilizada [Lee89]. En sistemas digitales un posible método de estimación consiste en la obtención del denominado 'eye opening' que mide la dispersión entorno al valor teórico de los símbolos en recepción. No obstante, la estimación así efectuada incluye también el efecto de la dispersión temporal del canal. Los márgenes de variación son del orden de 5-25 dB, bastante más reducidos que en la estimación de RSSI.
- Indicadores de calidad. Dentro de esta categoría se incluiría la estimación de la probabilidad de error en el bit (BER), así como las diferentes estimaciones de probabilidad de error de tramas (FER) o determinadas palabras código utilizadas en la interfaz radio.

Los diferentes valores de las medidas están sujetos a las fluctuaciones características de los canales radio como resultado de la propagación multicamino. La decisión de realizar un *handover* tiene que estar basada en la atenuación por distancia y, excepcionalmente, puede contener cierta componente asociada al efecto de sombras (*shadowing*), pero no debería tener en cuenta los desvanecimientos rápidos. De esta forma resulta imprescindible la realización de promediados temporales que permitan estimar el valor de la media local ($5-40\lambda$) para evitar *handovers* innecesarios. Debido a la necesidad de realizar medidas de las estaciones de base vecinas, las medias locales deben obtenerse a partir de algoritmos de promediado de mediciones instantáneas de la potencia de la señal. Básicamente los algoritmos utilizados son del tipo ventana deslizante o con factor de olvido exponencial.

El dimensionado del intervalo de promediado es un punto crítico a tener en cuenta. Un intervalo demasiado largo, aunque podría mitigar considerablemente el efecto de los desvanecimientos rápidos, podría conducir a excesivos retardos en la decisión del instante de *handover*. En ciertos entornos, particularmente para *handovers* NLOS en microceldas, donde se producen cambios abruptos de potencia media resultaría inviable su utilización. Por otra parte, intervalos demasiado cortos implican una componente residual de fading importante en los parámetros promediados que conduciría a decisiones de *handover* innecesarias. El intervalo óptimo de promediado debería adaptarse por tanto en función de las condiciones de propagación del entorno considerado. Además, para un mismo entorno, la velocidad del móvil podría ser utilizada también como un parámetro de adaptación del intervalo de promediado. En [Holtzman95] plantean un mecanismo de estimación de la frecuencia doppler a partir de la varianza en las diferencias de las muestras obtenidas para el cálculo de la RSSI. Dicha estimación se utiliza posteriormente para adaptar el factor de olvido del algoritmo de promediado, de forma que para velocidades bajas el factor de olvido aumenta y viceversa.

Pero el terminal móvil, además de realizar medidas de calidad en su enlace, debe monitorizar las frecuencias o canales piloto de las celdas vecinas. La tecnología utilizada en el acceso radio condiciona el mecanismo de medidas en canales adyacentes. En los sistemas FDMA de primera generación, la realización de medidas en el móvil no puede llevarse a cabo porque el móvil permanece todo el tiempo sintonizado a su canal. En sistemas TDMA, el terminal móvil aprovecha los tiempos entre emisión y recepción y viceversa para conmutar a canales piloto de celdas adyacentes y realizar mediciones. En sistemas CDMA con transmisión continua se puede forzar la aparición de intervalos temporales dedicados a la realización de medidas de otras estaciones de base, modo de operación conocido como *slotted* CDMA. La reducción de capacidad debida a la introducción de los intervalos de medida se compensa mediante un aumento de la velocidad de transmisión.

2.6. Iniciación y Decisión del *handover*

2.6.1. Parámetros utilizados en los criterios de decisión

Centrándonos únicamente en aspectos derivados de las condiciones de propagación, los parámetros básicos a considerar en el diseño de un algoritmo de decisión de *handover* se encuentran entre las siguientes:

a) Estimaciones de canal y situación del móvil

- Valores de potencia recibida.
- Niveles de interferencia en los recursos disponibles.
- Parámetros de calidad como relaciones señal a interferencia (SIR) y tasas de error en el bit y/o trama (BER, FER).
- Estimación de la velocidad del terminal móvil.
- Distancia entre el móvil y la estación de base.

b) Parámetros de control del sistema

- Márgenes de histéresis y de penalización temporal.
- Valores umbrales de potencia, de calidad y de distancia.
- Contadores de tiempo.
- Máxima potencia de transmisión.

- Patrones para reconocimiento de situaciones con elevada probabilidad de requerir un traspaso.

Es importante destacar que los parámetros de control del sistema no tienen porqué ser constantes, sino que pueden depender a su vez del escenario de propagación considerado y de posibles configuraciones y niveles de celdas superpuestos (HCS, 'hot spot' escenarios), así como de cualquier otra particularidad que pueda establecer diferencias entre las prestaciones u objetivos de celdas vecinas.

2.6.2. Criterios de decisión

Los objetivos a la hora de diseñar un algoritmo de *handover* se plantean en términos de los parámetros descritos en el apartado 2.6.1. De forma general, dichos parámetros podrían agruparse bajo dos objetivos globales opuestos: el mantenimiento de una determinada calidad de servicio (probabilidad de bloqueo y de pérdida, retardo) y la reducción del número de *handovers* necesarios. El análisis del compromiso entre ambos no debe únicamente plantearse en términos de condiciones de propagación, sino que los mecanismos de gestión de recursos radio (asignación de canales, control de admisión, control de potencia) están fuertemente relacionados con la optimización del procedimiento de *handover*.

Existe un gran número de estudios en la literatura que analizan las prestaciones de algoritmos de *handover* basados en el cálculo del nivel de potencia recibido desde las estaciones de base (RSSI). En [Pollini96] se muestra la siguiente clasificación:

- Algoritmos basados en la comparación de niveles de potencia relativos. El terminal móvil siempre está conectado a través de la estación de base que recibe con menor atenuación. El retardo en la decisión del *handover* es reducido pero el número de *handovers* puede llegar a ser excesivo ya que muchos *handovers* se inician cuando el nivel de potencia de la estación vigente aún es aceptable. Además los tiempos de promediado utilizados deben ser elevados para no incrementar todavía más la tasa de *handovers* debido a las fluctuaciones de los desvanecimientos.
- Algoritmos basados en la comparación de niveles de potencia relativos con valor umbral. En este caso, la decisión de *handover* está supeditada a la recepción de mejor potencia desde la estación de base candidata pero siempre que la potencia recibida desde la estación de base actual esté por debajo de un determinado valor umbral. La elección del valor umbral debe tener en cuenta el nivel de sensibilidad del sistema pero también es importante adaptarlo respecto al valor de potencia recibida en la intersección de las celdas. Un umbral demasiado elevado conduce a que las prestaciones vengan condicionadas simplemente por la comparación de potencias. En cambio, un valor umbral demasiado inferior al nivel de intersección conduce al denominado efecto 'cell dragging', es decir, el mantenimiento de conexiones con terminales bastante adentrados en la zona de cobertura de la estación de base vecina. Tal situación deriva en un incremento del nivel de

potencia interferente y en el consecuente deterioro de la calidad del sistema. La utilización de criterios basados únicamente en valores umbrales conllevaría la adecuación del valor umbral a la potencia en el punto de intersección. Por tanto, en un sistema celular, tendría que gestionarse un valor adaptativo para los diferentes puntos del perímetro de la zona de cobertura de una estación de base.

- Algoritmos basados en la comparación de niveles de potencia relativos con margen de histéresis. Para reducir el número de *handovers* debidos a las fluctuaciones de los desvanecimientos se recurre a la utilización de un margen de histéresis. De esta forma, la decisión de ejecutar un *handover* se inicia únicamente cuando el nivel de potencia de la celda vecina está por encima de la actual un valor superior al margen de histéresis. Valores de histéresis elevados reducen considerablemente el número de *handovers* innecesarios, también denominado efecto 'ping-pong', pero conlleva a un incremento del retardo en la decisión del *handover*. En [Vijayan93] plantean un estudio analítico basado en procesos de Poisson para caracterizar el compromiso entre el retardo y el número de *handovers* en función del margen de histéresis y del intervalo de promediado.
- Algoritmos basados en la comparación de niveles de potencia relativos con margen de histéresis y con valor umbral. En este caso la reducción del número de *handovers* innecesarios se basa en valores umbrales y márgenes de histéresis de forma conjunta. En [Zhang96] se extiende el estudio realizado para el criterio relativo con histéresis con la inclusión de valores umbrales de potencia. El valor umbral también puede plantearse en términos de la probabilidad de error radio (BER). En [Kumar94] se modela el efecto de la utilización del parámetro BER acotando el margen de error ligado a la propia estimación de probabilidades de error. Las conclusiones obtenidas son similares a las derivadas cuando se utiliza el valor de potencia.

El valor del margen de histéresis y valores umbrales óptimos dependen del entorno de aplicación [Senarath94]. En [Murase91] plantean un algoritmo conjunto para entornos macro y micro celulares basado en la decisión de *handover* con un criterio adaptado a dos situaciones opuestas: entornos macrocelulares y *handovers* NLOS típicos de entornos microcelulares. Así pues se considera simultáneamente la combinación de un margen de histéresis bajo con un tiempo de promediado elevado para macroceldas y la combinación de un margen de histéresis elevado con tiempos de promediado reducidos para detectar 'corner effects'. Otro mecanismo que permitiría abordar ambos tipos de escenarios de propagación consiste en la utilización de un único intervalo de promediado y margen de histéresis adaptado a *handovers* tipo LOS y la utilización del indicador de palabra errónea para poder detectar las situaciones de cambios bruscos de potencia [Noerpel97]. De esta forma se fijaría un contador de palabras erróneas que podría ser utilizado para iniciar un traspaso.

Otros estudios basados también en la utilización de los valores RSSI de las estaciones de base, abordan el problema del traspaso con planteamientos de *fuzzy logic*, redes neuronales y programación dinámica [Pollini96]. Concretamente, en el estudio [Kelly95] basado en técnicas de programación dinámica se desarrolla un modelo basado en la optimización de una función de coste que incluye el número de *handovers* y el número de situaciones en las que la potencia recibida por el terminal móvil se encontraría por debajo del límite de calidad. En el mismo trabajo se manifiesta la dificultad matemática de abordar la obtención de la solución óptima que pasaría por un conocimiento previo de la trayectoria. Por ello se formula una solución simplificada cuyas prestaciones resultan similares al mecanismo conjunto de histéresis y valor umbral descrito anteriormente. El problema del traspaso también se ha abordado mediante técnicas de reconocimiento de patrones [Wong98]. La idea fundamental consiste en considerar que, aún teniendo en cuenta la aleatoriedad del canal radio, es posible disponer de información más o menos estacionaria que permita prever la ocurrencia de traspasos en determinadas ubicaciones de la zona de cobertura. Tal como se representa en la Figura 2-4, si en un determinado instante de la comunicación puede predecirse con cierta probabilidad la necesidad de un *handover*, podría actuarse en consecuencia.

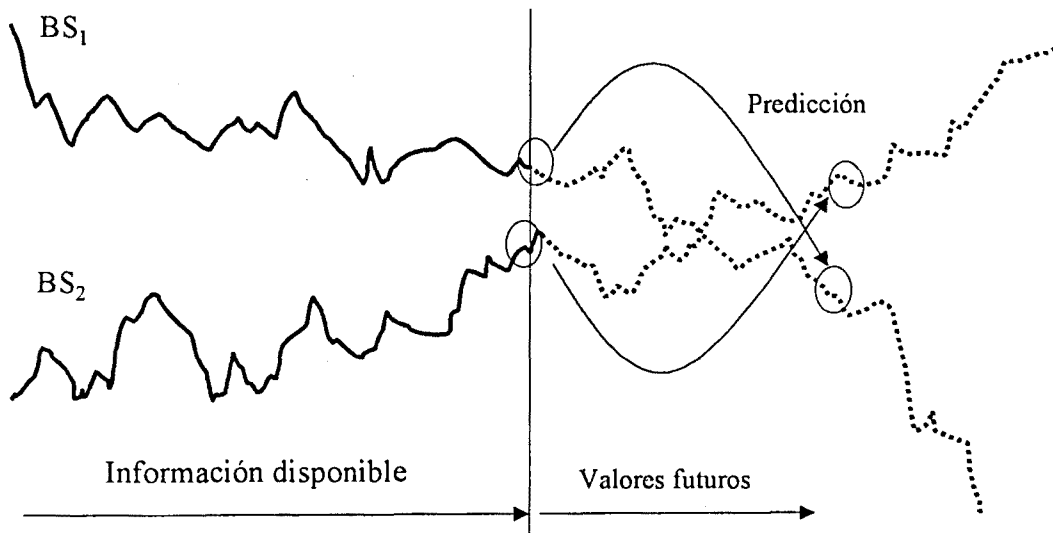


Figura 2-4. Predicción del comportamiento de los parámetros utilizados en la decisión del traspaso.

La inclusión de los parámetros de interferencia y SIRN en la decisión del *handover* puede mejorar notablemente las prestaciones de calidad del sistema. En sistemas con control de potencia, la optimización de la potencia transmitida para conseguir un cierto valor de SIR puede determinar la reducción del nivel global de interferencias y por tanto la reducción del número de conexiones bloqueadas o perdidas. En [Ostling94] se estudia la variación de las relaciones SIR en el enlace ascendente y descendente en un entorno microcelular con asignación estática de recursos. Los

resultados obtenidos muestran la disparidad en el comportamiento de ambas relaciones para una misma trayectoria y diferentes patrones de asignación de canales. Se comparan prestaciones de algoritmos de *handover* basados en SIR y en RSSI y se constata la necesidad de utilizar una combinación de todos ellos para conseguir unos márgenes óptimos de prestaciones. Un modelo basado únicamente en el nivel SIR del enlace descendente ha sido estudiado en [Chuah95]. El mecanismo de *handover* consistiría en este caso en mantener el enlace activo siempre que el valor de SIR supere un cierto umbral de disparo. Se concluye que el algoritmo reduce considerablemente el número de *handovers* necesarios pero a costa de incrementar el nivel de interferencia y aumentar el número de conexiones perdidas ya que el *handover* se realiza cuando el terminal móvil se ha adentrado considerablemente en la zona de cobertura adyacente.

Según sean las condiciones de interferencia, en ocasiones puede resultar mejor el mantenimiento de un enlace a una estación de base con atenuación ligeramente mayor pero que permita una potencia de transmisión menor para conseguir la misma calidad en términos de SIR. El algoritmo de SIR es comparado por los mismos autores en [Chuah95] con un mecanismo de optimización de potencia para realizar el *handover*. Las prestaciones del algoritmo aumentan en cuanto a reducción de interferencias y por tanto de la probabilidad de pérdida, pero el número de *handovers* se dispara. A efectos de reducir los *handovers* innecesarios, plantean la introducción de un contador que limita el tiempo de decisión entre dos *handovers* consecutivos. Los resultados obtenidos en cuanto a nivel de interferencia prácticamente se mantienen y se consigue una reducción considerable del número de *handovers*, aunque siempre por encima del criterio de SIR.

La inclusión de contadores de tiempo para gestionar la decisión del *handover* ha sido considerada en entornos mixtos de macro y microceldas. Para evitar la selección de microceldas como celdas candidatas en el caso de terminales móviles de elevada velocidad, se utiliza un contador de penalización que evita que una estación de base pase a formar parte de las celdas candidatas a menos que se haya monitorizado durante un periodo superior al contador, ya que se podrían dar situaciones en las que se decida un *handover* y cuando se proceda a su ejecución el terminal haya abandonado la zona de cobertura. En [Ramsdale92] plantean la problemática para el sistema GSM tanto en el caso de *handovers* como en el caso de procedimientos de (re-)selección de celda.

A modo de ejemplo, en el sistema GSM se utilizan cuatro criterios en la decisión de realizar un traspaso [GSM05.08]. Según el orden de prioridad, los criterios definidos son los siguientes:

1. Calidad de la conexión en el enlace ascendente y descendente (RXQUAL).
2. Nivel de potencia del enlace ascendente y descendente de la conexión en curso y nivel de potencia de los pilotos de las estaciones de base vecinas (RXLEV).

3. Distancia a la estación de base.
4. Balance de potencias entre la estación de base actual y las vecinas. Los márgenes de potencia así obtenidos se comparan teniendo en cuenta un margen de histéresis.

2.6.3. Protocolos de *handover*

Otro aspecto importante a destacar en la etapa de iniciación del *handover*, es la ubicación dentro del sistema del algoritmo de decisión. De esta forma se distingue entre: Network Controlled *Handover* (NCHO), Mobile Assisted *Handover* (MAHO) y Mobile Controlled *Handover* (MCHO) [Grimlund91]. Conforme el proceso de *handover* se va descentralizando, el tiempo necesario para la ejecución de un *handover* se reduce, pero también disminuye la información disponible para optimizar el criterio de decisión de la nueva estación de base [Tripathi98].

En el *handover* iniciado por el móvil (MCHO), la estación móvil es la responsable de llevar a cabo todo el control del procedimiento de *handover* (tomar medidas, procesarlas, implementar el algoritmo de decisión de *handover*, elegir la estación de base nueva,...). No obstante, a efectos de que la red pueda mantener cierto control sobre las tasas de *handover*, las decisiones tomadas en el móvil están supeditadas a una serie de parámetros de control que las estaciones de base pueden difundir. El grado de descentralización es máximo para el esquema MCHO de forma que el mecanismo resulta apropiado para entornos microcelulares con elevada densidad de tráfico en los nodos de conmutación. Así mismo, las decisiones de *handover* pueden ejecutarse de forma muy rápida. Por otro lado, el terminal móvil no conoce las condiciones de calidad soportadas por los restantes usuarios y debe basar la elección de la celda candidata en la estimación de los niveles de interferencia de los recursos disponibles. Además, la estación de base puede pasarle información de calidad del enlace ascendente en forma de medidas promediadas o bien transmitiendo en el enlace descendente el indicador WEI con el resultado de la demodulación. Los sistemas de telefonía inalámbrica DECT y PACS, ambos basados en MCHO, presentan retardos de *handover* del orden de 50 y 500 ms. [Noerpel97].

En un protocolo NCHO, las entidades funcionales encargadas de llevar a cabo el proceso de decisión están localizadas por completo en la red, incluyendo todos los mecanismos de monitorización de potencia y calidad de los enlaces activos. La información de ocupación de los recursos de las diferentes estaciones de base está centralizada en el nodo donde se va a llevar a cabo la gestión del *handover*, pudiéndose por tanto realizar una asignación más optimizada para la conexión a traspasar. Tal nivel de centralización incide en el retardo experimentado en el procedimiento de *handover*. Para que el controlador de *handover* pueda disponer de medidas de una misma conexión de las bases colindantes, cada estación de base debe transmitir al controlador los parámetros de calidad de sus enlaces activos, así como el de los enlaces ocupados en celdas vecinas que podrían ser candidatos al

traspaso. Esta situación conlleva una considerable carga de señalización que se puede mitigar parcialmente haciendo que las medidas de los enlaces de conexiones en celdas vecinas sólo sean reportadas bajo demanda y con menor frecuencia, penalizando por tanto el instante óptimo de decisión del *handover*. Valores del orden de magnitud del tiempo de interrupción del enlace son del orden de 100-200 ms y del retardo total del orden de 5-10 s [Tripathi98] [Grimlund91]. Este tipo de *handover* puede resultar apropiado para entornos macrocelulares pero inviable en entornos de tráfico denso y fluctuante como los microcelulares. El esquema NCHO es el adoptado en los sistemas analógicos AMPS, TACS y NMT y también en los sistemas inalámbricos CT-2 y CT-2 Plus.

El *handover* asistido por el móvil (MAHO) es una variante del *handover* controlado por la red en la que el terminal realiza medidas de calidad de su propio canal y de los pilotos de las estaciones vecinas y los transmite a la red para que sean considerados en el proceso de decisión. Con el esquema MAHO, utilizado en el sistema GSM, se mantiene el control del proceso por la red pero se consigue mayor descentralización y se reduce el tiempo de retardo del *handover* a tiempos del orden de 1 segundo [Grimlund91].

Dentro del proyecto europeo CoDiT [Codit95] se planteó una cuarta alternativa, denominada Mobile Evaluated *Handover* (MEHO), similar al esquema MCHO pero donde la decisión final reside en la parte fija. De esta forma se consigue un funcionamiento descentralizado, con la consiguiente reducción en los retardos de *handover*, pero con el control del sistema sobre aspectos tales como tasas de *handover* y gestión de situaciones de congestión de puntos de acceso.

2.7. Ejecución del *handover*

Una vez analizados los procedimientos de decisión del traspaso y los parámetros utilizados en dicha decisión, en esta sección se presentan algunos aspectos concernientes a la señalización y ejecución del traspaso.

2.7.1. Plano de señalización

Desde el punto de vista de señalización, deberá transferirse información de control entre el terminal móvil y el punto de la red que deberá controlar la ejecución del *handover*. Si la conexión se realiza a través de la estación de base antigua el proceso se denomina *backward handover*. En el caso de establecerse el enlace de señalización directamente con la estación de base nueva, se denota como *forward handover*. En *handovers* NCHO únicamente es aplicable el concepto de *backward handover* mientras que para mecanismos MCHO y MAHO se pueden tener ambas posibilidades.

En los procedimientos *backward*, en el caso de existir varias celdas candidatas, la asignación y reserva de los nuevos recursos puede llevarse a cabo de forma más optimizada ya que la información

disponible en la red sobre el estado de ocupación de recursos es mayor que en el móvil. En cambio, como la señalización se intercambia a través de la estación de base antigua, la probabilidad de pérdida del enlace aumenta en entornos donde pueden producirse bruscas fluctuaciones del nivel de potencia, especialmente en entornos microcelulares. Además, en los casos donde la petición de *handover* se realiza desde el móvil (MCHO), la probabilidad de perder el enlace podría acentuarse si se consumiera excesivo tiempo en efectuar la reserva de recursos y la posterior notificación de confirmación al terminal móvil. Si la petición de *handover* se ha efectuado desde la red (MAHO, NCHO) dicho intervalo se reduce al cambio de canal porque los recursos han sido reservados previamente.

Los mecanismos de *forward handover* son más robustos en cuanto a la probabilidad de pérdida de la conexión ya que se intenta acceder directamente a la nueva estación de base. Existe, no obstante, un tiempo necesario para establecer el nuevo enlace (sincronización, mecanismo de acceso) y, en caso satisfactorio, conmutar los recursos de red hacia el nuevo punto de acceso. Es importante destacar que los nuevos recursos no están disponibles hasta que la etapa de *handover* a nivel radio y a nivel de enlace de señalización se han completado a través de la nueva estación. En cambio, en el procedimiento *backward* los recursos se reservan previamente al acceso del terminal a través de la estación de base destino, independientemente de si el traspaso va a efectuarse con éxito o no, por lo que la carga de señalización en la red siempre será mayor que en el caso de un procedimiento *forward*. Para reducir el retardo de acceso a la nueva estación de base podría considerarse un mecanismo que difundiera información específica de la conexión en curso a todas las estaciones vecinas candidatas en aras a agilizar la ejecución del traspaso [Chia91].

La elección entre un mecanismo *backward* o *forward* depende básicamente de las condiciones del entorno de propagación. En [Chia91] se presenta una valoración de ambos en función del tipo de celdas involucradas en el *handover*. Concretamente, se considera el mecanismo de *forward handover* como preferible para micro-micro y micro-macro *handovers* argumentando a favor el rápido deterioro que puede producirse en el enlace de la estación de base vieja. El *backward handover* sería pues preferible en macro-macro y macro-micro *handovers* donde el deterioro del enlace viejo no es tan crítico.

La señalización necesaria en la parte fija de red depende de la arquitectura del sistema en cuestión y de la ubicación de las entidades funcionales involucradas en la gestión del *handover*. En la sección 2.10 se explica más detalladamente la señalización asociada al traspaso para diferentes arquitecturas y sistemas.

2.7.2. Plano de transmisión

Desde el punto de vista del plano de transmisión podríamos hacer la distinción entre los denominados *hard* y *soft handover*. En el caso de *hard handover* se produce una interrupción temporal en la transmisión mientras el terminal móvil conmuta desde el canal antiguo al nuevo. En cambio, en el *soft handover*, el canal nuevo se activa antes de la liberación del canal antiguo, de forma que durante un intervalo de tiempo se encuentran activos simultáneamente ambos canales. El mecanismo de *hard handover* es el utilizado en los sistemas celulares analógicos y en los basados en TDMA/FDMA digitales como el GSM y D-AMPS. Estos últimos pueden reducir considerablemente la duración de la interrupción temporal si las estaciones de base están sincronizadas o mediante el uso de procedimientos que permitan al terminal móvil el cálculo por adelantado de la corrección temporal a aplicar (denominada Time Advance) en la estación de base destino. El *soft handover* es propio de los sistemas basados en CDMA, donde la reutilización frecuencial en las bases vecinas permite la comunicación simultánea con dos o más puntos de acceso. En el capítulo 4 se presenta un estudio de las repercusiones derivadas de la utilización de traspasos *hard* o *soft* en un sistema CDMA, así como la posibilidad de combinar las señales recibidas o enviadas desde más de una estación de base, mecanismo conocido con el nombre de macrodiversidad.

2.8. Parámetros de evaluación de los mecanismos de *handover*

Para validar y comparar las prestaciones de diferentes esquemas de *handover* existen una serie de parámetros que se han utilizado ampliamente en la literatura a tal efecto. En [Pollini96] se citan algunos de ellos:

- Probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas.
- Probabilidad de bloqueo de una petición de traspaso.
- Probabilidad de requerirse un *handover*.
- Probabilidad de pérdida de una conexión en curso. Parámetro para caracterizar los traspasos fallidos que conducen a una pérdida de la conexión.
- Probabilidad de *handovers* innecesarios. Probabilidad de decidirse la ejecución de un *handover* cuando los parámetros de calidad del enlace son todavía aceptables.
- Tasa de generación de *handovers*.

- Retardo del *handover*. Estimación de la distancia o tiempo desde el punto donde se produce el *handover* hasta el punto dónde hubiera debido producirse según un criterio de optimización determinado.
- Duración de la interrupción. A diferencia del retardo del *handover*, este parámetro se refiere únicamente al intervalo de tiempo durante el cual el terminal móvil no dispone del enlace físico para mantener su transmisión.

Por tanto, el diseño del mecanismo de traspaso se realiza en aras a optimizar el máximo número de ellos.

2.9. *Handover* como funcionalidad de gestión de recursos radio

El mecanismo de traspaso está íntimamente relacionado con otras funciones utilizadas en los sistemas celulares para gestionar el uso de los recursos radio. La gestión de recursos radio, además de controlar el traspaso a nivel radio, se ocupa de funciones tales como: control de potencia, adaptabilidad del enlace (modulación, codificación, entrelazado), control de admisión y asignación de recursos. Por tanto, una gestión conjunta de todos ellos puede repercutir en una utilización más eficiente de los recursos radio. A continuación se exponen algunas de las interacciones a tener en cuenta entre el traspaso y el control de potencia, la asignación dinámica de canales y el control de admisión.

2.9.1. Control de potencia.

El control de la interferencia inherente a los sistemas celulares es uno de los factores clave en la determinación de las prestaciones ofrecidas por el sistema. El objetivo básico del control de potencia consiste en minimizar la potencia de los diferentes terminales activos bajo la restricción de mantener el criterio de calidad requerido en cada una de las conexiones. Aumentar el valor de la potencia transmitida en tales condiciones significa incrementar el nivel de interferencia en el sistema innecesariamente. Por otro lado, el traspaso pretende establecer las diferentes conexiones a través de las estaciones de base más apropiadas en cada caso. Por tanto, combinando ambas visiones, el objetivo global de ambos mecanismos podría orientarse a distribuir las conexiones entre las diferentes estaciones de base de forma que la potencia global sea mínima y cada una de las conexiones cumpla los requisitos de calidad impuestos. Por ejemplo, en el sistema GSM se apuntan una serie de consideraciones sobre la operativa conjunta del control de potencia y del algoritmo de decisión de traspaso. Una de ellas plantea que se intente evitar, en la medida de lo posible, que una decisión de ejecutar un traspaso por calidad o potencia vaya seguida de un comando de reducción de la potencia transmitida.

2.9.2. Asignación dinámica de canales.

Las técnicas de asignación dinámica de canales (DCA) permiten distribuir los recursos del sistema entre los diferentes puntos de acceso en función del grado de necesidad. De esta forma, a diferencia de las técnicas de asignación fija (FCA), el factor de re-uso va adaptándose dinámicamente a las condiciones de tráfico y de interferencia presentes en el sistema. En la sección 3.4.2 del Capítulo 3 se exponen más detalles sobre la asignación dinámica de canales. En este punto, nuestro interés se centra en destacar la importancia que puede tener la operación conjunta de los mecanismos de traspaso y asignación de canal. En el momento de establecerse una conexión, el terminal, o bien el sistema, elige un recurso con prestaciones adecuadas para cursar la comunicación. En caso de residir la decisión en el terminal, los criterios de elección pueden basarse en el nivel de interferencia presente en los diferentes recursos disponibles. En caso de realizarse la decisión en la red, los criterios pueden reflejar el estado de la ocupación de recursos. Dondequiera que se tome la decisión, conforme vayan cambiando las condiciones de interferencia en el sistema, los algoritmos necesarios en la iniciación y decisión de un traspaso podrían resultar convenientes para proceder a la realización de una nueva elección y asignación de canal. Por tanto, podríamos ver el traspaso como una funcionalidad adicional de la asignación de canales que intentara siempre disponer del recurso más apropiado.

Llegado este punto, y dado que el mantenimiento de una conexión en curso influye mucho más en el grado de servicio que el bloqueo de una nueva conexión, resulta interesante priorizar las peticiones de traspaso frente a nuevos accesos a la hora de asignar los recursos del sistema [Senarath95]. Existen multitud de estudios en la literatura dedicados a analizar las prestaciones de esquemas de traspaso con asignación de prioridades, reserva de recursos para el tráfico generado por los trasposos, sistemas de colas para la gestión de peticiones de traspaso, etc. Dichos esquemas no son exclusivos de los sistemas DCA sino que pueden aplicarse perfectamente a esquemas FCA. Incluso el hecho de incluir la reserva de recursos puede repercutir favorablemente en el grado de servicio global, reduciéndose el número de conexiones abortadas.

2.9.3. Control de admisión

El control de admisión debe gestionar la aceptación de nuevas conexiones en el sistema. La aceptación o bloqueo de una nueva conexión no debe basarse únicamente en el estado de tráfico e interferencia de la celda donde se ha originado la petición, sino que también resulta conveniente disponer de información sobre el estado de las celdas vecinas. El motivo radica en que las posibles variaciones en la distribución del tráfico y nivel de interferencia entre celdas debe poder ser compensada en la medida de lo posible por la capacidad residual no asignada. De esta forma, una solución idónea sería disponer de un algoritmo de gestión de admisión capaz de prever posibles variaciones de carga del sistema

debido al traspaso de conexiones. Dicha previsión podría realizarse mediante la monitorización de las variables de decisión que intervienen en el traspaso.

2.10. Arquitectura de red y *handover*

La problemática del traspaso no se centra únicamente en la gestión adecuada de los recursos radio, sino que el traspaso también debe abordar la reestructuración de los recursos utilizados en la parte fija de la red, proporcionando nuevas conexiones desde el punto de acceso radio hacia el terminal distante y liberando los recursos que ya no se utilicen. Por ello, el diseño del protocolo de *handover* depende de la arquitectura y de la gestión de transferencia de información y encaminamiento adoptados en la parte fija de red.

A modo de ejemplo, la Figura 2-5 muestra la estructura de una red GSM. GSM está basado en una red troncal de conmutación de circuitos donde los nodos MSC (Mobile Switching Center) centralizan las funcionalidades de establecimiento y liberación de los circuitos. Los nodos BSC (Base Station Controller) se encargan de la gestión de recursos radio de forma que la MSC pueda establecer de forma *transparente* una conexión dedicada hacia el terminal móvil. Las BTS (Base Transceiver Station) actúan básicamente de transductores radio y son comandadas por los controladores BSC. Los nodos HLR (Home Location Register) y VLR (Visitor Location Register) son los encargados de gestionar la movilidad global del sistema [Mouly92].

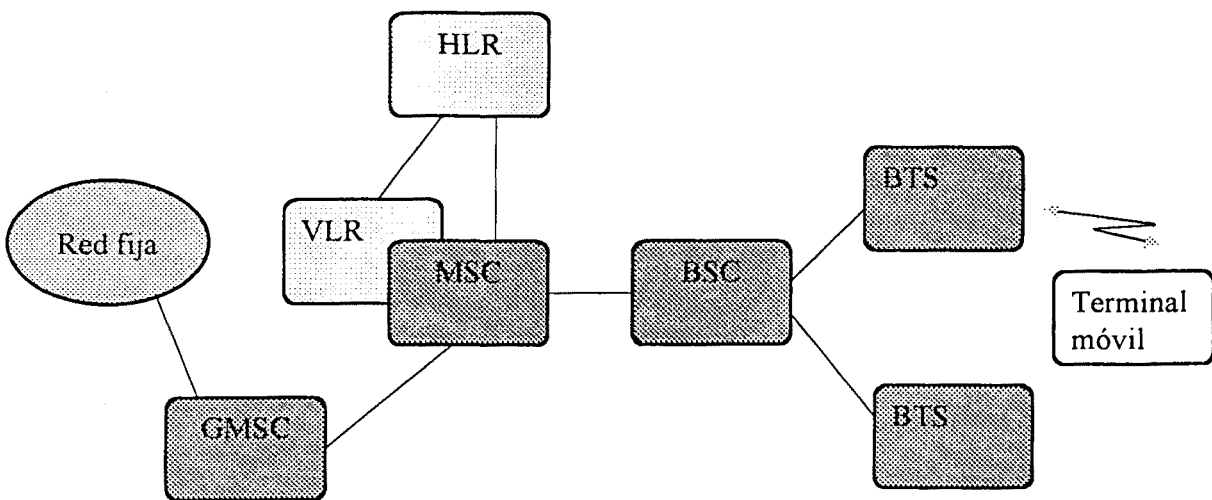


Figura 2-5. Elementos principales de una red GSM.

El procedimiento de *handover* debe tener en cuenta la ubicación del móvil para el encaminamiento de la señalización y el establecimiento del nuevo enlace a través de los diferentes módulos que van a verse implicados en la ejecución del *handover*. En GSM, en función de la estructura jerárquica de la que dependen las dos estaciones de base involucradas, podemos distinguir entre: *handover* intra-BSC

(BTSs dependientes del mismo controlador de estaciones), *handover* inter-BSC o intra-MS (BTSs dependientes del mismo MSC) y *handover* inter-MS (BTSs dependientes de diferentes conmutadores, por lo que se hace necesario un encaminamiento de la información entre ambas centrales). Los traspasos entre nodos de conmutación diferentes se presenta como el más complejo de todos los casos posibles. En la literatura se han propuesto varios esquemas para abordar dicho tipo de traspasos, comúnmente denominados traspasos globales o *inter-LE* (Local Exchange) en sistemas *wireless* ATM. Siguiendo la nomenclatura del proyecto europeo RAINBOW [Faggion97], en la Figura 2-6 se representan varias alternativas en la realización de un traspaso entre nodos de conmutación (LE). Mediante las siglas RAS (Radio Access Network) se representa el subsistema de acceso radio, independiente de la red troncal, que permite establecer conexiones dedicadas hacia el terminal móvil enmascarando la gestión de los recursos radio.

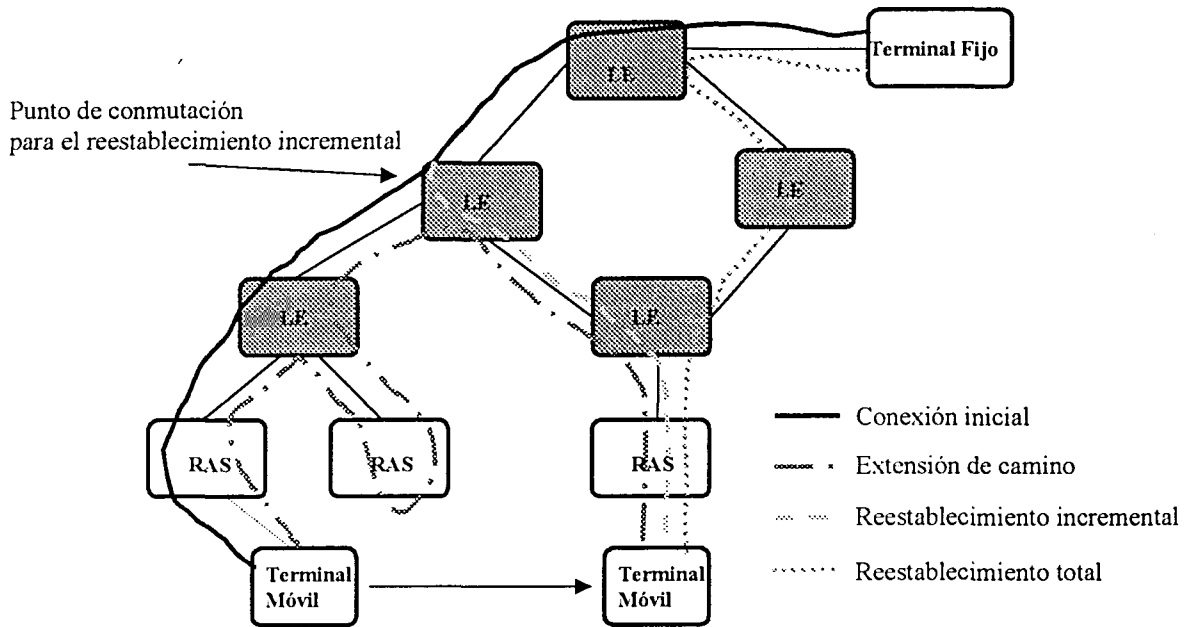


Figura 2-6. Diferentes posibilidades de re-establecimiento de los circuitos dedicados en un proceso de traspaso.

Los mecanismos de establecimiento del nuevo camino, véase Figura 2-6, pueden clasificarse en las siguientes categorías [Ajmone96]:

- **Restablecimiento global.** Se establece una nueva conexión desde el terminal móvil hacia el terminal fijo a través del nuevo punto de acceso. La duración del traspaso puede ser excesivamente larga ya que debe recurrirse a la señalización de control de las conexiones (CC) como si de una nueva conexión se tratara.
- **Extensión de camino.** Para agilizar la ejecución del traspaso se procede a establecer un circuito dedicado entre la red de acceso antigua y la nueva red de acceso. Las limitaciones más evidentes

son el excesivo uso de recursos innecesarios y la posibilidad de formarse bucles en caso de que el terminal móvil regrese a la celda donde inició la conexión.

- **Reestablecimiento incremental o parcial.** En este caso, se establece una nueva conexión únicamente hasta uno de los conmutadores involucrados en la conexión antigua, de forma que los circuitos establecidos entre dicho conmutador y el terminal fijo pueden mantenerse invariantes. Con ello, las prestaciones conseguidas pueden situarse entre los dos casos mencionados anteriormente: la nueva ruta es más óptima que en el caso de extender simplemente la conexión y el retardo es menor del necesario para establecer una nueva conexión completa, aunque realmente dicho retardo dependerá de los mecanismos encargados de identificar el conmutador idóneo.
- **Establecimiento Multicast.** Aunque no se encuentra representado en la Figura 2-6, la idea del establecimiento multicast consiste en reservar múltiples recursos durante el establecimiento inicial de la conexión en todos los nodos de acceso colindantes donde 'previsiblemente' el móvil pueda realizar un traspaso. De esta forma, la conmutación puede ser muy rápida y no existen problemas de falta de recursos para seguir con la conexión. En cambio, la capacidad de la red puede verse afectada considerablemente debido al excesivo consumo de recursos en reservas. La idea de multicast se discute con más detalle en [Acampora94] bajo el concepto de *Virtual Tree*.

El traspaso implementado entre conmutadores en los sistemas de segunda generación GSM, IS-54/136 y IS-95 se basan en un concepto similar al descrito como reestablecimiento incremental o parcial. Dentro de las variantes que existen para determinar el conmutador que va a actuar de puente (COS, *cross-over point*) entre el camino establecido y el nuevo camino, existe la posibilidad de mantener el conmutador inicial, donde se estableció la conexión, como punto de anclaje. Esta variante se conoce como '*Anchored-point approach*'. De esta forma, el conmutador inicial recibe el nombre de *Anchor MSC* y es el encargado de mantener el control de la conexión durante toda su duración. Los conmutadores adicionales utilizados para realizar el encaminamiento de dicha conexión debido a la realización de trasposos se conocen como *relay MSCs*.

Respecto al plano de control del mecanismo de traspaso, la solución adoptada en GSM, D-AMPS y IS-95 consiste en incluir la gestión del mismo dentro de la funcionalidad asociada a los nodos MSC. De esta forma, los conmutadores 'hablan' entre ellos y con las bases de datos VLR y HLR según el protocolo MAP (Mobile Application Part), o bien ANSI-41 en el caso de los sistemas americanos. Otra planteamiento diferente ha sido adoptado en el proyecto RAINBOW [Faggion97]. En este caso, tanto la gestión de movilidad como el control de las llamadas se realiza mediante la incorporación de elementos de redes inteligentes (IN). La filosofía básica de dicha solución consiste en restringir la funcionalidad de los conmutadores únicamente a la gestión de servicios portadores y ubicar toda la inteligencia del sistema en nodos independientes denominados SCP (Service Control Point). Los

nodos SCP están conectados a los conmutadores LE mediante una interfaz IN mejorada basada en INAP (IN Application Part).

2.11. Handover en sistemas de transmisión por paquetes.

La mayoría de estudios referentes a la problemática del traspaso en redes celulares suponen una filosofía de operación basada en conmutación de circuitos. De hecho, todas las consideraciones abordadas en las anteriores secciones del presente capítulo están enmarcadas en dicha línea. La previsible adopción de técnicas de transmisión en modo paquete dentro de los futuros sistemas celulares conduce a la necesidad de diseñar algoritmos de traspaso adaptados al nuevo marco de operación.

De entrada, los parámetros de evaluación de un procedimiento de traspaso apuntados en la sección 2.8 están enfocados prácticamente a la caracterización de servicios soportados por técnicas de conmutación de circuitos. Si la transmisión de la información de los usuarios se realiza mediante técnicas de transmisión de paquetes, tanto en la parte de red fija como en la interfaz radio, nos encontramos otros parámetros que podrían ser considerados en el análisis de las prestaciones de un protocolo de *handover*. Entre ellos podemos mencionar:

- Retardo y tasa de pérdida de paquetes
- Duplicado de paquetes.
- Cambios en el orden de la secuencia de paquetes.

Tales problemas pueden ser tratados en la capa de transporte con procedimientos extremo a extremo pero el funcionamiento de tales protocolos se degrada notoriamente en entornos de movilidad. Dicha degradación es debida a que los protocolos extremo a extremo, como por ejemplo TCP, están diseñados y dimensionados para actuar bajo condiciones de congestión de red y no teniendo en cuenta aspectos derivados de la movilidad de los usuarios. En [Caceres95] se propone un esquema de movilidad basado en TCP/IP para aumentar el caudal eficaz en situaciones de *handover*. Tampoco los actuales protocolos de nivel de enlace están diseñados para evitar tales problemas. Por todo ello es necesario analizar y diseñar el protocolo de *handover* teniendo en cuenta aspectos típicos de la capa de enlace [Cohen96]. En [Ayanoglu95] se plantea un protocolo de *handover* con una capa de enlace distribuida que evita la pérdida de paquetes y mantiene el orden de secuencia. También es interesante tener en cuenta la asimetría de carga computacional a la hora de establecer protocolos de línea de forma que la mayor complejidad resida en las estaciones de base.

En el capítulo 5 se presenta una descripción de una posible arquitectura de red para los próximos sistemas de tercera generación y en el capítulo 6 se abordan algunos de los aspectos referentes a la gestión de movilidad que deben considerarse en sistemas de transmisión por paquetes.

2.12. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una visión global de aspectos relacionados con el mecanismo de traspaso en sistemas celulares. Con ello se pretende constatar la importancia del mecanismo de traspaso y la gran cantidad de variables y condicionantes que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar una solución de traspaso apropiada.

El protocolo de traspaso está englobado dentro de las funciones de gestión de los recursos radio, y por tanto, entre sus objetivos podemos destacar la gestión eficiente de los mismos. Por otro lado, el traspaso también debe participar en la gestión de los recursos utilizados en la parte fija de la red, proporcionando nuevas conexiones desde el punto de acceso radio hacia el terminal distante y liberando los recursos que ya no se utilicen.

La mayoría de estudios sobre esquemas de traspaso en la literatura están enfocados a sistemas de conmutación de circuitos. La progresiva adopción de técnicas de transmisión por paquetes, tanto en la interfaz radio como en la red fija, plantean la necesidad de abordar la problemática del traspaso bajo el marco de operación fijado por los esquemas de transmisión en modo paquete.

Finalmente cabe destacar que existen muchos otros aspectos, no menos importantes, relacionados con el mecanismo de traspaso que no se han abordado en el presente capítulo. Entre ellos, podríamos apuntar la problemática en torno a los mecanismos de seguridad, autenticación y comprobación de los datos de un usuario. Es importante que los procedimientos utilizados a tal efecto no introduzcan retardos apreciables en la conexión en curso (debido a la búsqueda de parámetros en bases de datos, transferencia de perfiles de usuario, etc.). Por otro lado, el mecanismo de traspaso debe diseñarse con la flexibilidad suficiente para incluir posibles condicionantes derivados de las características del tráfico cursado en el sistema (teletráfico). Otro aspecto interesante podría ser el análisis de las repercusiones del traspaso en la provisión de servicios personalizados y de valor añadido (IN, CAMEL) entre redes diferentes.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3. ACCESO MÚLTIPLE PARA TRANSMISIÓN EN MODO PAQUETE

3.1. Introducción

Uno de los aspectos que ha sido principal objeto de investigación en los últimos años es el diseño de un esquema de acceso radio capaz de multiplexar de forma eficiente los diferentes servicios. La tecnología TDMA, avalada por su aplicación en los sistemas celulares de segunda generación, compite con esquemas CDMA, actualmente mejor situados en cuanto a expectativas de poder cumplir los requisitos de los futuros sistemas móviles, y con toda una serie de variantes e híbridos de ambos. Sin embargo, un punto de común acuerdo parece ser la adopción de esquemas de transmisión de paquetes frente a los esquemas de conmutación de circuitos incluso, conforme los sistemas vayan incorporando nuevas prestaciones, para la transmisión de tráfico en tiempo real. La transmisión por paquetes flexibiliza la compartición de recursos y permite conseguir mayores eficiencias espectrales al aprovechar la multiplexación estadística de las fuentes. Sin embargo, son muchos los problemas a tener en cuenta a la hora de diseñar un protocolo de acceso por paquetes ya que deben garantizarse para las diferentes comunicaciones en curso las prestaciones de calidad QoS acordadas durante la fase de establecimiento de la conexión.

En este capítulo se exponen las características básicas de las técnicas y protocolos de acceso múltiple, para posteriormente, proceder al análisis de diferentes esquemas de transmisión de paquetes en dos plataformas de referencia, una ilustrativa de un acceso basado en TDMA y otra basada en CDMA. Respecto al acceso TDMA, se ha estudiado la aplicación del protocolo PRMA++ para servicios de voz y datos en la plataforma de acceso radio especificada en el proyecto europeo FRAMES y conocida como FMA1. En el caso de CDMA, la plataforma abordada corresponde a la propuesta europea WCDMA para IMT-2000. En este caso se ha analizado el compromiso existente entre los diferentes modos de transmisión propuestos para servicios de datos de baja velocidad.

3.2. Técnicas de acceso múltiple.

La finalidad básica de las técnicas y protocolos de acceso múltiple consiste en permitir el uso compartido del canal radio por varios terminales móviles de forma simultánea. La separación entre la información contenida en diferentes transmisiones se consigue mediante la introducción de principios

de ortogonalidad. En este sentido, las tecnologías utilizadas en la actualidad, y que constituyen la base de los esquemas de acceso planteados dentro de la tercera y cuarta generación de sistemas móviles, se centran en torno a tres principios fundamentales:

- **División en frecuencia.** Transmisiones efectuadas simultáneamente en márgenes frecuenciales diferentes pueden ser recuperadas de forma independiente. Las técnicas de acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA) asignan a cada usuario una portadora diferente.
- **División en tiempo.** La ortogonalidad entre transmisiones se consigue mediante la separación en tiempo. Los terminales pueden hacer uso de la misma banda frecuencial pero en intervalos de tiempo disjuntos, evitándose el solapamiento temporal de las señales involucradas. Las técnicas por división en tiempo (TDMA) se basan en la organización temporal de transmisiones independientes y discontinuas.
- **División en código.** La separabilidad se consigue mediante la introducción de una componente adicional al dominio tiempo-frecuencia. Esta nueva componente se basa en la modificación de la señal transmitida en función de un código o secuencia. En una recepción simultánea con solapamiento temporal y frecuencial, las características de diseño del código posibilitan la distinción de la información asociada a cada uno de los diferentes códigos. Las técnicas por división en código (CDMA) permiten por tanto el solapamiento temporal y frecuencial de transmisiones independientes.

En la práctica, las soluciones adoptadas suelen ser una combinación de los tres principios básicos. Particularmente, los esquemas de acceso W-CDMA y TD-CDMA propuestos para la tercera generación, aunque normalmente no se menciona, contienen una componente FDMA en tanto se procede a la definición de canalizaciones frecuenciales, y la propia técnica TD-CDMA es un híbrido entre TDMA y CDMA. La técnica de acceso múltiple adoptada conduce a la definición de los recursos que constituirán las unidades básicas de asignación. De forma general, un recurso básico puede asociarse a un conjunto del tipo {frecuencia, slot, código}.

Mientras FDMA es la única técnica desarrollada dentro de los sistemas celulares de primera generación, esquemas híbridos entre FDMA, TDMA y CDMA son los utilizados en los sistemas digitales de segunda generación y dentro del proceso de estandarización de los futuros esquemas. FDMA/TDMA es la tecnología adoptada en los sistemas celulares GSM, IS-54/IS-136 y PDC, así como en los terminales inalámbricos DECT, PACS y PHS. CDMA únicamente se utiliza en el sistema celular IS-95 y en la mayoría de soluciones *wireless* LAN. A pesar de la mayor implantación de sistemas basados en TDMA, la mayoría de las propuestas para IMT-2000 están basadas en soluciones CDMA (Véase capítulo 1). La elección de la metodología de acceso múltiple no escapa al habitual

compromiso existente entre prestaciones y complejidad de diseño. En este caso, las prestaciones suelen medirse en función del número de usuarios soportados por Hz, o más concretamente, dentro de un sistema celular multiservicio, mediante el flujo de información por unidad de frecuencia y por estación de base, normalmente expresado en términos de kbits/s/Mhz/Celda. Además de la capacidad de información que puede soportar el sistema, también debe tomarse en consideración el rango de cobertura de las celdas en función de la tecnología de acceso múltiple adoptada, así como la traducción del factor Kbits/s/Mhz/Celda a Kbits/s/MHz/Km² en aras a incluir posibles aspectos de implantación del sistema en un entorno determinado.

En condiciones de propagación ideales y presencia de ruido Gaussiano, las tres técnicas FDMA/TDMA/CDMA, así como soluciones mixtas, presentan las mismas prestaciones de capacidad [Baier94]. Sin embargo, la variabilidad y dispersividad del canal radio tanto en tiempo como en frecuencia, conducen a diferentes resultados que pueden abogar por diferencias de capacidad superiores a un orden de magnitud. Existen multitud de estudios en la literatura dedicados a comparar las prestaciones de diferentes esquemas de acceso [Baier96, Jung93], principalmente entre las opciones TDMA y CDMA. Sin embargo, los resultados presentados dependen en gran medida de los criterios y condiciones de operación considerados en el análisis comparativo y por tanto, las conclusiones pueden decantarse por una de las dos técnicas en función del entorno y servicio analizados.

Dentro del programa europeo RACE II, se llevaron a cabo dos proyectos, dentro de la línea de investigación sobre comunicaciones móviles personales, dedicados a desarrollar sendas plataformas de acceso basadas en CDMA y TDMA dentro del concepto UMTS: R2020 CODIT [Andermo95] y R02084 ATDMA [Urie95]. Entre los objetivos del proyecto CODIT (UMTS Code Division Testbed) se planteó el desarrollo de un esquema CDMA mixto que tuviera entre sus principales características la flexibilidad respecto a la implementación de diferentes servicios, velocidades de transmisión variable y servicios de paquetes, planificación frecuencial y gestión de recursos radio, entre otros. Por otro lado, el proyecto ATDMA (Advanced TDMA) pretendía potenciar un esquema de acceso TDMA con los mismos objetivos de flexibilidad planteados en CODIT: esquema radio adaptativo, entornos de aplicación múltiples, utilización de técnicas de asignación dinámica de canales (DCA), entre otros. En [Barberis97] se expone un estudio comparativo entre ambos sistemas para diferentes tipos de tráfico (voz, datos 9.6kbits/s, datos 64 kbits/s, mixto) y escenarios de aplicación (macro, micro, indoor). El trabajo concluye diciendo que ningún acceso es mejor que el otro en todos los aspectos analizados y aporta algunas consideraciones sobre los aspectos que conducen a las diferencias observadas entre ellos.

Otro proyecto destacado dentro del programa marco europeo ACTS, posterior a RACE II, es el proyecto AC090 FRAMES [Nikula98]. El objetivo principal del proyecto consistía en estudiar las

diferentes tecnologías de acceso y definir un esquema viable para UMTS. El resultado fue la elaboración de dos modos de acceso:

- FMA1 (FRAMES Mode Access 1): sistema TDMA de banda ancha con o sin ensanchado temporal.
- FMA2 (FRAMES Mode Access 2): acceso CDMA de banda ancha.

FMA2 ha servido como base en la elaboración del esquema WCDMA para FDD en UTRAN, mientras que FMA1 con ensanchado frecuencial ha sido la base del esquema TD-CDMA para TDD en UTRAN, ambos accesos adoptados en ETSI para principios de 1998.

3.3. Protocolos de acceso múltiple

Los protocolos de acceso múltiple son los encargados de gestionar la utilización de los recursos derivados de la técnica de acceso implementada. El protocolo de acceso, estrechamente ligado a la técnica de acceso hasta tal punto que la distinción entre ambos conceptos resulta a veces un poco difusa, debe establecer los criterios y la operativa de utilización de los recursos compartidos, en aras a permitir la realización de múltiples conexiones *simultáneas* de diferentes usuarios sobre el mismo medio. Las prestaciones del protocolo pueden medirse básicamente en términos de:

- Flexibilidad, entendida como la habilidad de integración de servicios con características dispares (voz, vídeo, datos).
- Calidad, en el sentido que debe garantizarse unas cotas y márgenes de operación en cuanto a retardos y tasas de pérdida establecidas de antemano.
- Capacidad, la utilización del ancho de banda debe ser lo más eficiente posible ya que, particularmente en comunicaciones radio, el rango de frecuencias disponible es un recurso limitado.

En la Figura 3-1 se ilustra la problemática planteada. Centrándonos en un acceso centralizado hacia/desde las estaciones de base, el protocolo de acceso múltiple debe cursar la información contenida en lo que podríamos plantear como un sistema de colas distribuidas entre los terminales móviles y la estación de base o punto de acceso. El objetivo primordial consiste en permitir el máximo número de usuarios bajo las restricciones impuestas por el cumplimiento de una calidad de servicio (QoS) en las conexiones soportadas. La solución a dicho problema pasa por gestionar eficientemente la política de transmisión, teniendo en cuenta las diferentes restricciones de servicio. Desde dicho punto de vista, el compromiso de diseño reside en la cantidad de recursos necesarios para organizar la política de transmisión frente a la capacidad efectiva obtenida para cursar el tráfico de información.

Además, la solución adoptada puede estar sujeta a restricciones adicionales como puede ser la complejidad del equipo, capacidad de procesamiento y consumo de energía en los terminales móviles.

Durante los últimos años se han propuesto multitud de protocolos de acceso múltiple para sistemas de comunicaciones móviles, desde simples esquemas de asignación estática de recursos hasta esquemas basados en gestión de colas distribuidas y asignación de recursos bajo demanda (DQRUMA, Distributed-Queuing Request Update Multiple Access) [Karol95], pasando por accesos totalmente aleatorios del tipo ALOHA. Todos los protocolos tienen sus puntos fuertes y sus puntos débiles, de forma que no existe un acceso único que ofrezca las mejores prestaciones en cualquier tipo de entorno y para cualquier tipo de tráfico.

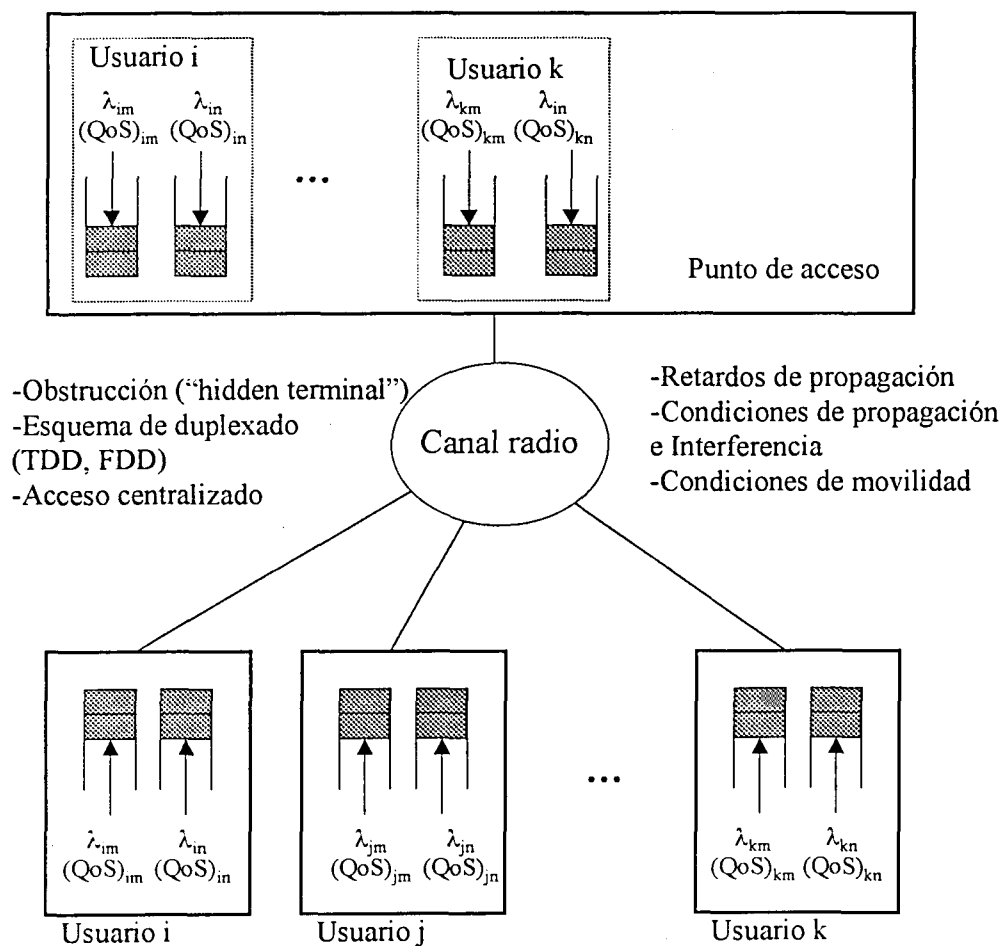


Figura 3-1. Ilustración de la problemática planteada en un esquema de acceso múltiple en un sistema de comunicaciones móviles.

Existen diferentes aspectos que pueden ayudar a catalogar los protocolos de acceso múltiple para sistemas de comunicaciones móviles [Sallent97]. El primero de ellos podría ser la asignación de recursos de forma fija durante el transcurso completo de una conexión, o bien la asignación dinámica de recursos en función de las necesidades puntuales de transmisión, es decir, la asignación de recursos

en base a la aparición de ráfagas de información dentro de una conexión. Dentro de los protocolos de asignación fija podríamos ubicar los esquemas de acceso adoptados actualmente en las redes celulares de segunda generación (GSM, D-AMPS, IS-95, PDC) y en los sistemas inalámbricos (DECT, PACS, PHS), donde la asignación de recursos se realiza en modo circuito. Dentro del marco de la asignación dinámica podemos ubicar la mayoría de protocolos presentados para esquemas de transmisión en modo paquete. Ejemplos de esquemas de asignación dinámica son los protocolos: PRMA++ (Packet Reservation Multiple Access) analizado en la sección 3.4, DSMA/CD (Digital Sense Multiple Access/Collision Detection) utilizado en CDPD [Sreetharan96], CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) utilizado en IEEE 802.11 [Chhaya96], y slotted-ALOHA, entre muchos otros.

Otro aspecto relevante del protocolo de acceso es la utilización de mecanismos con o sin contención. En el caso de esquemas sin contención deben arbitrarse los accesos por interrogación o mediante el establecimiento de prioridades o turnos de transmisión. En cambio, los esquemas con contención son susceptibles a la aparición de colisiones durante la transmisión. Por ello, a efectos de minimizar el impacto de las colisiones, los mecanismos con contención se complementan con técnicas de resolución de colisiones y estabilización. Dentro de los esquemas con contención nos encontramos con las técnicas ALOHA, CSMA/CA y esquemas del tipo ISMA (Inhibit Sense Multiple Access) [Prasad96] y DSMA/CD en caso de accesos centralizados. Dentro de los sistemas sin colisión podemos ubicar los mecanismos de asignación fija y los esquemas basados en la reserva de recursos bajo demanda como el PRMA++. Aunque estos últimos esquemas se entiendan como libres de colisión, el mecanismo de petición de recursos puede estar sujeto a la aparición de colisiones, por lo que realmente se puede identificar dos partes claramente diferenciadas en la operación del protocolo: petición de recursos mediante un esquema con resolución de colisiones y transmisión por reserva libre de colisiones. La parte de acceso aleatorio puede tener mayor o menor peso dentro de las prestaciones del esquema completo en función del número de veces que se recurra a ella. Por ejemplo, en el caso del establecimiento de un circuito GSM, la parte de acceso consiste en la transmisión de la petición en el canal RACH (Random Access Channel) hasta la recepción de la confirmación correspondiente. En cambio, en el protocolo PRMA++, el acceso aleatorio se realiza en cada aparición de ráfagas de datos. Existe una modificación del protocolo PRMA++ para soportar simultáneamente tráfico de voz y datos denominado SIR (Service Integration Radio Access) [Anastasi96] que reduce los efectos del acceso aleatorio mediante la incorporación de técnicas de *polling* para el tráfico de datos.

3.4. Acceso por división en tiempo (TDMA)

3.4.1. Generalidades

En un sistema TDMA una portadora es compartida por varios usuarios. Cada usuario puede transmitir o recibir información en una o más ranuras temporales, denominadas slots, estructuradas según un

formato de trama determinado. El duplexado de la información puede también realizarse en la misma portadora (TDD) o bien disponer de una portadora para cada sentido de la transmisión (FDD).

La información contenida en las ráfagas transmitidas en un slot TDMA no puede dedicarse exclusivamente al transporte de información útil del servicio ofrecido, sino que se requiere un cierto *overhead* indispensable para el correcto funcionamiento del sistema. Particularmente, en TDMA resulta necesario disponer de un tiempo de guarda entre transmisiones de diferentes usuarios para mantener las condiciones de ortogonalidad frente a los retardos aparecidos en la propagación. El intervalo necesario depende del entorno de aplicación del sistema en cuestión (interiores, exteriores) y del uso de mecanismos adicionales que permitan adaptar el instante de transmisión en función del retardo de propagación existente entre el terminal y la estación de base (*Time Advance* en GSM). Además, dentro de la ráfaga es necesario incluir secuencias de bits predeterminadas que permitan realizar la estimación de la respuesta impulsional del canal y adquirir el sincronismo necesario para recuperar la información, entre otras funciones de control y adaptabilidad del formato de transporte. Por tanto, la eficiencia del acceso dependerá en gran parte del porcentaje de recursos radio destinados a la transmisión de información de control. Tiempos de slot elevados pueden reducir dicho porcentaje. No obstante, slots demasiado largos pueden repercutir en un aumento del retardo de transmisión y en un aumento del tiempo de respuesta del sistema frente a posibles cambios en las condiciones de propagación del sistema. A modo de ejemplo, el *overhead* en los sistemas GSM, PHS y DECT es del orden del 30%, mientras que en el sistema IS.54 y PDC se sitúa en torno al 20% [Falconer95].

La utilización de una estructura de multiplexado temporal disminuye la complejidad de esquemas multicanal en los transeptores de las estaciones de base. Además, en el terminal móvil, los tiempos de inactividad se aprovechan para realizar medidas de potencia de los canales de control de las celdas vecinas. Por otro lado, la transmisión discontinua deriva en mayores restricciones en el diseño de las etapas de potencia en la parte de RF, ya que el amplificador debe funcionar en modo pulsado y garantizar un margen de rizado bastante restrictivo durante el intervalo efectivo de transmisión.

Para combatir la dispersión temporal inherente a la propagación radio, en TDMA se recurre a técnicas de ecualización. La aparición de interferencia intersimbólica (ISI) se debe al solapamiento entre las señales correspondientes a símbolos adyacentes. Su importancia depende de la relación existente entre el tiempo de símbolo y la dispersión introducida por el canal, reflejada normalmente mediante el parámetro D_s (Delay Spread) correspondiente a la desviación típica de la distribución del retardo [Rábanos97]. Valores habituales del D_s son del orden de fracciones de μs hasta algunos pocos μs [Lee89]. El sistema GSM está diseñado para estimar respuestas del canal del orden de 18-20 μs , que traducido a tiempos de bits significa respuestas impulsionales del orden de 5 bits. La estimación de los coeficientes de los ecualizadores se realiza normalmente de forma adaptativa a partir de estimaciones realizadas en cada ráfaga transmitida. La variabilidad temporal del canal se combate en TDMA

mediante el uso de técnicas de entrelazado y codificación de canal [Proakis89]. La transmisión a ráfagas propia de TDMA facilita la aplicación de esquemas de entrelazado entre varios slots. Esquemas de diversidad espacial también son utilizados en TDMA para aumentar las prestaciones, normalmente en el enlace ascendente debido a las restricciones de separación entre las antenas receptoras.

La introducción de servicios de tasa variable puede afrontarse en TDMA mediante la asignación múltiple de slots. Otras posibilidades de ofrecer velocidades de transmisión diferentes se basan en la especificación de diferentes formatos de transmisión (modulación codificación, entrelazado). En ATDMA [Urie95] se planteó dicha posibilidad mediante la definición de un cierto número de modos de transmisión. De forma similar, en GPRS [Cai97] se han definido los modos CS-1 a CS-4 que permiten variar la capacidad de información útil contenida en un bloque de transmisión radio.

En una estructura celular, TDMA requiere una planificación frecuencial de las portadoras asignadas a cada estación de base, análogamente a un esquema FDMA. De esta forma, la interferencia cocanal se combate mediante la imposición de restricciones en las posibles frecuencias utilizables en cada celda. La asignación de canales puede hacerse de forma estática (FCA) o bien de forma dinámica (DCA). Las técnicas FCA se basan en la definición de un patrón de reuso de frecuencias (cluster) que proporcione, en condiciones desfavorables, valores de señal útil a interferencia CIR aceptables. Las técnicas DCA permiten la utilización de los recursos radio en las diferentes celdas del sistema en función de criterios de adaptabilidad de tráfico y niveles de interferencia. De esta forma, se intenta minimizar el desaprovechamiento de los recursos inherente a una distribución fija. En caso de utilizarse estrategias DCA basadas en condiciones de tráfico, se requiere una operación centralizada que permita conocer el estado de utilización de los recursos y disponga de mecanismos de asignación y liberación de los mismos a las estaciones de base del sistema celular. Estrategias de este tipo son las denominadas *channel borrowing* y *Markov allocation* [Steele95]. Por otro lado, la utilización de estrategias basadas en la estimación de la interferencia puede conducir a implementaciones descentralizadas donde el terminal móvil, o bien la estación de base, puede decidir la elección de los recursos radios sin la necesidad de requerirse señalización adicional con las celdas vecinas o con un controlador central. Los sistemas CT2 y DECT utilizan esquemas de asignación dinámica de canal basados en mediciones de interferencia en los canales efectuadas en los propios terminales.

El control de potencia de potencia no es estrictamente necesario en los sistemas TDMA. La razón estriba en que la interferencia cocanal se combate con la reutilización de frecuencias y por tanto, la relación SIR puede mantenerse dentro de ciertos márgenes garantizados en la planificación frecuencial. No obstante, la limitación de la potencia de transmisión a la mínima necesaria puede aumentar la calidad del sistema en tanto en cuanto conlleve una disminución del nivel de interferencia. Por otro lado, la utilización de técnicas DCA basadas en estimación de la interferencia, pueden

beneficiarse notoriamente de la utilización del control de potencia, aumentando por tanto la capacidad global del sistema [Whitehead93]. Otro aspecto importante derivado del uso del control de potencia es el posible incremento en la duración del tiempo de operación de las baterías en los terminales móviles.

Otra técnica utilizada en sistemas TDMA para mejorar las prestaciones del acceso es el salto en frecuencia (FH, Frequency Hopping). Los mecanismos de FH consisten en cambiar de frecuencia portadora repetidamente durante el transcurso de una conexión. El salto de frecuencias se realiza de acuerdo a una secuencia asignada por el sistema. Se distinguen dos modalidades de FH: slow FH, donde el cambio frecuencial se realiza cada tiempo de slot, y fast FH, donde el cambio se efectúa en intervalos del orden del tiempo de bit. El sistema GSM contempla la realización del FH lento. Las frecuencias utilizadas se encuentran entre aquellas permitidas en la celda activa, según la planificación frecuencial considerada. El efecto del FH se traduce en un promediado de la interferencia existente en los radiocanales utilizados en el sistema. De esta forma, el valor de C/I utilizado en la planificación frecuencial, y que suele fijarse en base a un criterio pesimista como puede ser su evaluación para terminales muy alejados de las estaciones de base, puede reducirse y derivar en un aumento de capacidad del sistema. Otro beneficio derivado de la utilización del FH es un aumento de la protección frente al efecto de los desvanecimientos selectivos presentes en el canal radio. Si la separación entre portadoras es superior al ancho de banda de coherencia del canal, el mecanismo de FH, junto con la utilización de entrelazado y codificación, puede mejorar las prestaciones del sistema.

Finalmente, un aspecto importante que debe posibilitar la técnica de acceso es la existencia de entornos jerárquicos (HCS). Tal como se ha visto en el capítulo 2, las configuraciones HCS se basan en proporcionar cobertura a una misma área de servicio mediante diferentes capas de celdas. Un ejemplo típico podría ser el solapamiento entre celdas correspondientes a un sistema celular terrestre y la cobertura asociada a un sistema por satélites. La restricción derivada del uso de TDMA en dichos entornos radica en la realización de una planificación frecuencial que distribuya canales ortogonales entre las diferentes capas de celdas.

3.4.2. Gestión del acceso múltiple en TDMA.

Los sistemas celulares e inalámbricos de segunda generación se basan en técnicas de conmutación de circuitos para gestionar la utilización de los recursos radio. Tal como hemos indicado en la sección 3.3, dichas técnicas son ineficientes cuando la actividad de la fuente de tráfico no justifica la dedicación en exclusiva de un recurso.

Dentro de los esquemas de asignación dinámica, los protocolos basados íntegramente en contención son poco viables en esquemas TDMA debido al bajo caudal que presentan. Esquemas del tipo ALOHA ranurado presentan eficiencias del 36%, valores bastante reducidos si pensamos en la escasez

de los recursos disponibles. No obstante, soluciones del tipo CSMA/CA o DSMA/CD pueden ser viables para sistemas de interiores o para ofrecer servicios de datos con restricciones de retardo relajadas, en contraposición a servicios en tiempo real como la telefonía. No obstante, dentro del entorno de sistemas celulares e inalámbricos, la gran mayoría de propuestas de protocolos de acceso se centran en esquemas de reserva de recursos bajo demanda, donde la petición de reserva puede realizarse mediante procedimientos de contención o bien mediante mecanismos libres de contención como la interrogación (polling) o mediante la señalización a través de los recursos previamente asignados.

En esta línea, PRMA++ es un protocolo relativamente sencillo que puede resultar viable para soportar tráfico de voz y de datos. A continuación se propone una posible implementación de una solución PRMA++ aplicada a la plataforma de transporte definida en FRAMES. Posteriormente, en las secciones 3.4.6 y 3.4.7 se estudian sus prestaciones para servicios de voz y datos respectivamente.

3.4.3. Plataforma FRAMES Modo 1

El modo FMA 1 definido en FRAMES está basado en un acceso wideband TDMA, permitiendo la posibilidad de utilizar técnicas de ensanchado. De esta forma, la ortogonalidad se consigue a partir de la asignación de slots diferentes pero también cabe la posibilidad de ubicar más de un usuario en un mismo slot temporal haciendo uso del ensanchado.

En la Tabla 3-1 se proporcionan las principales características del modo FMA1.

Tabla 3-1. Características de la plataforma FRAMES Mode 1.

FMA MODE 1	SIN ENSANCHADO FRECUENCIAL	ESPECTRO ENSANCHADO
Acceso múltiple	TDMA	TDMA/CDMA
Duplexado	FDD y TDD	
Separación portadoras	1.6 MHz	
Velocidad de portadora	2.6 Mbits/s-5.2 Mbits/s	2.167 Mchips/s
Estructura temporal	TDMA 16 ó 64 slots	TDMA 8 slots
Ensanchado frecuencial	-	Ortogonal, 16 chips/símbolo
Tiempo de trama	4.615 ms	

Tasa variable	Asignación de slots múltiple	Asignación múltiple de slots y códigos
Usuarios por trama	1-64	
Modulación de datos	BOQAM/QOQAM	QPSK/16-QAM
Modulación espectro ensanchado	-	GMSK linearizada
Pulso conformador	Coseno realzado (roll-off=0.35)	-
Codificación FEC	Códigos convolucionales con tasas de $r=1/4$ a 1	
Entrelazado	Inter-slot y inter-trama	

En la Figura 3-2 se representa el formato de trama para los dos modos de duplexado contemplados en FMA1. Se define tres slots básicos denominados 1/64, 1/16 y 1/8 en función del número de ellos que caben en una trama de 4.615 ms. La duración de la trama corresponde a la del sistema GSM a fin de armonizar al máximo ambos accesos. En el modo TDD, la separación entre el enlace ascendente y descendente puede adecuarse a las condiciones de carga experimentados, lo que permite soportar de manera natural la posible asimetría en el tráfico ofrecido en ambos enlaces. La utilización de técnicas de ensanchado se restringe a slots del tipo 1/8.

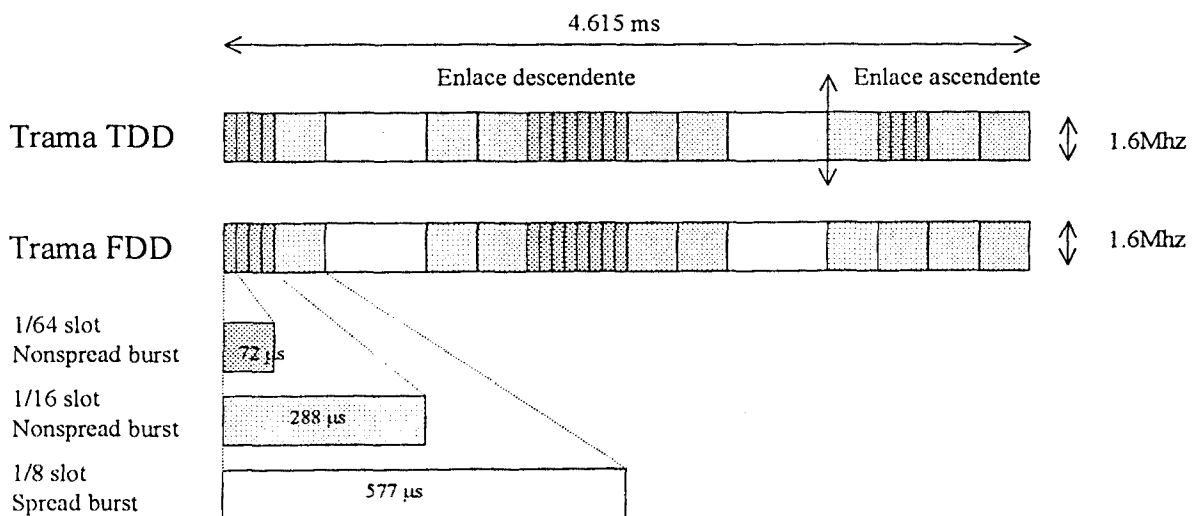


Figura 3-2. Estructura de tramas según el modo de duplexado en FMA 1.

En el estudio presentado en este capítulo únicamente vamos a considerar el modo sin ensanchado como plataforma de referencia de un sistema TDMA.

3.4.4. Protocolo PRMA++.

El protocolo PRMA++ (Packet Reservation Multiple Access) es uno de los múltiples esquemas de acceso que han sido propuestos para el sistema UMTS. Particularmente, PRMA++ ha sido el esquema planteado y diseñado dentro del proyecto europeo ATDMA (Advanced TDMA), proyecto desarrollado en el marco de proyectos RACE II. El objetivo básico de este proyecto consistió en la especificación de una plataforma de acceso radio TDMA capaz de cubrir los requisitos de acceso identificados dentro del sistema UMTS. Por ello, entre los puntos clave a tener en cuenta en el diseño del esquema de acceso se plantearon los siguientes aspectos:

- Habilidad del protocolo de acceso para soportar servicios de tasa constante y servicios de tasa variable simultáneamente.
- Capacidad de ofrecer un amplio margen de velocidades, permitiendo por tanto esquemas de asignación múltiple.
- Explotación de los tiempos de inactividad de las fuentes para aumentar la eficiencia en la ocupación de recursos del sistema y por tanto soportar un número mayor de usuarios simultáneos.

Ante tales premisas se abogó por un sistema de acceso múltiple basado en reserva de paquetes (packet reservation) para servicios de voz. La filosofía de dichos esquemas se basa en la asignación de recursos a nivel de ráfagas de tráfico, a diferencia de los esquemas utilizados en los sistemas de segunda generación donde la asignación de recursos se realiza a nivel de conexión o llamada. La primera versión de este tipo de esquema aplicable a sistemas de acceso radio con retardos de propagación reducidos (*round-trip delay*) fue propuesta por D.J. Goodman [Goodman89]. Dicha propuesta, conocida como PRMA, es una adaptación del esquema de acceso múltiple para enlaces por satélite denominado *Reservation ALOHA*. El protocolo PRMA organiza el tiempo de transmisión en tramas cuya duración corresponde a la periodicidad de las fuentes de información, consideradas habitualmente como fuentes de voz. A su vez, las tramas se dividen en ranuras temporales, denominadas slots, que son reservadas de forma dinámica por los terminales móviles. El mecanismo de reserva está basado en un acceso descentralizado a un slot libre que, en caso de ser aceptado, conlleva la asignación temporal en exclusiva de dicho slot al terminal que realizó el acceso. El slot se libera cuando el usuario vacía su cola de transmisión. La disponibilidad de los slots se difunde en el enlace descendente, así como información de control que permite conocer si una reserva se ha realizado satisfactoriamente. Aunque un porcentaje muy elevado de transmisiones se realizan en recursos asignados de forma exclusiva, el acceso inicial a un slot libre es un acceso con contención, por lo que PRMA contempla un mecanismo de retransmisión en caso de producirse colisiones.

PRMA++ difiere en varios aspectos del esquema PRMA. Concretamente, PRMA++ es una versión adaptada del esquema propuesto en [Mitrou90], conocido como ALOHA-reservation PRMA. La principal novedad del ALOHA-reservation PRMA respecto al protocolo PRMA [Goodman89] consiste en la separación entre los recursos destinados a transmisión de la información de usuario y los recursos utilizados bajo contención para efectuar reservas, para garantizar siempre una mínima capacidad a estos últimos. Particularmente, las características más relevantes del esquema ALOHA-reservation PRMA son las siguientes:

- En el enlace ascendente existen R-slots (Reservation slots) y I-slots (Information slots). Los R-Slots se utilizan para enviar peticiones de reserva de recursos y los I-slots se dedican exclusivamente al transporte de información de los terminales móviles. Los R-slots están divididos en miniranuras de forma que pueden realizarse múltiples accesos en un único R-slot. Además, el número de R-slots se supone variable en función de la carga soportada por el sistema.
- El enlace descendente está formado también por I-slots y además por A-slots (Acknowledge slots), estos últimos utilizados para notificar la asignación de recursos en el enlace ascendente. Los A-slots se distribuyen apareados con los R-slots del enlace ascendente. Una diferencia importante respecto al esquema PRMA [Goodman89] es que los terminales no tienen que estar escuchando continuamente el enlace descendente para conocer cuales son los I-slots disponibles en el enlace ascendente.
- Cuando un terminal dispone de información para transmitir, realiza una petición de recursos en los R-slots y espera la correspondiente respuesta en los A-slots. Dicha respuesta especifica el número y posición de los I-slots que podrán ser utilizados en exclusiva por el terminal.

Sobre dicha base, PRMA++ añade dos peculiaridades:

- En aras a simplificar la operación del sistema, el número de R-slots por trama se considera fijo y no se realiza su división en miniranuras.
- En el enlace descendente se añaden un nuevo tipo de slots denominados FP-slots (Fast Paging slots) dedicados a señalar el inicio de la transmisión de información destinada a un terminal en particular. La inclusión de los slots FP conlleva una ligera asimetría en la capacidad soportada en ambos enlaces.

En la Figura 3-3 se ilustra la estructura de trama definida en PRMA++. Además de la estructura de trama, PRMA++ define una estructura de multitrama para acomodar los canales de control y la gestión de las conexiones. Por tanto, una vez establecida la conexión, los terminales no disponen de recursos asignados de forma permanente sino que deben conseguirlos únicamente cuando dispongan de

información para transmitir. La demanda se realiza mediante el envío de una ráfaga de acceso en un R-slot con la siguiente información con un identificador asignado al terminal durante el establecimiento de la conexión, el tipo de servicio y el número de I-slots requerido. La ráfaga de acceso incluye un tiempo de guarda para compensar el efecto del retardo de propagación.

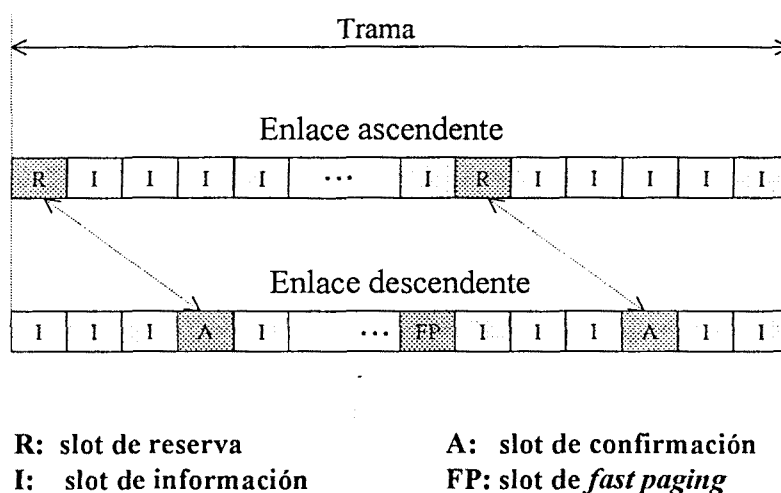


Figura 3-3. Estructura de trama en PRMA++.

La aplicación del protocolo PRMA++ no sólo es exclusiva de sistemas con duplexado en frecuencia sino que podría aplicarse en esquemas TDD concatenando en tiempo las estructuras para el enlace ascendente y descendente presentadas en la Figura 3-3. No obstante, una solución TDD implica tiempos de acceso más elevados y una pérdida adicional de recursos en la implementación de un tiempo de guarda entre ambas direcciones para compensar el retardo de propagación. Otra posibilidad de operación del PRMA++ en entornos multiportadora donde los canales de control podrían distribuirse entre las diferentes portadoras o bien utilizar una de ellas como *master* y las restantes exclusivamente para soportar transmisiones con reserva.

3.4.5. Adaptación de PRMA++ a FRAMES Mode 1.

Una portadora FMA1 puede soportar un servicio de voz asignando en exclusiva un único slot 1/64 a un terminal móvil. El número de símbolos de información contenidos en un slot 1/64 puede ser de 144 o de 122, dependiendo de la longitud asignada a la secuencia de entrenamiento. Utilizando una tasa de codificación $r=1/2$ y una modulación Binary Offset Quadrature Amplitude Modulation (BOQAM), el número de bits útiles por slot es de 144 ó 122 respectivamente. Por tanto, en el caso más limitativo, la asignación de un único slot 1/64 por trama equivale a un canal con capacidad de 26.4 kbits/s, mientras que la velocidad del vocoder puede ser del orden de 13 kbits/s (como en GSM) o menor. De hecho, el servicio de voz podría ofrecerse mediante una asignación de un slot cada dos tramas FMA1, resultando una velocidad de 13.2 kbits/s.

El análisis presentado en el siguiente apartado [Ferrus98a] se basa en el mapeo de los I-Slots, R-Slots y A-Slots definidos en PRMA++ en slots 1/64 de la estructura de trama FMA1. El mecanismo de duplexado es FDD y la caracterización se realiza para el tráfico del enlace ascendente. Tras haber confirmado la petición de reserva, el terminal dispone de un I-Slot en exclusiva dentro de la trama. La liberación del mismo se notifica por señalización a través del mismo recurso dedicado, de forma que el I-slot queda disponible en la trama inmediatamente posterior al último paquete de voz transmitido.

En la sección 3.4.7, el planteamiento es similar con la única diferencia que se introduce la posibilidad de realizar asignación múltiple de I-slots del tipo 1/64 o bien asignar directamente un I-slot mapeado en un slot 1/16.

3.4.6. Tráfico de voz.

El esquema analizado consiste en una portadora FMA-1 en modo FDD destinada a soportar exclusivamente tráfico de voz.

El modelo utilizado para generar tráfico de voz es un modelo de Markov de dos estados [Goodman91], comúnmente conocido como modelo ON/OFF. En la Figura 3-4 se representa el diagrama de transiciones de dicho modelo. El estado ON representa el intervalo de actividad del terminal donde se produce la generación de paquetes. Las tasa de generación se considera constante para servicios de voz. El estado OFF representa los intervalos de inactividad de la fuente que pueden atribuirse a las pausas efectuadas por el hablante durante la comunicación. La permanencia en cada estado se modela mediante variables aleatorias exponenciales caracterizadas por el tiempo medio de permanencia T_{ON} y T_{OFF} .

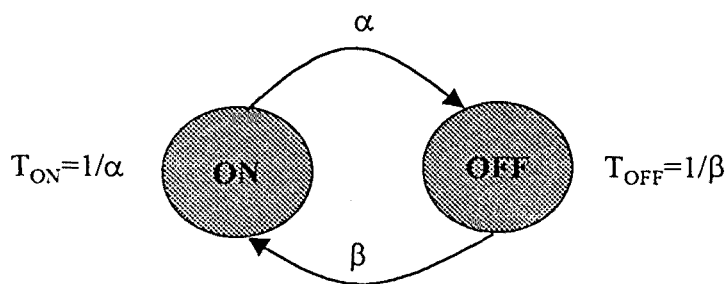


Figura 3-4. Modelo ON/OFF utilizado para caracterizar el servicio de voz.

Los valores de T_{ON} y T_{OFF} se corresponden a los considerados en el proyecto ATDMA [Urie95] y su valor es igual a 1.41 y 1.74 respectivamente, siendo el factor de actividad resultante del 45%.

El número máximo de usuarios soportados se fija en función de la tasa de pérdida de paquetes (PLR, Packet Lost Ratio) máxima permitida [Goodman89]. La pérdida de paquetes se produce generalmente durante el procedimiento de petición de recursos, de forma que se descartan los paquetes iniciales de algunas ráfagas de voz ("front end clipping"). El retardo máximo que puede tolerar un paquete de voz se ha fijado a 2 tiempos de tramas. En la mayoría de estudios presentados en la literatura se considera una tasa máxima permitida del orden del 1%.

De esta forma, la ganancia del sistema PRMA++, respecto a un esquema de acceso basado en asignación fija de circuitos, puede calcularse mediante

$$G_{PRMA++} = \frac{M_{0.01}}{N}$$

donde N representa el número de slots en que se divide la trama PRMA++, incluyendo R-Slots, y $M_{0.01}$ indica el número de usuarios soportado con una tasa global de pérdidas PLR=1%.

A continuación se procede al dimensionado de la trama en el enlace ascendente y se analizan las repercusiones del procedimiento de acceso con contención, el efecto del factor de actividad y el efecto de la tasa de generación de peticiones.

3.4.6.1. Efecto de la probabilidad de retransmisión.

Para conseguir una ganancia de multiplexado elevada es necesario disponer del máximo número posible de I-slots en la trama PRMA++, reduciendo por tanto al mínimo el número de R-slots dedicado a gestionar el acceso aleatorio. Por otro lado, la ubicación de pocos R-slots puede conducir a situaciones de inestabilidad donde los terminales experimenten un excesivo retardo en acceder a los recursos, incluso encontrándose la mayoría de los I-slots vacíos.

Las prestaciones que determinan el acceso a través de los R-slots puede modelarse básicamente mediante un esquema slotted ALOHA. En la Figura 3-5 se representa la evolución de la tasa de pérdidas PLR en función de la probabilidad de retransmisión considerada. La configuración corresponde a una trama PRMA++ con un único R-Slot. Podemos observar que una probabilidad de retransmisión demasiado reducida conduce a un aumento de la tasa de paquetes perdidos PLR debido a tiempos de acceso prolongados. No obstante, valores elevados de la probabilidad de retransmisión pueden acentuar el problema de las colisiones derivando exactamente en el mismo problema. Por tanto, vemos que existe un margen de operación óptimo. No obstante, puede observarse que dicho margen no es constante, sino que depende de la estadística de generación de las fuentes, del número de usuarios activos en el sistema y del propio número de R-slots asignados en la trama.

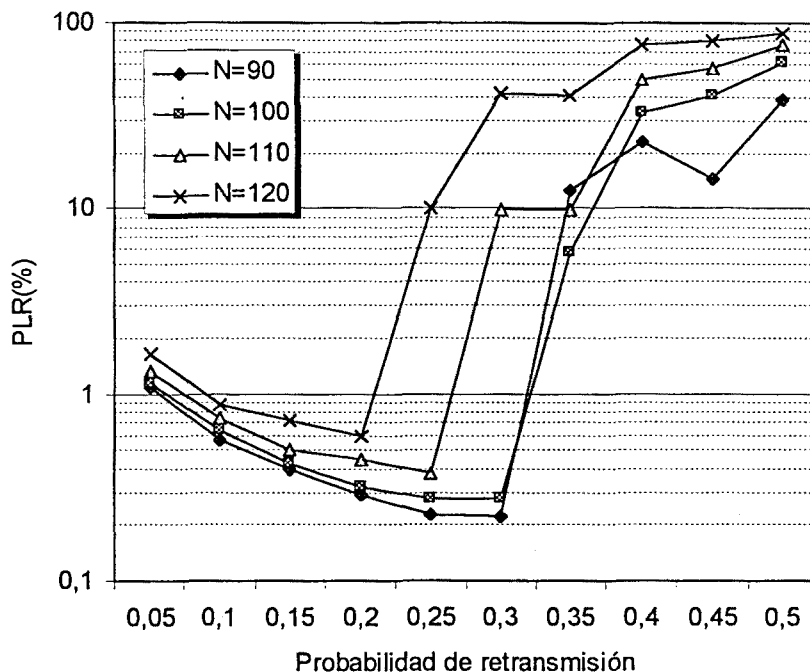


Figura 3-5. Efecto de considerar una probabilidad de retransmisión estática.

Para reducir la influencia del mecanismo de acceso en las prestaciones globales del protocolo hemos modificado la probabilidad de retransmisión de forma adaptativa. Para ello, se ha recurrido a un algoritmo de *back-off* exponencial propuesto para la estabilización de sistemas slotted-ALOHA [Jeong95]. Dicho esquema se basa en la disminución por un factor constante p de la probabilidad de retransmisión, en función del número de intentos de acceso realizados sin éxito. De esta forma, un terminal que ha realizado n intentos no satisfactorios va a transmitir en el siguiente slot de acceso con probabilidad

$$p_r = p_{max} \cdot p^{n-1} \tag{3-1}$$

El valor de p_{max} considerado es de 1 de forma que la misma expresión resulta aplicable en el caso del primer intento donde se transmite con probabilidad 1.

En caso de que se realizaran en la estación de base estimaciones de la tasa media de generación de peticiones por usuario (λ_p) y del número medio de usuarios en contienda (N_c), cabe la posibilidad de calcular la probabilidad de retransmisión óptima adaptada a las condiciones de carga del sistema. La probabilidad de retransmisión debería intentar al máximo la aparición de colisiones pero garantizando un acceso rápido cuando el número de móviles en contienda sea reducido. El criterio que hemos planteado consiste en obtener la probabilidad de retransmisión que garantice en media un único acceso

por R-slot. De esta forma, a partir de la estimación del número de móviles en contienda (N_C) y de la tasa media de generación de peticiones λ_p , la probabilidad de retransmisión p_r debería cumplir

$$N_C \cdot p_r + N_{OFF} \cdot \lambda_p = 1 \quad (3-2)$$

donde N_{OFF} representa el número de móviles activos en el sistema pero que se encuentren en estado OFF. El valor de N_{OFF} puede obtenerse a partir de la estimación de N_C mediante

$$N_{OFF} = N - N_R - N_C \quad (3-3)$$

siendo N el número de móviles activos en el sistema y N_R el número de reservas vigentes en los I-slots. Así pues, la probabilidad de retransmisión viene dada por

$$p_r = \min \left(1, \frac{1 - \lambda_p \cdot (N - N_R - N_C)}{N_C} \right) \quad (3-4)$$

El valor de p_r podría difundirse en los A-slot del enlace descendente. Es importante observar que dicha solución no implica que todos los terminales deban recuperar la información de los A-slots de forma sucesiva, sino que únicamente aquellos móviles que se encuentran en contienda y que necesariamente deben demodular el A-slot para conocer el resultado de su previo acceso, van a disponer del valor de la probabilidad de retransmisión a utilizar en el siguiente R-slot. Un punto no abordado en el presente estudio es la obtención de las estimaciones del número de usuarios en contienda ni de las posibles repercusiones que podrían derivarse de una estimación incorrecta.

En la Figura 3-6 se muestra la tasa de paquetes perdidos haciendo uso de la adaptación slot a slot de la probabilidad de retransmisión apuntada en (3-4) y mediante la utilización de esquemas de *back-off* con factor p . Como era de esperar, las mejores prestaciones se obtienen mediante el mecanismo propuesto de estimación adaptativa de la probabilidad de retransmisión, ya que se hace uso de mayor información sobre el estado del canal. No obstante, mediante ambos procedimientos se consigue estabilizar el mecanismo de acceso con contención. Podemos observar que para un número reducido de terminales, las diferencias entre los diferentes mecanismos se acentúa debido a que, para bajas condiciones de carga, las prestaciones del sistema global vienen delimitadas por el mecanismo de acceso. En cambio, para cargas más elevadas, las diferencias se reducen para valores de p superiores a 0.25 debido a que la limitación del sistema se traslada al número de I-Slots disponible.

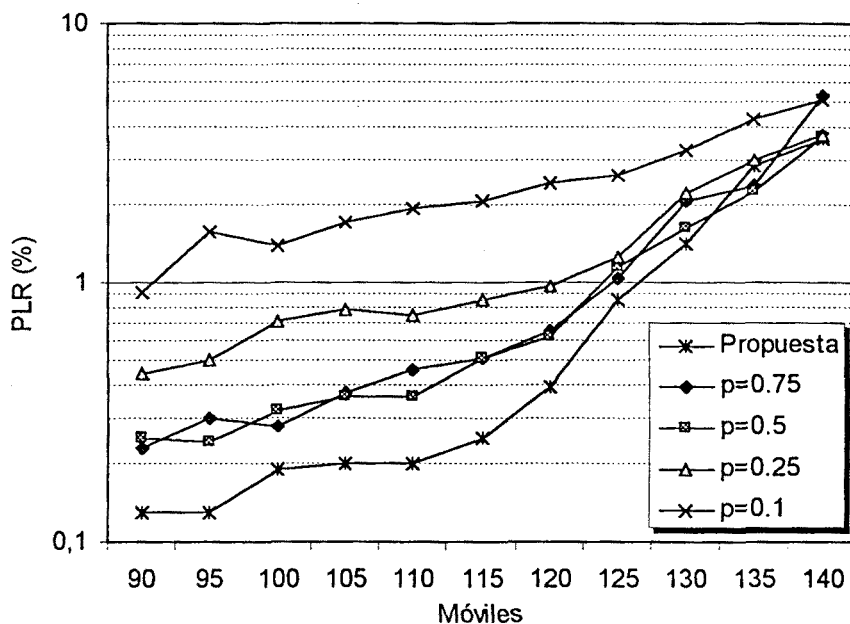


Figura 3-6. Estabilización del acceso a los R-slots mediante mecanismos de *back-off* exponencial y mediante la metodología propuesta.

En los resultados obtenidos en las siguientes secciones se utiliza un esquema de *back-off* exponencial con factor $p=0.5$.

3.4.6.2. Dimensionado de la trama FMA1

El dimensionado de la trama PRMA++ radica básicamente en la determinación del número óptimo de R-Slots que permita acomodar el máximo número de usuarios. En la Figura 3-7 podemos observar la variación de la tasa de pérdidas PLR en función del número de usuarios en el sistema y del número de R-Slots considerado.

Para cargas bajas, la configuración con 4 R-Slots es la que presenta una tasa de pérdidas más reducida. Conforme aumenta el número de usuarios en el sistema, la tendencia se invierte y la configuración mejor se obtiene de considerar 1 R-Slot. La justificación de dicho comportamiento puede extraerse de la observación de los resultados presentados en la Figura 3-8. El tiempo de acceso experimentado por los terminales para demandar recursos es considerablemente más reducido conforme aumenta el número de R-Slots, para todas las condiciones de carga analizadas. En cambio, el tiempo de asignación de I-Slots se incrementa más deprisa para configuraciones con mayor número de R-Slots, ya que en tal situación, los recursos destinados al tráfico de información son menos.

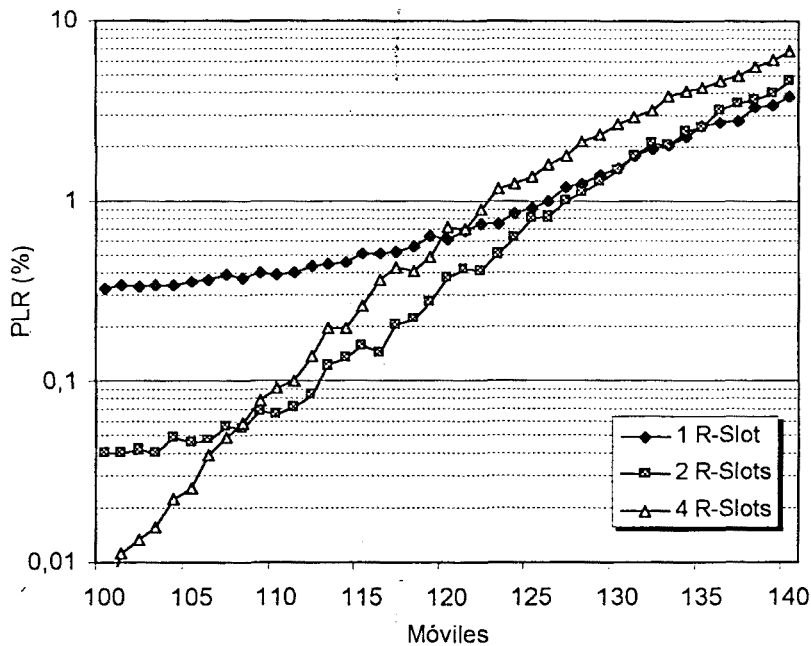


Figura 3-7. Tasa de paquetes perdidos en función del número de R-slots.

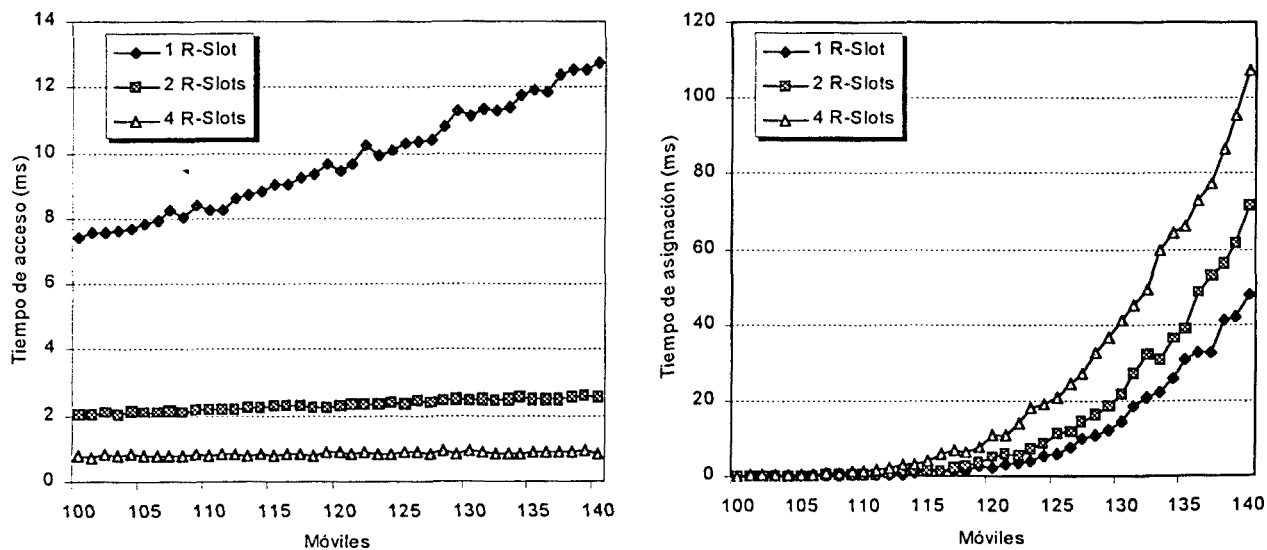


Figura 3-8. Retardo de acceso y tiempo de asignación de recursos.

Además de la tasa de pérdidas PLR global, resulta interesante observar la evolución del porcentaje de usuarios activos que realmente experimentan una pérdida inferior al 1%. En la Figura 3-9 se representa dicho comportamiento.

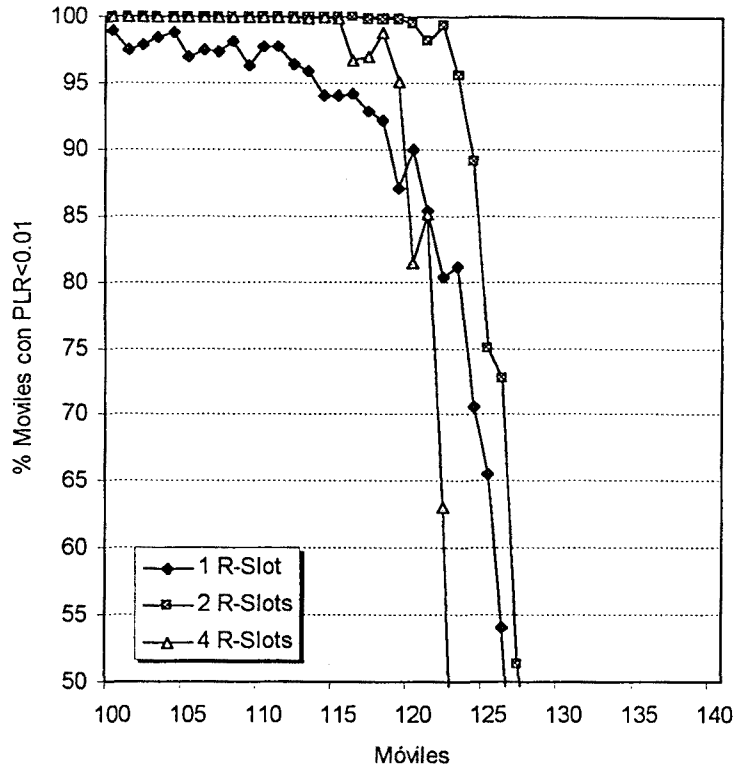


Figura 3-9. Porcentaje de usuarios activos con PLR < 1%.

Podemos observar que la mejor opción consiste en considerar 2 R-Slots en la trama PRMA++. De los resultados reflejados en la Figura 3-7, dicha elección puede resultar un poco más difusa ya que la condición en base a la tasa PLR global es menos restrictiva. En la Tabla 3-2 se representa el máximo número de usuarios permitido garantizando que el 95% de ellos van a experimentar tasas de pérdidas inferiores al 1%.

Tabla 3-2. Ganancia PRMA++ considerando un 95% de usuarios con tasa de pérdidas PLR < 1%

	Usuarios Simultáneos	Ganancia PRMA++
1 R-SLOT	113	1.76
2 R-SLOT	123	1.92
4 R-SLOT	119	1.86

Independientemente de la configuración adoptada, vemos que las ganancias de multiplexado conseguidas frente a un esquema de conmutación de circuitos son del orden de 76%-92%.

3.4.6.3. Efecto del factor de actividad

El factor de actividad considerado en el modelado del servicio de voz influye considerablemente en las prestaciones del sistema PRMA++. En la Figura 3-10 podemos observar la dependencia de la tasa de pérdidas PLR global con el factor de actividad FA y en la Figura 3-11 el porcentaje de usuarios con tasa de pérdidas inferior al 1%. Ambas figuras corresponden a una configuración de trama con 2 R-Slots. El factor de actividad se ha calculado en función de los tiempos T_{ON} y T_{OFF} expresados en la Tabla 3-3. El criterio seguido para su obtención consiste en mantener la tasa de peticiones (TP) constante. Para ello, se considera que la suma de tiempos medios de permanencia en los estados ON y OFF se mantiene invariable, de forma que la generación de ráfagas de voz se realiza a la misma frecuencia. La tasa de peticiones por móvil puede calcularse mediante la expresión

$$TP = \frac{1}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (3-5)$$

Tabla 3-3. Tiempos T_{ON} y T_{OFF} para los factores de actividad analizados.

	T_{ON}	T_{OFF}	TP
FA=0.35	1.10	2.04	0.3
FA=0.45	1.41	1.74	0.3
FA=0.55	1.74	1.41	0.3

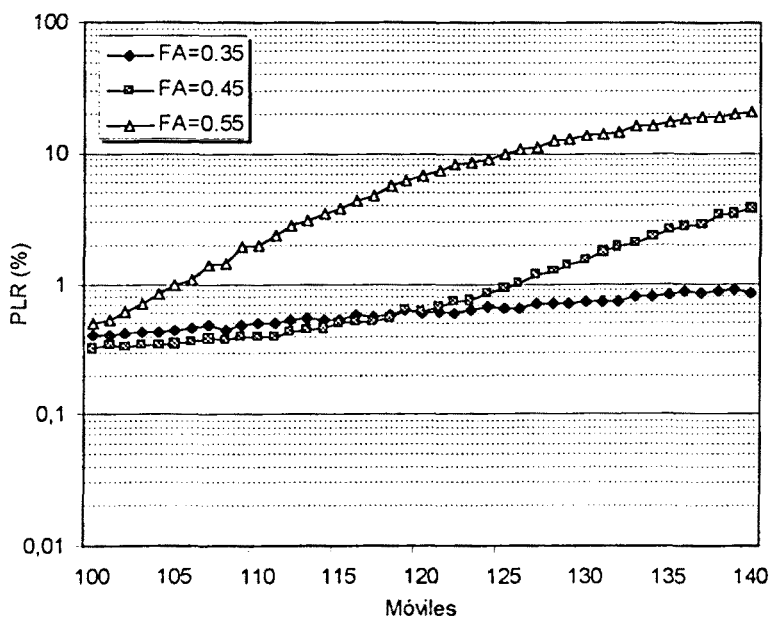


Figura 3-10. Dependencia de la tasa de pérdida (PLR) global con el factor de actividad (FA).

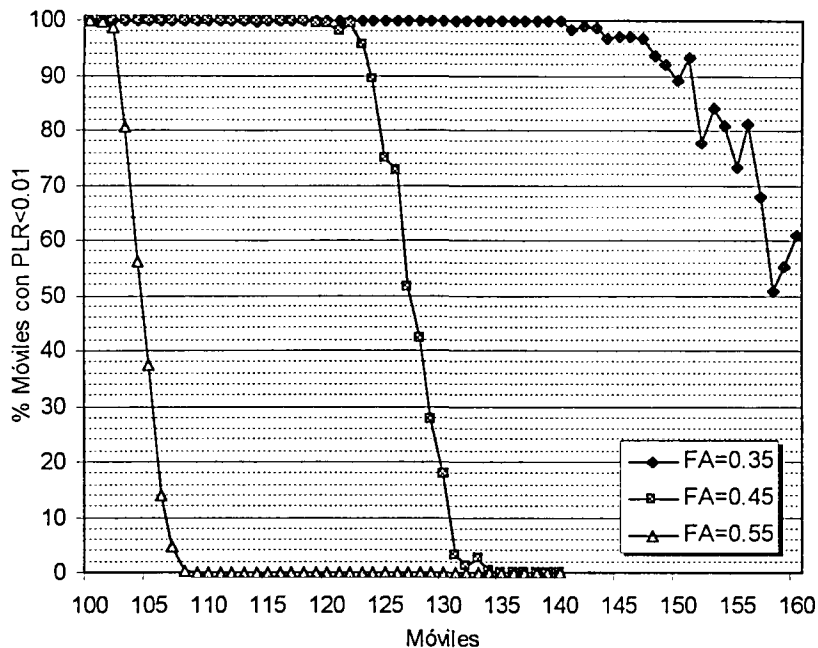


Figura 3-11. Porcentaje de usuarios activos con PLR<1%.

Para cargas bajas las prestaciones son similares para los tres casos analizados porque la limitación radica en el mecanismo de acceso y la tasa de generación de peticiones se mantiene constante. Conforme aumentamos la carga las diferencias se acentúan considerablemente debido a la falta de I-Slots, especialmente para FA=0.55. No obstante, es importante destacar que las ganancias obtenidas respecto a un esquema de conmutación de circuitos siguen siendo notorias. En la Tabla 3-4 podemos observar que la configuración óptima sigue siendo con 2 R-Slots con ganancias de procesamiento entre 129% y 59% para factores de actividad entre 0.35 y 0.55.

Tabla 3-4. Ganancia PRMA++ en función del FA para diferentes configuraciones de trama.

	1 R-Slot	2 R-Slots	4 R-slots
FA=0.35	1.78	2.29	2.20
FA=0.45	1.76	1.92	1.86
FA=0.55	1.59	1.59	1.50

3.4.6.4. Efecto del número de peticiones

Si mantenemos el factor de actividad constante FA=0.45, el valor absoluto de los tiempos T_{ON} y T_{OFF} influye en la tasa de peticiones generada. De acuerdo a la expresión (3-5) los valores considerados para TP se reflejan en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Tiempos T_{ON} y T_{OFF} para las diferentes tasas de peticiones analizadas.

	T_{ON}	T_{OFF}	FA
TP=0.2	2.24	2.76	0.45
TP=0.3	1.41	1.74	0.45
TP=0.4	1.12	1.38	0.45

En la Figura 3-12 y Figura 3-13 se representan, respectivamente, los resultados obtenidos para una configuración de 1 R-Slot y 2 R-Slots. En caso de ubicar un único slot para el acceso, el aumento de la tasa de peticiones repercute considerablemente en la capacidad del sistema. En cambio, ubicando 2 R-Slots, el máximo número de usuarios permitido con una tasa PLR global inferior al 1% se mantiene prácticamente constante con las tasas de peticiones consideradas (véase Figura 3-13). Tal como se ha visto en las anteriores secciones, el motivo radica básicamente en que las limitaciones del sistema en zonas de carga elevada se deben principalmente al número de I-Slots disponible y al factor de actividad, siempre que los recursos dedicados al acceso sean adecuados.

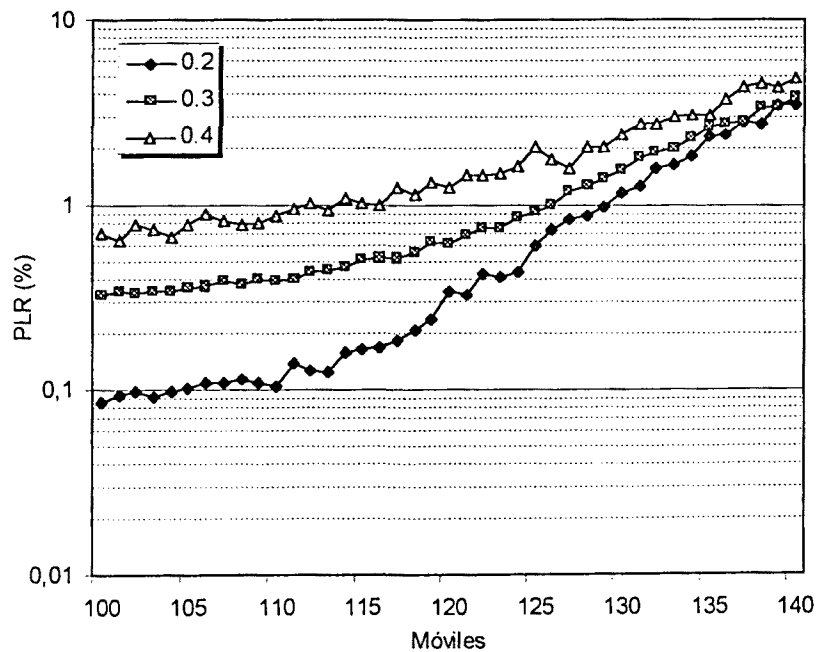


Figura 3-12. Dependencia de la tasa de pérdida (PLR) global con la tasa de peticiones. Configuración con 1 R-Slot.

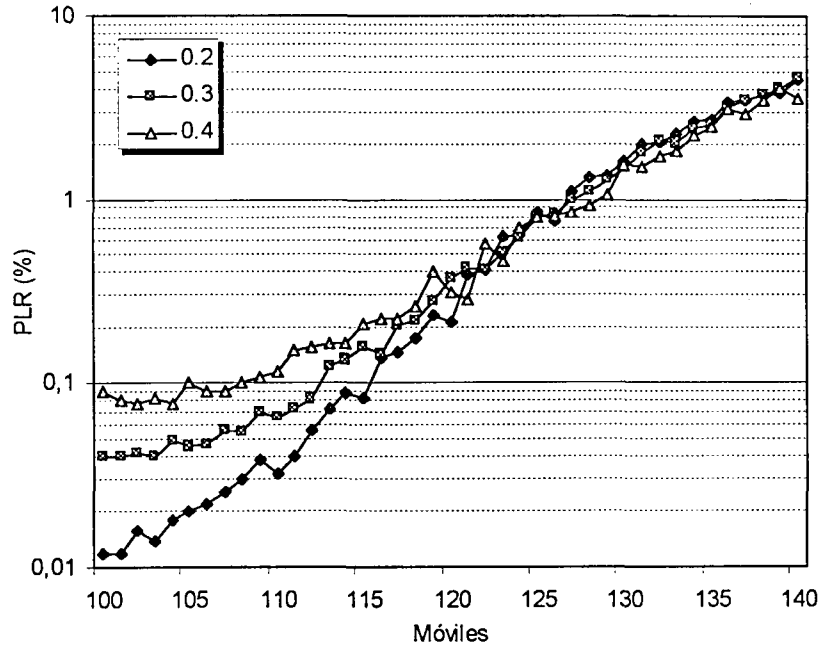


Figura 3-13. Dependencia de la tasa de pérdida (PLR) global con el factor de actividad (FA). Configuración con 2 R-Slots.

3.4.7. Tráfico de datos

La mayoría de estudios encontrados en la literatura sobre las prestaciones de esquemas PRMA se aplican para servicios de voz. En este apartado vamos a estudiar el comportamiento del protocolo PRMA++ para servicios de datos.

La caracterización del tráfico de datos se ha llevado a cabo mediante un proceso de Poisson con tasa de generación λ_m mensajes/s. La longitud de los mensajes generados L se establece en función del número de slots $1/64$ necesarios para realizar la transmisión completa del mensaje. A fin de comparar el efecto de la longitud del paquete en igualdad de condiciones de carga, el valor de λ_m se calcula mediante la siguiente expresión

$$\lambda_m = \frac{\alpha}{T_{trama} \cdot L} \quad (3-6)$$

donde α representa el porcentaje de tráfico generado por un usuario de datos respecto a la capacidad de transmisión derivada de disponer asignado un slot $1/64$ de forma permanente. En el presente análisis el valor de α se limita entre 0 y 1, de forma que la asignación en modo circuito pueda resultar a priori ineficiente.

El modo de operación para tráfico de paquetes es similar al descrito en el caso de servicios de voz. No obstante, existe una diferencia significativa entre ambos servicios en la forma en que se genera la información. En el caso de tráfico de voz, los paquetes pertenecientes a una ráfaga van generándose periódicamente cada tiempo de trama. En cambio, en el caso de tráfico de datos, el mensaje está disponible por completo en el momento de realizar la petición de reserva. Por tanto, en aras a reducir el retardo de transmisión del mensaje, puede resultar interesante la utilización de un esquema de asignación múltiple de I-Slots. Por otro lado, el parámetro utilizado para comparar las prestaciones es el retardo medio experimentado por los paquetes, en lugar de la tasa de pérdida, ya que se supone un comportamiento ideal del canal. Para poder comparar retardos correspondientes a longitudes de paquete diferentes, el retardo se ha normalizado respecto a la longitud L del mensaje.

El esquema de asignación múltiple se encuentra representado en la Figura 3-14. Cuando llega la petición de reserva a la estación de base, se comprueba el estado de carga de los I-Slots. En caso de que existan menos I-slots ocupados que un umbral fijado por Max_num1 , se procede a realizar una asignación de un I-Slot del tipo 1/16, con una capacidad superior a 4 veces la capacidad ofrecida por un slot 1/64 (Véase Figura 3-2). En caso contrario, se realiza la misma comprobación respecto a un umbral menos restrictivo fijado por Max_num2 . Si la comparación es positiva, se asignan dos I-Slots del tipo 1/64. En caso de resultar negativa, se procede simplemente a comprobar si existen I-Slots disponibles, guardando la petición en una cola FIFO (*first-in-first-out*) para su posterior asignación en el caso de encontrarse todos los recursos ocupados.

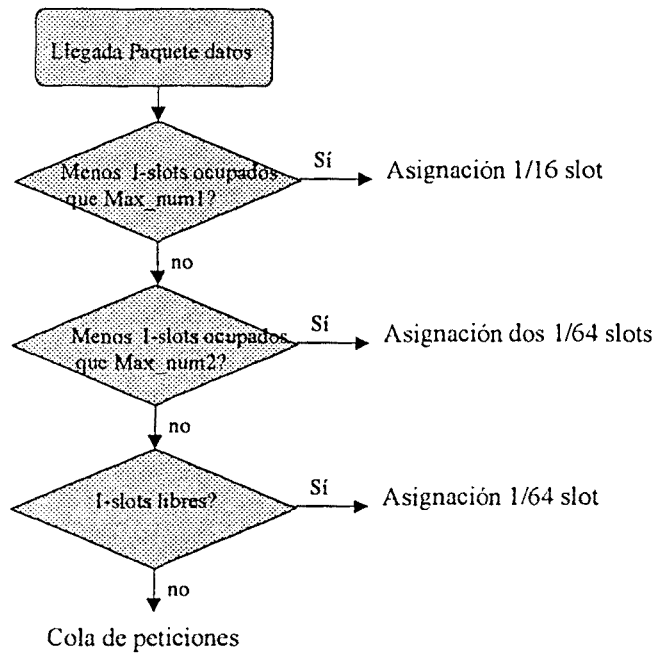


Figura 3-14. Esquema de asignación múltiple básico.

Los valores de Max_num1 y Max_num2 se han fijado en función del número de I-Slots disponibles en la trama, denominado $MaxRes$. Los resultados presentados a continuación corresponden a

$$Max_num1=MaxRes-8$$

$$Max_num2=MaxRes-16$$

En la Figura 3-15 y Figura 3-16 se representa el valor del retardo normalizado para paquetes de longitud 16 y 128 respectivamente. La tasa de generación de tráfico viene dada por $\alpha=0.25$. El número de R-Slots ubicados en la trama PRMA++ se ha establecido en 2-8. Tal como se observa en la Figura 3-15, las configuraciones con únicamente 2 R-Slots conducen a resultados muy pobres, mientras que la configuración con 8 R-Slots mantiene el retardo normalizado en valores cercanos a 1, e incluso inferiores, para el margen de carga analizado. Además, en caso de aplicar asignación múltiple, las prestaciones para 2 R-Slots empeoran aún más, mientras que si se utilizan 8 R-Slots, se produce una mejora respecto al caso de asignación única. El motivo de dicho comportamiento se debe principalmente a la congestión del canal de acceso aleatorio en el caso de destinar únicamente 2 R-Slots. La utilización de asignación múltiple contribuye a aumentar la tasa de peticiones, ya que los paquetes se transmiten más rápido y el número de paquetes transmitidos en una sola petición de reserva disminuye. En cambio, 8 R-Slots proporcionan suficiente capacidad en el canal de contención y la asignación múltiple sí que puede proporcionar disminuciones importantes del retardo normalizado. En el caso de 100 terminales móviles con 8 R-Slots, utilizar asignación múltiple proporciona retardos normalizados en torno a 0.35, mientras que con asignación única el retardo es del orden de 1.15. Los resultados obtenidos para mensajes de longitud $L=128$ son completamente diferentes. Análogamente al efecto del factor de actividad para servicios de voz, el funcionamiento del protocolo PRMA++ es más apropiado para mensajes largos, ya que el *overhead* asociado a la petición de recursos se rentabiliza más al aumentar el tiempo de mantenimiento del I-Slot. En este caso, véase la Figura 3-16, la asignación múltiple comporta, independientemente del número de R-Slots, una reducción del retardo normalizado. La razón estriba en la disminución de la tasa de petición en un factor 16/128 respecto al caso anterior. Bajo estas condiciones, la capacidad de acceso con 2 R-Slots es suficiente para llevar a cabo la reserva de los recursos. El comportamiento es bastante monótono para todo el margen de móviles considerado, la carga ofrecida es del 25%, y únicamente puede apreciarse un ligero incremento del retardo normalizado para el caso de asignación múltiple con 8 R-Slots. Dicho incremento se debe principalmente a la imposibilidad de asignar múltiples recursos conforme el nivel de carga aumenta, siendo el efecto más apreciable en la configuración con menos I-Slots.

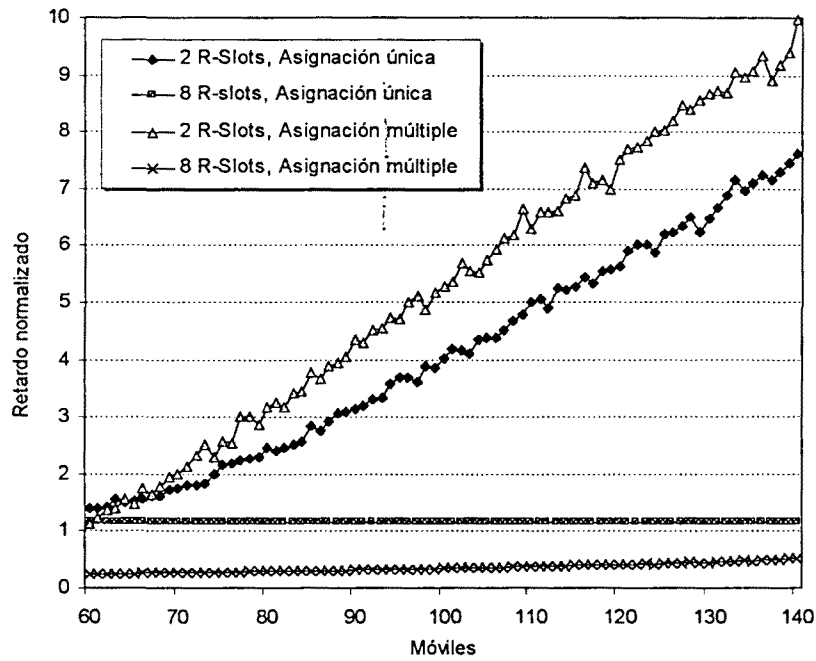


Figura 3-15. Transmisión de mensajes L=16 y con tasa de generación del 25%.

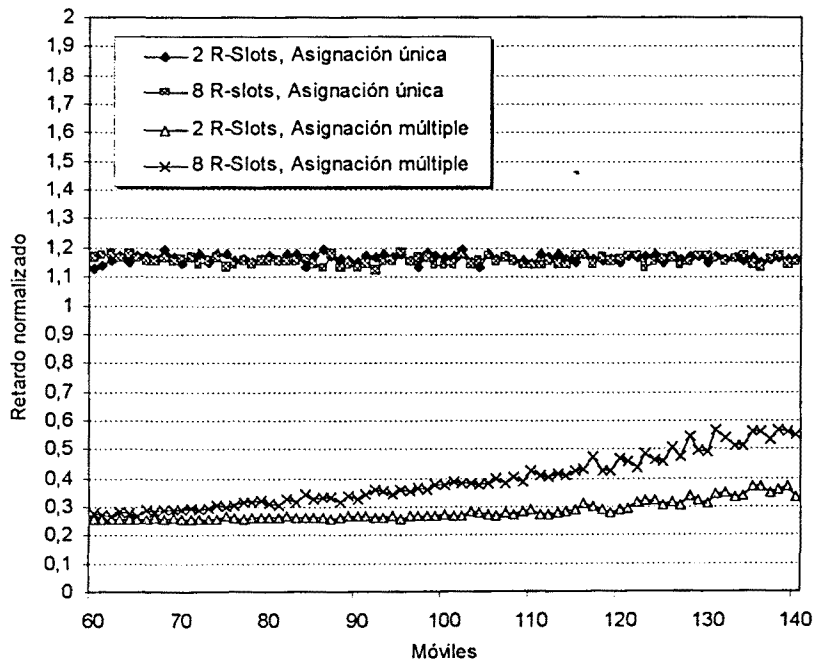


Figura 3-16. Transmisión de mensajes L=128 y con tasa de generación del 25%.

Si aumentamos la tasa de generación de los terminales al 50%, se obtienen los resultados representados en la Figura 3-17 y Figura 3-18.

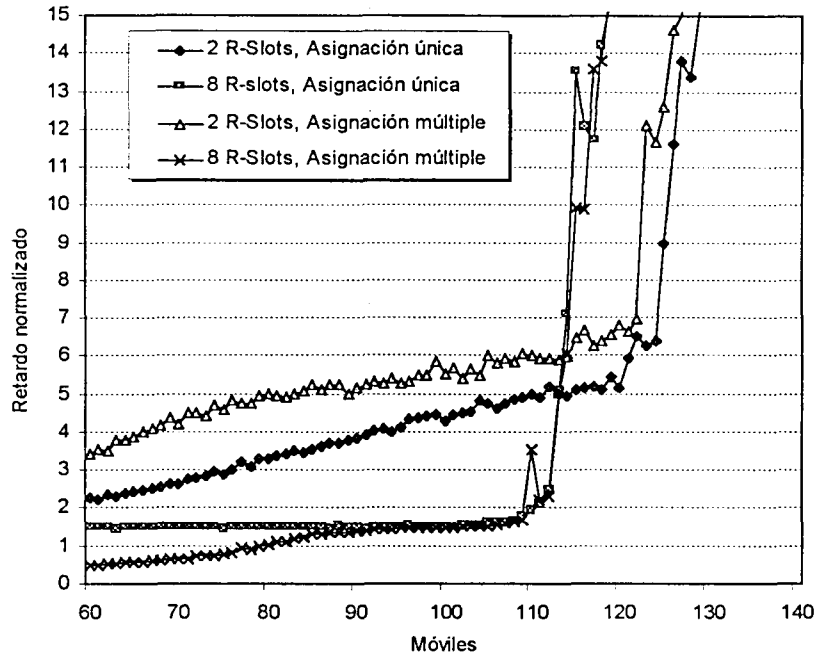


Figura 3-17. Transmisión de mensajes L=16 y con tasa de generación del 50%.

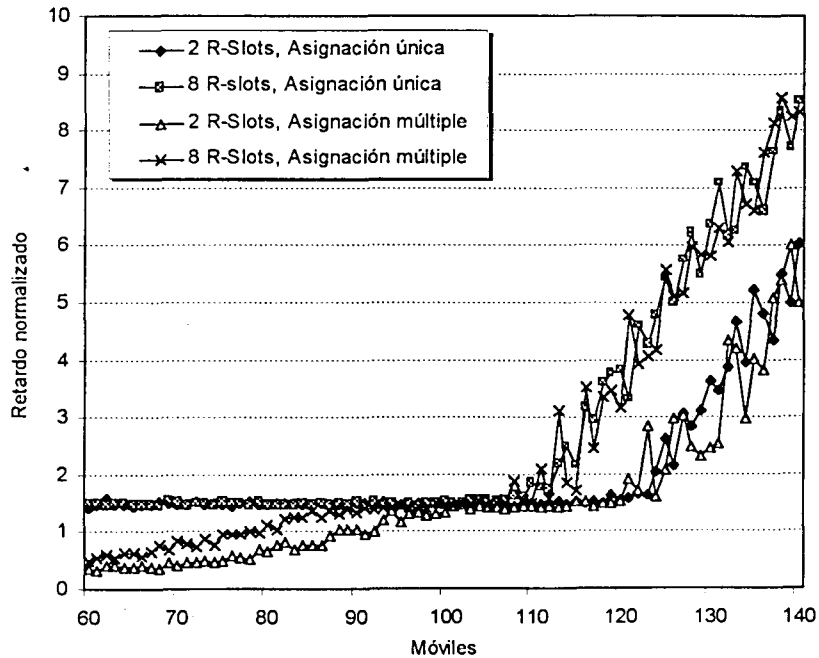


Figura 3-18. Transmisión de mensajes L=128 y con tasa de generación del 50%.

Para ambas longitudes de paquete, L=16 y L=128, el comportamiento observado, con un número de terminales activos reducido, es idéntico al experimentado para tasas de generación inferiores analizadas previamente. En el caso de L=16, conforme el número de usuarios activos aumenta, las

mejoras conseguidas con la asignación múltiple y 8 R-Slots van reduciéndose paulatinamente. Para el caso de 2 R-Slots, las prestaciones de la asignación múltiple siempre son peores por la saturación en el canal de acceso. No obstante, el desbordamiento en retardo se produce antes para la configuración con 8 R-Slots por disponerse de menos recursos dedicados al tráfico de datos. Para paquetes de longitud $L=128$, las prestaciones de los diferentes mecanismos van uniformizándose para un número de usuarios activos en torno a 100-110. A partir de dicho margen, incrementar el número de usuarios activos deriva en la manifestación del efecto de saturación de los recursos de tráfico, más crítica para el caso de 8 R-slots.

Finalmente, los resultados en la Figura 3-19 y Figura 3-20 corresponden a tasas de generación de 75%. Tal como era de esperar el número de usuarios activos soportados en el sistema, con condiciones de retardo aceptables, se reduce drásticamente. Por otro lado, las mejoras introducidas por la asignación múltiple, básicamente para mensajes largos, son prácticamente inapreciables debido a la elevada carga soportada en el sistema.

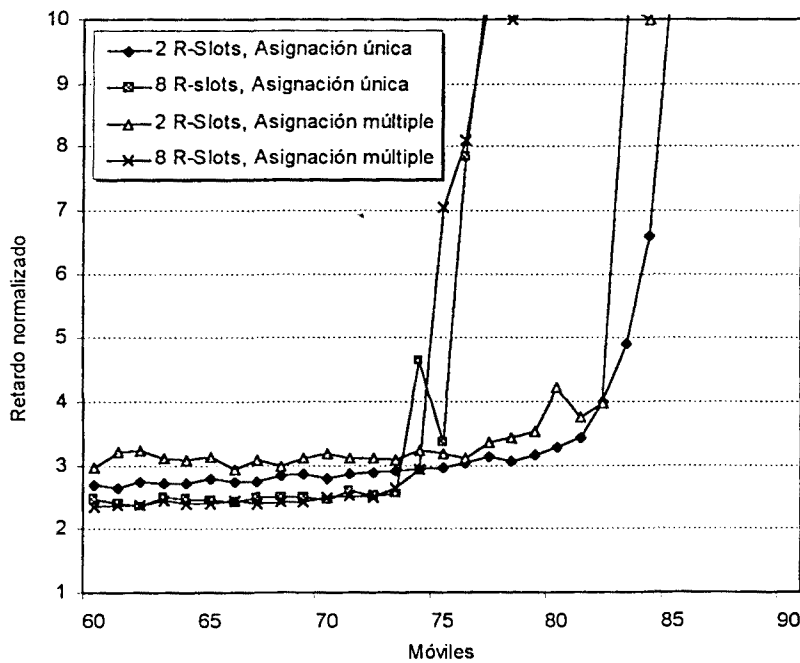


Figura 3-19. Transmisión de mensajes $L=16$ y con tasa de generación del 75%.

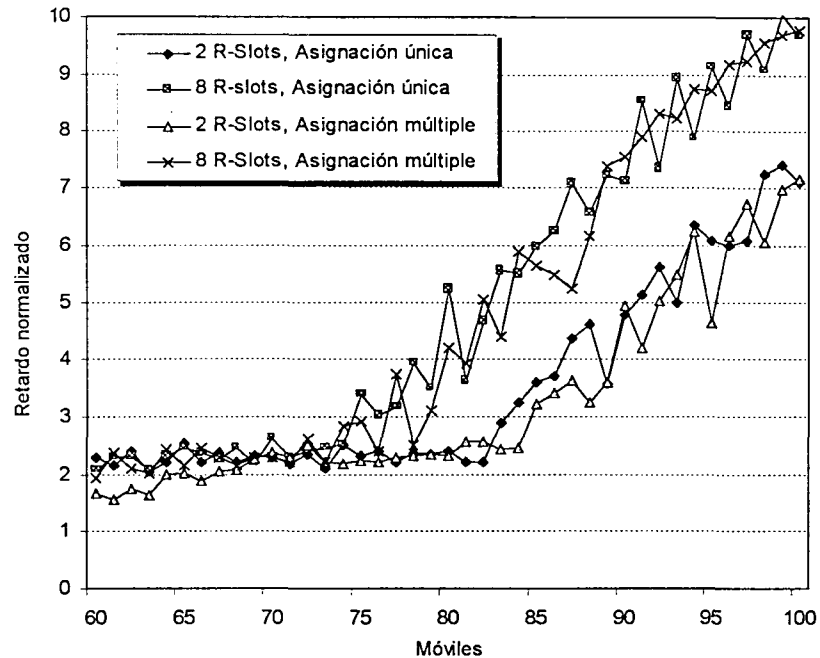


Figura 3-20. Transmisión de mensajes $L=128$ y con tasa de generación del 75%.

De las figuras presentadas podemos observar que el esquema de asignación múltiple propuesto únicamente aporta mejoras significativas para condiciones de carga medias-bajas y capacidades del canal de acceso que no penalicen el incremento de peticiones asociado a la asignación múltiple. Los valores de Max_num1 y Max_num2 permiten variar el punto de carga donde las prestaciones de la asignación múltiple y la asignación única convergen.

3.4.8. Conclusiones del análisis realizado.

En las anteriores secciones se ha presentado un análisis de las prestaciones del protocolo PRMA++ aplicado a la plataforma de transporte FRAMES Mode 1 basada en wideband TDMA.

En el caso de tráfico de voz, a pesar de la elevada sensibilidad del protocolo PRMA++ respecto a la estadística de generación de tráfico, se ha puesto de manifiesto la elevada ganancia de multiplexado que puede conseguirse mediante la utilización de un protocolo relativamente poco complejo basado en la reserva dinámica de recursos. En particular, para valores típicos del tiempo de actividad y silencio de una fuente de voz del orden de 1.41 y 1.74 respectivamente, resultando un factor de actividad del 45%, la ganancia del protocolo PRMA++ respecto a una configuración basada en conmutación de circuitos resulta del orden del 92%. Factores de actividad del 35% y 55% conducen a valores de ganancia de 129% y 59% respectivamente.

No obstante, el mecanismo de retransmisión utilizado en los R-Slots constituye una restricción importante en las prestaciones del protocolo. Se ha observado que valores de probabilidad de retransmisión constantes conducen a márgenes de operación óptimos muy reducidos y dependientes de las condiciones de carga del sistema. A tal efecto, se ha propuesto un mecanismo de adaptación dinámica de la probabilidad de retransmisión y se ha comparado con esquemas de estabilización del tipo *back-off* exponencial.

Posteriormente se han analizado las prestaciones del protocolo PRMA++ para cursar tráfico de datos con estadística de Poisson. La operativa de funcionamiento es similar al servicio de voz, con la particularidad de que se ha introducido un mecanismo de asignación múltiple de recursos basado en el estado de carga del sistema, de forma que se posibilita la asignación de una capacidad de transmisión del orden de 2 ó 4 veces superior a la proporcionada por un único I-Slot. Los resultados confirman el mejor comportamiento del protocolo PRMA++ conforme aumenta el tamaño de los mensajes, debido básicamente a la *rentabilidad* del procedimiento de reserva utilizado en PRMA++ frente al overhead inherente a la petición de recursos. Respecto a la utilización de esquemas de asignación múltiple, se ha constatado que los beneficios derivados quedan restringidos a márgenes de funcionamiento reducidos, particularmente para condiciones de carga medias-bajas y canal de contención correctamente dimensionado. En caso contrario, el aumento en la tasa de peticiones ocasionada por la asignación múltiple, se traduce en un incremento del retardo global debido a la saturación del canal de acceso.

3.5. Acceso por división en código (CDMA)

3.5.1. Técnicas de espectro ensanchado (SS)

La técnica de transmisión de espectro ensanchado SS (Spread Spectrum) consiste básicamente en transmitir la señal de información con un ancho de banda mucho mayor que el estrictamente necesario en caso de utilizar una modulación convencional [Pickholtz82, Lee93]. De esta forma se consigue que la densidad espectral de potencia de una emisión SS sea muy baja, pudiendo estar incluso por debajo del nivel de ruido térmico. La aplicación de técnicas de espectro ensanchado a la gestión del acceso múltiple es lo que se denomina genéricamente como CDMA. Existen dos modalidades de sistemas CDMA:

- FH-CDMA (Frequency Hopping CDMA). El ensanchado se consigue mediante la conmutación de frecuencia portadora, según una secuencia predeterminada, durante la transmisión de un símbolo de información.

- DS-CDMA (Direct Sequence CDMA). El ensanchado se realiza mediante el producto de la señal de información con una secuencia pseudoaleatoria de variación mucho más rápida. La señal resultante se utiliza para modular en fase una portadora.

Los sistemas FH-CDMA presentan una mayor complejidad de implementación por lo que su aplicación se encuentra actualmente relegada a algunos sistemas propietarios de redes locales inalámbricas. Por otra parte, la opción DS-CDMA es la utilizada en el sistema IS-95 de Qualcomm y la adoptada en todas las propuestas para IMT-2000 basadas en CDMA. A continuación se exponen sus principales características, siendo la mayor parte de ellas comunes a ambas realizaciones FH-CDMA y DS-CDMA.

3.5.2. Generalidades de un sistema DS/CDMA.

En este apartado se presentan las características más relevantes de un sistema DS/CDMA. En la Figura 3-21 se ilustra el esquema básico de un modulador DS-CDMA. La señal de información $d(t)$ se expande en frecuencia mediante la multiplicación por una secuencia de variación más rápida $m(t)$. La separabilidad en recepción entre los diferentes usuarios se garantiza mediante la asignación de una secuencia diferente a cada acceso, de forma que en recepción el producto de la señal recibida por la secuencia $m(t)$ invierte el proceso de ensanchado siempre que se cumpla $m^2(t)=1$. La secuencia utilizada es de carácter pseudoaleatorio y se conoce normalmente como *código*. La relación entre el ancho de banda de la señal de información y el ancho de banda de la señal ensanchada se denomina ganancia de procesamiento (G_p).

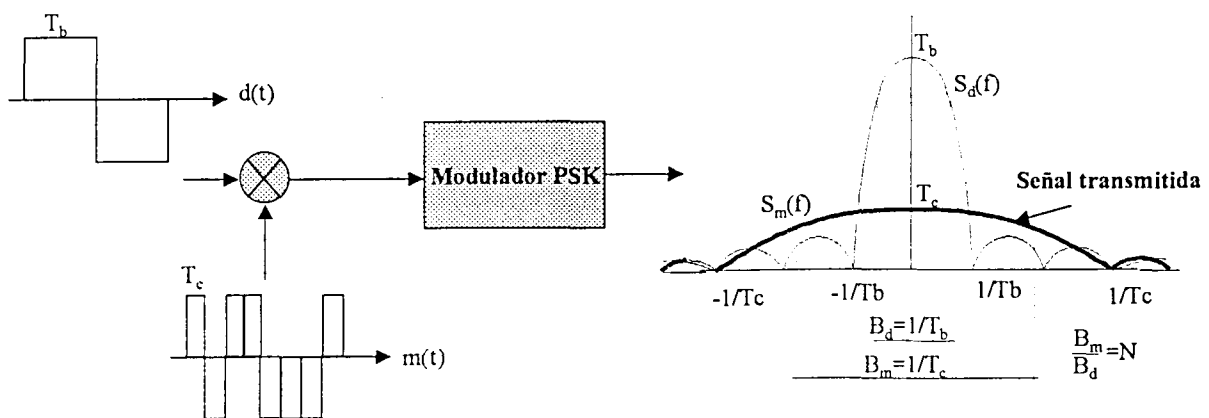


Figura 3-21. Esquema básico de una transmisión DS-CDMA.

Existe un gran número de familias de códigos aplicables a los sistemas DS-CDMA. El objetivo básico de diseño de todas ellas consiste en garantizar valores de autocorrelación muy reducidos cuando las secuencias no están perfectamente alineadas y también en caso de correlaciones cruzadas entre distintos códigos. En [Dinan98] se proporciona una recopilación de las principales características de

las familias de códigos en sistemas CDMA: secuencias m , códigos de Gold, secuencias de Kasami (Small Set KS, Large Set KS) y códigos ortogonales (OSVF). Las secuencias m se caracterizan por ser secuencias de periodicidad máxima y presentan buenas características de autocorrelación pero valores de correlación cruzada elevados. Los secuencias de Kasami, incluyéndose los códigos de Gold como subconjunto, presentan valores de correlación cruzada mínimos, característica importante a cumplir en esquemas CDMA asíncronos. Finalmente, los códigos ortogonales garantizan una correlación cruzada nula, pero para ello resulta necesaria una perfecta alineación entre códigos, permisible únicamente en el enlace descendente y en el caso de un enlace ascendente síncrono.

Una de las características más importantes del acceso CDMA en entornos celulares es su habilidad para combatir la dispersión temporal del canal. El elevado ancho de banda utilizado en CDMA, superior al ancho de banda de coherencia del canal radio, permite la resolución de diferentes ecos de señal debidos a la propagación multicamino, para su posterior combinación en fase mediante esquemas del tipo MRC (Maximal Ratio Combining). El receptor basado en dicho principio se conoce como receptor RAKE y fue propuesto ya en 1958 por Price y Green.

Pero quizás el aspecto más relevante asociado al uso de técnicas CDMA en entornos celulares es la capacidad de reutilizar la misma frecuencia en celdas adyacentes. En el proceso de recuperación de la señal de información, las señales provenientes de otros usuarios conservan su característica de espectro ensanchado, mientras que la señal de interés se comprime en su ancho de banda original. De esta forma, el nivel de potencia de los restantes usuarios que se traduce en interferencia es equivalente a la proporción de potencias existente entre el ancho de banda expandido y el original. Por tanto, la señal de interés experimenta un margen de protección frente a las señales interferentes igual a la ganancia de procesado. Se puede demostrar que dicho margen de protección también aparece en el caso de señales interferentes de banda estrecha, posiblemente ajenas al sistema, y respecto al nivel de potencia del ruido térmico [Proakis89]. En el capítulo 4 se analiza y cuantifica el nivel de interferencia cocal en un sistema celular CDMA en función del mecanismo de traspaso.

La utilización de factores de reutilización unitarios permite la realización de traspasos del tipo soft, donde la conexión del terminal móvil con la red se mantiene simultáneamente a través de más de una estación de base. Tal como se detalla en el capítulo 4, la utilización de traspasos soft proporciona un aumento de capacidad del sistema y garantiza un servicio ininterrumpido de la capa física a las capas superiores. En las otras técnicas, el traspaso puede originar una pequeña interrupción en la conexión. Además, el traspaso soft puede proporcionar una protección adicional frente a la propagación multicamino ya que puede interpretarse como un sistema de diversidad espacial.

En CDMA, a diferencia de los sistemas TDMA, es necesario un control de potencia bastante restrictivo en el enlace ascendente. En caso contrario, los usuarios con mejores condiciones de

propagación podrían enmascarar las señales provenientes de usuarios menos afortunados. Dicho fenómeno se conoce como efecto 'near-far'. Para evitar tal situación, el control de potencia debe garantizar la recepción de las señales de cada usuario dentro de unos márgenes de potencia determinados, típicamente entre 1-2 dB [Viterbi93] respecto al valor deseado. El control de potencia debe ser suficientemente rápido para compensar al máximo los desvanecimientos del canal. El valor de la frecuencia de adaptación de la potencia considerado en WCDMA de UTRAN es de 1600 Hz. Respecto al margen de potencias capaz de compensar, se consideran valores típicos del orden de 80 dB. Para el caso del enlace descendente, el control de potencia no es estrictamente necesario porque la mayor parte de la interferencia proviene de la propia estación de base y por tanto, la proporción entre potencias de los diferentes usuarios se mantiene invariable. No obstante, la utilización de un control de potencia menos restrictivo que en el enlace ascendente puede conducir a considerables aumentos en la capacidad del sistema, tal como se analiza en el capítulo 4. Márgenes dinámicos típicos para el control de potencia del enlace descendente se encuentran entre 10-20 dB. La frecuencia de actualización puede ser también menor que la utilizada en el enlace ascendente.

La utilización de técnicas de codificación de canal y entrelazado proporciona mejoras en un sistema CDMA. De hecho, la codificación de canal puede entenderse como parte de la ganancia de procesamiento. Por tanto, si reducimos el factor de ensanchado a costa de aumentar la redundancia del código, manteniendo la ganancia de procesamiento constante, la reducción que nos proporciona el código de canal en el valor de E_b/N_0 necesario se puede traducir en un incremento de capacidad del sistema.

Otra característica atractiva de los sistemas CDMA es la facilidad de aprovechar el comportamiento ráfagas (bursty) de algunos servicios y la capacidad inherente para multiplexar tráfico heterogéneo. Las prestaciones del sistema CDMA vienen condicionadas por el nivel de interferencia existente. Si los terminales únicamente transmiten cuando disponen información para ello, el nivel de interferencia en el sistema se reduce y por tanto, el número de usuarios simultáneos puede incrementarse. Tal como hemos visto en el estudio sobre PRMA++, el factor de actividad de un terminal de voz puede estimarse entorno al 45%. Esto significa que el nivel medio de interferencia puede reducirse en un porcentaje del orden del 55%. El mismo principio aplica a fuentes de naturaleza distinta: la multiplexación en CDMA puede conseguirse únicamente transmitiendo cuando se disponga de información. Evidentemente, a fin de tener más control sobre la interferencia en el sistema se pueden aplicar protocolos de acceso que permitan aumentar las prestaciones del multiplexado.

Respecto a la obtención de tasas variables en sistemas CDMA, las opciones más relevantes son la utilización de ganancias de procesamiento variable y la posibilidad de multicódigo. Aumentar o disminuir la ganancia de procesamiento produce el efecto contrario en la velocidad de información transmitida. La opción de multicódigo se basa en emitir de forma paralela, sobre la misma portadora, múltiples señales DS-SS, cada una con un código diferente.

Un mecanismo utilizado en CDMA para aumentar la capacidad del sistema es la sectorización. El hecho de utilizar antenas sectoriales reduce la interferencia asociada a cada una de ellas, teóricamente y en caso de distribución uniforme de tráfico, en un factor aproximadamente igual al número de sectores, derivando en un incremento neto de capacidad. En TDMA, la sectorización también deriva en un incremento de capacidad, aunque no resulta tan directo como en CDMA porque aparecen pérdidas adicionales debidas a la división de los recursos.

Tal como hemos visto, la capacidad de un sistema CDMA depende del nivel de interferencia presente en el sistema. Muchas veces, para contrastar el concepto de capacidad en CDMA con otras técnicas de acceso, se utiliza el concepto de *soft capacity*. Con ello, se pretende enfatizar que el número de usuarios soportados en un sistema CDMA no se fija en base a un número concreto de recursos, llámense slots o frecuencias, sino que la capacidad depende de los requisitos de calidad que pretenden conseguirse. Finalmente, si se tiene en cuenta que la mayor parte de la interferencia cocanal experimentada en CDMA proviene de la misma celda, la utilización de algún mecanismo que permita mitigar dicha interferencia puede derivar en un aumento considerable de la capacidad del sistema. Bajo dicha filosofía se han planteado esquemas de detección multiusuario (JD, Joint Detection) y canceladores de interferencia (IC, Interference Cancellation) para el enlace ascendente [Verdu86, Klein95]. En el enlace descendente el mismo efecto se consigue mediante la utilización de códigos ortogonales.

Respecto a la utilización de estructuras jerárquicas de celdas en sistemas CDMA, las soluciones adoptadas pasan necesariamente por la adopción de frecuencias diferentes en las distintas capas de celdas. En caso contrario, la configuración resultante se asemejaría más a un patrón continuo de celdas de diferente tamaño [Shapira94], por lo que, por ejemplo, resultaría imposible la utilización de celdas paraguas para cursar el tráfico de los terminales de elevada movilidad.

3.5.3. Wideband CDMA

Wideband CDMA es una técnica de acceso múltiple por división en código, CDMA, con la única particularidad de utilizar velocidades de portadora, en chips/s, superiores al que se denomina CDMA convencional o CDMA de banda estrecha. El CDMA de banda estrecha está representado principalmente en la actualidad por el sistema de Qualcomm, con velocidades de 1.25Mchips/s. Aparte de las características mencionadas anteriormente y que son aplicables genéricamente al CDMA convencional, el esquema CDMA de banda ancha permite además:

- Velocidades de transmisión elevadas. Uno de los objetivos planteados en la definición de los esquemas de tercera generación es la provisión de servicios portadores de hasta 2Mbps en entornos de interiores y de 144kbps a 384kbps para exteriores.

- Reducida potencia de transmisión y elevada capacidad. El ancho de banda utilizado permite aprovechar favorablemente la dispersión temporal propia de los canales radio. Utilizando técnicas de diversidad es posible reducir la potencia transmitida y consiguientemente aumentar la capacidad del sistema.
- Incremento de la ganancia de multiplexado. El hecho de soportar un número más elevado de usuarios por portadora favorece la eficiencia de aprovechamiento de los recursos compartidos.

En la siguiente tabla se presentan las principales características definidas para el esquema WCDMA en la propuesta UTRAN de ETSI.

Tabla 3-6. Principales características de la propuesta Wideband CDMA.

Acceso Radio	DS-CDMA
Esquema de duplexado	FDD/TDD
velocidad chips/s	4096 Mcps (8.192Mcps /16.384Mcps)
Separación portadoras (4.096Mcps)	Flexible en el margen 4.4-5.2Mhz (200khz de resolución)
Longitud Trama	10ms (dividida en 16 slots de 0.625ms)
Detección	Coherente en ambos enlaces mediante la transmisión de un piloto.
Esquema de velocidad múltiple	Ganancia de procesado variable+Multicódigo
Codificación de canal	Código convolucional (tasa 1/2-1/3) Código RS opcional (tasa 4/5)
Acceso por paquetes	Modo dual (por canal dedicado y canal común)

La estructura propuesta para los canales físicos está basada en la transmisión simultánea de un canal de control dedicado (Dedicated Physical Control Channel, DPCCH) y del canal de datos propiamente dicho (Dedicated Physical Data Channel, DPDCH). La información transmitida en el DPCCH se utiliza para realizar la estimación de canal, el control de potencia y la transmisión de las características de la información contenida en el DPDCH (multiplexado, ganancia de procesado) de forma que la estructura del DPDCH puede variarse slot a slot. Inicialmente se consideran portadoras a 4096 Mchips/s con ganancias de procesado variables entre 4 y 256. El elevado margen de variación de la ganancia de procesado posibilita la transmisión de la mayoría de servicios sin recurrir a la transmisión de señales multicódigo, que requieren el uso de amplificadores lineales de altas prestaciones en los terminales móviles. La información se organiza en tramas de 10 ms subdivididas en 16 slots que constituyen el máximo paso de adaptación del control de potencia en lazo cerrado.

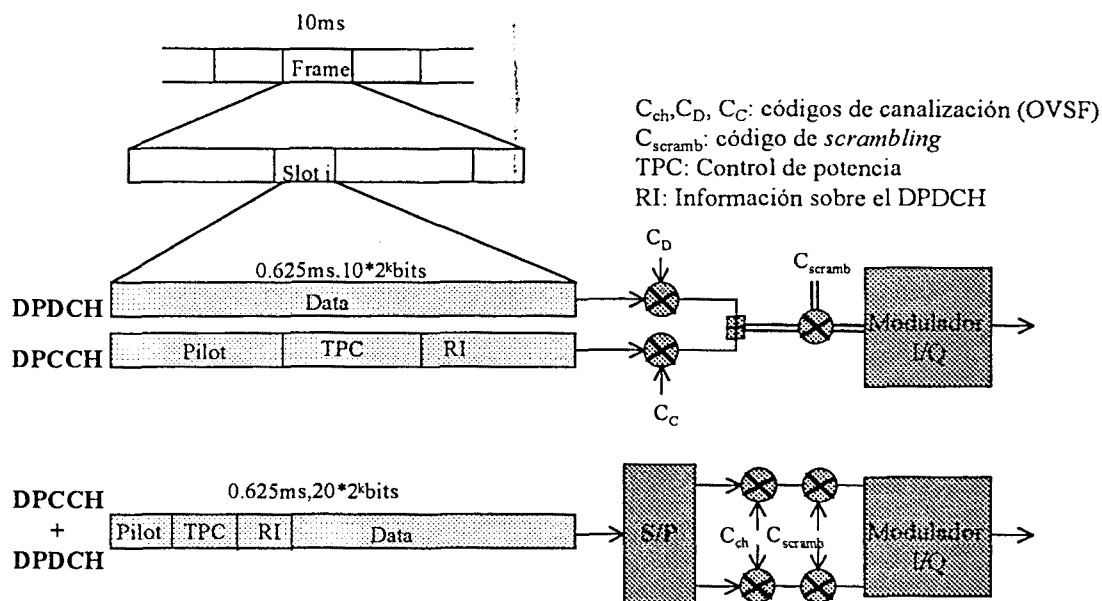


Figura 3-22. Esquema transmisión W-CDMA

En el canal descendente se utilizan códigos ortogonales de longitud variable (OVSF) para multiplexar los canales físicos de una misma estación base expandidos además por un código de Gold de periodo $2^{18}-1$ específicamente asignado a dicha estación de base. En el canal de subida se utilizan también códigos OVSF, pero en este caso expandidos con códigos de longitud 256 escogidos de entre el conjunto *Very Large* de Kasami [Dinan98].

3.5.4. Transmisión de paquetes

Los mecanismos de transmisión por paquetes se encuentran todavía en fase de estandarización. Por ello, el planteamiento adoptado en el presente trabajo está basado en el documento de evaluación [WCDMA], donde se definen vagamente tres esquemas de transmisión por paquetes. En [Dahlman98] podemos encontrar una descripción adicional del mismo planteamiento.

Con el objeto de abordar la gran disparidad en las características de los servicios de datos (longitudes de los paquetes, tasas de generación), se identifican básicamente dos posibles modos de operación:

- Transmisión de paquetes por canal común.
- Transmisión de paquetes por canal dedicado.

En la primera opción, el paquete de información se transmite dentro de la ráfaga de acceso aleatorio. En este caso, no se realiza ninguna gestión para una posterior reserva de recursos y por tanto, el acceso

puede ser relativamente rápido. No obstante, como la potencia de transmisión únicamente puede determinarse a partir de un control de potencia en lazo abierto, se origina un exceso de interferencia al intentar conseguir un determinado nivel de calidad E_b/N_0 . Además, el canal RACH es un canal de contención, y por tanto, las transmisiones efectuadas pueden experimentar colisiones. Bajo esta perspectiva, la transmisión de paquetes por canal común está enfocada a servicios de datos con tasas de generación bajas y longitudes de paquetes reducidas.

La segunda alternativa consiste en el establecimiento de un canal dedicado (DCH) para llevar a cabo la transmisión por paquetes. De esta forma, cuando el terminal dispone de información a transmitir, solicita, mediante el canal RACH, la asignación de recursos. En caso satisfactorio, dicha petición es contestada por el canal FACH con la especificación de los recursos reservados (DCH) y los posibles modos de transporte (TFI) utilizables. El inicio de la transmisión en dicho canal también se realiza en base a la información contenida en el mensaje de asignación. El establecimiento de un canal dedicado conlleva la utilización de un control de potencia en lazo cerrado que permite realizar una gestión más eficiente de la potencia transmitida. Además, el canal dedicado es un canal sin contención, y por tanto, es imposible la aparición de colisiones en código de usuarios diferentes. Una vez operativo el canal dedicado, en [WCDMA] plantean dos posibles 'submodos' de operación:

- Transmisión de un único paquete.
- Transmisión de múltiples paquetes.

En el primero de ellos, el canal dedicado se libera inmediatamente después de efectuar la transmisión del paquete de datos que originó la reserva. En cambio, el segundo modo contempla el mantenimiento del mismo canal dedicado para efectuar la transmisión de múltiples paquetes. Por tanto, el primer modo puede resultar eficiente para transmitir paquetes generados con poca frecuencia y cuya longitud sea suficientemente elevada para justificar el *overhead* resultante del mecanismo de establecimiento del canal dedicado. En caso de servicios con tasas de generación de paquetes más elevadas, el segundo método puede resultar más apropiado ya que no requiere el reestablecimiento del canal DCH para cada paquete a transmitir. No obstante, en este último caso, se propone que la transmisión de paquetes largos no pueda iniciarse en el terminal sólo por el hecho de disponer del canal en exclusiva, sino que se plantea la necesidad de solicitar previamente permiso al sistema, aunque es importante incidir en el hecho que dicha petición puede efectuarse sin contención por el propio canal dedicado.

En la Figura 3-26 se ilustra gráficamente la filosofía del mecanismo de transmisión por canal común y de los dos modos de operación descritos para la transmisión de paquetes por canal dedicado.

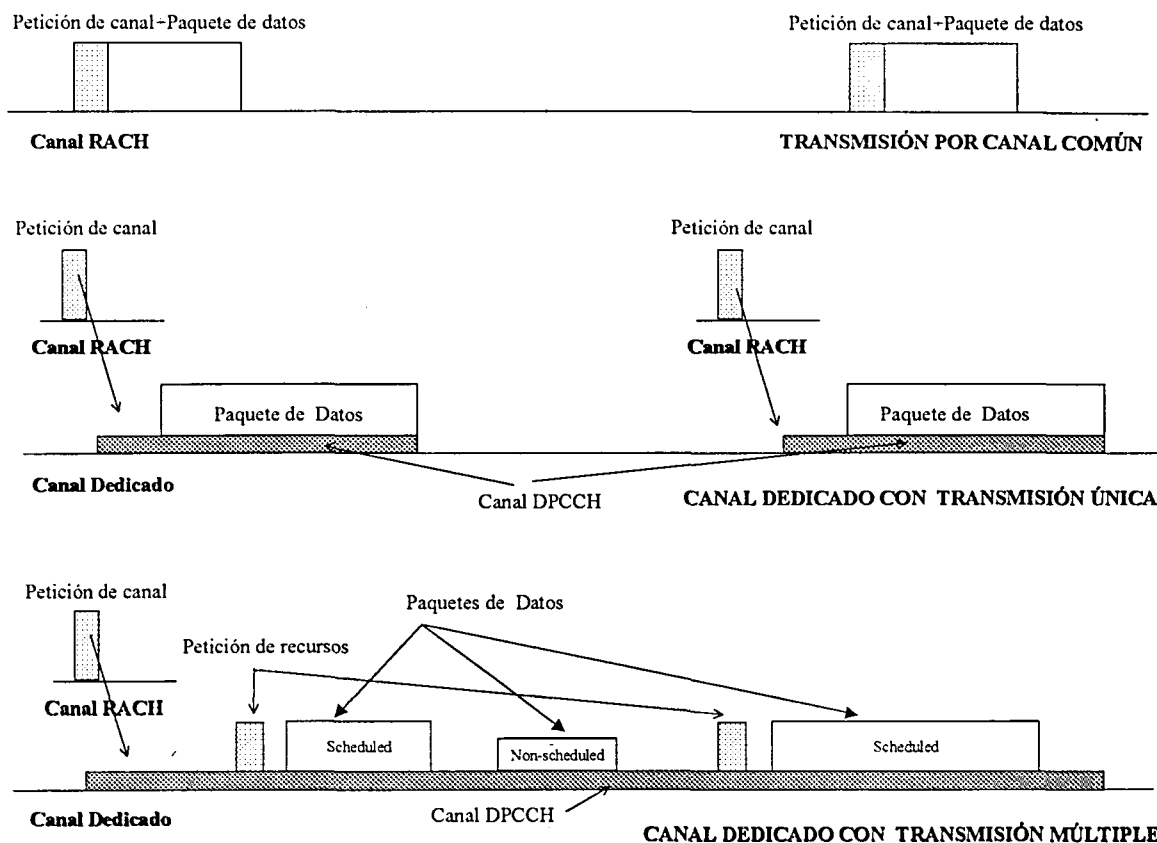


Figura 3-23. Ilustración de los diferentes modos de transmisión contemplados en el acceso WCDMA.

3.5.5. Mecanismo de acceso aleatorio

La ráfaga de acceso utilizada en el RACH consta de un preámbulo y la parte propiamente de información tal como se muestra en la Figura 3-24. El preámbulo consiste en una secuencia (preamble sequence) escogida aleatoriamente de entre un conjunto de 16 secuencias ortogonales disponibles en todas las estaciones de base, ensanchadas por una secuencia de Gold de longitud 256 (preamble code). Cada estación de base comunica en los canales de control comunes el número de códigos de preámbulo utilizables en el RACH.

La estructura de la parte de datos es idéntica a la de un canal dedicado en el enlace ascendente. El canal DPCCCH está mapeado en la componente en cuadratura de la portadora emitida y contiene símbolos piloto e información del formato de transporte. La parte de datos consta de 4 campos: identificador del terminal móvil, descripción del servicio solicitado, un paquete de datos de usuario opcional y una palabra de verificación de errores. El factor de ensanchamiento utilizado en la parte de datos se limita al subgrupo {32, 64, 126, 256}. Respecto a la longitud temporal, en la propuesta [UTRAN] se especifica un valor único constante de 10 ms. Sin embargo, en el momento en que

iniciamos la realización del presente estudio, consideramos una longitud del campo de datos variable en base a las especificaciones preliminares apuntadas en [WCDMA].

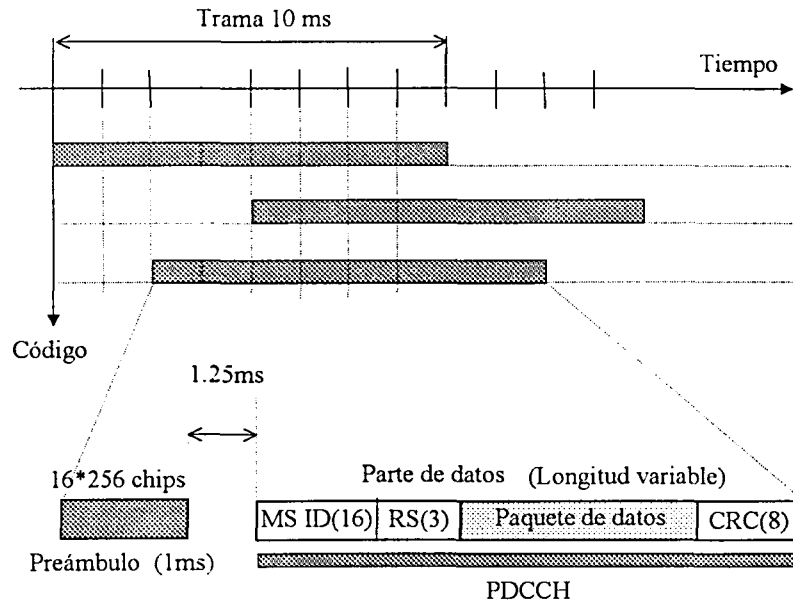


Figura 3-24. Formato de la ráfaga de acceso en el RACH

La estructura temporal del canal de acceso aleatorio, canal RACH, se basa en la definición de ranuras de 1.25 ms. Por tanto, en cada trama WCDMA se permiten 8 accesos en intervalos de tiempo diferentes. El código utilizado en la parte de datos viene determinado por la elección de la secuencia de preámbulo, el código de preámbulo y el slot de acceso. Por tanto, una estación de base con un solo código de preámbulo puede soportar el acceso de $16 \cdot 8 = 128$ móviles en 10ms. La potencia de transmisión se calcula mediante un control de potencia en lazo abierto basado en la recepción de un canal piloto común.

3.5.6. Análisis de los mecanismos propuestos.

Nuestro objetivo es plantear una análisis comparativo que pueda aportarnos algunos resultados cuantitativos respecto a la utilización de los tres modos detallados en la sección 3.5.4. Cuando las velocidades de transmisión son elevadas es evidente que el mejor modo de transmisión consiste en establecer un canal dedicado que permita, por un lado, una utilización eficiente de la potencia transmitida gracias a la utilización de un control de potencia en lazo cerrado, y por otro, que permita la posibilidad de aplicar algoritmos de asignación dinámica de recursos (*scheduling*) para explotar adecuadamente los beneficios derivados de la multiplexación estadística de varios usuarios. Sin embargo, un canal dedicado supone transmitir continuamente el canal DPCCH, aunque no se disponga de información útil para enviar, y además, los recursos utilizados para la gestión del establecimiento

del enlace deben justificarse, para aumentar la eficiencia, a partir de la transmisión de cierto volumen de información.

Bajo dicho planteamiento [Ferrus98b], nuestro interés se centra en evaluar los mecanismos de transmisión propuestos para servicios con bajas tasas de generación de paquetes, donde a priori parece ineficiente recurrir a la asignación de forma permanente de un canal dedicado. En la Figura 3-25 se representa la problemática abordada.

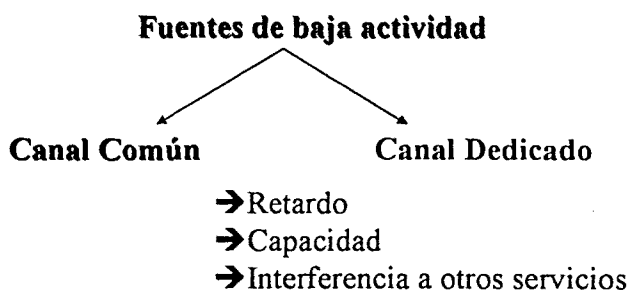


Figura 3-25. Compromiso planteado para servicios de datos con tasas de generación reducidas

Los criterios de comparación utilizados son el retardo de transmisión, el caudal eficaz y, en el supuesto de ubicar los servicios de datos en portadoras donde coexistan servicios en tiempo real, la interferencia ocasionada a tales servicios. En la siguiente sección se describe detalladamente el modelo implementado y en la sección 3.5.8 se proporcionan los resultados obtenidos.

3.5.7. Consideraciones de diseño.

El escenario planteado consiste en una canalización WCDMA de 4096kchips/s para el enlace ascendente. Se supone que el enlace descendente no condiciona el funcionamiento de los modos de transmisión implementados en el canal ascendente.

Para analizar y valorar el compromiso entre la elección de canal común y canal dedicado, tal como se ilustra en la Figura 3-25, se dispone de N_v usuarios de voz y N_d usuarios de datos en la misma canalización frecuencial. A continuación se detallan los parámetros de diseño considerados en la realización de las diferentes simulaciones.

3.5.7.1. Modos de transmisión implementados.

De acuerdo con los modos de transmisión comentados en la sección 3.5.4, se han considerado los siguientes mecanismos de acceso:

- Transmisión por canal común (CC): El mensaje se transmite en el canal RACH. Los móviles implementan un control de potencia en lazo abierto para calcular su potencia de transmisión. El conjunto de códigos de acceso se supone limitado.
- Transmisión en canal dedicado (CD): Se establece un canal dedicado con control de potencia en lazo cerrado para llevar a cabo la transmisión del paquete. La petición de establecimiento se transmite en el canal RACH. El tiempo transcurrido desde la recepción correcta en la estación de base de la solicitud de acceso hasta la correspondiente asignación de recursos se denomina tiempo de asignación (T_a). Para modelar el efecto de la estabilización del control de potencia en el canal dedicado, se incluye un retardo adicional denominado tiempo de estabilización (T_e). Finalmente, la liberación del canal dedicado se lleva a cabo después de haber transcurrido T_l segundos desde la transmisión del último paquete sin que se disponga de nuevos paquetes de datos. El valor de T_l se utiliza para modelar los dos 'submodos' de transmisión por canal dedicado. Particularmente, valores de T_l nulos conllevan la liberación del canal después de la transmisión de un único paquete. En cambio, valores mayores que cero permiten la transferencia de múltiples paquetes.

Adicionalmente se ha creído conveniente introducir un tercer mecanismo de transmisión con características intermedias a los dos descritos anteriormente:

- Transmisión por reserva de código (RC): Al igual que el modo en canal dedicado, el móvil accede inicialmente al RACH. Sin embargo, el recurso solicitado no es el establecimiento de un canal dedicado sino que únicamente se demanda un código en exclusiva para proceder a la transmisión del paquete de información. El código asignado se libera una vez transmitido el paquete de información. Se considera también la posibilidad de reutilización del código para transmisiones múltiples en base a un tiempo de liberación T_l . No se establece control de potencia en lazo cerrado.

En la Figura 3-26 vemos un esquema de los tres mecanismos propuestos. El tiempo T_0 representa el tiempo de transmisión mínimo necesario para enviar el paquete de datos. Respecto al formato de la ráfaga de acceso, para el modo CC se han considerado 19 bits adicionales (identificación+servicio) que pasan a engrosar la longitud del paquete de datos. El campo CRC se supone incluido en el valor de la tasa de codificación r . Para los modos CD y RC, la ráfaga de acceso se ha considerado de duración igual a 2 ranuras (2.5 ms). La probabilidad de retransmisión de la petición de acceso en caso de colisión, denominada P_{RACH} , se calcula de forma estática a partir de la tasa de generación de paquetes de información.

En el caso del modo CD, se considera la posibilidad de limitar el número máximo de usuarios de datos en el sistema a N_d^{max} , ya sea por motivos de interferencia o por disponibilidad de códigos en

exclusiva. El mismo planteamiento es aplicable al modo RC para incluir el efecto de limitación del número de códigos.

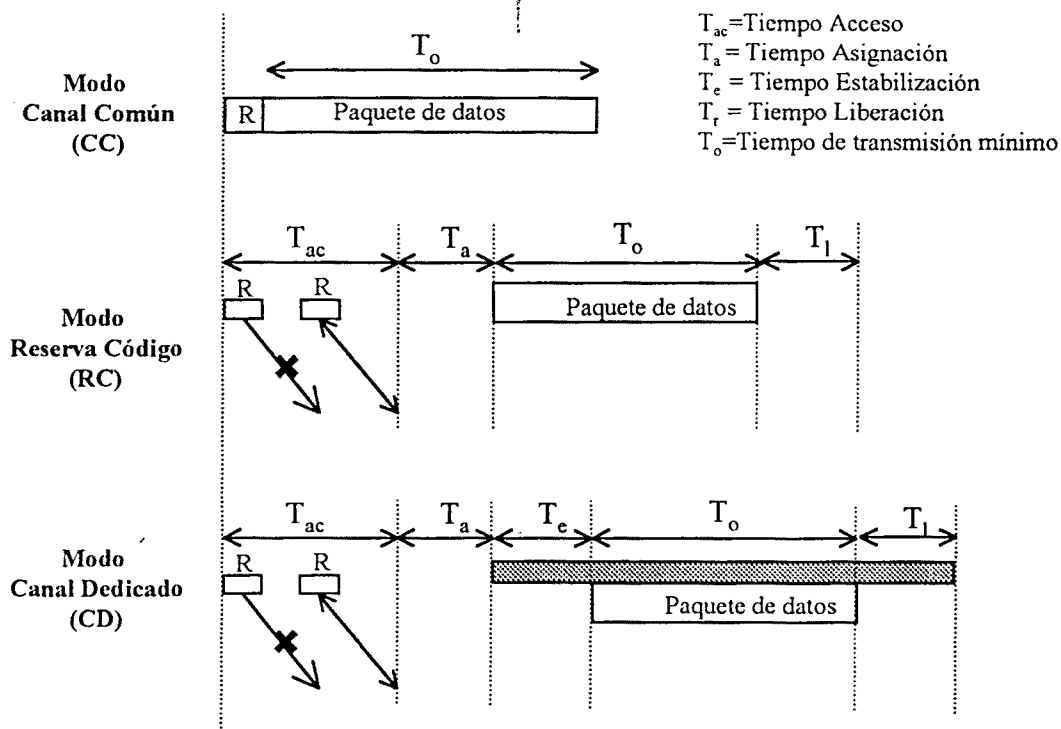


Figura 3-26. Representación de los tres mecanismos de acceso considerados.

El tiempo mínimo T_o de transmisión de un paquete (véase su definición en la Figura 3-26) puede calcularse a partir del conocimiento del factor de ensanchamiento SF_d , la tasa de codificación r y la velocidad de transmisión en chips/s. A partir de la longitud del paquete, representada por L (bytes), se tiene que el número de bits después de realizar la codificación de canal es de

$$\frac{L \cdot 8}{r}$$

Por tanto, a partir de la velocidad de 4096 kchips/s considerada se obtiene la siguiente expresión para el tiempo T_o .

$$T_o = \frac{L \cdot 8}{4096 \cdot r} SF_p \text{ (ms)} \quad (3-7)$$

La expresión (3-7) es válida para los modos CD y RC. En el caso particular del modo CC se deben añadir los bits correspondientes a la cabecera (véase sección 3.5.5) de forma que se tiene

$$T_o^{RACH} = \frac{(19 + L \cdot 8)}{4096 \cdot r} SF_p \text{ (ms)} \quad (3-8)$$

El tiempo T_o se utiliza como factor de normalización de los resultados obtenidos. De esta forma, el retardo normalizado para cada uno de los tres modos se obtiene mediante

$$\frac{T_{CC}}{T_o}, \frac{T_{RC}}{T_o} \text{ y } \frac{T_{CD}}{T_o} \quad (3-9)$$

donde T_{CC} , T_{RC} y T_{CD} representan los valores del retardo medio experimentados por cada modo.

3.5.7.2. Modelado del canal.

Para tener en cuenta el aprovechamiento de la propagación multicamino mediante la utilización de un receptor RAKE coherente en la estación de base, así como el efecto de la codificación, hemos considerado como figura de mérito un valor umbral medio E_b/N_o para los diferentes servicios de voz y datos. Dicho valor umbral tiene en cuenta el efecto de los desvanecimientos rápidos y debe obtenerse para cada entorno mediante simulaciones de enlace. De esta forma el efecto aleatorio del canal queda reducido a considerar únicamente las variaciones lentas en la potencia recibida (shadowing) modeladas comúnmente mediante una variable aleatoria lognormal de media cero y desviación típica del orden de 4-8dB.

El control de potencia tiene como objetivo garantizar una relación E_b/N_o superior al umbral en todo momento. Se ha supuesto que el control de potencia es capaz de compensar parcialmente los desvanecimientos lentos. A efectos de caracterizar la distribución de potencia resultante, se ha tomado como referencia el estudio presentado en [Viterbi93] donde se plantea el modelado de las imperfecciones del control de potencia en lazo cerrado (CLPC) mediante una variable aleatoria lognormal con desviaciones inferiores a 2dBs. Análogamente, las prestaciones del control de potencia en lazo abierto (OLPC) también se han caracterizado mediante variables lognormales con desviaciones algo superiores.

3.5.7.3. Transmisión y detección de la información.

Como se ha comentado en el apartado anterior, se han considerado unos valores umbrales de (E_b/N_o) para determinar las prestaciones del sistema. Concretamente se ha definido: $(E_b/N_o)_d$ para datos, $(E_b/N_o)_v$ para los paquetes de voz y $(E_b/N_o)_r$ como umbral de detección en el canal RACH de una nueva ráfaga de acceso. Al considerar un sistema con dos clases de servicio distintas resulta necesario establecer la relación entre la potencia de transmisión aplicable a cada uno de ellos. La relación E_b/N_o

experimentada por el usuario i de voz y el usuario n de datos puede formularse en cada caso según las expresiones:

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_v^i = \frac{P_v^i \cdot G_p}{\sum_{j \neq i} P_v^j + \sum_m P_d^m} \quad (3-10)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_d^n = \frac{P_d^n \cdot G_p}{\sum_j P_v^j + \sum_{m \neq n} P_d^m} \quad (3-11)$$

donde P_v^j y P_d^m representan la potencia recibida del usuario j de voz y del usuario m de datos respectivamente. G_p^v es la ganancia de procesamiento conseguida en el servicio de voz y G_p^d la correspondiente al servicio de datos. Partiendo de la base que la potencia transmitida por los usuarios de un mismo servicio es idéntica, y despreciando la contribución en la interferencia global de un único usuario, se puede obtener la siguiente relación que relaciona los parámetros relevantes de cada servicio:

$$\frac{P_d \cdot G_p^d}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_d} = \frac{P_v \cdot G_p^v}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_v} \quad (3-12)$$

Fijada la velocidad en chips/s de la portadora y el tamaño útil de los mensajes, variar la ganancia de procesamiento repercute directamente en el tiempo de transmisión. Utilizando ganancias de procesamiento pequeñas, el retardo de transmisión disminuye pero a costa de aumentar la potencia transmitida para mantener las restricciones de QoS. Para una misma tasa de generación de mensajes, el nivel de interferencia medio producido es independiente de la ganancia de procesamiento utilizada, pero instantáneamente, y considerando la influencia sobre otros servicios soportados en la misma portadora, debe tenerse en cuenta la aparición de picos más elevados de potencia interferente.

Debido a que la transmisión de un paquete se realiza sobre varias tramas y que cada segmento puede experimentar condiciones de interferencia distintas, a efectos de simulación, hemos decidido la correcta o incorrecta recepción de un paquete en función de haber recibido una relación (E_b/N_0) superior al umbral durante un determinado porcentaje del tiempo de transmisión del paquete. Dicha suposición supone implícitamente el uso de técnicas de entrelazado en la transmisión del paquete. No se ha considerado el efecto de los mecanismos de retransmisión en los paquetes de información ya que los resultados obtenidos dependerían en gran manera de la técnica ARQ adoptada y de la partición en subbloques que debería aplicarse a los paquetes de datos. En los modos de reserva y canal dedicado, si

que ha sido necesaria la consideración de un mecanismo de retransmisión para compensar el problema de las ráfagas de acceso no detectadas.

Hemos supuesto que la estación de base utiliza un único código de preámbulo, posibilitando por tanto, 128 posibles accesos diferentes en una trama de 10 ms. Los códigos utilizados en el canal dedicado y en el modo RC se suponen independientes de los códigos de acceso.

3.5.7.4. Dimensionado del enlace ascendente.

La capacidad del enlace de subida corresponde a una única portadora BPSK a 4096 Mchips/s que permite establecer canales dedicados con velocidades brutas de 16kbps, con factores de ensanchamiento (SF) de 256, hasta 1024kbps, con SF=4. Las ráfagas de acceso al RACH pueden transmitirse en instantes múltiplos de 1.25ms dentro de una trama de 10ms. La estación base difunde información para que los móviles conozcan los códigos disponibles para efectuar el acceso aleatorio.

Si consideramos N_v usuarios de voz con factor de actividad α_v , ganancia de procesado G_p^v y relación de potencias entre el canal DPCCH y DPDCH dada por g_v , se puede estimar el máximo de usuarios de datos que el sistema puede soportar a partir de la siguiente expresión,

$$N_d^{max} \leq \frac{G_p^d}{(\alpha_d + g_d)} \left[\frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_d \exp\left(\frac{(\sigma\beta)^2}{2}\right)} - \frac{N_v(\alpha_v + g_v)}{G_p^v} \right] \quad (3-13)$$

donde α_d , G_p^d y g_v corresponden al tráfico de datos y $\exp(.)$ con $\beta=\ln 10/10$ tiene en cuenta el incremento de potencia necesaria debido a las imperfecciones del control de potencia modelado mediante una lognormal con desviación σ .

Dicha expresión no incluye la influencia de la interferencia de otras celdas ni el efecto de la sectorización, típica de entornos macrocelulares, porque nuestro objetivo es comparar los tres mecanismos de acceso sin considerar valores absolutos de las prestaciones del sistema.

3.5.7.5. Caracterización de las fuentes de tráfico

Las fuentes de datos se han modelado mediante un proceso de Bernouilli con probabilidad de generación calculada a partir de un parámetro, α , que indica la velocidad media en bits/s de la fuente respecto a una velocidad de 8kbps/s tomada como referencia. El valor de 8kbit/s es el flujo neto de

información que soporta un canal dedicado con un factor de ensanchamiento de 256 y una tasa de codificación de 1/2. Por tanto,

$$v_t = \alpha \cdot 8 \text{ kbits/s} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3-14)$$

Nótese que la relación entre α y α_d viene dada por la ganancia de procesamiento utilizada, concretamente se cumple

$$\alpha_d = \alpha \frac{SF}{256} \quad (3-15)$$

Se han considerado longitudes de paquetes desde 16 bytes hasta 512 bytes.

3.5.8. Resultados.

A continuación se exponen algunos de los resultados obtenidos así como la sensibilidad de los mismos en función de algunos de los parámetros fijados en el modelado del sistema.

3.5.8.1. Marco de operación

A efectos de definir un margen de operación, hemos supuesto que la relación E_b/N_o requerida para el servicio de voz y los servicios de datos es igual y de valor 7dB,

$$\left(\frac{E_b}{N_o} \right)_v = \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_d = 7dB \quad (3-16)$$

El valor de 7dB es un valor típico utilizado en estudios sobre capacidades del sistema CDMA convencional [Viterbi93]. Sin embargo, en un sistema CDMA de banda ancha, donde las mejoras introducidas por la explotación de la dispersión temporal pueden ser más significativas, son típicos valores del orden de 2-4dB [WCDMA]. No obstante, el suponer un valor de 7dB no introduce ninguna pérdida de generalidad para poder comparar los diferentes mecanismos estudiados y además, facilita el manejo de simulaciones menos costosas al reducir el número de usuarios activos en el sistema. En la misma línea, y en aras a considerar la interferencia originada por usuarios conectados a través de otras estaciones de base, hemos aumentado la E_b/N_o requerida de 7 dB por un factor proporcional al valor medio de dicha interferencia, de forma que la condición que realmente se evalúa para decidir la correcta recepción de un paquete es la siguiente

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) \geq \left(\frac{E_b}{N_o}\right)(1+f) \quad (3-17)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 4, hemos considerado un valor de $f=0.54$ correspondiente a trasposos soft con combinación por selección en un entorno macrocelular caracterizado por una profundidad de los desvanecimientos $\sigma=8\text{dB}$. La expresión (3-17) se aplica indistintamente a los servicios de voz y datos.

Análogamente, se ha considerado la misma tasa de codificación r en ambos servicios. Particularmente se ha tomado un valor de $r=0.5$. De esta forma, la expresión (3-12) se reduce a

$$P_v \cdot SF_v = P_d \cdot SF_d \quad (3-18)$$

donde se ha hecho uso de la igualdad (3-16) y de la relación existente entre el factor de ensanchamiento SF y la ganancia de procesamiento G_p dada por

$$G_p = \frac{SF}{r} \quad (3-19)$$

donde r es la tasa de codificación.

Para el servicio de voz, el factor de ensanchamiento SF se ha considerado de 256 y la proporción de potencias entre los canales físicos PDDCH y PDCCH igual a de 3 dB[WCDMA], es decir,

$$g_v = \frac{P_{PDCCH}}{P_{PDDCH}} = 0.5 \quad (3-20)$$

Para el servicio de datos, el factor SF es variable entre 32 y 256 y, teniendo en cuenta (3-18), la proporción de potencias g_d se ha calculado según

$$g_d = \frac{1}{1 + \frac{256}{SF_d}} \quad (3-21)$$

donde puede comprobarse que para valores $SF_d=256$ se obtiene la misma proporción considerada en el servicio de voz.

En la Tabla 3-7 se muestran los valores tomados por defecto en los diferentes parámetros considerados en el análisis que se presenta a continuación.

Tabla 3-7. Parámetros utilizados como referencia en las simulaciones.

Usuarios voz	20
Usuarios datos	50
Códigos acceso aleatorio	16*8
SF	128
Error CLPC	0.5 dB
Error OLPC	2.5 dB
T_e	10 ms
1T_a	10 ms
T_1	20 ms
N_d^{max}	50
P_{RACH}	10*Tasa de generación de paquetes

¹ Dicho tiempo de asignación no incluye el posible retardo adicional generado por la limitación del número de recursos.

En la Figura 3-27 y Figura 3-28 se muestra el comportamiento del caudal eficaz y del retardo normalizado en función de la tasa de generación de tráfico para la configuración descrita en la Tabla 3-7. La Figura 3-27 corresponde a mensajes de longitud $L=32$ bytes mientras que en la Figura 3-28 la longitud considerada es de $L=256$ bytes. Podemos observar que en ambos casos, para tasas menores a $\alpha=0.5$, el caudal eficaz soportado en el modo CD es superior a los modos CC y RC. Respecto al retardo, para las mismas tasas, el modo CC es el que presenta mejores prestaciones para longitudes de 32 bytes. En cambio, para longitudes $L=256$ bytes, el modo CC presenta un retardo ligeramente superior a los restantes. Particularmente, tal como se aprecia en la Figura 3-28, el retardo experimentado en modo CD es el más reducido para tasas entre 0.2 y 0.6.

Para el modo CD, en el caso de aumentar la carga ofrecida, el caudal eficaz se reduce drásticamente y el retardo se dispara. Dicho efecto se debe al excesivo nivel de interferencia presente en el sistema generado por la existencia de demasiados canales dedicados. Es importante observar también que la carga a partir de la cual empiezan a deteriorarse las prestaciones depende de la longitud de los mensajes. En los modos RC y CC la degradación con el aumento de carga ofrecida es más gradual debido al denominado efecto captura.

No obstante, para los tres modos estudiados, la región de funcionamiento que vamos a caracterizar corresponde al margen de tasas inferiores a 0.5. En dicho margen es donde consideramos realmente interesante abordar el compromiso descrito en la sección 3.5.6. Evidentemente, para tasas superiores,

los modos CC y RC no son apropiados por el bajo caudal presentado, y la evolución del modo CD simplemente está reflejando la limitación de la capacidad del sistema, aunque podría aumentarse el caudal a costa de limitar el número de canales dedicados simultáneos, tal como se verá en la sección 3.5.8.7.

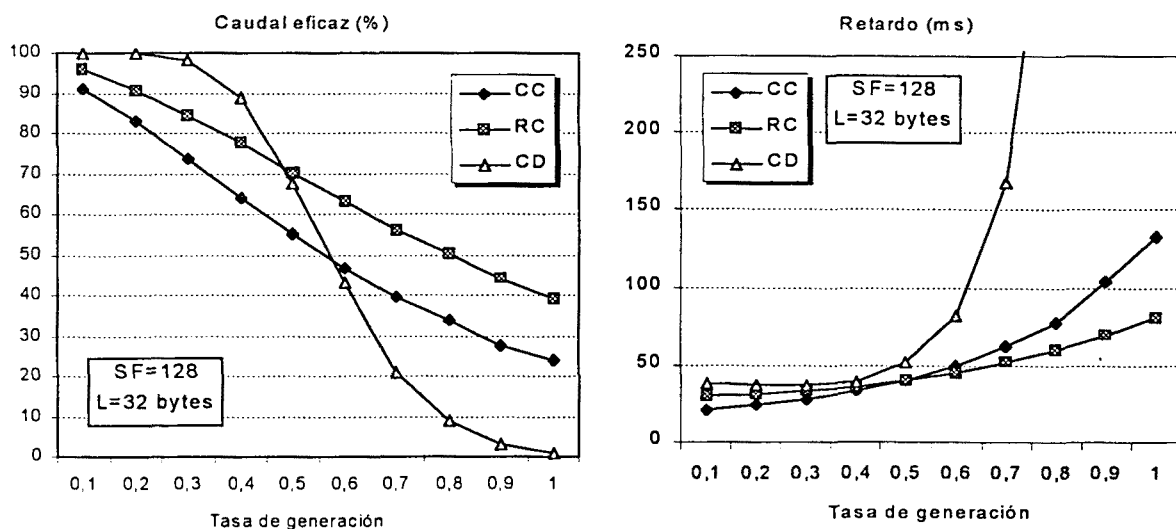


Figura 3-27. Caudal eficaz y retardo en función de la tasa de generación de paquetes (α_d). Paquetes de 32 bytes y SF=128.

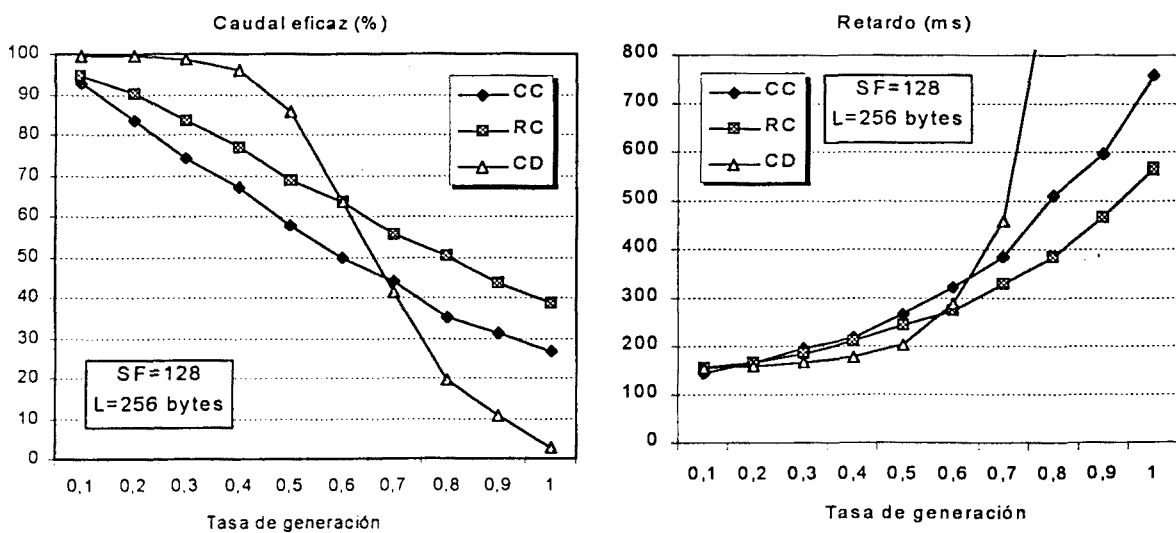


Figura 3-28. Caudal eficaz y retardo en función de la tasa de generación de paquetes (α_d). Paquetes de 256 bytes y SF=128.

Además, observando la probabilidad de desbordamiento del tráfico de voz en función de la carga de datos, véase Figura 3-29, podemos ver que para tasas superiores a 0.3-0.4 los valores se disparan debido al excesivo nivel de interferencia presente en el sistema.

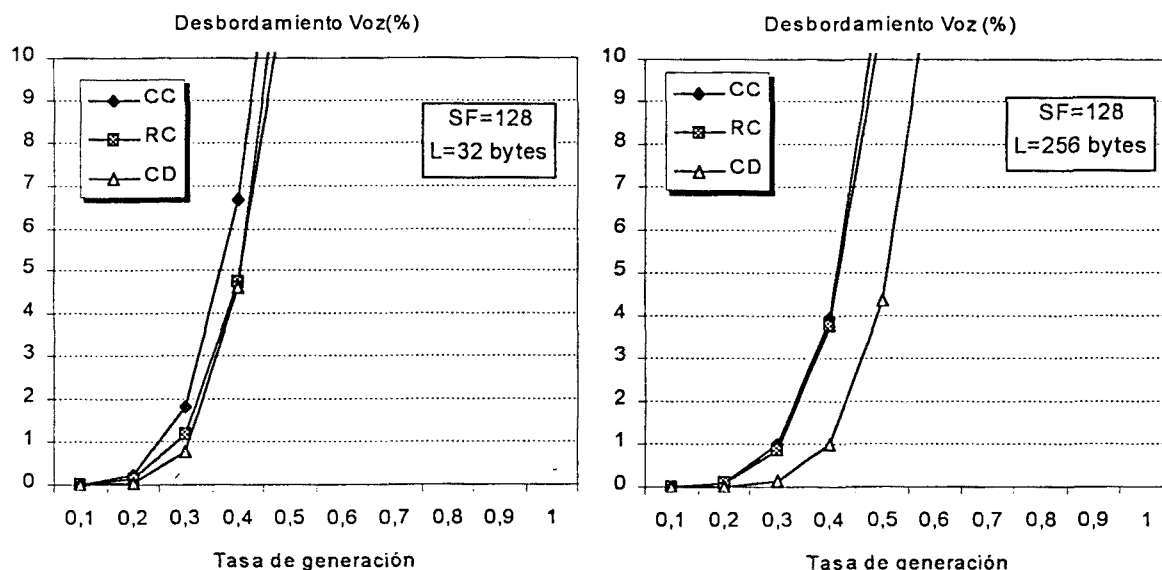


Figura 3-29. Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz en función de la carga de datos.

Así pues, el margen de operación considerado en el presente estudio, dependiente de las condiciones de carga fijadas en la Tabla 3-7, consiste en tasas de generación de mensajes $\alpha < 0.5$, lo que supone una tasa efectiva por usuario menor de 4kbit/s independientemente de la longitud de los paquetes.

3.5.8.2. Efecto de la longitud de los paquetes.

En la Figura 3-30 se representa el caudal eficaz para los tres modos de operación en función de la longitud de los paquetes. Para tasas reducidas, con una velocidad efectiva de transmisión de 800 bit/s/usuario, el modo de transmisión por canal común CC experimenta una reducción del caudal eficaz inferior al 10% en todos los casos, Dicha reducción, no apreciable en los modos RC y CD, es debida mayoritariamente a la colisión en código. El tráfico perdido en el caso de utilizar el modo RC es menor ya que se reducen el efecto de las colisiones y, en el caso de recurrir a la asignación de un canal dedicado, podemos observar como se cursa prácticamente la totalidad del tráfico ofrecido. Si se consideran tasas de generación de 2.4 kbits/s por usuario, podemos observar que las diferencias entre el tráfico cursado por los tres modos se acentúan considerablemente. El motivo radica en las prestaciones del control de potencia en lazo abierto y en lazo cerrado utilizado en los modos CC-RC y

CD respectivamente. Además, el modo CD empieza a presentar una ligera disminución de caudal para longitudes de mensaje cortas.

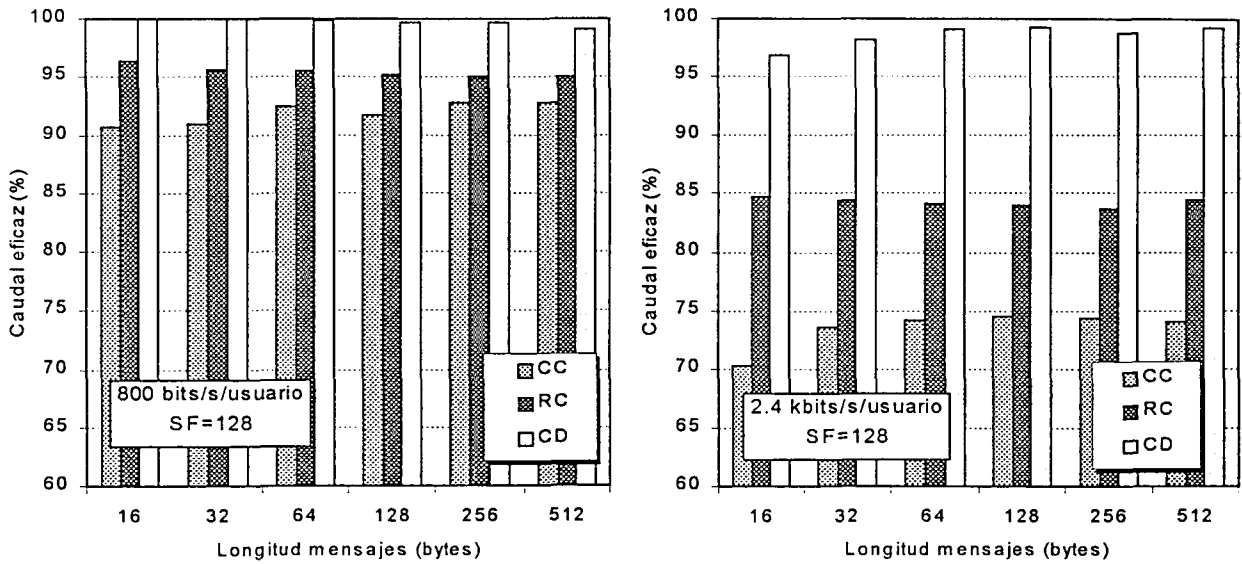


Figura 3-30. Comportamiento del caudal eficaz

Sin embargo, en términos de retardo normalizado, el modo CC presenta los menores retardos de transmisión para tasas reducidas y longitudes de mensajes cortas. Tal como podemos observar en la Figura 3-31, para tasas de 800 bits/s/usuario, el retardo del modo CC es siempre menor que el retardo experimentado en los modos RC y CD. Para mensajes de 16 bytes las diferencias son de un factor 2.2 respecto al modo CD y de un factor 1.6 respecto al modo RC. Nótese que el valor correspondiente a los modos RC y CD puede aproximarse, para tasas donde el caudal se mantiene prácticamente al 100%, mediante las expresiones

$$\frac{T_{RC}}{T_o} \approx \frac{T_o + T_a + T_{ac}}{T_o} \quad (3-22)$$

$$\frac{T_{CD}}{T_o} \approx \frac{T_o + T_a + T_{ac} + T_e}{T_o} \quad (3-23)$$

donde T_o , T_a , T_e y T_{ac} son los retardos representados en la Figura 3-26.

Conforme la longitud aumenta las diferencias tienden prácticamente a desaparecer entre los tres modos. Es interesante observar que la mejora en las prestaciones de retardo para longitudes grandes no es solo propia del modo CD, sino que los modos RC y CC también experimentan dicha tendencia. El comportamiento del modo CC, aunque a priori pueda parecer inconsistente con el planteamiento de

que la transmisión por canal común resulta más apropiada para longitudes de paquetes cortas, se debe al hecho que la velocidad de transmisión por usuario se mantiene constante independientemente de la longitud del paquete, lo que en media provoca que el porcentaje de paquetes recibidos erróneamente sea prácticamente el mismo. El ligero incremento para mensajes de 16 bytes se debe principalmente al mayor peso de la cabecera de la ráfaga de acceso y a la ligera reducción experimentada de caudal eficaz. Para tasas de 2.4kbits/s, las prestaciones del modo CC empeoran uniformemente para las diferentes longitudes consideradas. El modo RC también empeora en general para las diferentes longitudes. Sin embargo, el efecto de reducción del número de colisiones empieza a ser relevante respecto al *overhead* introducido para longitudes superiores a 128 bytes, donde los retardos pasan a ser mejores que los experimentados en CC. Respecto al modo CD, el retardo se mantiene bastante insensible al aumento de carga, llegando incluso a mostrar mejores prestaciones para mensajes cortos. Dicha mejora se debe básicamente al aumento del número de paquetes que se transmiten durante el transcurso de la conexión dedicada. Por tanto, para longitudes superiores a 64 bytes y tasas de 2.4 bits/s, el modo por canal dedicado ofrece mejores prestaciones tanto en caudal como en retardo que el modo CC.

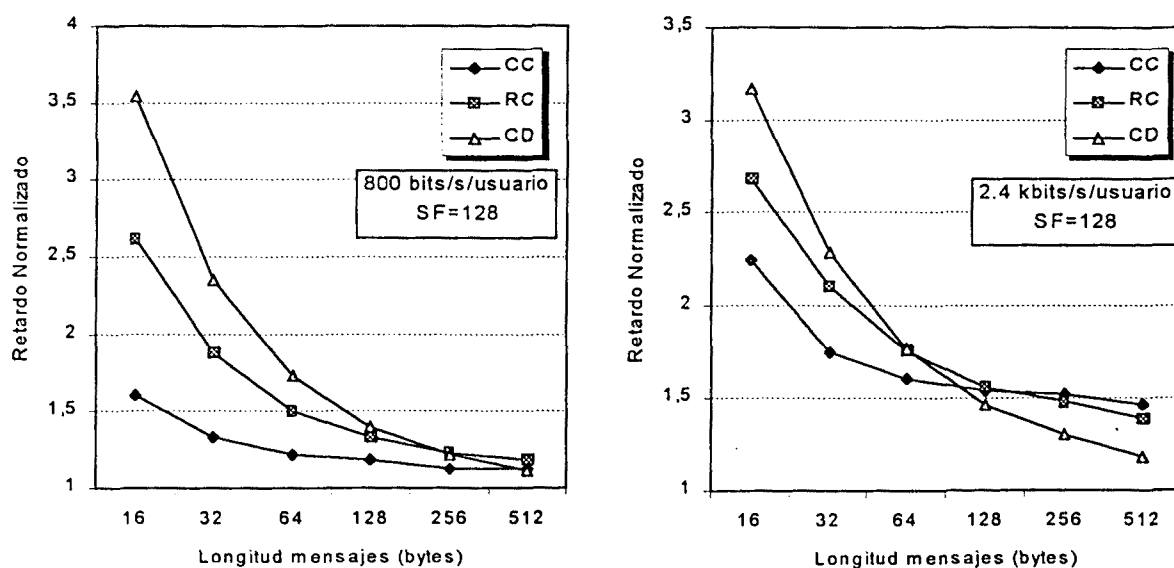


Figura 3-31. Evolución del retardo normalizado

En la Figura 3-32 se muestra el impacto de la interferencia debida a la transmisión de datos en el servicio de voz cursado en la misma portadora. Para tasas de 800 bits/s la probabilidad de desbordamiento se mantiene inferior al 0.01% para los tres modos. Para tasas de 2.4 kbits/s, la probabilidad de desbordamiento aumenta a valores típicos del orden del 1-2%. El modo CD es el que presenta mejores prestaciones debido a la gestión más eficiente de la potencia.

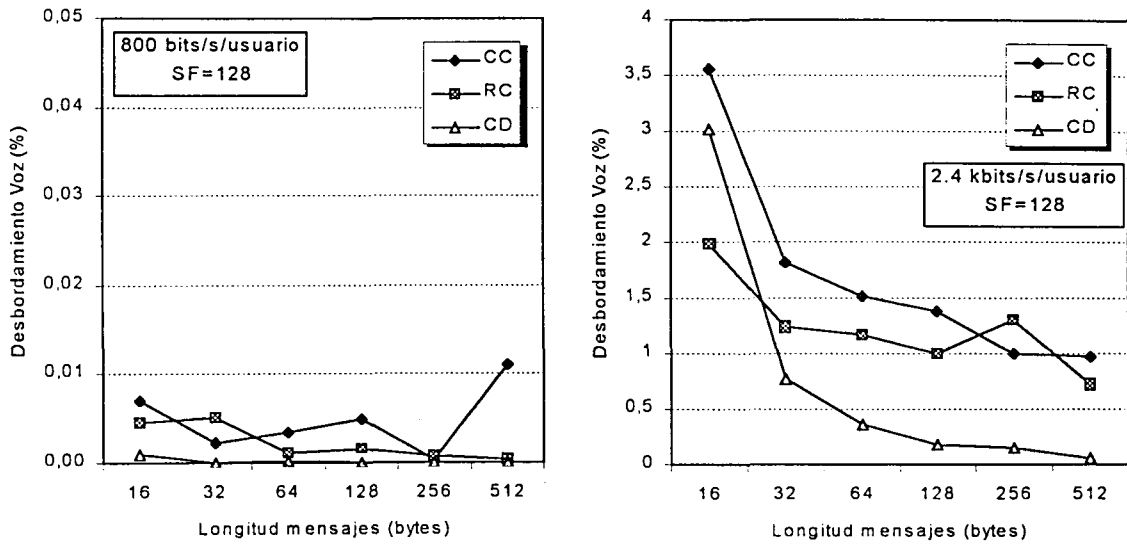


Figura 3-32. Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz

Finalmente, para validar la tendencia constatada en el aumento de la tasa de generación, en la Figura 3-33 se presentan resultados correspondientes a tasas de 4kbits/s por usuario. La disminución de caudal para los modos CC y RC se produce de forma más gradual, como ya se observó en la Figura 3-27 y Figura 3-28 , mientras que las prestaciones del modo CD se reducen drásticamente, llegando incluso a presentar valores de caudal más reducidos que los modos CC y RC para longitudes de mensajes inferiores a 64 bytes. El comportamiento en retardo refleja que, para longitudes menores de 64 bytes, el modo RC pasa a ser la mejor alternativa, mientras que para longitudes superiores, el modo CD es el que se comporta más eficientemente.

En la Figura 3-34 se presentan algunos parámetros que ayudan a interpretar los resultados comentados en el párrafo anterior en términos de caudal efectivo y retardo normalizado. El valor de potencia representado en la Figura 3-34 está normalizado respecto a la potencia recibida en el canal PDDCH de un usuario de voz con SF=256. Podemos observar que la evolución de la potencia normalizada coincide básicamente con la característica de caudal eficaz presentada en la Figura 3-33. Sin embargo, la diferencia en caudal efectivo entre los modos CC y RC que presentan el mismo nivel de potencia, es debida a las colisiones en código propias del acceso CC. Por otro lado, la diferencia de potencias entre los modos CC y RC para longitudes de mensajes cortas se debe al aumento del número de transmisiones múltiples durante una única reserva de código que reducen el *overhead* debido a la señalización de reserva. El número de asignaciones múltiples se encuentra representado, junto con el número de usuarios simultáneos, en la Figura 3-34. Podemos ver que, en media, se transmiten 3,5 paquetes de 16 bytes en una única reserva efectuada o, equivalentemente para el modo CD, en un único establecimiento de canal dedicado.

El número de usuarios simultáneos en los modos CD y RC, en el caso de mensajes cortos, aumenta debido al *overhead* de señalización en el RACH y los correspondientes tiempos de asignación, estabilización y liberación. Sin embargo, es importante observar que, aunque el número de usuarios simultáneos en ambos modos es similar, los niveles de potencia normalizada global difieren. El motivo radica en la potencia adicional introducida en el modo CD durante los tiempos de estabilización y liberación que, en caso de mensajes cortos, no compensa la diferencia en las prestaciones del control de potencia favorables al modo CD.

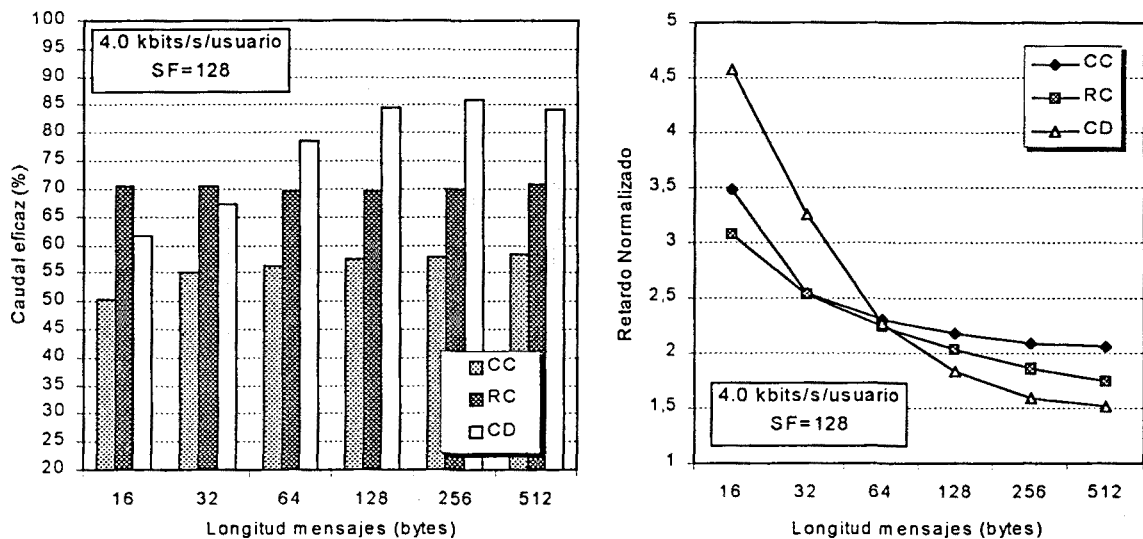


Figura 3-33. Caudal efectivo y retardo normalizado para tasas de 4.0kbits/s.

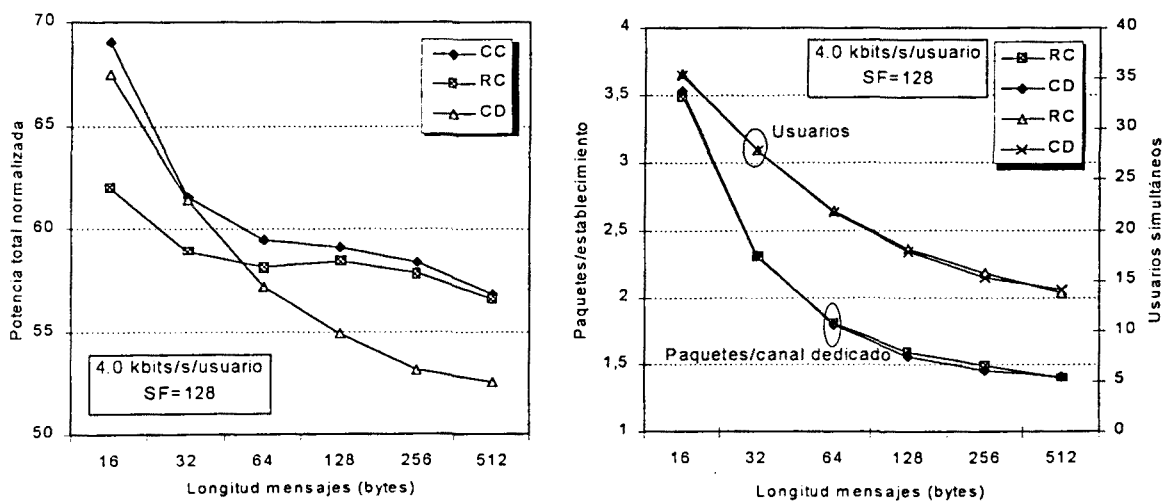


Figura 3-34. Potencia normalizada, número de usuarios simultáneos y paquetes transmitidos por cada establecimiento de un canal dedicado.

3.5.8.3. Sensibilidad a la ganancia de procesado.

Hemos visto que las prestaciones de los modos de transmisión analizados dependen de la longitud del mensaje de datos. Por tanto, parece obvio que dicha dependencia pueda acentuarse variando la ganancia de procesado ya que, en términos de tiempo de transmisión, los mensajes cortos van a serlo más con factores SF bajos, y opuestamente, los mensajes largos con ganancias de procesado altas van a ocupar más tiempo el canal de transmisión.

En la Figura 3-35 se representa la dependencia del caudal eficaz con el factor de ensanchamiento considerado y en la Figura 3-36 podemos ver su efecto sobre el retardo normalizado.

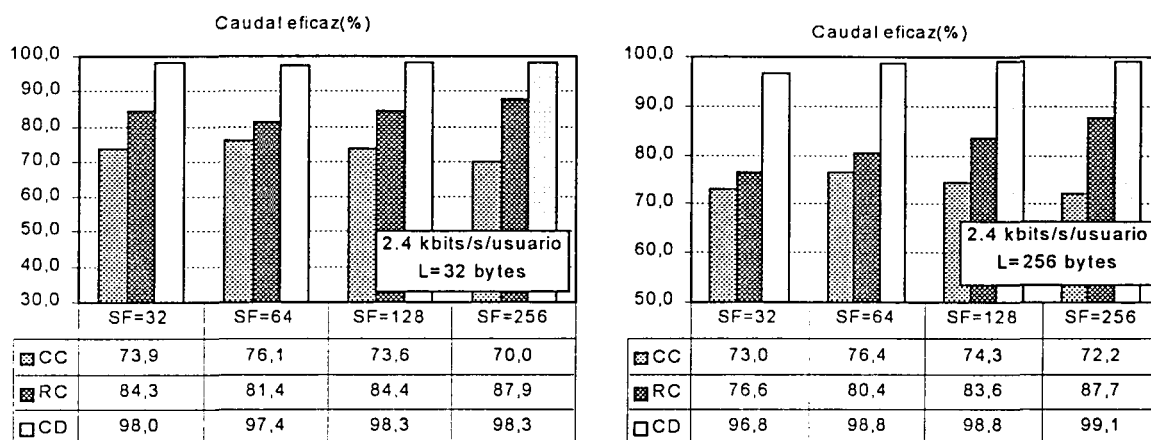


Figura 3-35. Dependencia del caudal con la ganancia de procesado.

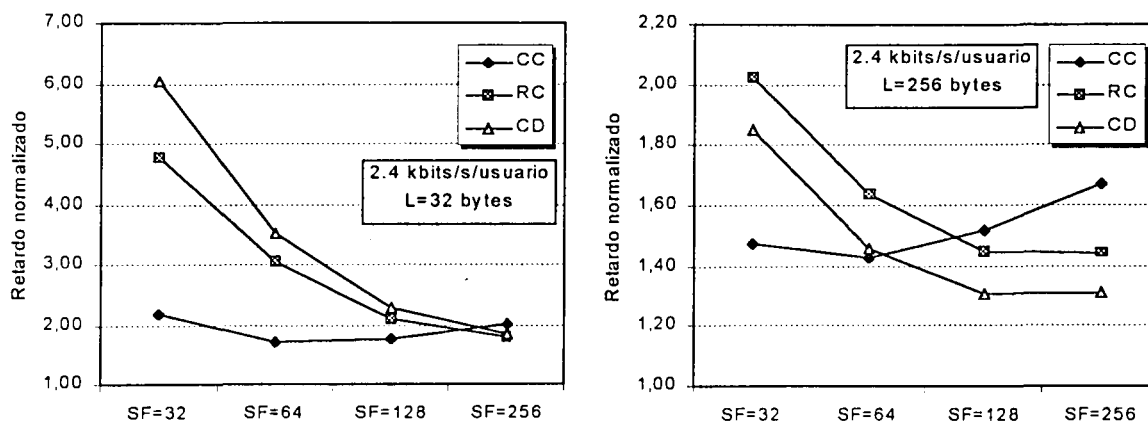


Figura 3-36. Dependencia del retardo normalizado con la ganancia de procesado.

Básicamente, los aspectos que determinan la dependencia del caudal con la ganancia de procesado para los modos RC y CD son:

- Al aumentar la ganancia de procesado, el tiempo de transmisión mínimo del paquete aumenta. Con ello, aumenta la probabilidad de que se transmitan más paquetes en una única conexión o reserva, reduciéndose por tanto la interferencia asociada a la señalización.
- Por otro lado, el aumento del tiempo de transmisión conlleva un aumento de la interferencia asociada al canal PDCCH que se transmite durante toda la duración del paquete de datos en modo RC y adicionalmente, en el modo CD, durante el tiempo de establecimiento y liberación.
- El aumento de la ganancia de procesado conlleva una reducción de la varianza de la potencia global en el sistema ya que en su cómputo intervienen más usuarios con potencia de transmisión menor.

El mayor o menor peso que pueden tener los tres factores en función de la longitud del paquete y de la tasa de generación condiciona el valor del caudal efectivo. En la Figura 3-37 podemos observar la dependencia de la potencia y del número de paquetes por canal dedicado en función de la ganancia de procesado. Volviendo a los resultados representados en la Figura 3-35, para longitudes de paquete de 256 bytes, la tendencia de los modos CD y RC presenta un ligero aumento con la ganancia de procesado, siendo más apreciable para el modo RC. Por tanto, en estos casos, la reducción de la varianza de la interferencia y el aumento de paquetes por conexión tienen mayor peso que el aumento en media de la interferencia global. Para el caso de paquetes de 32 bytes, podemos apreciar para ambos modos un ligero deterioro del caudal al pasar de SF=32 a SF=64, y una tendencia positiva para factores de ensanchado mayores.

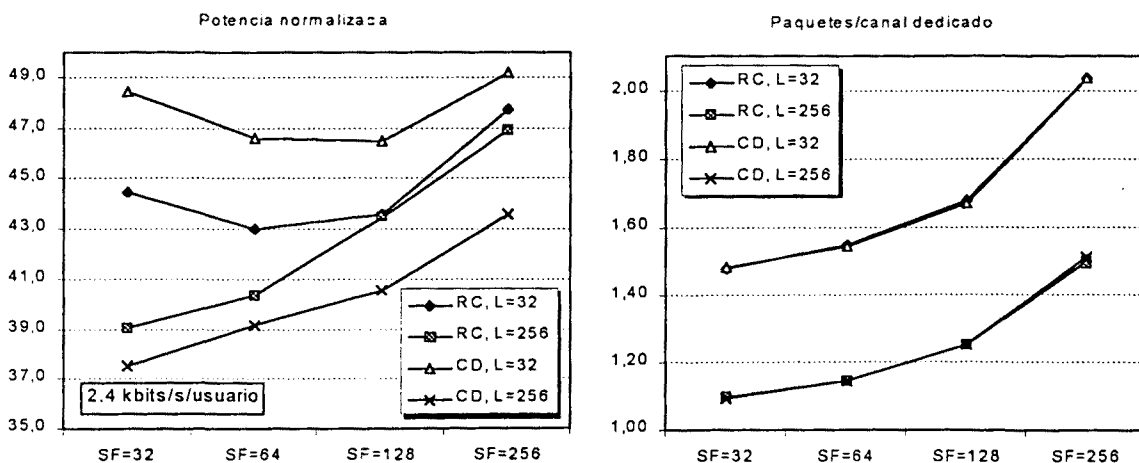


Figura 3-37. Evolución de la potencia normalizada y del número de paquetes por canal

Respecto al comportamiento del caudal eficaz en el modo CC, podemos observar en la Figura 3-35 que, para ambas longitudes de paquete, el caudal aumenta al pasar de SF=32 a SF=64 para

posteriormente decrementarse paulatinamente. La razón estriba en que el modo CC es el único que puede experimentar colisiones por código. Por tanto, reducir la ganancia de procesado a costa de aumentar el tiempo de transmisión conlleva un incremento de las situaciones en que transmisiones de diferentes usuarios se solapan en tiempo. Dicho efecto se ilustra en la Figura 3-39 y se comenta más detalladamente en la argumentación siguiente sobre el comportamiento del retardo.

De los valores proporcionados en la Figura 3-36, podemos observar que el retardo normalizado decrece uniformemente conforme aumenta la ganancia de procesado para los modos RC y CD. Dicho comportamiento se debe principalmente, al margen de la tendencia positiva experimentada por el caudal para ganancias superiores a SF=64, a la reducción del porcentaje de *overhead* conforme el tamaño de transmisión del paquete aumenta. En el caso del modo CC, la tendencia es completamente diferente, incrementándose el retardo normalizado conforme aumenta la ganancia de procesado. En la Figura 3-38 podemos apreciar la evolución de dicho retardo para las diferentes longitudes de paquete analizadas. Particularmente se presentan los resultados correspondientes al modo CC y al modo CD, omitiéndose los resultados del modo RC por presentar una dependencia similar al modo CD, tal como hemos comentado anteriormente.

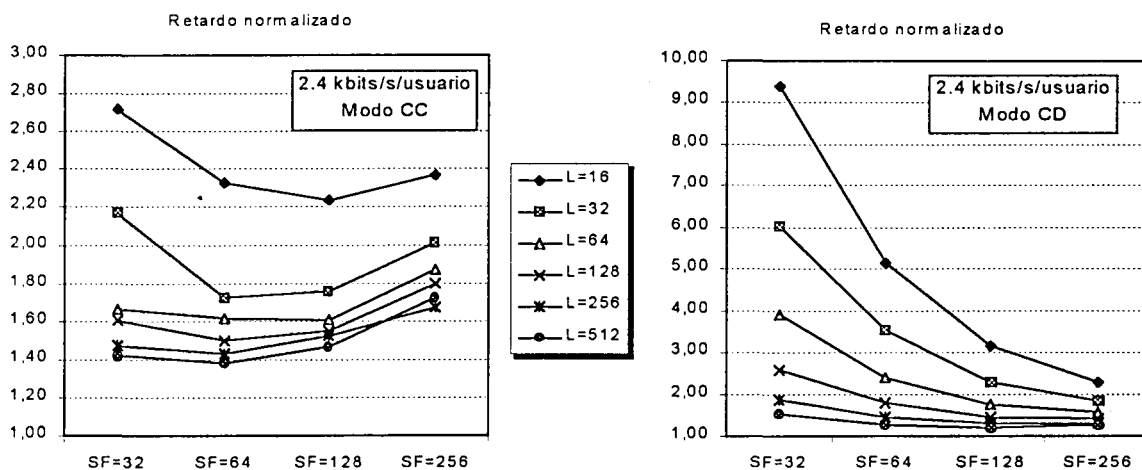


Figura 3-38. Comportamiento del retardo normalizado para los modos CC y CD.

El comportamiento ‘anormal’ del retardo en el modo CC se debe al aumento de las colisiones en código. En la Figura 3-39 se representa el porcentaje de colisiones experimentadas en el sistema en función de la longitud del mensaje y de la ganancia del procesado. Para una determinada longitud L, aumentar la ganancia se traduce en un aumento de colisiones y la importancia de dichas colisiones es tanto mayor cuanto menor sea la longitud del mensaje. Aunque aparentemente pueda resultar contradictorio, la explicación estriba en que, si se mantiene la tasa media por usuario, en el caso de mensajes de longitud corta, la generación de mensajes es más frecuente y por tanto, la utilización de

recursos extra debidos a la cabecera añadida en cada mensaje es más importante y las posibilidades de colisión aumentan. En caso de que los mensajes sean *suficientemente* largos, el efecto de la cabecera se reduce y el porcentaje de colisiones, para una misma ganancia de procesamiento, se mantiene uniforme. En la representación en términos de la longitud ilustrada en la Figura 3-39 se observa este comportamiento, donde el calificativo *suficientemente* podría aplicarse a longitudes superiores a 64 bytes.

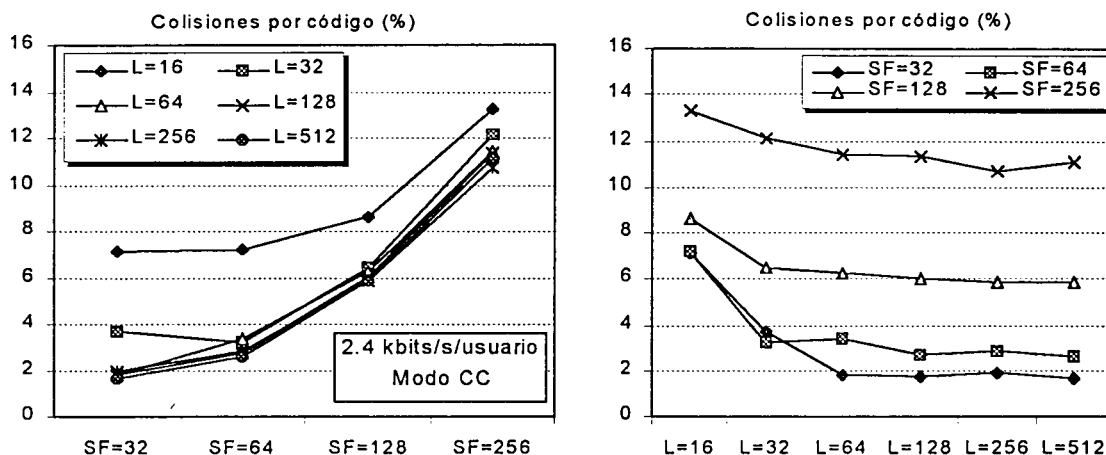


Figura 3-39. El aumento de colisiones por código para ganancias de procesamiento altas produce un deterioro del retardo para transmisión en modo CC.

Finalmente, es importante no olvidar la influencia que puede tener la elección de un factor de ensanchamiento SF del servicio de datos en la calidad ofrecida en el servicio de voz. Desde este punto de vista, tal como puede observarse en la Figura 3-40, la elección de ganancias de procesamiento reducidas conduce a probabilidades de desbordamiento elevadas y viceversa.

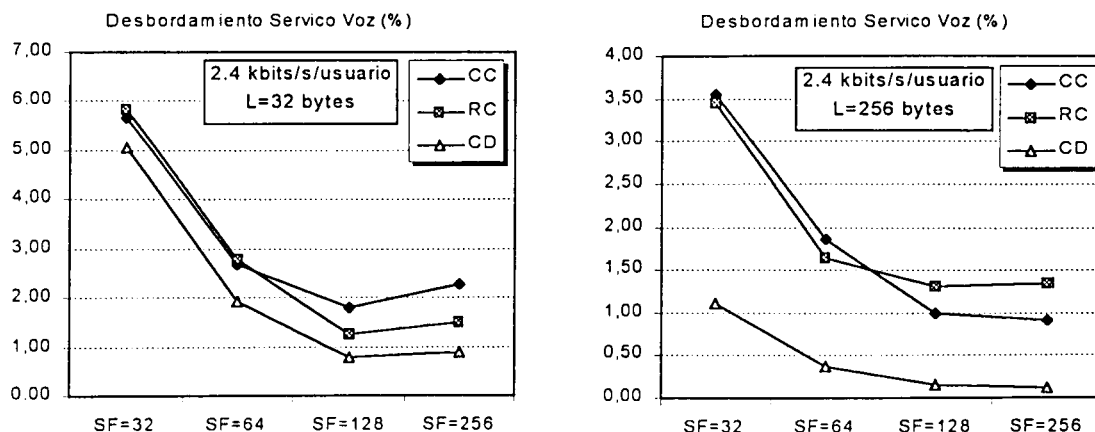


Figura 3-40. Efecto de la ganancia de procesamiento de los modos por paquetes sobre el servicio de voz.

3.5.8.4. Sensibilidad a las prestaciones del control de potencia.

Los resultados presentados en las secciones anteriores consideran una desviación típica respecto al valor nominal de potencia de 0.5 dB debido a las imperfecciones del control de potencia en lazo cerrado (CLPC). En caso de control de potencia en lazo abierto (OLPC) se ha considerado una desviación típica de 2.5 dB. En la Figura 3-41 y Figura 3-42 se muestra la sensibilidad a las imperfecciones del control de potencia de los resultados obtenidos. Tal como puede observarse, las figuras están divididas en cuatro zonas en función de las prestaciones conseguidas en caso de utilizar CLPC. Dentro de cada zona, las prestaciones del OLPC se caracterizan aumentando de 0 a 2 dB la desviación típica correspondiente. En el caso de mensajes de 32 bytes (véase la Figura 3-41), el modo CC sigue ofreciendo mejores prestaciones en términos de retardo. Lógicamente, las mejoras se acentúan conforme la diferencia entre las prestaciones de los mecanismos CLPC y OLPC se reducen. Por otro lado, es interesante observar que empeorando las prestaciones de ambos controles de potencia, pero manteniendo constante la diferencia entre ellos, el modo de acceso por canal dedicado CD resulta más perjudicado.

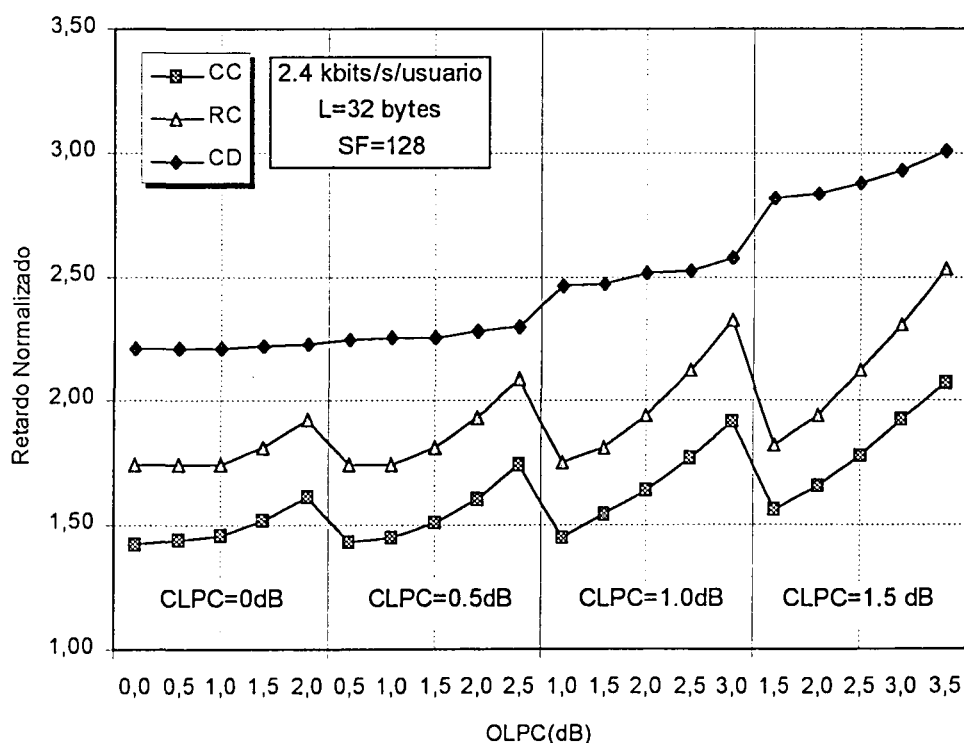


Figura 3-41. Dependencia de los resultados obtenidos con las prestaciones del control de potencia.

El mismo comportamiento puede observarse en la Figura 3-42 para mensajes de 256 bytes. Tal como habíamos constatado en la sección 3.5.8.2, las prestaciones del modo CD y RC mejoraban las

conseguidas por el modo CC para mensajes de 256 bytes. No obstante, para dicha longitud, las prestaciones del control de potencia pueden conducir a un cambio significativo del comportamiento de los diferentes modos de transmisión. Evidentemente, en caso de que los mecanismos de control de potencia ofrecieran la misma resolución, la existencia del canal DPCCH no tendría sentido y la probabilidad de pérdida por exceso de interferencia convergería para los tres modos de acceso. Bajo dicho planteamiento, el modo RC que, adicionalmente elimina las colisiones por código, resultaría el más apropiado para dichas longitudes de paquetes. Para longitudes menores dependería básicamente del tiempo de asignación fijo necesario, tal como veremos en la siguiente sección.

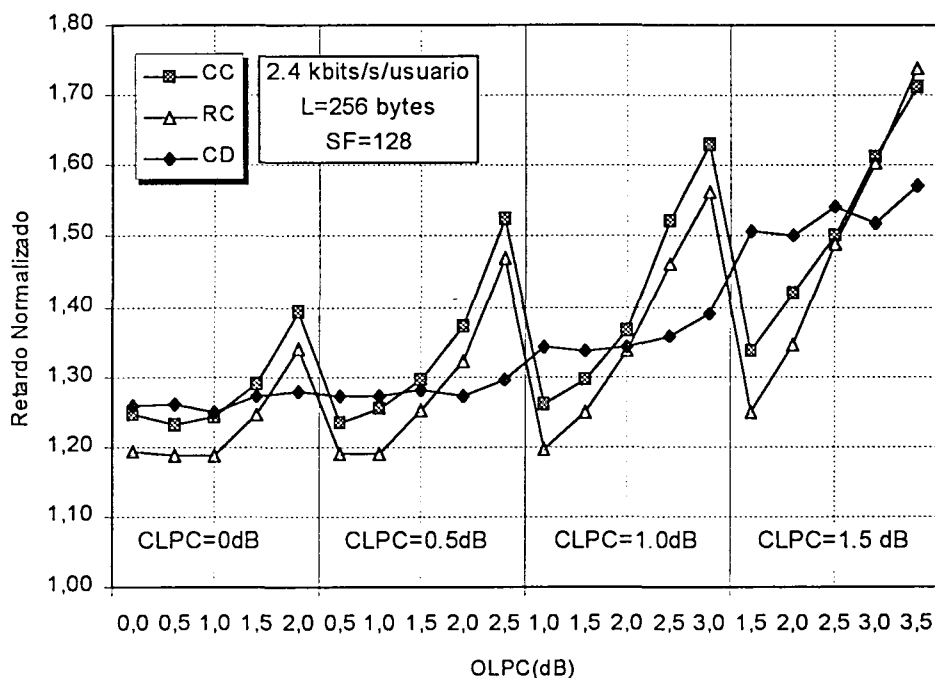


Figura 3-42. Dependencia de los resultados obtenidos con las prestaciones del control de potencia.

3.5.8.5. Sensibilidad a los tiempos de estabilización, asignación y liberación

En todos los resultados presentados se han considerado como referencia un tiempo de asignación T_a de 10 ms para los modos RC y CD y, adicionalmente para el modo CD, un tiempo de estabilización T_e del canal dedicado de 10 ms. Igualmente, el tiempo de liberación T_l de la reserva de código o del canal dedicado, se ha considerado de 20ms.

En la Figura 3-43 se representa el efecto del tiempo T_a+T_e necesario en el establecimiento del canal dedicado. Aumentar el retardo de establecimiento comporta un incremento del retardo normalizado, especialmente para longitudes de paquete reducidas y tasas de generación elevadas. Así mismo, el caudal eficaz disminuye debido básicamente al incremento del nivel de interferencia en el sistema

ocasionado por la emisión del PDCCH durante el periodo de estabilización. Análogamente, en la Figura 3-44 se muestra el comportamiento del modo RC frente a la duración del tiempo de asignación de la reserva. Los resultados observados en términos de retardo son similares a los apuntados para el modo CD. Sin embargo, el caudal eficaz se mantiene aproximadamente constante con el aumento del tiempo de asignación ya que, en este caso, no se procede a la transmisión del canal PDCCH.

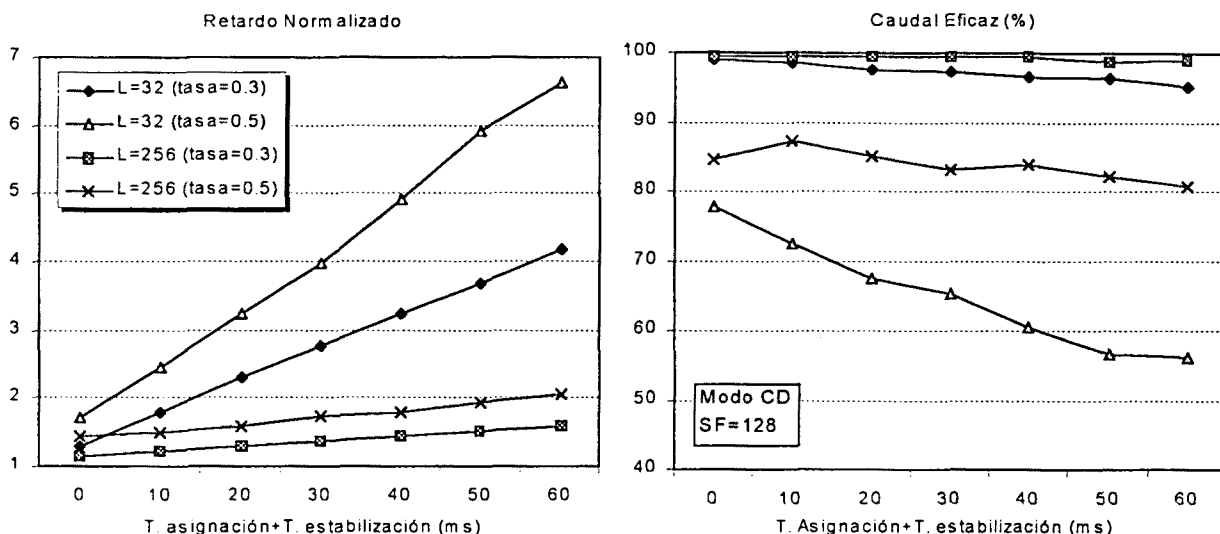


Figura 3-43. Efecto del tiempo necesario para el establecimiento del canal dedicado.

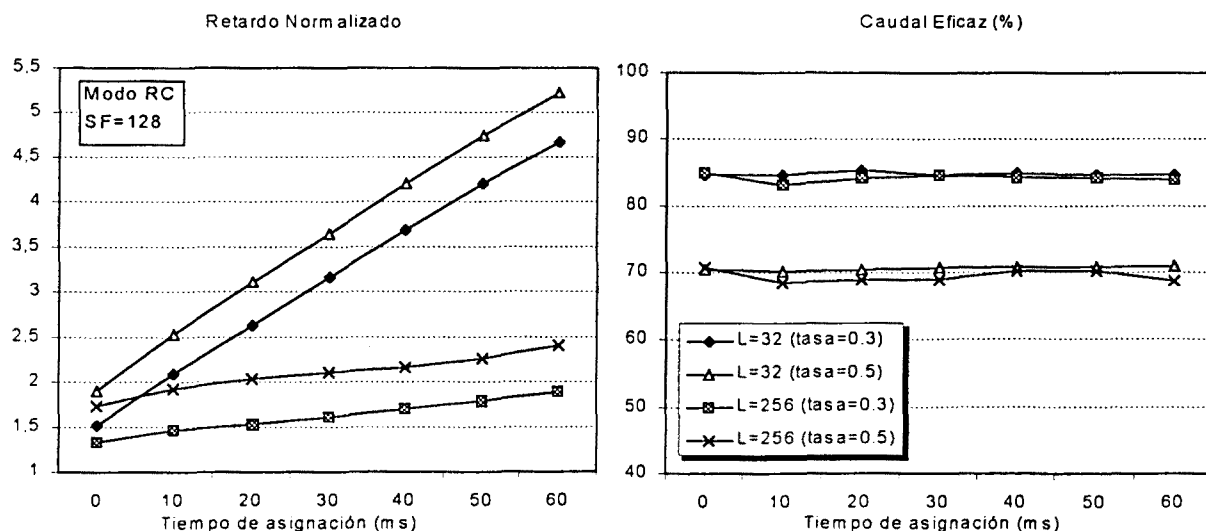


Figura 3-44. Efecto del tiempo de asignación de código en las prestaciones del modo RC.

En el supuesto de que el tiempo de asignación de un código en exclusiva dentro del modo RC fuera nulo, las ventajas sobre el método CC serían evidentes para cualquier longitud y tasa de generación de los paquetes, ya que, con retardos efectivos de transmisión similares, el modo RC evita las colisiones

por código. En la Figura 3-45 se proporcionan los mismos resultados expuestos anteriormente en la Figura 3-31, particularizados para el caso de $T_a=0$ en el modo RC.

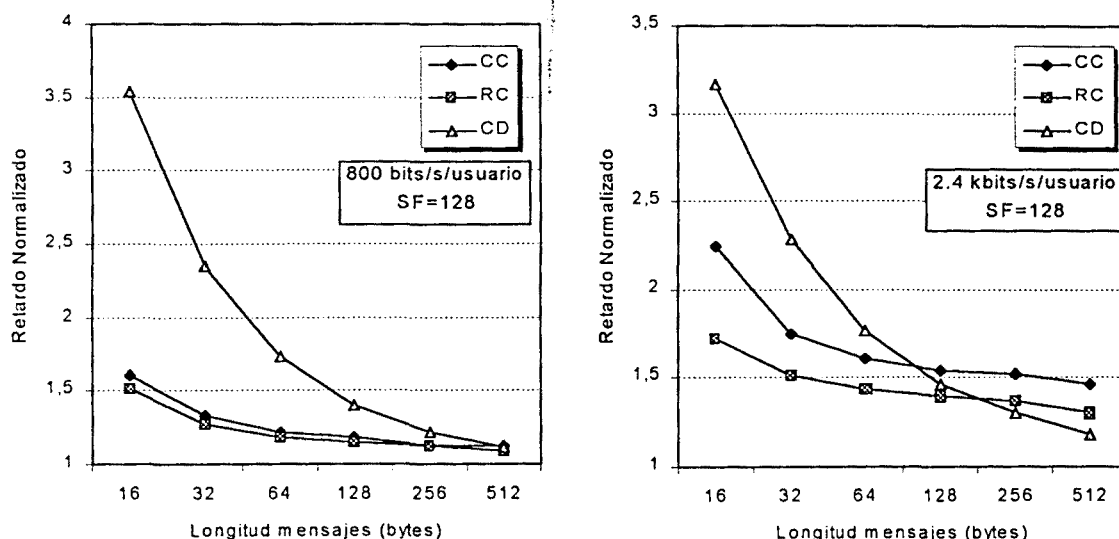


Figura 3-45. Comparación entre los modos de transmisión para $T_a=0$ s con el modo RC.

Respecto a la influencia del tiempo de liberación (T_1) los resultados presentan diferencias para ambos mecanismos. En el modo CD, un aumento del tiempo de liberación del canal presenta dos tendencias opuestas. Por un lado, tiempos de liberación elevados permiten la transferencia de múltiples mensajes de información sin necesidad de reestablecer un canal dedicado para cada uno de ellos, reduciendo por tanto el tiempo de transmisión de algunos paquetes. Por otro lado, el mantenimiento del canal PDCCH durante el tiempo de liberación contribuye a aumentar el nivel de interferencia en el sistema, aumentando por tanto el riesgo de recepción incorrecta. Dicho compromiso se ilustra en la Figura 3-46. Se puede observar que, en términos de retardo, existe un margen óptimo para T_1 situado en torno a 20 ms para tasas elevadas ($\alpha=0.5$). Para cargas más reducidas, el efecto de reducción de retardo por transmisión múltiple predomina frente al aumento de la interferencia, aunque como podemos observar en la Figura 3-46, sí que se constata un decremento del caudal eficaz.

En el caso del modo RC, únicamente aparece la tendencia de mejora debida al aprovechamiento de una única reserva para transmitir varios paquetes. En la Figura 3-47 puede observarse como el retardo disminuye conforme aumenta el tiempo de liberación y el caudal eficaz permanece invariante. La tendencia contraria aparecería en este caso en el supuesto de considerar un número limitado de códigos asignados de forma dedicada, tal como se analiza en la sección 3.5.8.7.

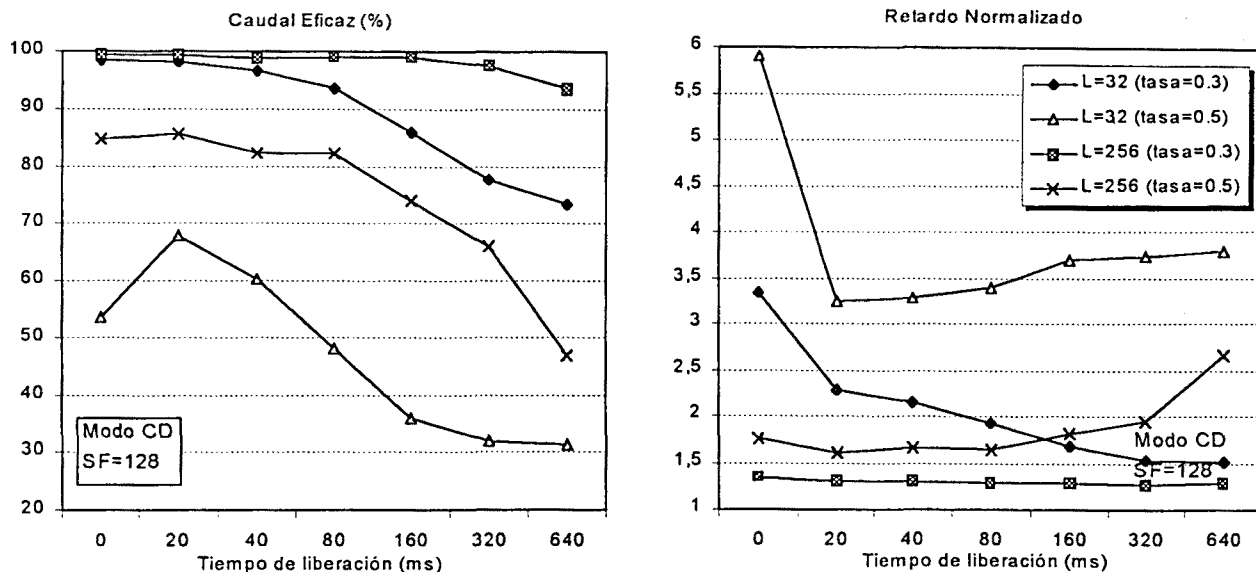


Figura 3-46. Efecto del tiempo de liberacin en el modo CD.

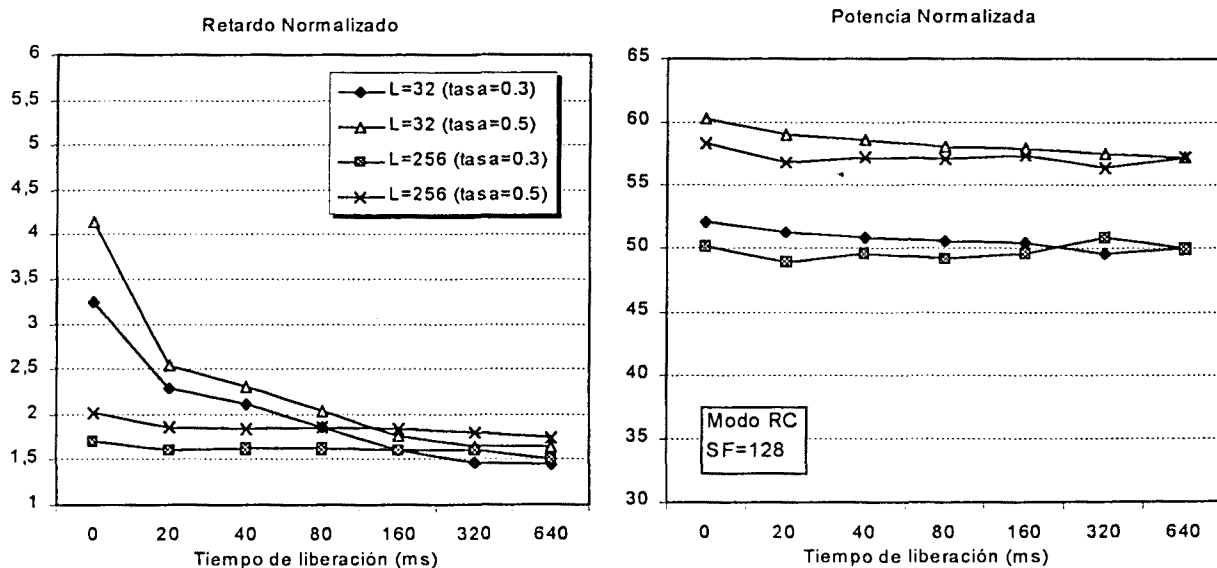


Figura 3-47. Efecto del tiempo de liberacin en modo RC.

3.5.8.6. Sensibilidad a la disponibilidad de códigos

Es importante también tener en cuenta el efecto del número de códigos disponible en el acceso por contención. Tal como se ha comentado en la sección 3.5.5, la utilización de un único código de preámbulo en una estación de base permite 16*8 accesos simultáneos en una trama de 10 ms del canal

RACH. El valor 16 corresponde al número de secuencias de preámbulo y el valor 8 indica el número de ranuras en que se divide la trama del RACH. En los resultados presentados en la Figura 3-48 y en la Figura 3-49, el parámetro *códigos/slot acceso* caracteriza el caso de permitir *códigos/slot acceso**8 accesos simultáneos en la trama RACH de 10 ms,

La variación de códigos de acceso es prácticamente inapreciable para los modos RC y CD, tal como se aprecia en la Figura 3-48. En cambio, las prestaciones del modo CC dependen en gran medida del número de códigos disponible. Para las tasas analizadas, podemos observar que con un número de códigos/slot acceso igual a 16, el porcentaje de colisiones en código se sitúa en torno al 10%. Doblar el número de códigos conduce a un porcentaje del orden de 5.8%. Por otra parte, reducir el número de códigos a la mitad conduce a valores del 15.9% de tráfico perdido en colisiones por código.

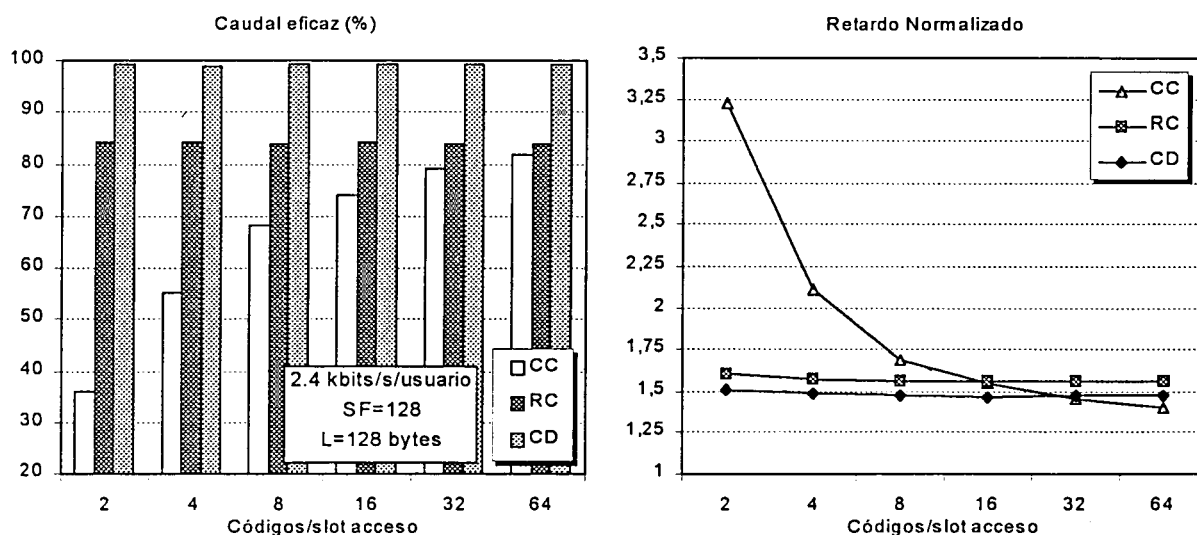


Figura 3-48. Dependencia del caudal eficaz y del retardo normalizado con el número de códigos de acceso.

En el caso de variar el número de usuarios, manteniendo la carga ofrecida al sistema constante, pueden obtenerse los resultados presentados en la Figura 3-49 para el modo de transmisión CC. El hecho de aumentar el número de usuarios no conduce a un deterioro de prestaciones, sino que, bajo las premisas consideradas, el porcentaje de colisiones depende básicamente del valor global de tráfico ofrecido y del número de códigos disponible.

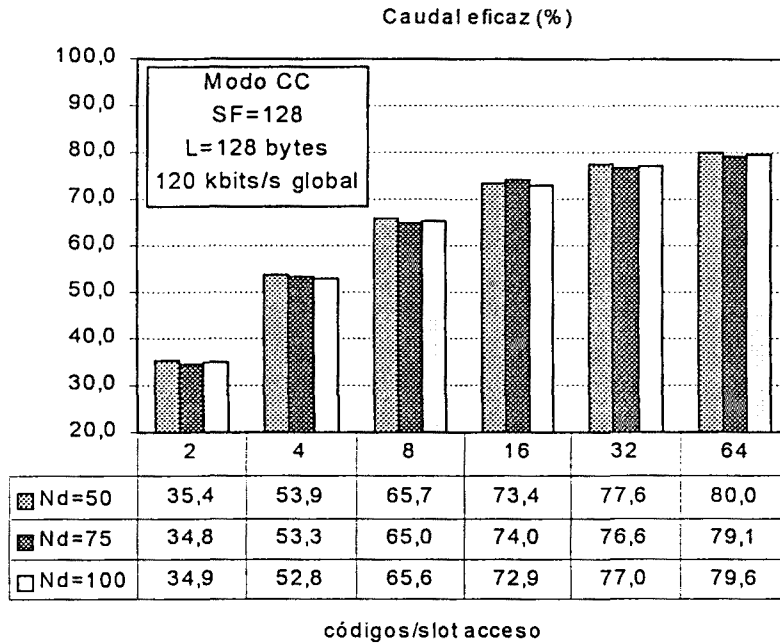


Figura 3-49. Influencia del número de códigos de acceso en modo CC para diferente número de usuarios.

3.5.8.7. Limitación del número máximo de canales dedicados.

Finalmente, en esta sección se analiza el efecto producido por la limitación del número máximo de canales dedicados, en el modo CD, y de códigos en exclusiva, en el modo RC. Tal como se vio en la sección 3.5.8.1, el caudal eficaz experimentado en el modo de transmisión dedicado era superior al de los modos RC y CD para tasas reducidas pero, conforme aumentaba el tráfico ofrecido, su degradación era más rápida. Si se limita el número de canales dedicados a un máximo de N , es posible conseguir mantener un elevado caudal eficaz para tasas de generación superiores. En la Figura 3-50 podemos observar dicho comportamiento. Vemos que existe un número óptimo, en términos de caudal, en torno a $N=15$. En cambio, si observamos el retardo experimentado, el hecho de limitar el número de conexiones simultáneas a valores de N reducidos conduce a desbordamientos en términos de retardo. El motivo radica en que el aumento de caudal experimentado no compensa el incremento del tiempo de espera necesario para adquirir los recursos. El valor de N óptimo depende de la ganancia de procesamiento y de la longitud del paquete.

En el caso del modo por reserva de código RC (véase la Figura 3-51), la limitación del número de códigos produce desbordamiento en términos de retardo. En cambio, la variación del caudal eficaz es menos significativa debido a que el efecto de la limitación se manifiesta en una zona de carga donde el nivel de interferencia presente ya conduce a una reducción importante del caudal.

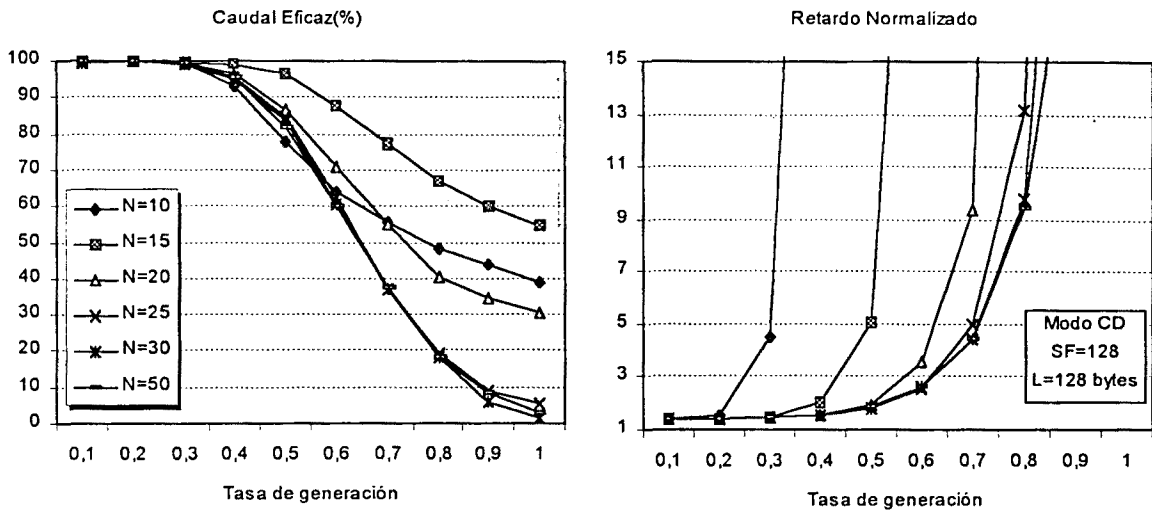


Figura 3-50. Limitación del número de canales dedicados.

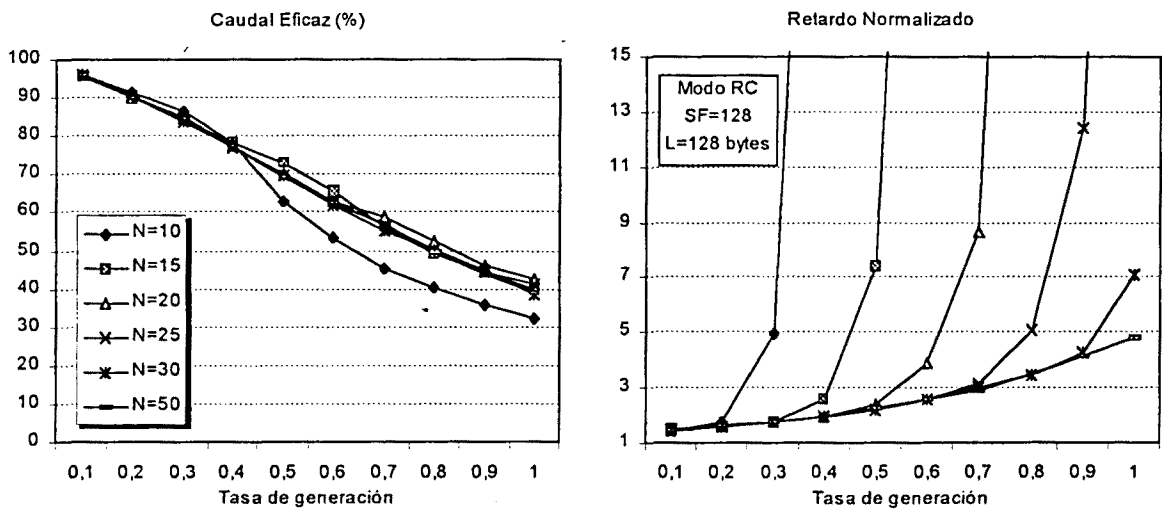


Figura 3-51. Limitación del número de códigos en exclusiva.

Si tenemos en cuenta el efecto de la limitación en el tráfico de voz cursado en la misma portadora, valores de N reducidos pueden ayudar a mantener constante la probabilidad de desbordamiento experimentada en el servicio de voz. No obstante, dicha limitación restringe el margen de tráfico soportado por los modos RC y CD por el efecto de desbordamiento de retardo constatado previamente. En la Figura 3-52 se representa la dependencia de la probabilidad de desbordamiento con el número de canales/códigos asignados.

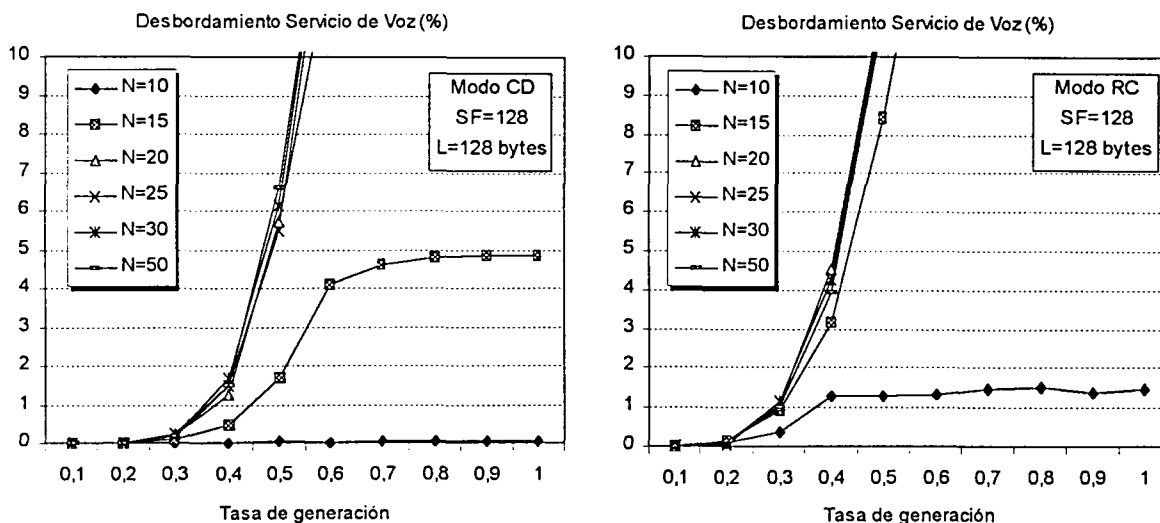


Figura 3-52. Probabilidad de desbordamiento del servicio de voz en caso de limitación de canales dedicados o códigos en exclusiva.

3.5.9. Conclusiones del análisis realizado.

En el presente análisis se han evaluado las prestaciones de diferentes mecanismos de acceso por paquetes para el enlace ascendente vagamente expuestos en la propuesta Wideband CDMA, adoptada en ETSI como esquema de acceso radio a UMTS en la banda FDD.

El estudio planteado se centra en torno a servicios de datos de baja velocidad donde, a priori, parece ineficiente la asignación de un canal dedicado. En la misma línea, se ha considerado que los servicios de datos de baja velocidad se ofrecen sobre una canalización frecuencial dedicada simultáneamente a cursar otros servicios, donde en particular se ha supuesto un servicio de voz. El tráfico de datos se caracteriza en función del porcentaje α de información generada respecto a la que podría cursarse en caso de disponerse de un canal dedicado permanentemente.

Los modos Canal Común (CC), Canal Dedicado (CD) y un tercer modo propuesto que hemos denominado Reserva de código (RC), se han analizado bajo el compromiso de tiempo de establecimiento, potencia adicional debida a la transmisión de canales dedicados de control, colisiones en código, y prestaciones del control de potencia en lazo abierto y en lazo cerrado. Concretamente en el modo CC se utiliza un control de potencia en lazo abierto y existe el riesgo de experimentar colisión por código, pero el tiempo de acceso es mínimo. En el extremo opuesto, el modo CD utiliza control de potencia en lazo cerrado y dispone de un código en exclusiva, impidiéndose por tanto las colisiones por código y reduciendo la variación de la interferencia, a costa de requerir un tiempo de asignación de recursos y un tiempo para la estabilización del control de potencia en el canal dedicado. El modo RC propuesto intenta cubrir el hueco entre los modos CD y CC, impidiendo las colisiones por código pero

operando con control de potencia en lazo abierto, a costa de requerir un tiempo de asignación del código en exclusiva.

Los criterios de comparación utilizados han sido el retardo de transmisión, el caudal eficaz y la interferencia producida sobre un servicio de voz ubicado en la misma banda frecuencial. En base a ellos, se han determinado los márgenes de funcionamiento donde cada uno de los modos propuestos presenta mejores prestaciones. Particularmente se ha tenido en cuenta la influencia de la longitud del mensaje de datos, el efecto de la ganancia de procesado, las repercusiones derivadas de las imperfecciones del control de potencia, el dimensionado de los tiempos de asignación, estabilización y liberación del canal, y por último el efecto del número de códigos de acceso y dedicados. Entre las observaciones apuntadas podemos destacar las siguientes:

- Para tasas de generación bajas ($\alpha=0.1$), independientemente de la longitud del paquete, el modo CC presenta las mejores prestaciones en términos de retardo, aunque las diferencias se reducen considerablemente conforme aumenta la longitud del paquete. En cambio, el caudal eficaz experimentado es ligeramente inferior al de los modos CD y RC debido a la existencia de colisiones por código. No obstante, dicha reducción no compensa el *overhead* necesario para disponer de recursos en exclusiva en los modos RC y CD.
- Conforme se incrementa el valor medio de la velocidad de transmisión de las fuentes, las diferencias entre los tres mecanismos van pronunciándose a favor de la utilización de un canal dedicado, incluso para longitudes de paquete muy cortas. Este hecho se justifica porque se permite la utilización del canal dedicado para transmitir múltiples paquetes. Además, las prestaciones en cuanto a la interferencia producida sobre el servicio de voz son considerablemente más reducidas debido al mayor control existente sobre la interferencia.
- Si consideramos ganancias de procesado inferiores para la transmisión de datos, las prestaciones de los modos CD y RC empeoran en términos de retardo de transmisión normalizado. Este comportamiento es debido básicamente al aumento del *overhead* asociado a ambos modos. Para el modo CC, la variación del retardo normalizado con la ganancia de procesado presenta una tendencia opuesta al anterior, básicamente por el aumento de colisiones en código conforme aumenta el retardo mínimo de transmisión del paquete. No obstante, para longitudes del mensaje de datos muy cortas se aprecia un ligero deterioro debido al aumento de la interferencia. Por otro lado, ganancias de procesado reducidas, independientemente del modo de transmisión, conduce a un aumento de la desviación experimentada por la interferencia que se traduce, en el análisis planteado, en un deterioro de las prestaciones del servicio de voz.

3.6. Conclusiones

En el presente capítulo se han abordado aspectos relacionados con la problemática del acceso múltiple en sistemas de comunicaciones móviles. Tras un enfoque de los objetivos, posibilidades y compromisos que ofrecen diferentes técnicas y protocolos de acceso al medio, se ha pasado a analizar las prestaciones de dos posibles esquemas de acceso representativos, uno basado en TDMA y otro en CDMA.

Dentro del acceso TDMA se ha escogido la plataforma especificada en el proyecto europeo FRAMES y conocida como FMA1. FMA1 está basada en wideband TDMA y su diseño ha servido como referencia en la especificación del modo de acceso UWC-136HS. Sobre dicha plataforma se han analizado las prestaciones del protocolo PRMA++ tanto para servicios de voz como de datos. Respecto al tráfico de voz, los resultados obtenidos confirman la considerable ganancia de multiplexado alcanzable por PRMA++, aún cuando se consideran factores de actividad superiores al 50%. También se ha constatado la importancia en la elección del mecanismo de contención en el acceso a los slots de petición. A tal efecto, el diseño original basado en una probabilidad de retransmisión estática presenta un margen de comportamiento bastante reducido. Por tanto, un mal dimensionado, o un incremento brusco de tráfico, puede conducir fácilmente a situaciones de inestabilidad. A tal efecto se han analizado las prestaciones de algoritmos de *back-off* exponencial y se ha propuesto un algoritmo adaptativo que maximiza las prestaciones. Respecto al tráfico de datos, las prestaciones del protocolo PRMA++ dependen considerablemente de la longitud del paquete y de la tasa de generación de peticiones. Dicho comportamiento da lugar a un mayor grado de compromiso a la hora de diseñar una proporción eficiente entre los recursos dedicados a contención y los dedicados a tráfico de información. También se ha analizado el efecto de introducir un esquema de asignación múltiple. Las mejoras aportadas por la asignación múltiple se concentran en unos determinados márgenes de operación, pudiendo incluso deteriorar las prestaciones conseguidas en caso de asignación de un único slot.

Para caracterizar un sistema de acceso CDMA se ha recurrido a la propuesta WCDMA en UTRA para el modo FDD. El estudio se ha centrado en analizar el compromiso existente para servicios de datos de baja velocidad respecto a la utilización de los modos de transmisión por paquetes descritos en la propuesta europea. Los resultados obtenidos intentan cuantificar, dentro de las condiciones de operación consideradas el compromiso, en términos de retardo, caudal e interferencia, entre los modos estudiados, Canal Común (CC), Reserva de código (RC) y Canal Dedicado (CD), respecto a factores como el tiempo de establecimiento, potencia adicional debida a la transmisión de canales dedicados de control, colisiones en código, y prestaciones del control de potencia en lazo abierto y en lazo cerrado.

