

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

TESIS DOCTORAL

**ESTRATEGIAS DE CONTROL DE ACCESO EN SISTEMAS
DE COMUNICACIONES MÓVILES CELULARES DE
TERCERA GENERACIÓN**

AUTOR: Margarita Ruiz García
Ingeniera de Telecomunicación

2001

D. ANTONIO DIAZ ESTRELLA, PROFESOR TITULAR DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

CERTIFICO:

Que D^a. Margarita Ruiz García, Ingeniera de Telecomunicación, ha realizado en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga, bajo mi dirección, el trabajo de investigación correspondiente a su Tesis Doctoral titulada:

”ESTRATEGIAS DE CONTROL DE ACCESO EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES
MÓVILES CELULARES DE TERCERA GENERACIÓN”

Revisado el presente trabajo, estimo que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que conste a efectos de lo establecido en el Real Decreto 778/1998 regulador de los estudios de Tercer Ciclo-Doctorado, AUTORIZO la presentación de esta Tesis en la Universidad de Málaga.

Málaga, 14 de Febrero de 2001

Fdo. Antonio Diaz Estrella
Profesor Titular del Dpto. de Tecnología Electrónica

Departamento de Tecnología Electrónica
E. T. S. I. Telecomunicación
Universidad de Málaga

TESIS DOCTORAL

**ESTRATEGIAS DE CONTROL DE ACCESO EN SISTEMAS
DE COMUNICACIONES MÓVILES CELULARES DE
TERCERA GENERACIÓN**

AUTOR: Margarita Ruiz García
Ingeniera de Telecomunicación

DIRECTOR:
Antonio Diaz Estrella
Dr. Ingeniero de Telecomunicación

Agradecimientos

Han sido muchas las personas que han participado con su ayuda y colaboración en la realización de esta tesis y que merecen mi más sincero agradecimiento.

El apoyo y la dedicación de mi tutor Antonio Diaz Estrella han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Sus esfuerzos para crear y consolidar un grupo de investigación en un tema tan complicado como las comunicaciones móviles han sido los pilares fundamentales de esta investigación.

Mi compañero Juan Manuel Romero me ha dado fuerzas y ánimos en los momentos más difíciles, en los que siempre ha estado.

Debo agradecer a Alfredo García Lopera su interés y sus esfuerzos en la andadura de nuestro grupo de investigación. En esta andadura debo mencionar a Alcatel España que ha impulsado nuestro trabajo con su apoyo. También me gustaría señalar la importancia de los compañeros que han integrado este grupo de investigación y sin los cuales no habría llegado este momento.

A Francisco Sandoval Hernández debo agradecer todos los medios y recursos que ha puesto a mi disposición como director del departamento de Tecnología Electrónica para la elaboración de esta tesis.

También debo agradecer a mis alumnos de Proyecto Fin de Carrera su inestimable colaboración en esta línea de investigación, en especial a Juan Enrique Burgos Lati, Francisco Rojas Pareja y Juan José Guerrero García. Por supuesto no puedo olvidar a muchas de las personas de este departamento, que han sufrido los avatares del desarrollo de esta tesis, y a las que agradezco su comprensión.

Mi agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) que ha financiado en parte este trabajo de investigación por medio del proyecto TIC98-1040.

El aliento en esta larga andadura lo he recibido de mi *gran* familia. Debo agradecer mucho

a todos, a Carlos su gran ayuda y su incondicional apoyo, que me han hecho sentir capaz de conseguirlo; a mi hermana su gran confianza, mucho mayor que la mía; a mis padres, su comprensión sin límites y a mis tías y tíos su cariño.

Resumen

Los futuros sistemas de comunicaciones móviles celulares de tercera generación no sólo deberán soportar el tradicional servicio de voz en tiempo real y las aplicaciones convencionales orientadas a datos, como el correo, transferencia de ficheros, etc, sino también las nuevas aplicaciones multimedia, entre las que destacan las de tipo interactivo. Las diferencias existentes entre los requisitos de QoS (Quality of Service) de las diversas aplicaciones demandadas motiva la necesidad de ofrecer garantías de calidad muy distintas.

La estandarización de la tercera generación de comunicaciones móviles está progresando muy rápidamente en la mayor parte de los países. Estos sistemas denominados IMT-2000 (International Mobile Telecommunications in the Year 2000) por la ITU (International Telecommunication Union), y designados como UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute), extenderán los servicios proporcionados por la segunda generación actual. La componente terrestre de UMTS, denominada UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access), usa como tecnología de acceso WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) en Europa y Japón. Este interfaz radio WCDMA ofrece un conjunto de mejoras, respecto a la técnica CDMA de banda estrecha de 2G (Segunda Generación), para proporcionar tasas de transmisión más elevadas a los nuevos servicios de datos.

El objetivo de esta tesis es el estudio de las estrategias de control de acceso en un sistema UTRA multiservicio. Este análisis conlleva evaluar las limitaciones impuestas al sistema por el protocolo de acceso al canal común, así como estudiar las técnicas de admisión y gestión de recursos que permiten ofrecer garantías de QoS. Pero, como paso previo a todo lo expuesto, es necesario realizar un análisis de la capacidad orientado hacia la implementación de controles de admisión y gestión de recursos. Dado el enfoque de este estudio, es necesario desarrollar un método simple de estimación de la capacidad que nos permita efectuar un primer dimensionado del sistema UTRA. Para analizar la dependencia de la capacidad con las características de los servicios y del medio de propagación, se ha desarrollado una herramienta analítica de caracterización de la interferencia intercelda.

La evaluación del esquema de acceso al canal común efectuada en esta tesis no trata de

ser una comparativa de las diversas propuestas de acceso, lo que se pretende es analizar las limitaciones impuestas por el protocolo ALOHA ranurado a un sistema UTRA multiservicio, es decir, las posibles degradaciones en la capacidad debidas a retardos de acceso muy elevados. Un aspecto importante de este estudio ha sido considerar nuevos servicios de datos 3G, como es el caso del acceso *web*, que se integran con servicios tradicionales como la voz, ambos de características muy diferentes. Las prestaciones de este protocolo ALOHA ranurado, caracterizado por un acceso aleatorio, se comparan con las de un protocolo como ISMA (Inhibit Sense Multiple Access), que ejerce cierto control sobre el acceso. A tal efecto se ha desarrollado una herramienta de simulación que modela las estrategias de acceso indicadas. El propósito final es analizar la influencia de las técnicas de acceso sobre las limitaciones del sistema, es decir quién impone las restricciones, el parámetro del tiempo de acceso o los máximos niveles de interferencia permitidos, analizados en el estudio previo de capacidad.

En lo que respecta al análisis de controles de admisión (CAC), se han evaluado dos tipos, aquellos que establecen un umbral de admisión fijo y los adaptativos, que modifican el umbral dinámicamente según el estado del sistema. Dentro de los CAC no adaptativos, se ha analizado una primera clase muy simple, con un umbral basado en el número de usuarios y una segunda clase de mayor complejidad, basada en el nivel de interferencias. La ventaja de estos controles es su simplicidad frente a las técnicas adaptativas que requieren medidas periódicas de diversos flujos de información para tomar sus decisiones. Finalmente, se ha efectuado un completo estudio del sistema UTRA multiservicio desde una perspectiva global analizando diversas técnicas de gestión de recursos junto a un control de admisión adaptativo. Este CAC dinámico es especialmente adecuado para este sistema donde existe una gran fluctuación del nivel de interferencias. Se han propuesto dos técnicas de gestión de recursos, la primera basada en la combinación de los criterios de retardo y longitud de cola, y la segunda de carácter dinámico, que adapta la velocidad de transmisión del usuario a las condiciones de carga del sistema. El estudio conjunto de estos controles de acceso requiere un modelo detallado del sistema. Por este motivo se ha desarrollado una herramienta de simulación que permite estudiar las variaciones en los flujos de información sobre cuyas medidas se basan las decisiones de las técnicas adaptativas.

Abstract

In the near future, the third generation cellular mobile communication systems will have to provide a great variety of services. Besides the voice service and the conventional data services (mail, ftp, etc.), there will appear new multimedia services, among them, the interactive-type applications such as web access. These different kinds of services will require different QoS (Quality of Services) guarantees.

The standardization procedure of the third generation systems is now rapidly progressing in all major regions of the world. These systems that go under the ITU (International Telecommunication Union) name of IMT-2000 (International Mobile Telecommunications in the Year 2000) and within ETSI (European Telecommunications Standards Institute) as the UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) will extend the services provided by current second generation systems. WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) has been chosen both in Europe and Japan as the basic radio access technology for the terrestrial component of UMTS, the so-called UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access). Compared to the second generation narrow-band CDMA, the WCDMA radio interface offers significant improvements, in addition to the support of higher rate services.

The aim of this thesis is to analyze the access control strategies within a multiservice UTRA system to offer QoS guarantees. Following this purpose a performance evaluation of the medium access protocol (MAC) which may be used in UTRA is made together with the study of the admission controls and resource scheduling schemes. Before that, we are compelled to give an account of the system capacity in order to come to terms with the implementation of the admission techniques. For this reason, it is vital to develop a simple method for the estimation of this capacity.

Our intention hasn't been to compare the different MAC protocols but to analyze the slotted ALOHA protocol access delays within a multiservice UTRA system, that is, the reduction of the capacity due to very high access delays. We have taken into account the new data third generation services such as the web access as well as the traditional services like the voice one, both of them with very different features. We establish a comparison between the slotted ALOHA

protocol and the ISMA protocol (Inhibit Sense Multiple Access). In the first case the access is random whereas in the second one there exists a certain control over the access. The final goal is to study the restrictions imposed on the system both by the access protocol (delay) and by the QoS guarantees (interference threshold).

As far as the admission controls is concerned, two types are being considered. The first one sets a threshold from the very beginning and the second one adjusts the threshold to the system conditions. We have dealt with two CAC belonging to the first group: a very simple one based on the number of users and another one much more complex based on the interference level. The simplicity of these controls is their great advantage against the dynamic CAC requiring frequent measures from the system. We have carried out an overall study of the multiservice UTRA system by applying resource scheduling schemes together with an adaptive admission control. This last one is very suitable for multiservice systems where we can find a great fluctuation of the interference level. We have proposed for consideration two resource scheduling techniques. The first one uses the delay and size of the queue parameters. The second one adapts the transmission rate of the user to the load conditions of the system. It is necessary to employ a detailed model of the system so as to evaluate collectively the dynamic access controls mentioned before.

Índice General

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Glosario	xv
Símbolos	xvii
1 Introducción	1
2 Comunicaciones móviles de 3G	9
2.1 Introducción	9
2.2 Evolución de los sistemas celulares	9
2.3 Sistemas celulares 3G	12
3 Garantías de QoS	17
3.1 Introducción	17
3.2 Requisitos de QoS	17
3.3 Clases de servicio UMTS	20
3.3.1 Clase Conversacional	21
3.3.2 Clase afuente	21
3.3.3 Clase interactiva	22
3.3.4 Clase diferida	22
3.4 Parámetros de QoS	22
3.4.1 Parámetros de QoS en UMTS	22
3.4.2 Discusión de parámetros de QoS por clases	25
3.5 Arquitectura de QoS	26
3.6 Gestión de servicios	28

4	Análisis de capacidad en sistemas 3G	31
4.1	Introducción	31
4.2	Fundamentos	31
4.2.1	Capacidad del enlace ascendente en sistemas CDMA	31
4.2.2	Entorno de propagación	34
4.2.3	Control de potencia	35
4.2.4	Análisis de interferencias	37
4.3	Investigación relacionada	37
4.4	Modelo de sistema	40
4.4.1	Parámetros del sistema UTRA	42
4.5	Análisis de capacidad	42
4.6	Entornos analizados	47
4.6.1	Caracterización de la interferencia intercelda	47
4.6.2	Análisis de capacidad	47
4.7	Resultados	50
4.8	Conclusiones	60
5	Análisis del tiempo de acceso en UTRA	63
5.1	Introducción	63
5.2	Fundamentos	63
5.2.1	Protocolos de acceso múltiple	63
5.2.2	Canales ascendentes en UTRA	65
5.2.3	Mecanismos de transmisión en sistemas CDMA integrados	67
5.3	Investigación relacionada	69
5.4	Modelo del sistema	72
5.4.1	Modelos de tráfico	74
5.5	Entornos analizados	76
5.5.1	Comparativa de protocolos de acceso	78
5.5.2	Estudio del control de acceso	81
5.6	Resultados	82
5.6.1	Protocolos de acceso	82
5.6.2	Control de acceso	91
5.7	Conclusiones	95
6	Controles de admisión y gestión en sistemas CDMA	97
6.1	Introducción	97
6.2	Fundamentos	97
6.3	Investigación relacionada	99
6.4	Estudio de controles de admisión no adaptativos	103

6.4.1	Modelo de sistema	103
6.4.2	Análisis numérico	104
6.4.3	Entornos analizados	107
6.4.4	Resultados	107
6.4.5	Conclusiones	119
6.5	Técnicas de admisión adaptativas y de gestión de recursos	119
6.5.1	Modelo del sistema	120
6.5.2	Controles de admisión y gestión analizados	122
6.5.3	Entornos analizados	127
6.5.4	Resultados	128
6.5.5	Conclusiones	143
6.6	Conclusiones finales	144
7	Conclusiones y líneas futuras	147
7.1	Conclusiones	147
7.2	Líneas futuras	150
A	Modelado gaussiano de la interferencia intercelda	153
B	Caracterización de la interferencia intercelda	157

Glosario

ACK	Acknowledgement
ACTS	Advanced Communications Technologies and Services
ALOHA	Protocolo de acceso al canal común
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
CAC	Call Admission Control
CBQ	Class Based Queuing
CDMA	Code Division Multiple Access
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel
DPDCH	Dedicated Physical Data Channel
DS-CDMA	Direct Sequence CDMA
EDD	Earliest Due Date
EDF	Earliest Deadline First
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FACH	Forward Access Channel
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FH-CDMA	Frequency hopping
FIFO	First-In-First-Out
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecommunications System
GoS	Grade of Service
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System of Mobile Communications
HSCSD	High Speed Circuit Switched
HRR	Hierarchical Round Robin
IMT-DS	International Mobile Telecommunications-Direct Spread
IMT-FT	International Mobile Telecommunications-Frequency Time
IMT-MC	International Mobile Telecommunications-Multi Carrier

IMT-SC	International Mobile Telecommunications-Single Carrier
IMT-TC	International Mobile Telecommunications-Time Code
IMT-2000	International Mobile Telecommunications in the Year 2000
ISMA	Inhibit Sense Multiple Access
IS-36	Interim Standard 36
IS-54	Interim Standard 54
IS-95	Interim Standard 95
ITU	International Telecommunication Union
JDC	Japanese Digital Cellular
MAC	Medium Access Control
ODMA	Opportunity Driven Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PRMA	Packet Reservation Multiple Access
QoS	Quality of Service
RACE	Research and Technology Development in Advanced Communications Technologies in Europe
RACH	Random Access Channel
RCSP	Rate Controlled Static Priority
RLC	Radio Link Control
SIR	Signal to Interference ratio
SMG	Special Mobile Group
T1	Committee T1
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TF	Transmission Format
TH-CDMA	Time hopping CDMA
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunications Technology Committee
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
VC	Virtual Clock
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WFQ	Weighted Fair Queueing
2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
3GPP2	3 rd Generation Partnership Project para CDMA2000

Símbolos

a	Tráfico en Erlangs
B	Umbral de máximo nivel de interferencia
b	Parámetro de la función densidad de probabilidad de la distribución Pareto
$\frac{E_b}{N_o}$	Relación energía de bit/densidad de ruido
c	Relación entre los factores de actividad de dos clases
c_{max}	Capacidad máxima
$E()$	Media estadística
f	Factor de interferencia intercelda
G	Ganancia de proceso
I_{intra}	Interferencia intracelda
I_{inter}	Interferencia intercelda
I_t	Interferencia total
k	Relación entre las tasas de bits de dos clases
l	Relación entre los requisitos de calidad de dos clases
l_r	Longitud de ráfaga
M	Número de clases de tráfico
$min()$	Valor mínimo
n	Factor de atenuación con la distancia
N	Número de usuarios
$N_{a,j}$	Número de usuarios activos de la clase j
N_e	Número efectivo de usuarios
p_b	Probabilidad de bloqueo
p_c	Probabilidad de conexión
p_p	Probabilidad de pérdidas
p_r	Probabilidad de retardo
P_t	Potencia transmitida
P_r	Potencia recibida por la estación base
$Prob()$	Probabilidad
R	Tasa de bits

r	Distancia desde el móvil a la estación base
T	Requisito energía de bit/densidad de ruido
$Var()$	Varianza estadística
W	Ancho de banda del sistema CDMA
α	Factor de actividad medio
β	$\frac{Ln10}{10}$
χ	Variable gaussiana que representa el control de potencia imperfecto
η	Ruido blanco de fondo
γ	Relación entre energía de bit y densidad de ruido
ι	Parámetro de la función densidad de probabilidad de la distribución Pareto
κ	Relación entre tasas de bits y requisitos de calidad de dos clases
λ_{media}	Coficiente de la media de la interferencia intercelda normalizada
λ_{var}	Coficiente de la varianza de la interferencia intercelda normalizada
ν	Interferencia de los usuarios de datos dependiente de la distancia
Ψ	Variable gaussiana normalizada que representa la interferencia intercelda
σ_{χ}	Desviación estándar del control de potencia imperfecto
σ_{ξ}	Desviación estándar del shadowing
ξ	Variable gaussiana que representa al shadowing

Índice de Figuras

2.1	Sistema de comunicaciones móviles	10
3.1	Arquitectura de la calidad de servicio en UMTS	27
3.2	Interrelaciones entre los controles de gestión de acceso de los usuarios al sistema UMTS	30
4.1	Análisis de capacidad en un sistema CDMA	32
4.2	Fenómenos de propagación en un medio radio	35
4.3	Variación del coeficiente de la media de la interferencia intercelda con las características del medio de propagación (prueba 1)	51
4.4	Variación del coeficiente de la varianza de la interferencia intercelda con las características del medio de propagación (prueba 3)	51
4.5	Variación del coeficiente de la media de la interferencia intercelda con el factor de actividad (prueba 2)	53
4.6	Variación del coeficiente de la varianza de la interferencia intercelda con el factor de actividad (prueba 4)	53
4.7	Capacidad en un sistema homogéneo (clase H1) modelando la interferencia intercelda con las distribuciones gaussiana y gamma (prueba 5)	54
4.8	Capacidad en un sistema homogéneo (clases H2 y H3) modelando la interferencia intercelda con las distribuciones gaussiana y gamma (prueba 6)	54
4.9	Error relativo al comparar el cociente entre los umbrales de admisión de dos clases con la relación entre sus parámetros característicos (pruebas 5 y 6)	56
4.10	Dependencia de la capacidad con el factor de propagación n (de 2 a 4) y con la desviación estándar σ_ξ (8 y 6 dB) para distintos valores E_i (prueba 7)	56
4.11	Capacidad para distintos valores de la desviación del control imperfecto de potencia. El umbral máximo de interferencia elegido es $media \pm i \cdot \sigma_\chi$, quedando i representado en el eje x (prueba 8)	57
4.12	Capacidad en un sistema multiservicio integrado por las clases M1, M2 y M3, variando el n° de usuarios de tipo M1 (prueba 10)	59

4.13	Capacidad en un sistema multiservicio integrado con 30 usuarios de tipo M1, variando el entorno de propagación (prueba 11)	59
4.14	Comparativa de la capacidad en un sistema multiservicio integrado por las clases M4 y M5, considerando el factor f y la distribución gaussiana para el modelado de la interferencia intercelda, así como controles de potencia perfecto e imperfecto (prueba 12)	60
5.1	Clasificación de los protocolos de acceso múltiple	64
5.2	Canal común en UTRA	66
5.3	Canales dedicados en UTRA	66
5.4	Modos de operación para servicios de datos de paquetes (canales ascendentes)	68
5.5	Función de control de acceso en función de la carga del sistema	73
5.6	Modelo de tráfico ON-OFF	75
5.7	Modelo de tráfico <i>web</i>	76
5.8	Comparativa de las funciones densidad de probabilidad de las distribuciones exponencial y Pareto	77
5.9	Diagrama de bloques del simulador de acceso	77
5.10	Retardo en un sistema homogéneo de voz. Protocolos ALOHA e ISMA con 2 y 16 códigos de acceso al canal común (prueba 1)	83
5.11	Carga máxima, retardo en mseg y % de colisiones un sistema homogéneo de datos al variar la tasa por usuario de 8 a 30 kbps (prueba 2)	84
5.12	Carga máxima, retardo en mseg y % de colisiones un sistema homogéneo de datos al variar la tasa por usuario de 4 a 14 kbps (prueba 2)	84
5.13	Cargas máximas para los protocolos ALOHA e ISMA variando el SIR de 3 a 7 dB (prueba 3). Observe que en el eje de abcisa se representan los protocolos de acceso con dos ganancias de proceso distintas, 32 y 64	86
5.14	Nivel de potencia en un sistema homogéneo de datos web con los protocolos ISMA y ALOHA con 2 y 16 códigos de acceso al RACH (prueba 4). El número de usuarios de datos se ha variado de 10 a 500	87
5.15	Porcentaje de colisiones en un sistema homogéneo de datos web con los protocolos ISMA y ALOHA con 2 y 16 códigos de acceso al RACH (prueba 4). El número de usuarios de datos se ha variado de 10 a 500	88
5.16	Retardo de acceso de las peticiones de voz en un sistema heterogéneo con los protocolos ALOHA e ISMA usando 2 y 16 códigos de acceso al RACH (prueba 5)	89
5.17	Retardo de acceso de las peticiones de datos en un sistema heterogéneo con los protocolos ALOHA e ISMA usando 16 códigos de acceso al RACH (prueba 5)	90
5.18	Porcentaje de colisiones en un sistema heterogéneo con los protocolos ALOHA e ISMA usando 2 códigos de acceso al RACH (prueba 5)	90

5.19	Nivel de potencia en un sistema con 40 usuarios de voz, al variar el n° de usuarios de datos con un factor de actividad de 0.2 (prueba 6)	92
5.20	Nivel de potencia en un sistema con 40 usuarios de voz, al variar el n° de usuarios de datos con un factor de actividad de 0.5 (prueba 6)	92
5.21	Nivel de potencia en un sistema con 40 usuarios de voz, al variar el n° de usuarios de datos con un factor de actividad de 0.8 (prueba 6)	93
5.22	Porcentaje de superación de la capacidad máxima con asignación de probabilidades de acceso y asignación de permisos de transmisión (prueba 7)	94
6.1	Control de admisión y disciplina de servicio en UTRA	98
6.2	Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 1)	109
6.3	Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 1)	109
6.4	Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 2)	110
6.5	Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 2)	110
6.6	Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 3)	112
6.7	Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 3)	112
6.8	Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 3)	113
6.9	Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 4)	113
6.10	Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 4)	114
6.11	Probabilidad de pérdidas en un sistema integrado para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 5)	115
6.12	Probabilidad de pérdidas en un sistema integrado para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 6)	115
6.13	Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 5)	117
6.14	Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 6)	117
6.15	Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 7)	118

6.16	Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 8)	118
6.17	Sistema empleado para el estudio por simulación de controles de admisión adaptativos y técnicas de gestión de recursos	120
6.18	Controles de acceso analizados	123
6.19	Función dinámica para adaptar la tasa de transmisión de una ráfaga de datos a la carga de la red	126
6.20	Probabilidad de conexión de 1 usuario de datos a las 3 estaciones base (EB) al variar su distancia normalizada al centro de la estación base local (prueba 1)	129
6.21	Probabilidad de bloqueo de 1 usuario de datos al variar la carga de usuarios de voz (prueba 1)	130
6.22	Probabilidad de retardo de un usuario de datos al variar la carga de usuarios de voz con el algoritmo adaptativo de tasa de transmisión (prueba 1)	131
6.23	Probabilidad de tasas de transmisión de un usuario de datos al variar la carga de usuarios de voz. La tasa de transmisión es igual a i veces la tasa básica (prueba 1)	132
6.24	Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.4 y una longitud media de ráfaga de 100 paquetes. Planificador de retardo (prueba 2)	132
6.25	Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.8 y una longitud media de ráfaga de 100 paquetes. Planificador de retardo (prueba 2)	133
6.26	Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.4 y una longitud media de ráfaga de 50 paquetes. Planificador de retardo (prueba 2)	133
6.27	Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.4 y una longitud media de ráfaga de 100 paquetes. Planificador de velocidad (prueba 2)	135
6.28	Probabilidad de retardo en un sistema con 8 usuarios de datos usando el planificador de retardo (prueba 2)	136
6.29	Probabilidad de retardo en un sistema con 8 usuarios de datos usando el planificador adaptativo de velocidad (prueba 2)	137
6.30	Bloqueo medio de la clase 1 en un sistema con 2 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3)	138
6.31	Bloqueo medio de la clase 2 en un sistema con 2 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3)	138
6.32	Bloqueo medio de la clase 1 en un sistema con 4 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3)	140

6.33 Bloqueo medio de la clase 2 en un sistema con 4 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3) 140

6.34 Probabilidad de retardo de la clase 1 en un sistema con 25 usuarios de voz, 4 usuarios de la clase 1 y 4 usuarios de la clase 2 (prueba 3) 141

6.35 Probabilidad de retardo de la clase 2 en un sistema con 25 usuarios de voz, 4 usuarios de la clase 1 y 4 usuarios de la clase 2 (prueba 3) 142

A.1 Móvil situado en una celda interferente 153

B.1 Sistema de celdas hexagonales 158

B.2 Móvil en celda interferente. Variables de integración θ y r_m para estimar los parámetros estadísticos de la interferencia intercelda 159

Índice de Tablas

2.1	Interfaz radio de la componente terrestre IMT-2000	13
3.1	Características de las clases de servicio UMTS	23
3.2	Parámetros de calidad definidos para cada una de las clases en UMTS	27
4.1	Valores del factor de atenuación con la distancia en distintos entornos	35
4.2	Parámetros característicos de las distintas clases de servicio	40
4.3	Parámetros de UTRA FDD versión 3.0.0	42
4.4	Descripción de las pruebas realizadas	48
4.5	Características de las clases de servicio estudiadas en un sistema homogéneo (R es la tasa de bit, G es la ganancia de proceso y T la relación energía de bit/densidad de ruido)	49
4.6	Características de las clases de servicio estudiadas en un sistema multiservicio (R es la tasa de bits, G es la ganancia de proceso, T la relación energía de bit/densidad de ruido requerida y α es el factor de actividad)	49
4.7	Variación de los coeficientes de la media y la varianza con el factor de atenuación n y la desviación del shadowing σ_ξ	52
4.8	Comparativa de capacidad de un sistema homogéneo para la clase de servicio H1	58
5.1	Parámetros del servicio de voz	75
5.2	Tabla de parámetros del modelo de tráfico <i>web</i>	76
5.3	Tabla de los experimentos realizados para analizar la limitación del tiempo de acceso (T es la relación energía de bit/densidad de ruido y G es la ganancia de proceso)	79
5.4	Tabla descriptiva de las pruebas realizadas sobre el control de acceso	81
5.5	Niveles de potencia (valores de potencia de la función distribución con probabilidad del 99%) en un sistema homogéneo de voz con 16 códigos acceso (prueba 1)	82
5.6	Retardo, reintentos y colisiones para las cargas máximas de los protocolos ALOHA e ISMA con ganancias de proceso de 32 y 64	86
5.7	Niveles de potencia de los protocolos ALOHA e ISMA con 2 y 16 códigos de acceso	88

5.8	Retardos de acceso en sistema integrado de voz (40 usuarios) y datos al variar el coeficiente de actividad de los datos (0.2, 0.5 y 0.8)	91
5.9	Porcentajes de superación de la capacidad máxima	94
6.1	Probabilidad de bloqueo y pérdidas en un sistema integrado usando un CAC basado en el número de usuarios al variar los usuarios de voz y datos	105
6.2	Probabilidad de bloqueo y pérdidas en un sistema integrado usando un CAC basado en el nivel de interferencias al variar los usuarios de voz y datos	108
6.3	Entornos analizados en el estudio analítico de controles de admisión	108
6.4	Comparativa de la probabilidad de pérdidas en un sistema integrado con tráfico de voz de 10 E	116
6.5	Entornos analizados por simulación	127
6.6	Probabilidad de bloqueo con los planificadores de retardo y de velocidad adaptativo en un sistema con 25 usuarios de voz, factor de actividad de 0.4 y longitud de ráfaga de 100	135
6.7	Probabilidad de bloqueo usando un planificador adaptativo de velocidad en un sistema con 25 usuarios de voz y longitud de ráfaga de 100 (α_d es el factor de actividad de los datos)	135
6.8	Probabilidad de bloqueo usando un planificador adaptativo de velocidad en un sistema con 25 usuarios de voz y factor de actividad de 0.4 (l_r es la longitud de ráfaga)	136
6.9	Probabilidad de retardo de 1 y 20 tramas al usar los planificadores de retardo y velocidad	136
6.10	Bloqueo medio de las clases 1 y 2 en un sistema integrado con usuarios de voz y el número de usuarios de datos de cada clase indicados en la tabla	139
6.11	Probabilidad de retardo de las clases 1 y 2 en un sistema con 25 usuarios de voz, 4 usuarios de la clase 1 y 4 usuarios de la clase 2	141

Capítulo 1

Introducción

El explosivo crecimiento de Internet y el gran aumento en la demanda de todo tipo de servicios radio están impulsando la necesidad de mejoras de capacidad y mayores tasas de transmisión en los sistemas de comunicaciones móviles. Los futuros sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación (3G) no sólo deberán soportar el tradicional servicio de voz en tiempo real y las aplicaciones convencionales orientadas a datos, como el correo, la transferencia de ficheros, etc., sino también las nuevas aplicaciones multimedia, entre las que destacan las de tipo interactivo, que están experimentando un gran desarrollo debido principalmente a Internet. Las diferencias existentes entre los requisitos de QoS (Quality of Service) de las diversas aplicaciones demandadas motiva la necesidad de ofrecer garantías de calidad muy distintas.

La estandarización de la tercera generación de comunicaciones móviles está progresando muy rápidamente en la mayor parte de los países. Estos sistemas, denominados IMT-2000 (International Mobile Telecommunications in the Year 2000) por la ITU (International Telecommunication Union), y designados como UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute), extenderán los servicios proporcionados por la segunda generación actual.

La propuesta de interfaz radio UMTS, elaborada por el subcomité SMG 2 (Special Mobile Group) del ETSI [?] recibió el nombre de UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access). UTRA tiene dos componentes, FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex). La primera está basada en WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), mientras que la segunda utiliza la combinación CDMA/TDMA (Code Division Multiple Access/Time Division Multiple Access). WCDMA es una técnica de acceso múltiple DS-SS-SSMA (Direct Sequence Spread Spectrum Multiple Access) de banda ancha, en la que las señales tienen una ocupación espectral de unos 5 MHz. La denominación de *banda ancha* surge de la comparativa con el sistema CDMA de segunda generación, cuyo ancho de banda es de 1.25 MHz. Este interfaz radio WCDMA ofrece un conjunto de mejoras, respecto a la técnica CDMA de 2G, para proporcionar tasas de transmisión más

elevadas. Entre estas mejoras se pueden mencionar un mayor ancho de banda, una detección coherente en el sentido ascendente, la posibilidad de empleo de antenas adaptativas y detección multiusuario y un rápido y eficiente protocolo de acceso de paquetes.

Las elevadas tasas de bits prometidas por los sistemas 3G permitirán a los operadores móviles ofrecer un amplio rango de servicios, entre los que se pueden identificar los siguientes tipos genéricos [?]:

- Comunicaciones personales. Comprende todos aquellos servicios utilizados por un usuario de manera personalizada para establecer comunicación con otras personas o máquinas. Entre estos servicios se encuentran los vocales, videoconferencia, correo electrónico, mensajes cortos, acceso a Internet, etc.
- Servicios de información tipo *pull*. Son los utilizados para obtener información bajo demanda, como noticias, bolsa, etc.
- Servicios de información tipo *push*. Relacionados con la información que se recibe a través del medio de comunicación sin solicitud previa de la misma, como la publicidad o notificaciones de ciertos eventos.
- Comercio electrónico. Servicios relacionados con la compra electrónica, en los que se produce un intercambio de bienes utilizando como medio de pago el teléfono móvil.
- Servicios audiovisuales y de entretenimiento. Servicios enfocados al ocio con alto contenido audiovisual como la televisión interactiva, vídeo y fotos bajo demanda, videojuegos, etc.

Debido a esta integración de servicios, es necesario explotar al máximo la capacidad de los sistemas 3G, ofreciendo las garantías de QoS requeridas. En estos sistemas CDMA cada nueva llamada incrementa el nivel de interferencia de todas las conexiones existentes, afectando por tanto a su calidad (*soft capacity*).

Los primeros trabajos de investigación sobre sistemas CDMA sirvieron para establecer los factores clave en el análisis de la capacidad, como son el nivel de interferencias, el modelado de la interferencia intercelda, y el control de potencia. Un trabajo importante sobre el nivel de interferencias es [?], donde se demuestra que dado que la técnica CDMA sólo está limitada en interferencias, frente a las limitaciones de ancho de banda de FDMA (Frequency Division Multiple Access) y TDMA (Time Division Multiple Access), se puede obtener una gran mejora en la capacidad mediante la reducción del nivel de interferencias. Esto ocasionó la aparición de un intenso trabajo de investigación sobre técnicas de mejora de la capacidad. Entre estas técnicas cabe destacar la sectorización y la monitorización de la actividad de los usuarios de voz [?], ampliamente usadas, que consiguen mejorar la capacidad de CDMA frente a FDMA y

TDMA. Otras técnicas de mejora se encuentran en trabajos como [?], donde se propone elegir como estación base no la más cercana, sino la de menor interferencia, y en [?], donde se opta por el uso de codificadores de voz de tasa variable.

Pero el análisis de la capacidad está muy influenciado por un aspecto clave de los sistemas CDMA, el control de potencia. Las imperfecciones de este control originan una importante degradación de la capacidad, con lo que surgen trabajos como [?] y [?] que analizan el modelado de estas imperfecciones mediante una distribución lognormal para un sistema tradicional de voz. En estudios más detallados como [?] y [?] se muestra que, en un canal con desvanecimientos rápidos debidos al multitrayecto, la desviación estándar de la distribución lognormal depende de si el móvil se está comunicando o no con la estación base donde se mide la potencia.

La mencionada dependencia de la capacidad con el nivel de interferencias ha llevado al estudio de modelos de interferencia intercelda que permiten simplificar el análisis de sistemas CDMA multicelda. El modelo más sencillo considera que la interferencia intercelda es una fracción de la interferencia intracelda, por lo que se define el factor f que relaciona ambos niveles de interferencia. Este factor f , empleado en estudios como [?], [?] y [?], debe emplearse con cuidado porque su valor depende mucho de las condiciones del entorno de propagación, lo que significa que si se producen cambios en el medio es necesario recalcular el valor adecuado para f . Además en este caso se considera un nivel constante de interferencia intercelda, lo que supone una simplificación importante. El modelo más ampliamente utilizado considera variaciones en el nivel de interferencia intercelda mediante el empleo de una variable aleatoria con distribución gaussiana [?], [?]. Los parámetros estadísticos media y varianza de esta interferencia no sólo dependen del medio de propagación, sino también de las características de los servicios soportados y del número de usuarios. Por este motivo, se ha desarrollado una herramienta analítica que permite adaptar los parámetros estadísticos en función de las características del entorno. Existen propuestas relativas al empleo de la distribución gamma para modelar la interferencia intercelda [?], [?].

Los primeros estudios sobre capacidad se efectuaron sobre sistemas que soportaban un único servicio, la voz, para posteriormente reorientarse hacia los nuevos sistemas multiservicio. Concretamente, los sistemas multiservicio de segunda generación (2G), que emplean la técnica CDMA de banda estrecha, han atraído una gran atención debido a su auge actual. La metodología analítica usada de forma más común [?], [?] estima el máximo número de usuarios de las diversas clases de servicios estableciendo que la relación señal/interferencia sea menor que un cierto umbral de calidad con determinada probabilidad. Este procedimiento requiere efectuar una integración de la función Q, [?]. Los sistemas integrados más simples integran el servicio de voz y un servicio de datos tolerante al retardo, mientras que en los sistemas multimedia se consideran distintos servicios de datos [?], [?], [?]. Los estudios más recientes sobre los futuros

sistemas UTRA se ocupan, principalmente, de analizar el impacto sobre la capacidad de las nuevas propiedades y técnicas de mejora que permite WCDMA [?], [?], [?].

La integración de servicios afecta de forma negativa a la capacidad. Una de las ventajas de CDMA es que, dado que la interferencia es generada por un elevado número de fuentes, la varianza de la función distribución de la potencia interferente instantánea disminuye, lo que mejora la capacidad. En cambio cuando se trata de transmisiones de datos en modo paquete, el acceso aleatorio al canal origina patrones de interferencia aleatorios que incrementan la varianza [?]. Además se genera un tráfico de paquetes con características muy variables en cuanto a tamaño de paquete y longitudes de ráfaga. Por este motivo es necesario analizar los protocolos de acceso MAC (Medium Access Control) más adecuados para minimizar la fluctuación de la interferencia. Un aspecto clave en sistemas integrados es el análisis de esquemas de acceso en modo dual, donde las transmisiones pueden tener lugar mediante canal común o canal dedicado según las características de la clase de servicio [?], [?].

Son muy numerosos los trabajos relativos al análisis de protocolos de acceso, como [?], donde se estudia el protocolo híbrido CDMA/PRMA, y otros muchos que se ocupan del protocolo ALOHA ranurado, que es el elegido por el estándar UTRA [?], [?]. Además en algunas de estas investigaciones sobre ALOHA ranurado se proponen mejoras al mismo, como el uso de un protocolo de chequeo del estado del canal [?], [?]. Este aspecto del acceso continúa siendo una línea de investigación para los sistemas CDMA de tercera generación, con trabajos tan actuales como [?] y [?], donde el eje central es la integración de servicios muy diversos. Un aspecto de interés, sobre el que la investigación es vaga, es el comportamiento de los protocolos de acceso en UTRA en función de los mecanismos de transmisión de las diversas clases, es decir, según el nivel de ocupación del canal común por parte de los distintos servicios.

La gestión del acceso de los usuarios a la red es un tema clave, especialmente en un sistema CDMA con aplicaciones multiservicio, como ocurre en UTRA. Para analizar esta cuestión es necesario considerar no sólo el protocolo MAC, sino también los controles de admisión y gestión de recursos [?]. El análisis de capacidad de los sistemas CDMA 3G es la base necesaria para la implementación de controles de admisión. Muchos de los artículos orientados hacia el estudio de técnicas de admisión simplifican el análisis de la capacidad usando el factor f para modelar la interferencia intercelda, como es el caso de [?] y [?]. Otros como [?] utilizan el factor f de un determinado entorno de propagación para ajustar la media y la varianza de la distribución gamma con la que se modela la interferencia intercelda. En este caso el problema es que no se propone ningún método para adaptar estos parámetros estadísticos si se producen cambios en el entorno de propagación. El empleo del factor f en estos análisis de controles de admisión no es muy adecuado porque no considera las variaciones del nivel de interferencia intercelda, lo que

parece implicar una gran bondad en los límites de capacidad.

Los controles de admisión se deben diseñar para garantizar tanto el grado de servicio (GoS) como la calidad de servicio (QoS). En [?] se presenta una clasificación muy clara de estas técnicas según la manera de establecer el umbral de admisión, el primer tipo basado en el número de usuarios, y el segundo basado en el nivel de interferencias. Además en este artículo se realiza una comparativa muy interesante de estas técnicas, aunque empleando un modelo de interferencia intercelda poco flexible, como se comentó anteriormente, y analizando una sólo clase de servicio de baja tasa como la voz. Existe otro conjunto de técnicas basadas en el concepto de ancho de banda equivalente [?], [?] que, en realidad, pertenecen al segundo tipo descrito, dado que el ancho de banda equivalente, definido como el producto del SIR (Signal to Interference Ratio) por la tasa de bits, no es más que una medida de la potencia o interferencia generada por cada usuario. La intensa investigación efectuada en torno a estos controles revela la dificultad de estimar el nivel de interferencia, que no es estático, sino que fluctúa [?], [?], especialmente en los sistemas multiservicio, por lo que es muy recomendable emplear algoritmos adaptativos. Los diversos trabajos sobre técnicas adaptativas muestran la complejidad de las mismas, dado que necesitan medidas periódicas de numerosos flujos de información para tomar sus decisiones [?]. En la actualidad continúa vigente la problemática de la elección de umbrales de admisión adecuados en sistemas multiservicio, para los que se han propuesto diversas estrategias de tipo adaptativo que tratan de adecuarse a las fluctuaciones del nivel de interferencias [?], [?]. Una técnica adaptativa muy interesante es la que se presenta en [?], que se basa en medidas de la carga y el nivel de interferencias para efectuar una asignación dinámica de recursos. Este estudio sólo considera una clase de servicio y emplea un algoritmo adaptativo de asignación de tasas de transmisión. Por este motivo sería interesante analizar su aplicación en un sistema multiservicio, empleando algoritmos de gestión de recursos más simples.

El empleo de algoritmos de gestión de recursos junto a controles de admisión mejora las prestaciones del sistema, maximizando la capacidad del mismo. En [?] se analizan las ventajas del uso combinado de técnicas de admisión y congestión en un sistema integrado por dos servicios tan distintos como la voz y un servicio de datos tolerante al retardo. Este artículo muestra la necesidad de la estrategia de gestión en un sistema multiservicio para repartir los recursos disponibles en función de las características de las diversas clases. Aunque existen trabajos en esta línea, son pocos los que se orientan hacia los futuros sistemas UTRA multiservicio.

El objetivo de esta tesis es el análisis de estrategias de control de acceso en un sistema UTRA multiservicio para ofrecer garantías de QoS. Dentro de esta gestión del acceso de los usuarios a la red se analizan las limitaciones impuestas al sistema por el protocolo de acceso MAC, junto con las mejores técnicas de admisión y gestión de recursos que limitan el nivel de interferencias

y distribuyen los recursos según las características de las clases de servicio para garantizar los requisitos de QoS de todas ellas. Dado que estos controles están estrechamente relacionados, para ofrecer garantías de calidad es necesario una perspectiva global que considere todos estos aspectos.

El estudio de técnicas de admisión requiere una fase previa de análisis de la capacidad. En esta fase se han efectuado ciertas simplificaciones en el modelo del sistema UTRA para posibilitar el desarrollo de un método analítico sencillo de estimación de la capacidad, fácilmente aplicable en la gestión del acceso [?], [?]. Pero con este propósito, y para obtener límites de capacidad que no sean demasiado optimistas, es necesario prestar atención al modelado de la interferencia intercelda, considerando las fluctuaciones de la misma mediante una variable aleatoria con distribuciones gaussiana y gamma. Para dotar de flexibilidad a este modelo de interferencia intercelda es necesario desarrollar una herramienta que adapte los parámetros estadísticos media y varianza a los cambios en el entorno de propagación y a las características de los servicios.

Tras efectuar este análisis de capacidad se han analizado las limitaciones impuestas al sistema UTRA por el protocolo de acceso ALOHA ranurado. En este caso no se pretende efectuar una comparativa de las diversas propuestas de protocolos de acceso, sino estudiar las posibles degradaciones en las prestaciones del sistema debidas a tiempos de acceso muy elevados [?], [?]. Para analizar cómo se pueden mejorar estos tiempos se ha estudiado el protocolo ISMA (Inhibit Sense Multiple Access) en el que la estación base ejerce cierto control, frente al acceso totalmente aleatorio de ALOHA ranurado. Una característica esencial en este estudio ha sido la integración de nuevos servicios de datos de tercera generación, como es el caso del acceso *web*, con servicios tradicionales como la voz, ambos de características muy diferentes. Esta integración de servicios distintos nos ha permitido indagar sobre la relación de los protocolos de acceso con los mecanismos de transmisión de las diversas claves. El propósito final de este estudio es analizar la influencia de las técnicas de acceso sobre las limitaciones del sistema, es decir quién impone las restricciones, el parámetro del tiempo de acceso o los máximos niveles de interferencia permitidos.

En cuanto a los controles de admisión, se han analizado dos tipos, el primero de ellos con umbrales de admisión fijos y el segundo de tipo adaptativo. En el primer caso se han evaluado las prestaciones de dos clases de controles, la primera, más simple, con un umbral basado en el número de usuarios y la segunda de mayor complejidad, basada en el nivel de interferencias, [?]. Este estudio analítico se orienta hacia servicios con conmutación de circuitos y conceptos tradicionales como los Erlangs de tráfico (modelos de tráfico con distribuciones exponenciales). En el segundo caso, el control adaptativo se ha diseñado para adaptar dinámicamente sus umbrales en función de la gran fluctuación de la interferencia a la que darán lugar los nuevos servicios de datos basados en conmutación de paquetes. Además se han propuesto diversas disciplinas de

servicio que mejoran las prestaciones cuando se unen al control de admisión. Dentro de estas técnicas se ha estudiado un disciplina dinámica, de mayor complejidad, orientada hacia servicios adaptativos con los que es posible negociar la tasa de transmisión.

Todos los contenidos de esta tesis se organizan en los siguientes capítulos.

El capítulo 2 analiza la rápida evolución de las redes de comunicaciones móviles, que han permitido al usuario el acceso a la información en cualquier lugar y en todo momento. A tal efecto se realiza una revisión de las características principales así como de los servicios soportados en la segunda y tercera generación.

En el capítulo 3 se describen los conceptos básicos de calidad de servicio, que diferencian a las diversas clases de servicio, y serán los usados tanto para establecer los requerimientos del usuario, como para medir el grado de satisfacción obtenido. Además se detalla la arquitectura de QoS propuesta en UMTS, que nos permite deducir la importancia de la gestión del acceso de los usuarios para ofrecer garantías de QoS.

En el capítulo 4 se presenta el mencionado análisis de capacidad del sistema UTRA multi-servicio. El capítulo 5 se ocupa del estudio de la influencia de las técnicas de acceso sobre las limitaciones del sistema. En el capítulo 6 se trata la problemática descrita sobre la elección de estrategias de admisión y gestión de recursos adecuadas para el sistema bajo estudio.

Finalmente en el capítulo 7 se presentan las conclusiones y líneas futuras de esta tesis.

Capítulo 2

Comunicaciones móviles de 3G

2.1 Introducción

La rápida evolución de las comunicaciones celulares y redes de área local sin hilos, así como de los terminales móviles, ha dado lugar a que los usuarios puedan acceder a la información en cualquier lugar y en todo momento. Las características de las aplicaciones actuales, como el carácter rafagueado del tráfico y los diferentes requisitos de QoS, convierten en ineficiente la tradicional técnica de conmutación de circuitos usada en la red de telefonía celular actual, y requieren modificaciones en las técnicas de conmutación de paquetes, para que soporten la movilidad y las características particulares del canal radio. En este capítulo se analiza la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles celulares, 2G y 3G, prestando especial atención al sistema UMTS.

2.2 Evolución de los sistemas celulares

En un sistema celular, la extensa área cubierta por el sistema radio se divide en un elevado número de áreas pequeñas, a las que se denomina celdas. Cada celda consta de una estación base con la que se comunican un conjunto de usuarios móviles, interconectada con una central de conmutación de telefonía móvil, que a su vez sirve de *gateway* a la red pública fija (figura 2.1).

Los sistemas celulares se clasifican, en función del tamaño de las celdas, en las siguientes categorías: macrocelulares, microcelulares y picocelulares, [?].

Las macroceldas son usadas, principalmente, para cubrir áreas extensas con baja densidad de tráfico, distinguiéndose entre macroceldas grandes y pequeñas según la extensión de este área. Las macroceldas grandes tienen radios entre 5 y 10 km y se usan en áreas rurales. Las celdas pequeñas tienen radios de 1 a 5 km y se usan cuando la densidad de tráfico en las celdas grandes es suficientemente elevada para causar bloqueos de llamadas. Estas redes macrocelulares

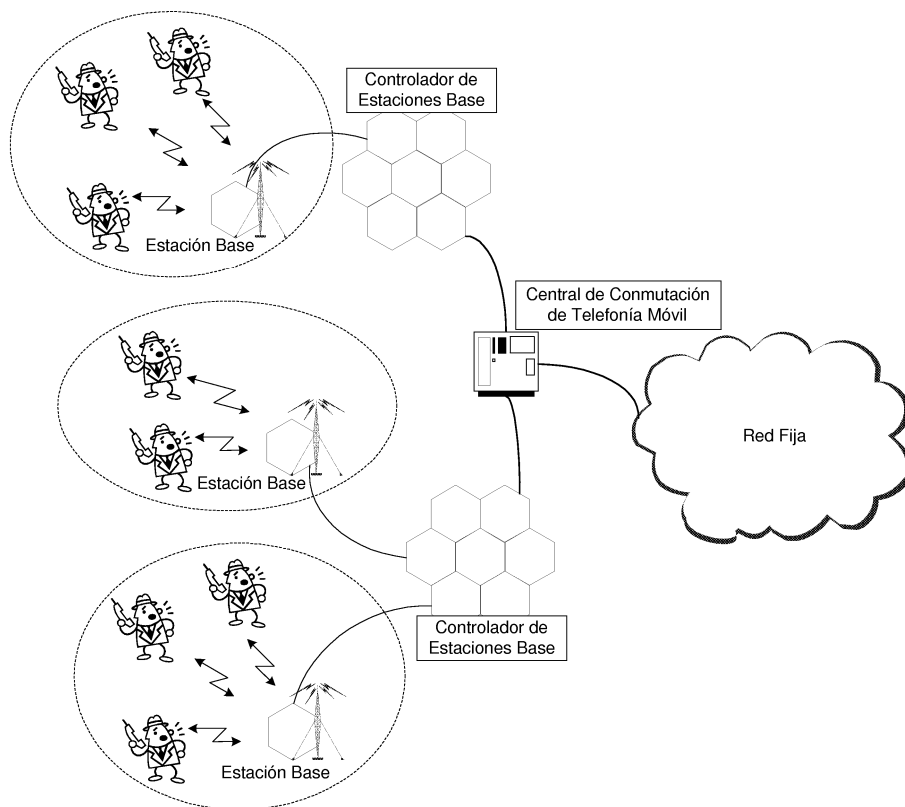


Figura 2.1: Sistema de comunicaciones móviles

requieren una buena planificación, basada en la combinación de medidas de campo y modelados teóricos según estas medidas.

Las redes microcelulares son usadas en áreas con alta densidad de tráfico, como áreas suburbanas, y tienen radios entre 200 m y 1 km. Las picoceldas, también llamadas celdas *indoor*, tienen radios entre 10 y 200 m y son usadas para las comunicaciones radio en un entorno de oficina. El pequeño tamaño de las picoceldas induce una rápida movilidad entre las mismas, por lo que el mantenimiento de la comunicación, incluido el traspaso de estación base (*handover*), es más complejo que en una red microcelular. Además, la variación dinámica en cada lugar del número de usuarios es un obstáculo para el control de calidad. Las ventajas de estas pequeñas células son su elevado *throughput*, una gran reutilización de las frecuencias y transmisores de baja potencia.

El gran desarrollo experimentado por las comunicaciones móviles en los últimos años las ha situado en un punto de inflexión, donde la movilidad a escala internacional, el acceso a Internet y las aplicaciones multimedia sobre terminales móviles cobran una gran importancia. En todo este proceso es interesante analizar la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles celu-

lares. La primera generación de redes celulares era analógica y requería terminales de usuario de elevada potencia instalados en los automóviles. El cambio más significativo con la llegada de la segunda generación fue la tecnología digital, capaz de proporcionar servicios mejorados en los terminales de usuario. Esta segunda generación actual, orientada principalmente a la comunicación de voz, usa el tradicional modo de conmutación de circuitos, que resulta muy ineficiente para el tráfico eminentemente rafagueado de los actuales y futuros servicios de datos. Por este motivo, es necesario usar técnicas de conmutación de paquetes y mejorarlas para la futura tercera generación de redes celulares, de forma que consideren los aspectos de movilidad y variación en el tiempo de las características del canal.

Los principales sistemas celulares 2G son los siguientes [?]:

- *GSM 900 y 1800* (Global System of Mobile Communications).

El estándar de telecomunicaciones digitales celulares GSM es el sistema macrocelular más ampliamente desarrollado, y más de 110 países en todos los continentes se han comprometido con esta tecnología. Este sistema supuso una revolución respecto de los sistemas analógicos, dado que la digitalización permitió reducir los costes de fabricación y mejorar el número de comunicaciones que podían cursarse en un ancho de banda dado.

Pero en la actualidad los costes de instalación son muy altos debido a su elevado nivel de utilización, especialmente en las ciudades, lo que ocasiona importantes interferencias que dificultan la comunicación. Para solucionar este aspecto se han aplicado diversas técnicas de mejora de la eficiencia espectral [?], tales como la utilización del control de potencia en el enlace descendente, el salto de frecuencias, de modo que la comunicación no se realiza siempre en la misma frecuencia, las estructuras jerárquicas de frecuencias y la utilización de un codificador adaptativo multitasa, que codifica la voz en función de las condiciones del canal. Pero con estas soluciones a corto plazo no pueden introducirse nuevos servicios, debido a las bajas tasas de transmisión ofrecidas, desde 300 bps hasta 9.6 kbps.

La evolución de las redes GSM hacia el estándar UMTS se basa en tres tecnologías [?]:

- HSCSD (High Speed Circuit-Switched Data). Esta técnica aumenta la capacidad de transmisión de GSM agrupando hasta 8 *time-slots* de un canal, de esta forma se pueden transmitir hasta 57.6 kbps en modo circuito conmutado. En este caso, el ancho de banda no se utiliza eficientemente porque se trata de conmutación de circuitos. Aunque requiere pocas inversiones en red, su adopción no se está llevando a cabo.

- GPRS (General Packet Radio Service). GPRS añade conmutación de paquetes a todos los niveles de la red GSM. Incluye una nueva capa MAC de acceso al medio y una nueva capa de control de radio RLC (Radio Link Control), con lo que la transmisión se puede realizar a distintas velocidades por *slot* (9.6, 13.4, 15.6 y 21.4 kbps) dependiendo del tipo de codificación. La velocidad es adaptativa, de forma que puede optimizarse dependiendo de las características del canal.

- EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). También llamado GSM384, utiliza un esquema de modulación y codificación alternativo que alcanza hasta 384 kbps, es decir 48 kbps por *time slot* GSM. EDGE mejora la capacidad de GSM, especialmente en zonas de alto tráfico, mediante técnicas de modulación adaptativas, que varían según las condiciones de propagación e interferencia. La introducción de EDGE tendrá poco impacto técnico, porque está totalmente basado en GSM, y requiere muy pocos cambios en el hardware y software de la red. Por ejemplo, EDGE usa la misma estructura de trama TDMA, canal lógico y ancho de banda de portadora 200 KHz de las redes GSM actuales. Además, los canales con funcionalidad EDGE podrán operar en modo EDGE o GSM, permitiendo la coexistencia y la introducción progresiva de EDGE.

- Pan-American IS-95A/B, IS-54, IS-36 y JDC (Japanese Digital Cellular). Los tres primeros son sistemas americanos de segunda generación. El sistema IS-95, basado en CDMA, ha tenido una fuerte influencia en la elección de CDMA como tecnología de acceso radio en los sistemas 3G.

2.3 Sistemas celulares 3G

Los elevados requisitos de tasa de transmisión de los nuevos servicios de datos, junto con la necesidad de una mayor eficiencia del espectro han sido los factores causantes del desarrollo de los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación. La especificación de los sistemas 3G supuso un fuerte reto, puesto que el objetivo general era establecer un sistema de comunicaciones móviles global, único en todo el mundo. Los sistemas 2G, si bien aportaban avances tecnológicos respecto a los de primera generación, eran estándares definidos con carácter local e incompatibles entre sí. Además, la restricción geográfica de los sistemas 2G venía acompañada de una falta de coordinación en la asignación de bandas de frecuencia. En la ITU comienzan en 1985 las primeras actividades de normalización de estos sistemas 3G globales con la creación del grupo interino 8/13 [?]. Este grupo investiga aspectos generales como las bandas de frecuencia

más adecuadas, los niveles de compatibilidad y las necesidades de los países en vías de desarrollo, y bautiza al sistema con el nombre de FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System). La asignación con carácter mundial de las bandas de 1885-2025 MHz y 2110-2200 MHz para la componente terrestre 3G, junto con 1980-2010 MHz y 2170-2200 MHz para la componente satélite, se realiza en la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones del año 1992.

La continuación de estos trabajos tiene lugar en el grupo 8/1 de la ITU. Este grupo, en colaboración con otros equipos involucrados, define los requisitos exigibles a las tecnologías de acceso radio 3G. Los principales objetivos del interfaz radio se pueden resumir en [?]:

- Máxima cobertura y movilidad para 144 Kbps, y preferiblemente 384 Kbps.
- Cobertura y movilidad limitadas para 2 Mbps.
- Alta eficiencia de espectro comparada con los sistemas existentes
- Gran flexibilidad para soportar nuevos servicios

Uno de los cambios más perceptibles efectuados por este grupo es el cambio de nombre del sistema, que pasa a denominarse IMT-2000 (la cifra designa tanto la banda de trabajo de 2 GHz como el año esperado para el término de las especificaciones). Otro aspecto importante consiste en el cambio del objetivo inicial de un sólo sistema mundial a un sistema IMT-2000 caracterizado por una familia de tecnologías de acceso radio. Con este propósito la ITU convoca en 1987 un proceso de presentación de tecnologías candidatas para seleccionar las tecnologías radio de IMT-2000. La respuesta a esta convocatoria consiste en la presentación de 10 candidaturas para la componente terrestre y 6 para la satélite. Una de las propuestas para la componente terrestre es el estándar europeo UTRA, que incluye una componente FDD y otra TDD. Tras un largo proceso de evaluación y selección, la componente terrestre se configura en 1999 conforme a los especificado en la tabla 2.1. El documento que recoge la especificación de cada una de estas tecnologías radio es la recomendación RSPC de la ITU, denominada oficialmente como M.1457.

Interfaz radio de la componente terrestre IMT-2000					
Nombre	IMT-DS	IMT-TC	IMT-MC	IMT-SC	IMT-FT
Propuesta	UTRA		MC CDMA 2000	UWC-136	DECT
Acceso	WCDMA	CDMA/TDMA	CDMA	TDMA	TDMA/FDMA

Tabla 2.1: Interfaz radio de la componente terrestre IMT-2000

El sistema UMTS nace como una propuesta netamente europea de tecnología 3G. La organización que elabora la propuesta es el grupo SMG2 de la ETSI, que se ocupa de decidir

la tecnología radio para UMTS mediante una evaluación de alternativas posibles. Al SMG2 se presentan numerosas propuestas que se agrupan en los denominados grupos de concepto según la tecnología en que se basan. Estos 5 grupos son:

- Grupo α , basado en tecnología DS-CDMA (Direct Sequence CDMA)
- Grupo β , basado en la técnica OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- Grupo γ , con las propuestas basadas en TDMA
- Grupo δ , con la combinación de TDMA y CDMA
- Grupo ε , basado en ODMA (Opportunity Driven Multiple Access)

En la reunión del SMG de 1997 se pone de manifiesto que la elección se circunscribe a los grupos α y δ , es decir a las tecnologías WCDMA y TDMA/CDMA. Tras muchas dificultades para el consenso, se llega al denominado *acuerdo de París* en 1998 que concluye que la solución UTRA tiene dos componentes: FDD y TDD. La primera, basada en la solución WCDMA, se sitúa en las bandas emparejadas de UMTS, y la segunda utiliza la combinación de tecnologías CDMA/TDMA y se ubica en las porciones no emparejadas de la banda.

Una vez decidida la interfaz radio, se inicia una fase de perfeccionamiento de la propuesta, mediante la creación de un nuevo foro para la especificación del sistema, el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). 3GPP es un consorcio de cinco organizaciones globales para el desarrollo de estándares como son la ETSI, ARIB (Association of Radio Industries and Businesses), T1 (Committee T1), TTA (Telecommunications Technology Association) y TTC (Telecommunications Technology Committee). A él le sigue en poco tiempo otro, el 3GPP2, reflejo de actividades similares pero en el campo de la propuesta CDMA2000 para IMT-2000.

El estudio de UMTS se ha efectuado en el marco de programas de investigación de la Comunidad Europea como RACE (Research and Technology Development in Advanced Communications Technologies in Europe) y ACTS (Advanced Communications Technologies and Services), [?].

La componente terrestre de UMTS, denominada UTRA, tiene una estructura jerárquica, es decir, está compuesta por tres tipos de celdas, macroceldas, microceldas y picoceldas, con un mínimo de 5 MHz de ancho de banda por celda. En la primera fase de implantación de UMTS está previsto usar macroceldas para proporcionar la máxima cobertura posible. Estas celdas cubren áreas desde 1 hasta 35 km y se destinan para ofrecer cobertura rural y de carreteras a vehículos que se mueven a alta velocidad (transmisión de datos de 144 kbps). Las microceldas, con radios desde 50 m hasta 1 km, proporcionan mayor capacidad y mejor cobertura en áreas

con alta densidad de tráfico (zonas urbanas). Esta red ofrece velocidades de transmisión de 384 kbps para usuarios fijos o que se mueven lentamente con una elevada densidad de tráfico. La tecnología FDD será la empleada tanto para las macroceldas como para las microceldas [?]. Las picoceldas tienen radios de hasta 50 m y ofrecen coberturas localizadas en interiores, con velocidades de transmisión de 2 Mbps. En este caso se emplea UTRA TDD, dado que este modo está optimizado para las altas tasas de transmisión requeridas en puntos de elevada densidad de tráfico. Dada la expansión de Internet, se espera que en estos sistemas 3G la mayor parte del tráfico sea acceso a internet e intranet, que se caracteriza por su asimetría, esto es, elevados requisitos de ancho de banda en el enlace descendente frente a mínimo ancho de banda en el enlace ascendente. TDD ofrece una solución óptima para estos patrones de tráfico asimétricos, mientras que FDD es simétrico, con igual ancho de banda en ambas direcciones. La ventaja de FDD es que proporciona un gran área de cobertura con servicios de gran movilidad, incluyendo tasas de bits de 144 Kbps a velocidades de automóviles, de 384 Kbps a velocidades de caminante y 2 de Mbps en un entorno estacionario, mientras que TDD es una tecnología de área local y baja movilidad.

Capítulo 3

Garantías de QoS

3.1 Introducción

Las futuras redes celulares de comunicaciones móviles no sólo deberán soportar el servicio en tiempo real de voz y las aplicaciones orientadas a datos convencionales, como el correo, telnet, ftp, etc, sino también las nuevas aplicaciones multimedia, entre las que destacan las de tipo interactivo, que están sufriendo un explosivo crecimiento debido principalmente a Internet. Dada la multitud de aplicaciones con requisitos muy distintos, es necesario que la red ofrezca a cada una de ellas las garantías de calidad exigidas. Así, por ejemplo las aplicaciones de vídeo en tiempo real y telefonía por Internet requieren límites muy estrictos en cuanto al retardo, aún a costa de sufrir pérdidas (aplicaciones sensibles al retardo), en cambio las aplicaciones de transferencia de datos como *ftp* requieren tasas de pérdidas pequeñas, a costa de retardos más elevados (aplicaciones sensibles al error). La definición de QoS en una red radio cuenta con una serie de importantes problemas específicos del entorno. En primer lugar, los canales radio tienen errores rafagueados, dependientes de la localización y dependientes de la movilidad de los usuarios. En segundo lugar la contención para el canal radio depende de la localización y finalmente la movilidad de los usuarios causa cargas de tráfico desiguales entre celdas. Por este motivo en este capítulo se analiza el aspecto de la calidad de servicio en sistemas 3G, describiendo los parámetros de QoS y las clases de servicio especificadas en UMTS. Además se analizan los mecanismos necesarios para garantizar estos parámetros de QoS en este tipo de redes.

3.2 Requisitos de QoS

La calidad de servicio es un concepto acuñado hace mucho tiempo, que se puede definir de forma genérica como el efecto conjunto del funcionamiento de un servicio que determina el grado de satisfacción de las diversas partes que participan en la comunicación (el usuario y el proveedor de servicio). Los requisitos de QoS resultan muy difíciles de garantizar en la nueva generación de comunicaciones móviles, donde se maneja un tráfico muy heterogéneo. Además es

necesario considerar las peculiares características del enlace radio [?], que motivan la aparición de dos efectos importantes, como son la fluctuación de la QoS, debida a la variación del ancho de banda del canal radio, y el carácter dinámico de las conexiones, debido al cual se pueden producir interrupciones por el traspaso entre estaciones base. Por este motivo, en un entorno radio no se puede garantizar una QoS continua, sino que es necesario usar una serie de estrategias para cumplir los requerimientos de las aplicaciones [?], tales como:

- *Ocultar las fluctuaciones del entorno a las aplicaciones*

Esta técnica se basa en enmascarar los cambios del entorno, ofreciendo un servicio estable a la aplicación. Para esto se usan controles de admisión, de reserva de recursos y de mantenimiento. Además es importante reducir la demanda, dadas las características de baja tasa del enlace radio. A tal efecto se aplican técnicas de reducción del volumen de transferencia como: compresión de datos, *caching* y filtrado inteligente.

En cuanto a la compresión, se pueden usar algoritmos generales o específicos según el contenido para conseguir mayor eficiencia de compresión. El *caching* se aplica para clientes tipo *web* y consiste en almacenar en una memoria caché en el nodo móvil los documentos, para evitar las sucesivas retransmisiones sobre el enlace radio. Aunque la mayor parte de los navegadores también realizan esta operación, el caché en el propio cliente tiene características persistentes y características de gestión avanzadas, que normalmente no están disponibles en los navegadores. El filtrado inteligente es una forma muy severa de compresión con pérdidas. Un ejemplo de la misma son los visores *web* que descargan los documentos sin imágenes. Una manera de implementación es permitir que el usuario especifique un tamaño máximo para la información que desea obtener, de forma que el sistema disponga de este límite máximo de datos. Cuando el usuario intente descargar un documento mayor que el límite, se le notifica, dándole la oportunidad de abortar la transferencia inmediatamente.

- *Realizar una renegociación constante de la QoS*

Cada vez que la red, debido a cambios en el entorno, no pueda proporcionar la calidad requerida por una aplicación, se inicia una renegociación, en la que se le pregunta a la aplicación si admite una calidad de servicio menor. La aplicación puede aceptar esta menor QoS en la conexión o no aceptar y desconectarse.

- *Monitorización y adaptación*

Es necesario adaptar las aplicaciones a las condiciones de fluctuación de la red. A tal efecto se pueden implementar un conjunto de mecanismos de control de flujo que permitan mantener un nivel de QoS.

- *Definición de parámetros de QoS adicionales*

Se pueden definir parámetros adicionales como el perfil de pérdidas, que indica los patrones o reglas a seguir en caso de que los paquetes deban ser eliminados, y la probabilidad de una comunicación sin interrupciones, que indica la probabilidad de que un traspaso entre estaciones base ocasione un corte en la comunicación. Debido a que en un entorno radio las conexiones se pueden interrumpir temporalmente (*handover*), las aplicaciones deben ser capaces de recuperarse de interrupciones temporales, para lo que deben especificar el tiempo máximo de interrupción que pueden tolerar y la frecuencia máxima de interrupción de la conexión.

El grupo 3GPP, encargado de la especificación del estándar UTRA, ha definido en sus informes técnicos [?] un conjunto de requerimientos de QoS a tres niveles: requerimientos a alto nivel, requerimientos generales y requerimientos técnicos, con el objetivo de definir y conformar de forma más precisa el concepto de QoS en estas redes radio de tercera generación. Estos requerimientos a tres niveles se detallan a continuación:

- *Requisitos de QoS de alto nivel*

Generalmente, los usuarios finales sólo se preocupan de los aspectos que son visibles para ellos. Desde este punto de vista se puede concluir que:

- Sólo es significativa la QoS percibida por el usuario final
- El número de parámetros definidos o controlados por el usuario debe ser tan pequeño como sea posible.
- Las definiciones de QoS derivadas de los requerimientos de las aplicaciones deben ser simples.
- Los atributos de QoS deben ser capaces de soportar todas las aplicaciones en uso.
- Las definiciones de QoS deben ser capaces de adaptarse a las futuras necesidades.
- La QoS debe definirse extremo a extremo.

- *Requisitos generales de QoS*

- Los parámetros de QoS deben ser capaces de proveer diferentes niveles de QoS.
- Ningún parámetro ni combinación de ellos debe tener un significado ambiguo.
- Los mecanismos de QoS deben permitir un uso eficiente del espectro radio.
- Los requisitos de QoS deben permitir una evolución independiente de las redes centrales y de acceso.
- Los requisitos de QoS deben adaptarse a la evolución de la red UMTS.

- *Requisitos técnicos para la QoS*
 - Los mecanismos de control de QoS en UMTS deben proporcionar el control extremo a extremo de los parámetros de QoS.
 - Los mecanismos de control de QoS en UMTS deben proveer un mapeo entre los requerimientos de la aplicaciones y los servicios UMTS.
 - Los mecanismos de control de QoS en UMTS deben ser capaces de trabajar de forma eficiente con los esquemas de QoS actuales.
 - La red UMTS debe proveer un conjunto finito de definiciones de QoS.
 - La sobrecarga y complejidad adicional causadas por la implantación de la QoS deben mantenerse limitadas, así como la cantidad de información de estado que se ha de transmitir y almacenar en la red.
 - La QoS debe permitir la utilización eficiente de los recursos.
 - Los parámetros de QoS deben soportar transmisiones asimétricas.
 - Las aplicaciones y el software de las estaciones base deben ser capaces de indicar valores de QoS en sus transmisiones.
 - El comportamiento de la calidad de servicio debe ser dinámico, es decir, debe ser posible modificar los parámetros de QoS durante una sesión activa.
 - Se debe limitar la cantidad de parámetros de QoS, dado que al incrementar el número de parámetros, se incrementa la complejidad del sistema.

3.3 Clases de servicio UMTS

En UMTS se han definido cuatro clases de servicio diferentes, cada una de ellas con distintos requisitos de QoS:

- Clase conversacional
- Clase afluente (*streaming*)
- Clase interactiva
- Clase diferida (*background*)

La principal diferencia entre estas clases es la sensibilidad al retardo. La clase conversacional es muy sensible al retardo, mientras que la clase diferida es la más insensible al mismo. Las clases de servicio conversacional y afluente están orientadas al transporte de flujos de tráfico en tiempo real, aunque la primera de ellas es más sensible al retardo.

Las clases interactiva y diferida se usan fundamentalmente en aplicaciones tradicionales de Internet como *www*, *e-mail*, *ftp* y *news*. Debido a sus menores restricciones de retardo frente a las clases conversacional y afluente, presentan mejor tasa de errores usando codificación del canal y retransmisiones. La principal diferencia entre ellas es que la clase interactiva se usa para aplicaciones interactivas, como la navegación web, mientras que la clase diferida se utiliza para tráfico unilateral (descarga de *e-mails* o de ficheros). El tráfico de tipo interactivo tiene mayor prioridad que el de tipo diferido, por lo que este último se cursa únicamente cuando los recursos no están siendo utilizados por tráfico de tipo interactivo. Esto es muy importante en redes radio, donde el ancho de banda es inferior al de las redes fijas.

3.3.1 Clase Conversacional

El ejemplo más conocido es el tráfico de voz (p.e. GSM), pero con Internet y los entornos multimedia han surgido nuevas aplicaciones que requieren esta modalidad de servicio, como la voz sobre IP y la videoconferencia. Las conversaciones en tiempo real siempre tienen lugar entre parejas o grupos de usuarios humanos. Esta es la única clase en la que las características requeridas están condicionadas únicamente por la percepción humana.

La clase conversacional se caracteriza porque no sólo debe ser muy bajo el tiempo de transferencia de la información, sino que la variación de retardo entre las unidades de información debe ser pequeña. El máximo retardo de transferencia está impuesto por la percepción humana de la conversación de audio y video. Por tanto, el límite del máximo retardo aceptable es muy estricto, y cualquier incremento del mismo supondrá una inaceptable pérdida de calidad. Este requisito del retardo de transferencia es, por lo tanto, significativamente más severo que el retardo de ida y vuelta del tráfico interactivo.

3.3.2 Clase afluente

Se aplica cuando el usuario recibe audio o video en tiempo real. Es un tráfico en un sólo sentido cuyo destino es un usuario humano.

Este esquema es una de las novedades en las comunicaciones de datos, que ha hecho surgir un conjunto nuevo de requerimientos, y cuya característica principal es que la variación entre las unidades de información debe ser constante, aunque no necesita un retardo de transferencia especialmente bajo. Es necesario controlar las variaciones de retardo punto a punto, para acotar las variaciones de retardo entre las unidades de información. Pero puesto que la aplicación receptora es capaz de alinear en el tiempo las tramas recibidas, la medida del máximo retardo aceptable es impuesta por esta capacidad de alineación de la aplicación receptora, y es por tanto muy superior al límite que impone la percepción humana.

3.3.3 Clase interactiva

Este esquema se aplica cuando el usuario final, que puede ser una máquina o un humano, requiere datos (*on-line*) a un sistema servidor remoto. Como ejemplos de interacción humana con equipos remotos se pueden mencionar el acceso *web* y el acceso a bases de datos y servidores. Un ejemplo de interacción de una máquina con un equipo remoto puede ser el acceso automático a datos de medida en una base de datos de peticiones.

El tráfico interactivo es otra clase, además de la clase conversacional, en la que los requerimientos generales quedan definidos por el patrón de respuesta del usuario final. En el destino hay una entidad que espera una respuesta dentro de un tiempo determinado. El retardo de ida y vuelta es por tanto uno de los parámetros clave. Otra de las características es que los paquetes deben ser transmitidos con una baja tasa de error.

3.3.4 Clase diferida

Este esquema se aplica cuando el usuario, que típicamente será una máquina, envía y recibe ficheros de forma no interactiva. Ejemplos pueden ser la transferencia de correos electrónicos entre servidores, sincronización de bases de datos, etc.

El tráfico en modo diferido es una de las modalidades clásicas de comunicaciones de datos, en las que las características generales están definidas por un destino que no espera los datos dentro de un tiempo determinado. Es por tanto relativamente insensible al retardo. Otra de sus características es que los paquetes deben ser transmitidos con una baja tasa de error.

Las características de las clases de servicio UMTS descritas se resumen en la tabla 3.1.

3.4 Parámetros de QoS

La definición de parámetros de calidad de servicio en UMTS se realiza en dos niveles, en primer lugar se definen unos parámetros de QoS generales, y en segundo lugar se realiza una discusión de parámetros de QoS por clases.

3.4.1 Parámetros de QoS en UMTS

Los parámetros definidos son los siguientes:

- *Clase de tráfico*: conversacional, afuente, interactiva y diferida.

Definición: tipo de aplicación para la que el servicio UMTS está optimizado.

<i>Clases de servicio UMTS</i>	<i>Características fundamentales de QoS</i>	<i>Ejemplo de aplicación</i>
Conversacional	Preservar la variación de tiempo entre unidades de información Patrón conversacional (retardo bajo y estricto)	Voz
Afluente	Preservar la variación de tiempo entre unidades de información	Flujo de vídeo o audio
Interactiva	Preservar el contenido de las unidades de información Patrón petición/respuesta	Buscador <i>web</i>
Diferida	Preservar el contenido de las unidades de información El destino no espera que los datos lleguen en un tiempo determinado	Descarga de <i>e-mails</i>

Tabla 3.1: Características de las clases de servicio UMTS

Objetivo: incluyendo la clase de tráfico como un atributo, la red UMTS puede hacer suposiciones sobre la fuente del tráfico y optimizar el transporte para el mismo.

- *Velocidad máxima* (kbps)

Definición: máximo número de bits enviados hacia la red y de ésta hacia el punto de acceso al servicio dentro de un intervalo de observación, dividido por la duración de este intervalo.

Objetivo: puede ser usado para realizar reservas de códigos en el canal descendente, de modo que se limite la velocidad de envío desde las aplicaciones o redes externas y se pueda definir la máxima velocidad de usuario requerida en aplicaciones capaces de funcionar a distintas velocidades.

- *Velocidad garantizada* (kbps)

Definición: número de bits garantizados enviados por UMTS al punto de acceso al servicio dentro de un período de medida, dividido por la duración de este periodo.

Objetivo: puede ser usado para facilitar el control de admisión, y para asignar recursos dentro de la red UMTS. Por ejemplo, los requerimientos de calidad como retardo y atributos de fiabilidad se aplican para tráfico entrante ascendente a la velocidad garantizada.

- *Orden de envío* (si/no)

Definición: indica si el portador UMTS debe proveer en secuencia las unidades de datos enviadas.

Objetivo: se usa para indicar si las unidades de datos fuera de secuencia serán aceptadas o no. Este parámetro depende de la fiabilidad y puede no estar determinado por la clase de tráfico.

- *Tamaño máximo de la unidad de datos* (bits)

Definición: máximo tamaño permitido para la unidad de datos.

Objetivo: se utiliza para el control de admisión y la vigilancia.

- *Formato de información de la unidad de datos*

Definición: lista de posibles tamaños exactos de la unidad de datos.

Objetivo: la red UTRA necesita la información de tamaño del paquete de datos para ser capaz de operar de modo transparente, lo que es beneficioso para la eficiencia espectral y el retardo cuando no se usa retransmisión.

- *Fiabilidad*

Definición: información sobre la fiabilidad que la red UMTS ofrece en términos de *tasa de error*, que indica las unidades de información perdidas o detectadas como erróneas, *tasa de errores de bit residual*, que indica la tasa de errores de bit no detectados, y el parámetro de *envío de unidades erróneas*, que indica si las detectadas como erróneas deben ser enviadas o descartadas.

Objetivo: Se usa para especificar el nivel de fiabilidad requerido por la aplicación. La red UTRA puede ajustar parámetros internos basados en este valor.

- *Retardo de transferencia* (segundos)

Definición: tiempo entre la petición de envío de una unidad de datos y la llegada de la misma. Se especifica para uno o más tamaños fijos de la unidad de datos.

Objetivo: se usa para especificar el retardo que puede aceptar la aplicación. Permite a la red UTRA ajustar formatos de transporte y parámetros de control de errores.

- *Gestión de prioridades del tráfico*

Definición: especifica la importancia relativa en el manejo de las unidades de datos.

Objetivo: Permite a UMTS organizar el tráfico de acuerdo a las necesidades de cada tipo de servicio. Es especialmente importante para la clase interactiva.

- *Asignación/retención de prioridades*

Definición: especifica la importancia relativa para la asignación de recursos.

Objetivo: diferenciar los distintos tipos de transmisiones al realizar asignaciones de recursos.

3.4.2 Discusión de parámetros de QoS por clases

En esta sección se indican los parámetros de QoS más relevantes para cada una de las clases de servicio de UMTS.

- *Clase conversacional*

Normalmente y aunque el flujo de datos de una fuente conversacional puede variar, el tráfico conversacional se supone que no va a ser a ráfagas. Por este motivo, para la asignación de recursos en UMTS se utilizan los atributos de velocidad máxima y velocidad garantizada. Los requisitos de recursos mínimos quedan determinados por la velocidad garantizada. En esta clase de tráfico es importante garantizar el retardo de transferencia de una unidad de información arbitraria. Los servicios de clase conversacional no admitirán retransmisiones. El tamaño máximo de la unidad de datos es aplicable únicamente si no se especifica el formato de información y se usa para el control de admisión y supervisión. Si el formato de información está especificado, con uno o varios posibles tamaños, cada unidad de información debe ajustarse exactamente a uno de los tamaños especificados. Mediante la utilización de la tasa de error de unidades de información, la tasa de error de bit residual y el envío de unidades erróneas se especifica el requisito de fiabilidad de la aplicación. Además, se puede elegir la detección y el descarte de unidades que contengan errores, seleccionando para esta clase conversacional la adecuación de la corrección de errores en recepción.

- *Clase afluyente*

Al igual que la clase conversacional, el tráfico afluyente se supone que no va a ser por ráfagas. Por este motivo, e igual que en la clase anterior, la asignación de recursos se realiza en función de los parámetros velocidad máxima y velocidad garantizada y tiene sentido garantizar el retardo de transferencia de una unidad de datos arbitraria. Los requerimientos de retardo de transferencia para el tráfico afluyente están típicamente en un rango en el que, al menos en parte, se pueden usar retransmisiones. Los requisitos de variación del retardo de la aplicación se expresan usando el parámetro retardo de transferencia. En cuanto al tamaño máximo de la unidad de datos, como en la clase anterior, sólo es aplicable si no se especifica el formato de información. Usando los parámetros de fiabilidad, la aplicación puede especificar sus requisitos sobre tasas de error.

- *Clase interactiva*

Esta clase está optimizada para el transporte con interacción humana o de máquinas con equipos remotos. Aunque las características de la fuente se desconocen, se supone un tráfico a ráfagas. Por este motivo, se utiliza la velocidad máxima para limitar los datos enviados por las aplicaciones y redes externas. En este caso es muy necesario diferenciar distintas calidades de servicio dentro de la clase interactiva. Una alternativa podría ser establecer una garantía absoluta sobre el retardo y la velocidad, lo que parece difícil de implementar en la red UTRA. En su lugar, se usa el parámetro de gestión de prioridades del tráfico. Las unidades de datos con un mayor valor de este parámetro se procesan con mayor prioridad, usando el planificador interno de UMTS. Es imposible combinar esta aproximación relativa con atributos que especifiquen retardo, errores, etc., así que una clase interactiva no tiene garantías de calidad, y la calidad final obtenida dependerá de la carga del sistema y la política de admisión y control del operador. El único parámetro adicional que es razonable especificar es la integridad de los datos, usando los parámetros de fiabilidad. Dado que no existen recursos específicos asignados a la clase interactiva, la tasa de error de unidades de información se debe usar como valor objetivo, y debe ser garantizada en condiciones de carga normal.

- *Clase diferida*

La clase diferida está optimizada para comunicaciones entre máquinas que no sean sensibles al retardo. La red UMTS sólo transmite este servicio cuando hay capacidad disponible. Es posible usar el parámetro de velocidad máxima para especificar un límite máximo de ancho de banda. El único parámetro adicional que es razonable especificar es la integridad de los datos, usando el parámetro fiabilidad.

En la tabla 3.2 se resumen los parámetros de calidad definidos para cada una de las clases en UMTS.

3.5 Arquitectura de QoS

Para proporcionar garantías de QoS en un sistema es necesario establecer desde el origen al destino un servicio portador con unas características y funcionalidades claramente definidas. El servicio portador incluye todos los aspectos que deben ser considerados para la provisión de la calidad de servicio contratada. Estos aspectos son, entre otros, el control de señalización, el transporte de los flujos de tráfico entrantes al sistema UMTS y la gestión de la QoS. La arquitectura de niveles de un servicio portador UMTS se representa de forma resumida en la figura 3.1 [?].

El servicio portador UMTS, encargado de proporcionar la QoS UMTS, consta de dos partes, el servicio portador de Acceso Radio y el servicio portador de Núcleo de Red. El servicio porta-

Clase de tráfico	Conversacional	Afluente	Interactiva	Diferida
Velocidad máxima	X	X	X	X
Orden de envío	X	X	X	X
Tamaño máximo	X	X		
Formato de información	X	X		
Fiabilidad	X	X	X	X
Retardo de transferencia	X	X		
Velocidad garantizada	X	X		
Prioridad			X	
Asignación/retención de prioridades	X	X	X	X

Tabla 3.2: Parámetros de calidad definidos para cada una de las clases en UMTS

El servicio de Acceso Radio constituye la parte más importante y afecta tanto a la red de acceso móvil como a la de transporte dentro del sistema UMTS. El papel del servicio portador del Núcleo de Red consiste básicamente en tareas de control y negociación con la red externa, en particular a la que el sistema UMTS está conectado.

El establecimiento, modificación y mantenimiento del servicio portador UMTS con una QoS determinada requiere una serie de funcionalidades, soportadas algunas de ellas en el plano de control y otras en el plano de usuario del servicio portador. Estas funcionalidades se describen a continuación.

- *Funciones de gestión de QoS en el plano de control del servicio portador UMTS*

Estas funciones, encargadas de mantener información de la red para la asignación de recursos, son las siguientes:

- Gestor del servicio. Se ocupa de la coordinación de las funciones del plano de control

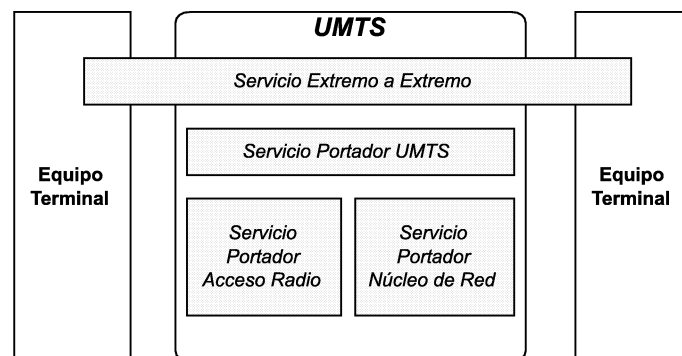


Figura 3.1: Arquitectura de la calidad de servicio en UMTS

para establecer, modificar y mantener el servicio del que es responsable.

- Función de traducción. Efectúa la conversión entre las primitivas internas de control UMTS y los diversos protocolos de control de redes externas.
 - Control de admisión/capacidad. Este control necesita información sobre los recursos disponibles y los recursos asignados al servicio portador UMTS.
 - Control de suscripción. Comprueba los derechos administrativos del usuario del servicio portador UMTS para utilizar el servicio solicitado con unos atributos de QoS especificados.
- *Funciones de gestión de QoS en el plano de usuario del servicio portador UMTS*

Estas funciones, diseñadas para mantener la señalización del tráfico de datos de un usuario dentro de ciertos límites definidos por los atributos de QoS específicos, se pueden resumir en:

- Función de proyección. Proporciona a cada unidad de datos una señal que especifica la QoS deseada en su transporte por el servicio portador.
- Función de clasificación. Asigna unidades de datos a los servicios establecidos de acuerdo a los atributos de QoS del servicio.
- Gestor de recursos. Distribuye los recursos disponibles entre todos los servicios que comparten dichos recursos, según la QoS requerida. Ejemplos de esta gestión son la planificación, la gestión de ancho de banda y el control de potencia.
- Acondicionador de tráfico. Proporciona el ajuste entre la QoS negociada y el tráfico de unidades de datos.

3.6 Gestión de servicios

En el sistema multiservicio UMTS se ha definido una completa arquitectura de QoS orientada a proporcionar las garantías requeridas por las diversas clases de servicio. Para conseguir este objetivo es necesario realizar una gestión eficiente del acceso de los usuarios a la red. Los factores claves de esta gestión de acceso son:

- Protocolo de acceso al medio (MAC)

Conjunto de reglas que determinan los procedimientos a seguir por un grupo de terminales para acceder a un conjunto de recursos compartidos. Este acceso se puede efectuar a través de un canal específico sin ningún tipo de reserva, con reserva, con mecanismos basados en *minislots* u otros. Trata de responder a la pregunta: *¿Cómo se accede?*.

- Algoritmos de ordenación de las transmisiones (*Scheduling*)

Procedimientos que determinan las transmisiones que pueden ejecutarse y el orden que deben seguir para poder garantizar los niveles de QoS requeridos, cuando diferentes terminales hacen uso de un conjunto de recursos compartidos. Trata de responder a la pregunta: *¿Quién accede y cuándo accede?*

- Algoritmo de selección de recursos

Algoritmo que permite distribuir los diferentes recursos compartidos entre los terminales, de modo que cada cual realice el uso más conveniente en función de sus condiciones de canal e interferencia. Trata de responder a la pregunta: *¿Dónde se accede?*

- Control de admisión

Mecanismo que, según el nivel de ocupación del sistema y la QoS requerida, determina si un nuevo usuario puede ser aceptado por el sistema. Trata de responder a la pregunta: *¿Quién puede acceder?*

Los algoritmos de control de admisión y gestión de recursos mencionados forman parte de las funciones del servicio portador UMTS, dentro de la arquitectura de QoS. Pero las relaciones entre estos controles son muy estrechas, como se describe en la figura 3.2, tanto que a menudo es difícil discernir donde acaban unos y empiezan otros. Por este motivo, y dada la especial relevancia de la gestión de acceso de los usuarios en los sistemas 3G, es necesario realizar un estudio desde una perspectiva global, que contemple todos estos aspectos.

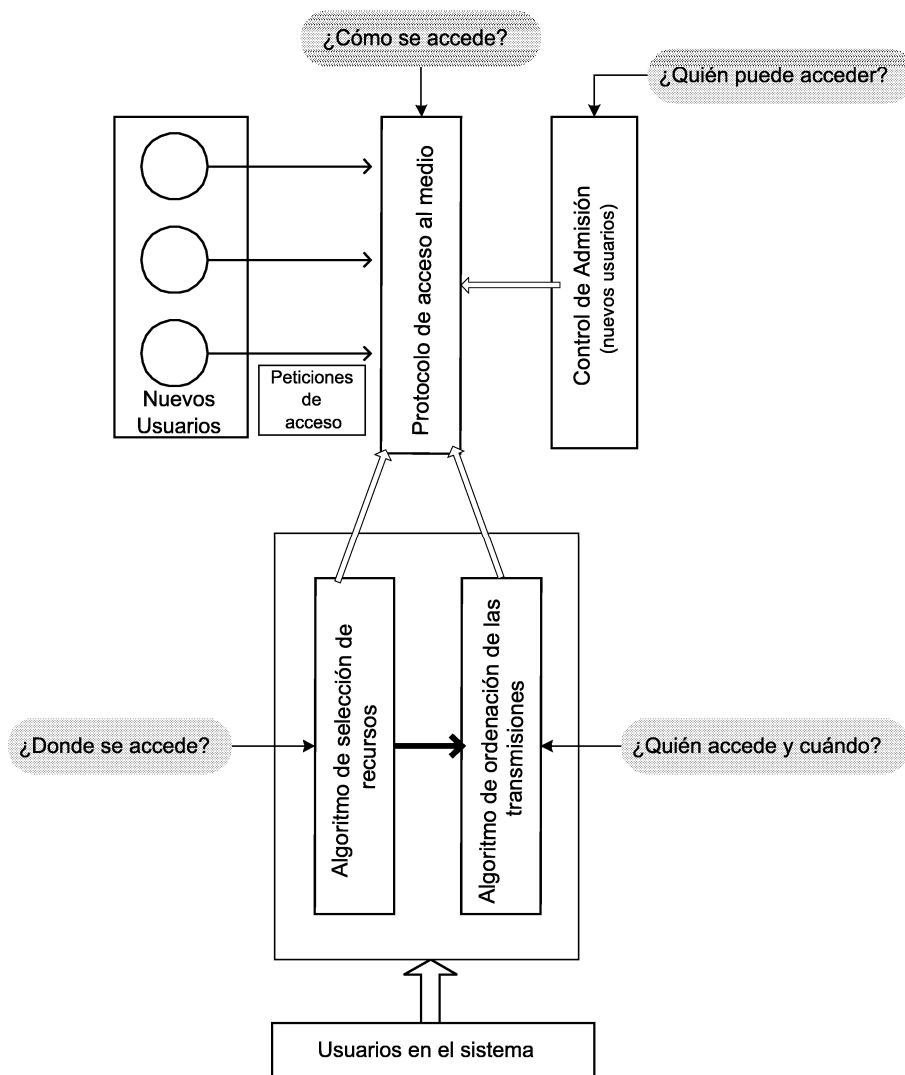


Figura 3.2: Interrelaciones entre los controles de gestión de acceso de los usuarios al sistema UMTS

Capítulo 4

Análisis de capacidad en sistemas 3G

4.1 Introducción

En los últimos años, el número de usuarios móviles se ha incrementado de forma mucho más rápida que en el pasado y se espera que esta nueva tendencia de rápido crecimiento continúe en el futuro. Según estudios del *UMTS Forum*, se espera que el porcentaje de usuarios multimedia se incremente de forma significativa durante el 2001. Los sistemas de comunicaciones móviles 3G, en avanzado proceso de estandarización, deberán adecuarse a este nuevo panorama de evolución y nuevos servicios. En este capítulo se estudia el aspecto clave de la capacidad en estos sistemas 3G con integración de servicios muy diversos, realizando un primer dimensionado para el estándar europeo UTRA. Este análisis se efectúa como paso previo necesario para la implementación de controles de admisión.

4.2 Fundamentos

En esta sección se engloba el estudio de todos aquellos aspectos y conceptos relacionados con el análisis de capacidad en un sistema CDMA.

4.2.1 Capacidad del enlace ascendente en sistemas CDMA

El cálculo de la capacidad en sistemas CDMA es un proceso complejo, dada su dependencia con las características del tráfico cursado tanto en la celda que se considera como en las que la rodean (interferencia múltiple). Dado que los patrones de interferencia son distintos para el receptor de la estación base y para el terminal móvil, el estudio de la capacidad debe efectuarse por separado para ambos enlaces, ascendente y descendente. En esta sección se analiza la capacidad en el enlace ascendente.

La capacidad del enlace ascendente se puede definir como el número de usuarios móviles que pueden acceder simultáneamente a una estación base con un nivel aceptable de interferencia

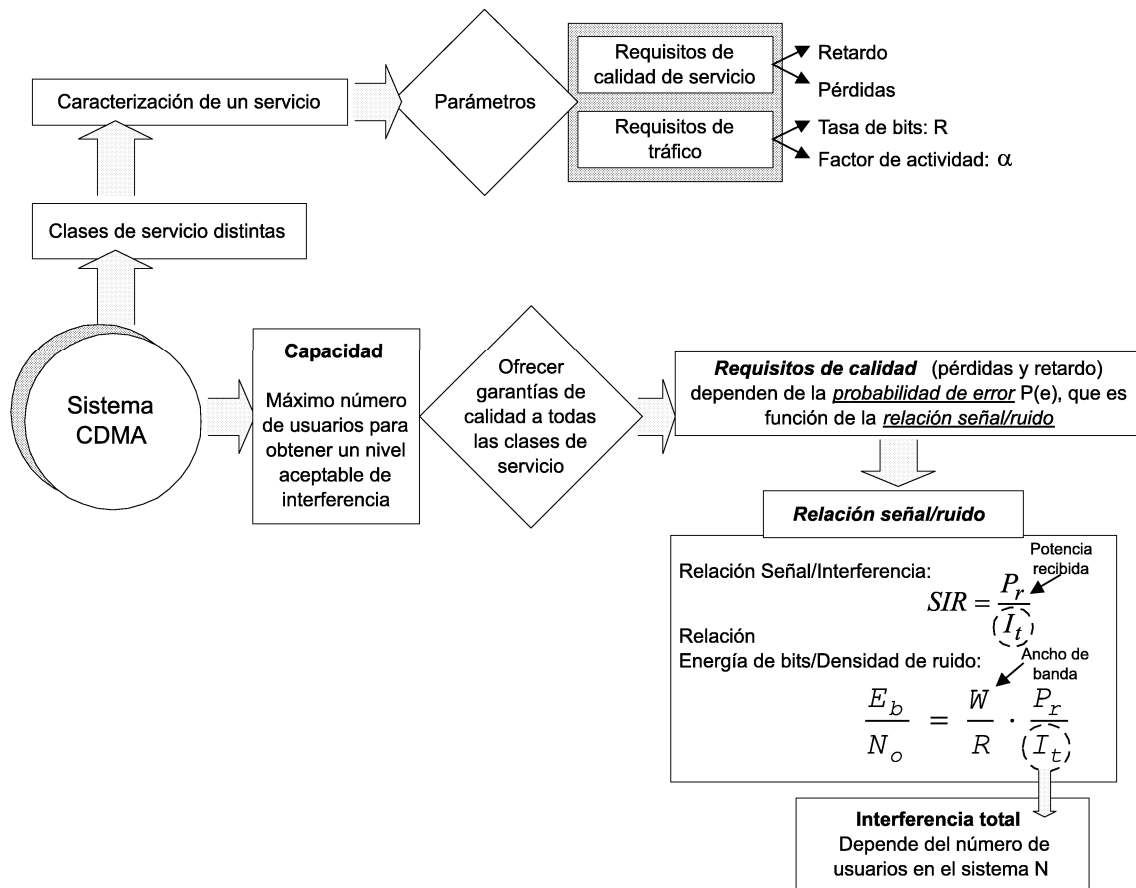


Figura 4.1: Análisis de capacidad en un sistema CDMA

mutua. En CDMA, esta capacidad no tiene un límite rígido como en TDMA, sino que puede ir creciendo a costa de una degradación en la calidad del servicio. Es decir, existe una relación muy estrecha entre la capacidad y la QoS, como se aprecia en la figura 4.1.

En esta figura se muestran los parámetros característicos de los servicios en un sistema CDMA, tanto los relativos al modelo de tráfico (tasa de bit R y factor de actividad medio α) como los requisitos de calidad (retardo y tasa de pérdidas). Estos requerimientos de QoS dependen de la probabilidad de error, dado que cuanto mayor sea ésta, mayores son las pérdidas y por tanto mayores retardos debidos a las retransmisiones. En un sistema CDMA la probabilidad de error depende del nivel de interferencias, es decir de la relación entre la potencia recibida por la estación base P_r y el ruido existente en el sistema o interferencia total I_t . Esta relación se puede expresar como la relación señal/interferencia SIR:

$$SIR = \frac{P_r}{I_t} \quad (4.1)$$

o también como la relación energía de bit (E_b) y la densidad de ruido (N_o) denominada γ :

$$\gamma = \frac{E_b}{N_o} = \frac{P_r}{\frac{I_t}{W}} = G \cdot \frac{P_r}{I_t} \quad (4.2)$$

$$G = \frac{W}{R} \quad (4.3)$$

donde W es el ancho de banda y G es la ganancia de proceso. La estimación de la capacidad consiste en fijar un umbral de calidad para la probabilidad de error, es decir determinar el número de usuarios para el cual la relación señal/ruido está por debajo de un umbral con determinada probabilidad. Este máximo número de usuarios permitido afecta principalmente al nivel de interferencia total I_t y depende de los parámetros de los distintos servicios.

La discusión sobre los factores que afectan a la capacidad se realiza tomando como ejemplo un sistema sencillo con una sola celda. Esta celda cuenta con N_t usuarios de un mismo tipo y se encuentra dividida en A_s sectores, que no interfieren entre sí, de modo que: $N_t = A_s * N$, donde N es el número de usuarios por sector. Además se considera que todos los usuarios están sujetos a un control de potencia ideal, es decir, todos llegan a la estación base con la misma potencia P_r , y que sólo se transmite durante los periodos activos mediante la monitorización de la actividad del usuario (factor de actividad medio α). En este caso, considerando un sector de la celda, la interferencia sobre un usuario es:

$$I_t = (N - 1) \cdot P_r \cdot \alpha + \eta \quad (4.4)$$

donde η es el ruido blanco de fondo. En este caso la relación energía de bit/densidad de ruido (ecuación 4.2) se puede expresar como:

$$\gamma = G \frac{1}{(N - 1) \cdot \alpha + \frac{\eta}{P_r}} \quad (4.5)$$

donde $\frac{\eta}{P_r}$ se suele despreciar. Si de esta expresión se despeja el número de usuarios, se obtiene:

$$N = \frac{G}{\gamma \cdot \alpha} + 1 \quad (4.6)$$

Este resultado nos muestra que la capacidad del enlace ascendente de un sistema CDMA es directamente proporcional a la ganancia de proceso e inversamente proporcional al factor de actividad α y a la calidad requerida γ . Por tanto, cuanto menor sea la tasa de bit requerida por una clase de servicio, mayor será la ganancia de proceso y por tanto la capacidad será mayor. En cambio, cuanto mayor sea el factor de actividad de un usuario, mayor será el nivel de interferencia generado por el usuario y por tanto menor será la capacidad. De igual modo cuanto más estricto sea el requisito de calidad de un usuario, es decir, se requiere mayor relación energía de bit/densidad de ruido, menor es la capacidad del sistema.

Pero en este estudio tan simplificado existen una serie de aspectos que no se han tenido en cuenta. El primero de ellos es la consideración de un sistema multicelda, en el que la interferencia no sólo depende de los móviles activos dentro de una celda, sino también del tráfico existente en las celdas vecinas. Además se ha supuesto una sólo clase de servicio, pero los futuros sistemas 3G van a integrar clases muy distintas, que emitirán con distintos niveles de potencia. Finalmente es necesario indicar que el control de potencia no siempre es perfecto, por lo que es necesario evaluar la degradación en la capacidad que originan estas imperfecciones en el control de potencia. Todo lo mencionado indica que existen dos factores clave en el estudio de la capacidad, como son la potencia recibida en la estación base y la interferencia en el sistema.

4.2.2 Entorno de propagación

La caracterización del entorno de propagación es esencial en un sistema radio para estimar la potencia recibida por la estación base. El canal radio es por naturaleza un medio hostil cuyo comportamiento es difícil de predecir. Tradicionalmente los canales radio se modelan de forma estadística usando medidas reales de propagación. La potencia recibida en el receptor, como consecuencia de la transmisión de una señal por el medio radio, sufre tres efectos: el primero de ellos es una importante atenuación con la distancia entre los equipos transmisor y receptor (*path loss*); el segundo consiste en una variación lenta de la potencia media recibida (*shadowing*), debida a la presencia de obstáculos en el camino, y que se modela normalmente mediante una distribución lognormal [?]; finalmente, como tercer efecto, la potencia instantánea recibida sufre una rápida fluctuación (*fading*), ocasionada por el desvanecimiento multitrayecto, que sigue una distribución de Rician o Rayleigh, dependiendo de la presencia o ausencia de una línea directa de visibilidad entre el transmisor y el receptor [?], [?]. La figura 4.2 ilustra estos tres fenómenos de propagación. En el caso A se produce una variación lenta en la potencia media recibida debido a la presencia de obstáculos, mientras que el caso B refleja la rápida fluctuación ocasionada en la potencia instantánea por el multitrayecto.

Uno de los modelos de propagación más ampliamente aceptado es el que se presenta en [?] en el que se considera que la potencia de la señal transmitida por un usuario se ve afectada tanto por la atenuación con la distancia como por el efecto de los obstáculos y la naturaleza del terreno en el canal radio (*shadowing*). En este modelo no se considera el desvanecimiento multitrayecto (*fading*) porque se asume que no afecta al nivel de potencia medio. La expresión es la siguiente:

$$P_r = P_t \cdot r^{-n} \cdot 10^{\frac{\xi}{10}} \quad (4.7)$$

donde P_r y P_t son las potencias recibida y transmitida respectivamente, r es la distancia del móvil a la estación base, n es el factor de atenuación con la distancia con valores diversos según

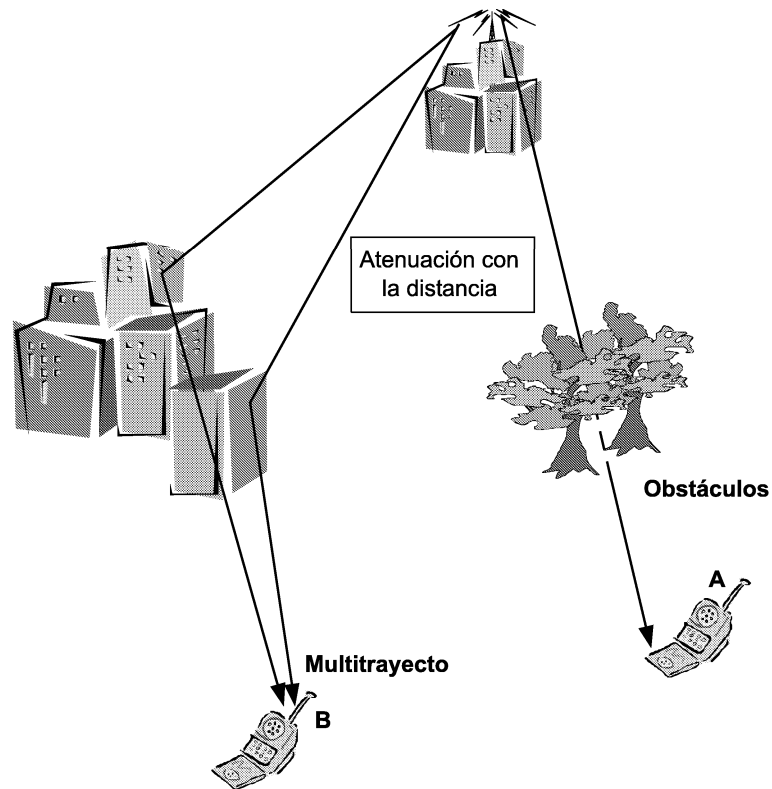


Figura 4.2: Fenómenos de propagación en un medio radio

el entorno considerado (tabla 4.1), aunque se suele tomar de 4 y ξ es una variable aleatoria gaussiana que representa el efecto de los obstáculos en el canal radio, cuya media es 0 y la desviación estándar σ_ξ suele ser de 8 dB [?]. Por tanto son el factor de atenuación n y la desviación estándar σ_ξ los parámetros característicos del entorno de propagación.

<i>Entorno</i>	Valor de n
Espacio libre	2
Área urbana celular	2.7 a 3.5
Obstrucciones de edificios	4 a 6
Obstrucciones en industrias	2 a 3

Tabla 4.1: Valores del factor de atenuación con la distancia en distintos entornos

4.2.3 Control de potencia

Un requerimiento clave en el enlace ascendente de un sistema CDMA es el control de potencia, que se emplea para compensar las pérdidas con la distancia y los desvanecimientos del canal. En un sistema CDMA todos los usuarios transmiten usando el mismo ancho de banda y al mismo tiempo, por lo que los usuarios interfieren entre sí. Debido al mecanismo de propagación, la

señal recibida por la estación base de un terminal de usuario cercano será mayor que la de otro situado en el límite de la celda. Este es el llamado efecto *near-far*. Para optimizar la capacidad, es necesario que todas las señales, lleguen a la estación base con la misma potencia media, independientemente de la distancia a la que estén situados [?]. Por este motivo las prestaciones del control de potencia son muy importantes para maximizar la capacidad del sistema.

El control de potencia es más importante en el enlace ascendente que en el descendente. La razón es que en el enlace descendente las señales multiplexadas transmitidas por una estación base se desvanecen simultáneamente y, por tanto, el control de potencia sólo debe contrarrestar el efecto de los desvanecimientos en la señal deseada y los desvanecimientos de las señales de otras estaciones base, que son independientes de los de la señal deseada. En cambio, en el enlace ascendente el control debe compensar, además de los dos tipos de perturbaciones anteriores, las variaciones de nivel de las demás señales originadas dentro de la celda, ya que, al ser transmitidas desde lugares diferentes, estas señales experimentan desvanecimientos independientes respecto a la señal deseada.

Existen dos tipos de control de potencia: bucle abierto y bucle cerrado. En el caso del control de potencia en bucle abierto, el receptor estima la atenuación de propagación midiendo la potencia de la señal recibida, y en función de esa estimación, ajusta su potencia de transmisión. Pero, dado que el desvanecimiento no está correlado en los sentidos ascendente y descendente, este control sólo conseguirá la potencia adecuada en media. Por este motivo es necesario un control de potencia en bucle cerrado. El control de potencia en bucle cerrado se basa en un proceso de realimentación; el receptor compara la relación señal/interferencia con el valor objetivo, y según el resultado de la comparación, ordena al transmisor incrementar o reducir la potencia. Habitualmente estas variaciones se realizan en escala logarítmica con un paso fijo comprendido entre 0.5 y 2 dB, [?]. El problema es que en la práctica no es posible eliminar totalmente el efecto *near-far* debido a imperfecciones en el control de potencia. Las imperfecciones en el control de potencia implican que los móviles no llegan con la misma potencia a la estación base local. Estas desviaciones en el nivel de potencia se modelan mediante una distribución lognormal [?]. De esta forma la ecuación 4.7 se transforma en:

$$P_r = P_t \cdot r^{-n} \cdot 10^{\frac{\xi}{10}} \cdot 10^{\frac{\chi}{10}} = P_t \cdot r^{-n} \cdot e^{\beta\xi} \cdot e^{\beta\chi} \quad \beta = \frac{Ln10}{10} \quad (4.8)$$

donde χ es la variable aleatoria gaussiana que representa las imperfecciones en el control de potencia, de media 0 y desviación estándar σ_χ de 1 a 2 dB [?].

4.2.4 Análisis de interferencias

La interferencia existente en un sistema CDMA de una sola celda, es la generada por la superposición de las señales procedentes de los usuarios activos de la propia celda, denominada interferencia intracelda I_{intra} , junto con la correspondiente al ruido blanco de fondo η . Pero en el caso más general de un sistema multicelda, aparece la interferencia intercelda I_{inter} debida a los móviles activos en las celdas vecinas. Esto significa que la interferencia total I_t es igual a:

$$I_t = I_{intra} + I_{inter} + \eta \quad (4.9)$$

La interferencia intercelda se puede modelar de diversas formas:

- Factor f de interferencia intercelda.

El modelado más simple consiste en considerar la interferencia intercelda como una fracción de la interferencia intracelda, usando el factor f , que se presenta en [?].

$$I_{inter} = f \cdot I_{intra} \quad (4.10)$$

- Variable *gaussiana* de interferencia intercelda.

En [?] se demuestra que la interferencia intercelda se puede modelar con una distribución gaussiana. Sus parámetros estadísticos media y varianza dependen tanto de las características del medio de propagación, como del factor de actividad del servicio y el número de usuarios en el sistema. La descripción de estos parámetros estadísticos se realiza en el apéndice A.

4.3 Investigación relacionada

La técnica CDMA de acceso múltiple por división por códigos fue propuesta hace décadas como alternativa a las técnicas FDMA y TDMA. El auge de estos sistemas CDMA estuvo muy condicionado por los primeros estudios de capacidad de los mismos, que se efectuaron sobre los tradicionales sistemas de voz existentes en esos momentos. En 1985 se publicó una primera comparativa de la capacidad de la técnica CDMA con las dos técnicas más convencionales TDMA y FDMA, concluyendo la superioridad de estas dos últimas frente a CDMA [?]. Pero fue en un estudio posterior [?] donde se demostró que, dado que CDMA sólo está limitada en interferencias, frente a las capacidades de FDMA y TDMA limitadas principalmente por ancho de banda, se puede obtener una gran mejora en la capacidad mediante la reducción del nivel de interferencias. Se abrió así una importante línea de investigación en sistemas CDMA enfocada hacia el estudio de las mejores técnicas de reducción de la interferencia para mejorar la capacidad. En [?] se proponen y analizan dos técnicas de reducción de la interferencia, que han sido extensamente

usadas, como son la sectorización y la monitorización de la actividad de los usuarios de voz. De esta manera se obtienen capacidades superiores de CDMA con respecto a FDMA y TDMA. Existen diversos trabajos orientados hacia este análisis de mejora de la capacidad como [?], donde se propone una reducción de la interferencia al elegir como estación base no la más cercana, sino la de menor interferencia o como [?] donde se opta por el uso de codificadores de voz de tasa variable para mejorar la capacidad y como [?] donde se aumenta el ancho de banda para obtener la deseada mejora en la capacidad.

Pero el análisis de la capacidad está muy influenciado por un aspecto clave de los sistemas CDMA, el control de potencia. Las imperfecciones de este control originan una importante degradación de la capacidad, por lo que se crea una nueva línea de investigación en torno a este tema. El primer modelado de estas imperfecciones aparece en [?], donde se concluye el uso de una distribución lognormal para modelar los errores del control en un sistema tradicional de voz. Los resultados obtenidos muestran reducciones en la capacidad en torno al 10% para desviaciones estándar de 0.5 dB y del 60% para desviaciones estándar mayores de 2 dB. En trabajos posteriores se incide en este estudio del modelo, como [?], donde se profundiza en el análisis de la densidad de probabilidad empírica de las imperfecciones en el control de potencia, en el caso de usar codificadores de voz de tasa variable. Pero además en [?] y [?] se analiza otra cuestión importante, la desviación estándar de la distribución lognormal, que representa las imperfecciones en el control de potencia, se ve afectada por el hecho de que el móvil se esté comunicando o no con la estación base donde se mide la potencia.

La mencionada dependencia de la capacidad de los sistemas CDMA con las interferencias ha llevado al desarrollo de modelos de interferencia intercelda que permiten simplificar el estudio de sistemas de múltiples celdas. El modelo más sencillo considera que la interferencia intercelda es una fracción de la interferencia intracelda, por lo que se define el factor f que relaciona ambos niveles de interferencia. Este factor f , empleado en estudios como [?], [?] y [?], debe usarse con cuidado porque su valor depende mucho de las condiciones del entorno de propagación, lo que significa que si se producen cambios en el medio es necesario recalcular el valor adecuado para f . Además en este caso se considera un nivel constante de interferencia intercelda, lo que supone una simplificación importante. El modelo más ampliamente utilizado considera variaciones en el nivel de interferencia intercelda mediante el empleo de una variable aleatoria con distribución gaussiana [?], [?]. Los parámetros estadísticos media y varianza de esta interferencia no sólo dependen del medio de propagación, sino también de las características de los servicios soportados (factor de actividad) y del número de usuarios. Es necesario desarrollar una herramienta que permita adaptar los parámetros estadísticos en función de las características del entorno. En [?] se profundiza en el estudio de la interferencia intercelda y se afirma que la media obtenida en [?] era un límite superior. Aunque la distribución gaussiana es la uso más general, en trabajos

como [?] y [?] se propone el uso de la distribución gamma, como alternativa que se adapta mejor a la interferencia intercelda, dado que ésta no toma valores negativos.

Toda la investigación descrita anteriormente ha servido para establecer los factores clave para el análisis de la capacidad de los sistemas CDMA, como son el modelado de la interferencia intercelda, el nivel de interferencias y el control de potencia. Pero estos trabajos iniciales se efectuaron sobre sistemas que soportaban un único servicio, la voz, para posteriormente reorientarse hacia los nuevos sistemas multiservicio. Los sistemas integrados analizados con más frecuencia integran el servicio en tiempo real de la voz y un servicio de datos con la característica diferencial de su tolerancia al retardo, lo que permite la conmutación de paquetes de datos frente a la tradicional conmutación de circuitos de la voz. En [?] se analiza un sistema multicódigo de voz y datos y es un buen ejemplo de la metodología analítica comúnmente empleada para analizar la capacidad de sistemas integrados. El criterio utilizado es ofrecer garantías de calidad a ambos servicios, de modo que el máximo número de usuarios de voz y datos sea aquel para el cual la relación señal/interferencia es menor que un cierto umbral de calidad con determinada probabilidad. Este procedimiento requiere efectuar una integración de la función Q [?]. Se han efectuado numerosos estudios de estos sistemas considerando aspectos como el control de potencia, las distribuciones de usuario o las estrategias de control de transmisión. En [?] se analizan las mejores estrategias de control de transmisión en un sistema integrado con tráfico variables de voz y datos, junto con el efecto de las imperfecciones en el control de potencia. Pero existen también estudios de sistemas multimedia donde la voz (tiempo real) se integra con diversos servicios de datos de características muy diferentes. Este es el caso de [?] y [?] donde se tratan aspectos como control de potencia y estimación del canal para garantizar los requisitos de QoS de los servicios en un sistema IS-95. En [?] se vuelve a tratar el tema de la mejora de la capacidad mediante la aplicación de los esquemas de codificación más óptimos en un sistema multimedia.

Dentro de esta línea de investigación de sistemas multiservicio, los diversos sistemas CDMA de segunda generación (IS-95A, B,...), que emplean la técnica CDMA de banda estrecha, han atraído una gran atención debido a su auge y expansión. Los futuros sistemas 3G, con mejores prestaciones gracias a la técnica de acceso WCDMA, se van a caracterizar principalmente por la novedad de los servicios que han de ofrecer, cuyo origen se debe fundamentalmente a las nuevas aplicaciones de transferencia de datos disponibles en Internet. La mayor parte de los estudios más recientes sobre UTRA se orientan hacia el análisis del impacto de las nuevas propiedades de WCDMA, más que hacia el estudio de la influencia de su característica de multiservicio en la gestión del acceso. Por este motivo requieren un análisis complejo [?], [?], [?].

El análisis de capacidad realizado en esta tesis es la fase previa necesaria para permitir el

desarrollo y aplicación de controles de admisión y técnicas de gestión de recursos que ofrezcan garantías de QoS en sistemas UTRA multiservicio. Por este motivo se quiere desarrollar un método de estimación de la capacidad sencillo que sea fácilmente aplicable en el posterior estudio de CAC. Pero, con este propósito, y para obtener límites de capacidad que no sean demasiado optimistas, es necesario prestar atención al modelado de la interferencia intercelda, para el que se han usado las distribuciones gaussiana y gamma. Para dotar de flexibilidad a este modelo de interferencia intercelda es necesario desarrollar una herramienta que adapte los parámetros estadísticos media y varianza a los cambios en el entorno de propagación y a las características de los servicios.

4.4 Modelo de sistema

El sistema CDMA analizado es un sistema multiservicio que soporta M clases de tráfico distintas. Los parámetros que distinguen a las distintas clases de servicio son la tasa de bit, el factor de actividad medio y la relación energía de bit/densidad de ruido requerida. Estos parámetros característicos son los indicados en la tabla 4.2.

	<i>Parámetros de la clase j</i>
N_j	Numero de usuarios
R_j	Tasa de bits
G_j	Ganancia de proceso
Ψ_j	Variable gaussiana normalizada de interferencia intercelda
α_j	Factor de actividad medio
P_j	Nivel de potencia recibida por la estación base
T_j	Relación entre energía de bit y densidad de ruido requerida

Tabla 4.2: Parámetros característicos de las distintas clases de servicio

Para simplificar el cálculo de la capacidad, los parámetros de las distintas clases j se expresan en función de una de ellas a la que denominaremos clase de referencia y que designaremos con el subíndice r , de forma que:

$$R_j = R_r \cdot k_j \quad (4.11)$$

$$G_j = \frac{G_r}{k_j} \quad (4.12)$$

$$T_j = T_r \cdot l_j \quad (4.13)$$

$$\alpha_j = \alpha_r \cdot c_j \quad (4.14)$$

$$\kappa_j = k_j \cdot l_j \quad (4.15)$$

En este estudio, como en otros [?], se considera que la relación entre las potencias de dos clases distintas, en este caso las clases j , r , es la siguiente:

$$\frac{P_j}{P_r} = \frac{R_j}{R_r} \cdot \frac{T_j}{T_r} = \kappa_j \quad (4.16)$$

Esta afirmación es equivalente a considerar que la interferencia sobre los distintos tipos de usuarios es muy similar, lo que resulta más exacto cuanto mayor sea el número de usuarios presentes en el sistema. La relación entre potencias indicada pone de manifiesto el hecho de que las diferencias entre las distintas clases, relativas a tasas de transmisión y requisitos de calidad, se traducen en niveles de potencia distintos.

En este estudio la interferencia intercelda se modela de dos formas, de forma determinista, usando el factor f , y como una variable aleatoria, mediante las distribuciones gaussiana y gamma. Para estas distribuciones se considera que todas las clases tienen una distribución uniforme de usuarios. Aunque esta aproximación es más cierta cuanto mayor sea el número de usuarios presentes, su uso está justificado porque el objetivo no es realizar una caracterización exhaustiva de la interferencia intercelda, sino calibrar el impacto de los requisitos de QoS en la capacidad del sistema. Posteriormente se realiza una comparativa de los resultados de capacidad obtenidos con cada uno de los modelos. El análisis de capacidad considera monitorización de la actividad del usuario, usando el parámetro del factor de actividad medio de cada clase.

En cuanto al control de potencia, se considera inicialmente control perfecto, para aproximar posteriormente la degradación de capacidad que suponen las imperfecciones en el mismo. El medio de propagación analizado considera las pérdidas con la distancia y los desvanecimientos lentos debidos a obstáculos como efectos de atenuación del canal.

Para analizar la capacidad en este modelo de sistema se ha empleado una metodología analítica. Su uso se justifica, en primer lugar, porque la interferencia intercelda no se pretende analizar de forma rigurosa, sino que se va a emplear un modelo gaussiano de interferencia intercelda. Para validar este modelo en un sistema UTRA multiservicio sería conveniente realizar una medición del propio sistema, lo que en nuestro caso no es posible porque no se dispone del sistema bajo estudio. El análisis detallado de los niveles de interferencia intercelda implicaría el uso de técnicas de simulación para implementar un modelo de sistema más parecido al real, donde no son necesarias tantas simplificaciones como en el caso analítico y se pueden complicar las características del entorno simulado. En segundo lugar el objetivo de este estudio es efectuar un primer dimensionado de los sistemas 3G, que permita el posterior análisis de controles de gestión de recursos. Por este motivo es posible realizar un modelo del sistema relativamente simple con tratabilidad analítica, donde la interferencia intercelda se modele con una variable gaussiana. Las simplificaciones efectuadas en el sistema, detalladas en esta sección, han permitido

el desarrollo de una herramienta analítica de estimación de la capacidad.

4.4.1 Parámetros del sistema UTRA

En esta tesis el estudio se ha enfocado hacia el estándar europeo UTRA, seleccionando el modo de operación FDD porque nuestro interés se centra en las fases iniciales de implantación de estos sistemas, en las que se empleará este modo de operación, y en las que se desconoce cuál será la demanda de nuevos servicios, por lo que es necesario optimizar la capacidad de los sistemas 3G para dar cabida al máximo posible. Los parámetros de sistema utilizados en este estudio han sido los correspondientes a la versión 3.0.0 del estándar UTRA en modo FDD de Diciembre de 1997 (tabla 4.3). Después de esto se han sucedido ciertos cambios hasta la versión 3.3.0 del 3GPP de Junio del 2000. Pero los cambios no han sido sustanciales, de manera que aquellos que están más relacionados con nuestro ámbito de estudio apenas afectan a nuestras simulaciones, de forma que las conclusiones obtenidas son igualmente aplicables. Estos cambios se pueden resumir en una reducción del ancho de banda de 4.096 Mcps a 3.84 Mcps, la disminución de 16 slots por trama a 15 slots, el cambio de tasas en el enlace ascendente de 16-1024 kbps a 15-960 kbps, y finalmente que el RACH no cuenta con 8 slots de acceso por trama sino de 15 slots cada dos tramas.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Ancho de banda	4.096 Mcps
Trama del canal dedicado	16 slots y 10 ms
Tasas de transmisión del canal dedicado	16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 kbps
Trama del canal de acceso común	8 slots y 10 ms
Tasas de transmisión del canal común	16, 32, 64 y 128 kbps

Tabla 4.3: Parámetros de UTRA FDD versión 3.0.0

4.5 Análisis de capacidad

En esta sección se presenta el estudio de capacidad del sistema CDMA multiservicio con las consideraciones previamente descritas. Los dos casos estudiados son el control de potencia ideal y una estimación de las degradaciones en la capacidad con las imperfecciones en el control de potencia.

Control de potencia perfecto

La relación energía de bit/densidad de ruido para cada clase i es (ecuación 4.2):

$$\gamma_i = \frac{G_i \cdot P_i}{I_t} \quad (4.17)$$

donde I_t es la interferencia total sobre un usuario activo de clase i . Las interferencias intracelda e intercelda sobre un usuario activo de clase i , que forman parte de la interferencia total (ecuación 4.9), tienen la siguiente expresión:

$$I_{intra} = \sum_{j=1}^M \alpha_j \cdot N_j \cdot \kappa_j \cdot P_r - \alpha_i \cdot \kappa_i \cdot P_r \quad (4.18)$$

$$I_{inter} = \sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot P_r \cdot \Psi_j \quad (4.19)$$

donde cada Ψ_j es la variable gaussiana que representa la interferencia intercelda normalizada de cada clase de servicio.

En todas las expresiones anteriores se aprecia la importancia de la tasa de bits y la calidad requerida, dado que el factor κ_j no sólo pondera la interferencia generada, sino que también influye en los parámetros estadísticos de la interferencia intercelda.

Sustituyendo en la ecuación 4.17 las expresiones de interferencia intracelda e intercelda y expresándolo todo en función de la potencia de referencia, queda:

$$\gamma_i = \frac{G_i \cdot \kappa_i}{\sum_{j=1}^M \alpha_j \cdot N_j \cdot \kappa_j - \alpha_i \cdot \kappa_i + \sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot \Psi_j} \quad (4.20)$$

En la expresión 4.20 se aprecia el importante efecto de la interferencia intercelda total en la capacidad. Los parámetros estadísticos de esta variable gaussiana dependen tanto de los parámetros de los servicios como de las características del medio de propagación y el número de usuarios existente. Esta dependencia de los parámetros estadísticos de la interferencia intercelda con el número de usuarios hace necesario el uso de un método iterativo para el cálculo de la capacidad. El primer paso es establecer el criterio de QoS, que se basa en asegurar que las relaciones energía de bit/densidad de ruido de todas las clases γ_i sean mayores que los umbrales requeridos por cada una de ellas T_i con determinada probabilidad, es decir:

$$\gamma_i \geq T_i \quad \text{para} \quad i = 1, \dots, M \quad (4.21)$$

Estableciendo esta condición, se calcula el máximo nivel de interferencias intercelda que impone cada clase, despejando de la ecuación 4.20, esto es:

$$\sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot \Psi_j \leq \frac{G_i \cdot \kappa_i}{T_i} + \alpha_i \cdot \kappa_i - \alpha_r \cdot N_e \quad i = 1, \dots, M \quad (4.22)$$

$$N_e \equiv \sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot c_j \cdot N_j \quad (4.23)$$

El umbral de máxima interferencia intercelda normalizada $I_{inter_{max}}$, que ofrece garantías de calidad a todas las clases, es el mínimo valor de los impuestos por las M clases.

$$I_{inter_{max}} = \min \left\{ \frac{G_i \cdot \kappa_i}{T_i} + \alpha_i \cdot \kappa_i - \alpha_r \cdot N_e \right\} \quad \text{para } i = 1, \dots, M \quad (4.24)$$

La clave del método implementado es calcular el máximo número efectivo de usuarios N_e , que es la suma ponderada del número de usuarios de las distintas clases, para el cual la variable aleatoria de interferencia intercelda total I_{inter} es menor que el umbral $I_{inter_{max}}$ con una probabilidad del 99%, es decir se garantizan pérdidas menores del 1% (ecuación 4.25).

$$Prob\left[\frac{I_{inter}}{P_r} \leq I_{inter_{max}}\right] \geq 0.99 \quad (4.25)$$

Esta búsqueda del máximo número de usuarios se realiza de forma iterativa, teniendo en cuenta que el incremento de este número cambia los parámetros estadísticos media y varianza de la distribución gaussiana de interferencia intercelda. La media y la varianza de esta interferencia intercelda, que es la suma de las variables gaussianas correspondientes a cada una de las clases, son las siguientes:

$$E\left(\frac{I_{inter}}{P_r}\right) = \sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot E(\Psi_j) \quad (4.26)$$

$$Var\left(\frac{I_{inter}}{P_r}\right) = \sum_{j=1}^M \kappa_j^2 \cdot Var(\Psi_j) \quad (4.27)$$

En esta tesis se ha desarrollado un método analítico, basado en la geometría del sistema de celdas hexagonales, que permite caracterizar de forma sencilla la media y la varianza de la interferencia intercelda en función de las características del servicio (factor de actividad) y el tipo de medio de propagación. Con este método, que se describe en el apéndice B, se consigue una gran flexibilidad ya que se pueden adaptar los parámetros estadísticos a entornos muy diversos.

Imperfecciones en el control de potencia

El objetivo de esta sección es evaluar de forma aproximada los efectos de las imperfecciones en el control de potencia, esto es la degradación en la capacidad que originan. Las imperfecciones se modelan mediante una distribución lognormal como se indicó en la ecuación 4.8.

Considerando que el nivel de potencia recibido en la estación base de los usuarios locales se ve menos afectado por las imperfecciones en el control de potencia que el nivel recibido de los usuarios situados en las celdas vecinas, la interferencia intercelda se puede aproximar con una variable gaussiana (apéndice A). El cálculo de la interferencia intracelda requiere estimar el número de usuarios activos $N_{a,j}$ de cada clase j , esto es $N_{a,j} = \lceil N_j \cdot \alpha_j \rceil$, de modo que:

$$I_{intra} = \sum_{j=1}^M \sum_{h=1}^{N_{a,j}} \kappa_j \cdot P_r \cdot e^{\beta \cdot \chi_{j,h}} - \alpha_i \cdot \kappa_i \cdot P_r \cdot e^{\beta \chi_i} \quad (4.28)$$

$$I_{inter} = \sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot P_r \cdot \Psi_j \quad (4.29)$$

En la expresión de la interferencia intracelda, se aprecia cómo, para cada clase j , los usuarios activos dan lugar a niveles de potencia diferentes, debido a las imperfecciones en el control de potencia. De estas expresiones se deduce que:

$$\gamma_i = \frac{G_i \cdot \kappa_i \cdot e^{\beta \chi_i}}{\sum_{j=1}^M \sum_{h=1}^{N_{a,j}} \kappa_j \cdot e^{\beta \cdot \chi_{j,h}} - \alpha_i \cdot \kappa_i \cdot e^{\beta \chi_i} + \sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot \Psi_j} \quad (4.30)$$

Para estimar la capacidad, anteriormente hemos descrito un método iterativo basado en calcular el máximo número de usuarios para el que la interferencia intercelda no supera su máximo umbral con una probabilidad del 99%. Por este motivo en primer lugar era necesario estimar este máximo umbral de interferencia. En este caso de control imperfecto de potencia, el máximo umbral de interferencias se estima así:

$$\gamma_i \geq T_i \quad \text{para} \quad i = 1, \dots, M \quad (4.31)$$

Despejando de la ecuación 4.30, se deduce:

$$\sum_{j=1}^M \kappa_j \cdot \Psi_j \leq \frac{G_i \cdot \kappa_i}{T_i} e^{\beta \chi_i} + \alpha_i \cdot \kappa_i \cdot e^{\beta \chi_i} - \sum_{j=1}^M \sum_{h=1}^{N_{a,j}} \kappa_j \cdot e^{\beta \chi_{j,h}} \quad i = 1, \dots, M \quad (4.32)$$

De modo que el umbral $I_{inter_{max}}$ es:

$$I_{inter_{max}} = \min \left\{ \frac{G_i \cdot \kappa_i}{T_i} e^{\beta \chi_i} + \alpha_i \cdot \kappa_i \cdot e^{\beta \chi_i} - \sum_{j=1}^M \sum_{h=1}^{N_{a,j}} \kappa_j \cdot e^{\beta \chi_{j,h}} \right\} \quad \text{para} \quad i = 1, \dots, M \quad (4.33)$$

La diferencia respecto al control perfecto de potencia y también el principal problema para estimar la capacidad, es que el umbral de interferencia intercelda obtenido no es un valor constante, como ocurría en el caso del control perfecto de potencia, sino una variable aleatoria. Un estudio riguroso de la interferencia intercelda implicaría analizar el tipo de distribución de esta nueva variable aleatoria junto con sus parámetros estadísticos. Pero dado que en este estudio lo que se pretende es analizar de forma aproximada la degradación de capacidad causada por las imperfecciones del control potencia, se efectúa la siguiente simplificación: se considera una distribución gaussiana para la variable $I_{inter_{max}}$ y se toma como valor para el umbral máximo de interferencia la media más o menos k veces su desviación estándar, variando k desde 0 a 3 (la elección de este valor de 3 se justifica porque el valor de la media más 3 veces la desviación

estándar tiene una probabilidad del 99% para una distribución gaussiana). Los valores media y varianza de la variable umbral se indican a continuación.

$$E(I_{intermax}) = E(e^{\beta \cdot \chi}) \cdot \left\{ \frac{G_i \cdot \kappa_i}{T_i} + \alpha_i \cdot \kappa_i - \sum_{j=1}^M N_{a,j} \cdot \kappa_j \right\} \quad (4.34)$$

$$Var(I_{intermax}) = Var(e^{\beta \cdot \chi}) \cdot \left\{ \left(\frac{G_i \cdot \kappa_i}{T_i} \right)^2 + (\alpha_i \cdot \kappa_i)^2 - \sum_{j=1}^M N_{a,j} \cdot \kappa_j^2 \right\} \quad (4.35)$$

Criterios de admisión

El análisis de interferencias efectuado nos permite determinar los criterios de admisión que debería aplicar un control de gestión de recursos para ofrecer garantías de QoS. En primer lugar si se cuenta con un control perfecto de potencia, los criterios son:

- Modelado de la interferencia intercelda mediante el factor f

$$T_i \leq \frac{G_i \cdot \kappa_i}{\sum_{j=1}^M \alpha_j \cdot N_j \cdot \kappa_j \cdot (1 + f) - \alpha_i \cdot \kappa_i} \quad (4.36)$$

Para despejar el criterio de admisión, a partir de la restricción impuesta a la relación energía de bit/densidad de ruido, se ha aplicado la ecuación 4.16 que establece la relación entre las potencias de las distintas clases. De manera que:

$$\sum_{j=1}^M N_j \cdot \alpha_j \cdot \frac{T_j}{G_j} \leq \frac{1}{1 + f} \implies N_e \leq \frac{1}{1 + f} \cdot \frac{G_r}{T_r} \quad (4.37)$$

Este criterio es determinista, por lo que es simple estimar el número efectivo de usuarios N_e que lo cumple.

- Modelado de la interferencia intercelda mediante una variable gaussiana

$$T_i \leq \frac{G_i \cdot \kappa_i}{\sum_{j=1}^M \alpha_j \cdot N_j \cdot \kappa_j - \alpha_i \cdot \kappa_i + \sum_{j=1}^M \kappa_j \Psi_j} \quad (4.38)$$

Teniendo en cuenta las relaciones entre las potencias de las distintas clases (ecuación 4.16) se llega a:

$$\sum_{j=1}^M (N_j \cdot \alpha_j + \Psi_j) \cdot \frac{T_j}{G_j} \leq 1 \implies N_e \leq \frac{G_r}{T_r} - \sum_{j=1}^M \Psi_j \cdot \kappa_j \quad (4.39)$$

En este caso aparecen las variables gaussianas de interferencia intercelda Ψ_j de las distintas clases de servicios, lo que complica el cálculo de la capacidad. El método de resolución usado en este trabajo es una herramienta iterativa que permite estimar de manera sencilla

y rápida los números de usuarios de cada clase que cumplen el criterio de máxima interferencia intercelda con una probabilidad del 99%. El máximo nivel de interferencia intercelda es una constante que depende de los parámetros de los diversos servicios.

En caso de que existan imperfecciones en el control de potencia, el criterio se complica porque en este caso el umbral máximo de interferencia intercelda no es una constante, sino una suma de variables aleatorias. En este trabajo el objetivo es sólo estimar de forma aproximada la degradación en la capacidad que originan estos errores.

4.6 Entornos analizados

En esta sección se ha efectuado en primer lugar una caracterización de la interferencia intercelda, como paso previo al análisis de capacidad efectuado posteriormente. La descripción de las pruebas realizadas, referentes a cada uno de estos estudios, se describen en la tabla 4.4.

4.6.1 Caracterización de la interferencia intercelda

El objetivo de este primer bloque de experimentos (pruebas 1 a 4), es analizar la dependencia de los parámetros estadísticos media y varianza de la interferencia intercelda con el medio de propagación y las características de los servicios. La media y la varianza de la interferencia intercelda (ver apéndice A), se pueden expresar como el producto del número de usuarios por un coeficiente (λ_{media} y λ_{var} para la media y varianza respectivamente), que engloban la dependencia con el medio de propagación y el factor de actividad (el coeficiente de la media es proporcional al factor de actividad). Por este motivo, se han variado las características del medio, esto es, el factor de atenuación con la distancia n y la desviación típica del desvanecimiento lento por obstáculos σ_ξ (pruebas 1 y 3), además del factor de actividad característico del servicio α (pruebas 2 y 4). Los valores utilizados para estos parámetros se muestran en la tabla 4.4.

4.6.2 Análisis de capacidad

En este estudio de capacidad se han estudiado entornos de 2 tipos: sistemas homogéneos, con un sólo servicio, y sistemas heterogéneos, con integración de servicios.

El entorno homogéneo se analiza con el objetivo de conocer la incidencia de los diversos parámetros del medio y los servicios sobre la capacidad. Para conocer esta dependencia se considera control perfecto de potencia y se varían las características de la clase de este sistema: la ganancia de proceso G , la relación energía de bit/densidad de ruido requerida T y el factor de actividad α . Las clases de servicio consideradas son las indicadas en la tabla 4.5. Además se han

<i>Estudios</i>				<i>Parámetro</i>	<i>Variable</i>	<i>Valores</i>	<i>Pruebas</i>				
<i>Caracterización de la Interferencia Intercelda</i>				λ_{media}	n, σ_{ξ}	n=2:0.5:4 $\sigma_{\xi}=1:1:10$ $\alpha=1$	P1				
					n, α	n=2:0.5:4 $\alpha=0.01:0.1:1$ $\sigma_{\xi}=8$ dB	P2				
				λ_{var}	n, σ_{ξ}	n=2:0.5:4 $\sigma_{\xi}=1:1:10$ $\alpha=1$	P3				
					n, α	n=2:0.5:4 $\alpha=0.01:0.1:1$ $\sigma_{\xi}=8$ dB	P4				
<i>Análisis de capacidad</i>	<i>Sistema homogéneo</i>	Control perfecto potencia	I_{inter} : Gauss y Gamma	N	α , clase	$\alpha=0.01:0.1:1$, clase H1	P5				
						$\alpha=0.01:0.1:1$, clases H2 y H3	P6				
						n=2:1:4, $\sigma_{\xi}=6$ y 8, T=1:1:9 clase H1	P7				
	<i>Sistema homogéneo</i>	Control imperfecto potencia	I_{inter} : Gauss y Gamma	N	σ_{χ}	$\sigma_{\chi}=0,0.5, 1.5, 3$ $\alpha=1$, clase H1 n=4, $\sigma_{\xi}=8$ dB	P8				
							Comparativa	N	I_{inter}, σ_{χ}	$f=0.55$ y Gauss $\sigma_{\chi}=0, 0.5, 1.5$	P9
										$\alpha=1$, clase H1 n=4, $\sigma_{\xi}=8$ dB	
	<i>Sistema heterogéneo</i>	Control perfecto potencia	I_{inter} : Gauss 3 clases M1, M2, M3	Umbrales de admisión	Usuarios de clases M1, M2 y M3	M1=30:30:150, M2=0:1:10, M3=0:20:120 n=4, $\sigma_{\xi}=8$ dB	P10				
						n, σ_{ξ} , usuarios M2 y M3	n=3,3.4,3.7,4 $\sigma_{\xi}=6:2:10$ M2=0:1:12 M3=0:20:150 M1=30	P11			
		Comparativa	2 clases M4 y M5	Umbrales de admisión	I_{inter}, σ_{χ}	I_{inter} : $f=0.55$ y Gauss $\sigma_{\chi}=0, 0.5, 1.5$ n=4, $\sigma_{\xi}=8$ dB	P12				

Tabla 4.4: Descripción de las pruebas realizadas

probado diversos medios de propagación, variando n y la desviación estándar del desvanecimiento por obstáculos σ_ξ . La interferencia intercelda se ha modelado con las distribuciones gaussiana y gamma para efectuar la comparativa de ambas. Posteriormente se analiza de forma aproximada el efecto de las imperfecciones en el control de potencia.

<i>Clases de servicio</i>	R	G	T
H1	32 Kbps	128	3 dB
H2	128 Kbps	32	3 dB
H3	128 Kbps	32	7 dB

Tabla 4.5: Características de las clases de servicio estudiadas en un sistema homogéneo (R es la tasa de bit, G es la ganancia de proceso y T la relación energía de bit/densidad de ruido) requerida)

En el caso de sistemas heterogéneos, se han realizado pruebas con la integración de servicios de diversas características para analizar los umbrales de admisión. Los servicios considerados se indican en la tabla 4.6.

<i>Clases de servicio</i>	R	G	T	α
M1	16 Kbps	256	3 dB	0.4
M2	64 Kbps	64	7 dB	0.4
M3	32 kbps	128	6 dB	0.1
M4	32 kbps	128	3 dB	0.4
M5	128 kbps	32	7 dB	0.1

Tabla 4.6: Características de las clases de servicio estudiadas en un sistema multiservicio (R es la tasa de bits, G es la ganancia de proceso, T la relación energía de bit/densidad de ruido requerida y α es el factor de actividad)

Los experimentos realizados se describen a continuación.

- Entorno homogéneo

- *Influencia de los parámetros de los servicios* (pruebas 5 y 6). Se analiza la capacidad del sistema para las clases H1 (prueba 5), y las clases H2 y H3 (prueba 6), variando el factor de actividad de todas ellas y usando las distribuciones gaussiana y gamma para la interferencia intercelda.

- *Influencia de las características del medio* (prueba 7). Se analiza la capacidad de un

sistema con la clase H1 con diversos medios de propagación distintos.

- *Efecto de las imperfecciones del control de potencia* (prueba 8). El análisis se ha realizado sobre la clase H1. Las características del medio son las más usuales y se ha variado la desviación estándar de las imperfecciones de control de potencia σ_χ . Los umbrales de máxima interferencia elegidos corresponden a $media \pm 3 \cdot \sigma_\chi$.
 - *Comparativa de capacidad* (prueba 9). Se comparan las capacidades en un sistema con el servicio H1, con un medio de propagación típico bajo 3 consideraciones distintas: 1) Factor f para modelar la interferencia intercelda [?], 2) Modelado gaussiano de interferencia intercelda con control perfecto, 3) Control imperfecto con distintas desviaciones estándar.
- Entorno heterogéneo
 - *Influencia de los parámetros de los servicios* (prueba 10). Se analiza un sistema integrado por las clases M1, M2 y M3 con control de potencia perfecto.
 - *Influencia de las características del medio* (prueba 11). Sistema integrado por las clases M1, M2 y M3, con 30 usuarios del servicio M1. Las características del medio se varían para analizar su influencia en la capacidad.
 - *Comparativa de capacidad* (prueba 12). Se analiza un sistema integrado con los servicios M4 y M5. Los umbrales estimados son los correspondientes a: 1) Modelado de la interferencia intercelda con el factor f , 2) Modelo gaussiano con control perfecto de potencia y 3) Control imperfecto variando la desviación σ_χ (umbrales máximos de interferencia intercelda $media \pm \sigma_\chi$ y $media \pm 2 \cdot \sigma_\chi$).

4.7 Resultados

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- *Caracterización de la interferencia intercelda*
 - *Influencia de las características del medio* (pruebas 1 y 3). En las figuras 4.3 y 4.4 se observa que cuanto mayor es el factor n , mayor es la atenuación y por tanto los valores de los coeficientes de la media y la varianza son menores debido a que el nivel de interferencias es menor.

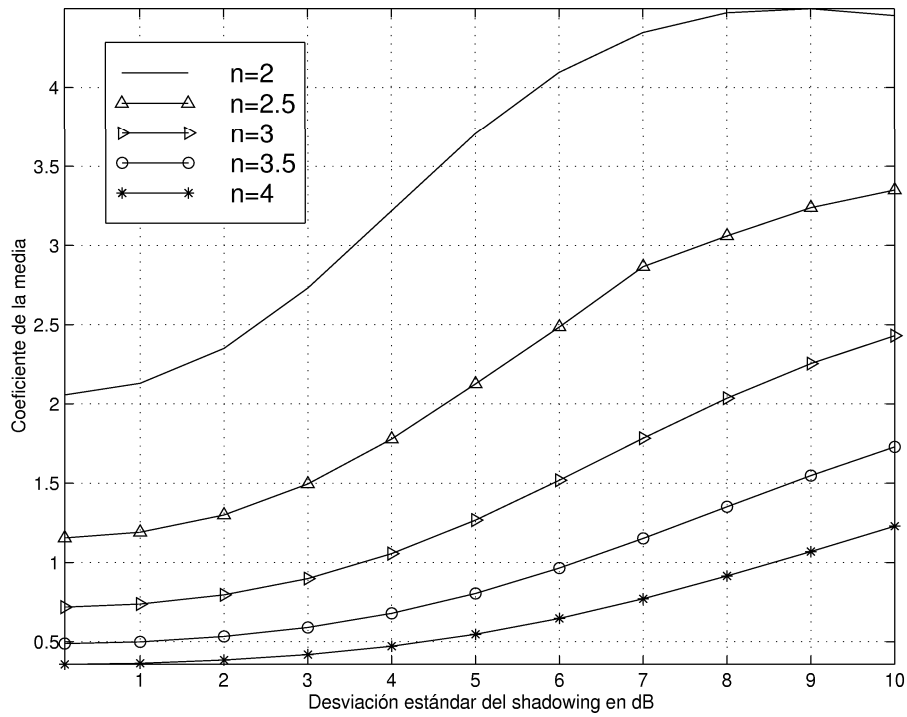


Figura 4.3: Variación del coeficiente de la media de la interferencia intercelda con las características del medio de propagación (prueba 1)

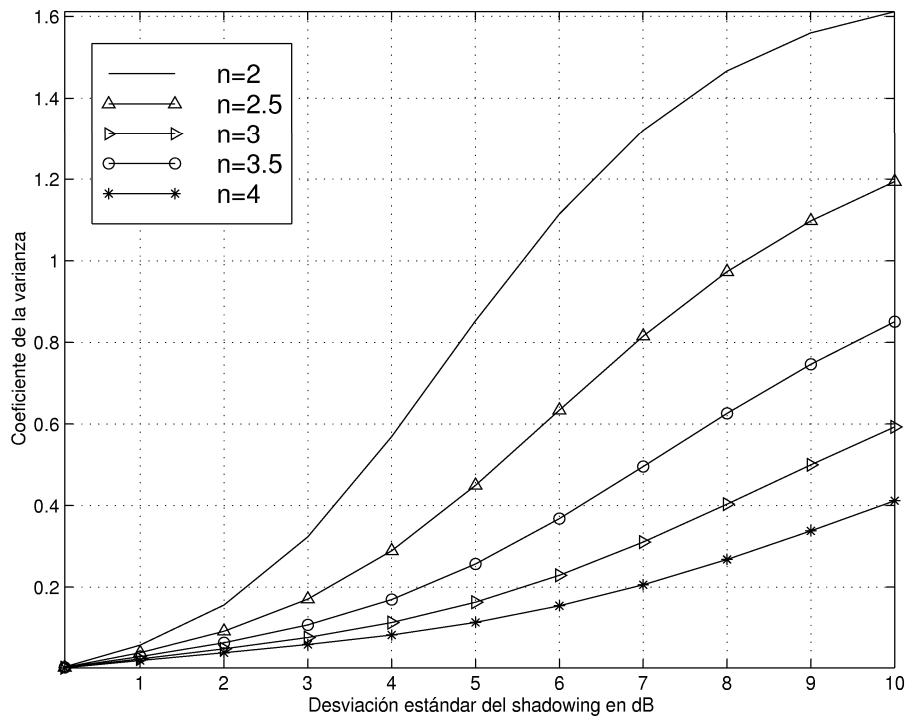


Figura 4.4: Variación del coeficiente de la varianza de la interferencia intercelda con las características del medio de propagación (prueba 3)

También se aprecia que cuanto mayor sea la desviación del desvanecimiento lento, mayor es la interferencia y por tanto mayores son los valores de estos coeficientes de media y varianza. Estos incrementos y decrementos se analizan en la tabla 4.7, en la que las columnas con la etiqueta % indican los incrementos en los coeficientes media y varianza al aumentar σ_ξ de 6 a 8 dB. En primer lugar, se aprecia que al aumentar n , se produce un importante decremento en los coeficientes de la media y la varianza. Esta disminución en el nivel de interferencia es más significativa cuanto menor sea el valor de n . Por ejemplo, si para $\sigma_\xi = 6$ dB se incrementa n de 2 a 2.5, λ_{media} pasa de 4.1 a 2.5, un decremento del 40%, en cambio si se parte de un n mayor como 3.5 y se aumenta hasta 4, el decremento en la media es menor, de un 33 % (λ_{media} pasa de 0.96 a 0.64). En segundo lugar, se observa que la influencia de la desviación σ_ξ depende mucho del factor de atenuación con la distancia n , de forma que cuanto mayor sea n , mayor es la influencia de esta desviación, debido a que el nivel de interferencias existente es menor y se ve más afectado por este efecto del canal. Además se observa que la desviación del canal tiene mayor influencia sobre el coeficiente de la varianza, sobre el que provoca grandes incrementos, mayores cuanto mayor sea n .

n	Coeficiente de la media λ_{media}			Coeficiente de la varianza λ_{var}		
	$\sigma_\xi = 6$ dB	$\sigma_\xi = 8$ dB	%	$\sigma_\xi = 6$ dB	$\sigma_\xi = 8$ dB	%
2	4.0939	4.4657	9.1	1.1148	1.4666	31.5
2.5	2.4858	3.0598	23	0.6338	0.9734	53.6
3	1.5185	2.0363	34	0.368	0.6258	70
3.5	0.9645	1.3516	40.1	0.2287	0.4032	76.3
4	0.6469	0.9144	41	0.1541	0.2678	73

Tabla 4.7: Variación de los coeficientes de la media y la varianza con el factor de atenuación n y la desviación del shadowing σ_ξ

- *Influencia del factor de actividad y n* (pruebas 2 y 4). En la figura 4.6 se observa que existe una relación prácticamente lineal del coeficiente de la varianza con el factor de actividad, más exacta cuanto menor sea el factor de actividad. Además si se comparan los resultados de las gráficas 4.5 y 4.6 se aprecia como el incremento de factor n de atenuación con la distancia produce un decremento muy significativo y similar tanto en el coeficiente de la media como en el de la varianza.
- *Análisis de capacidad en un sistema homogéneo*
 - *Influencia de los parámetros de los servicios* (pruebas 5 y 6). Las gráficas (4.7, 4.8) revelan que la distribución gamma es un poco más restrictiva que la gaussiana, aunque

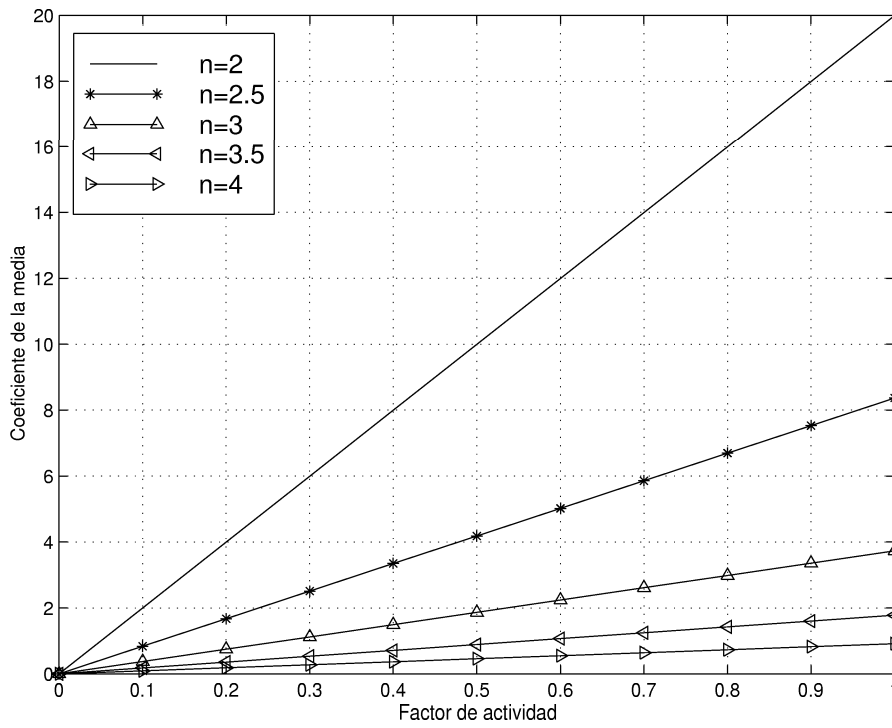


Figura 4.5: Variación del coeficiente de la media de la interferencia intercelda con el factor de actividad (prueba 2)

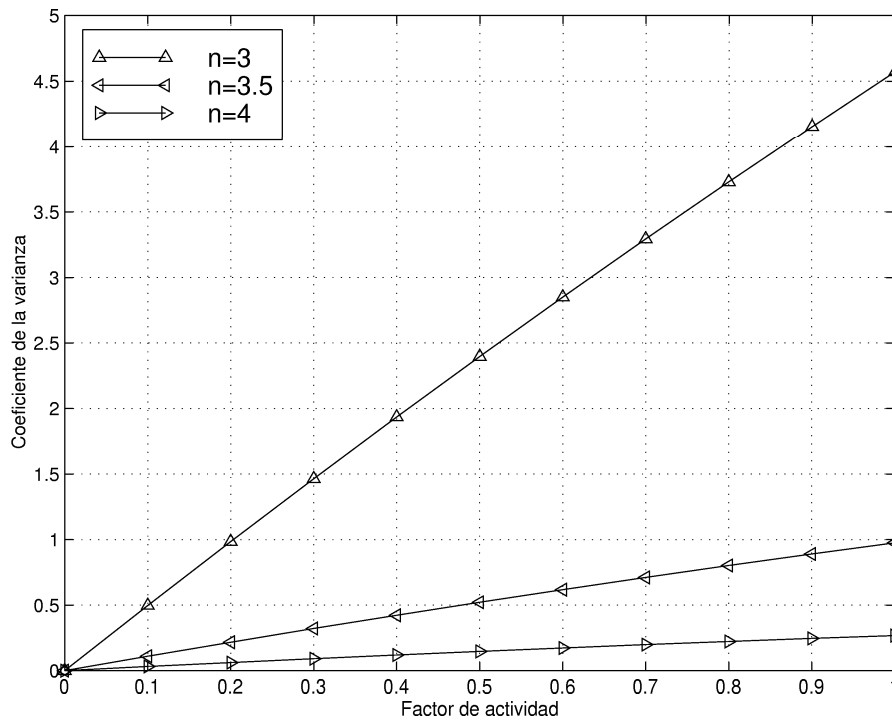


Figura 4.6: Variación del coeficiente de la varianza de la interferencia intercelda con el factor de actividad (prueba 4)

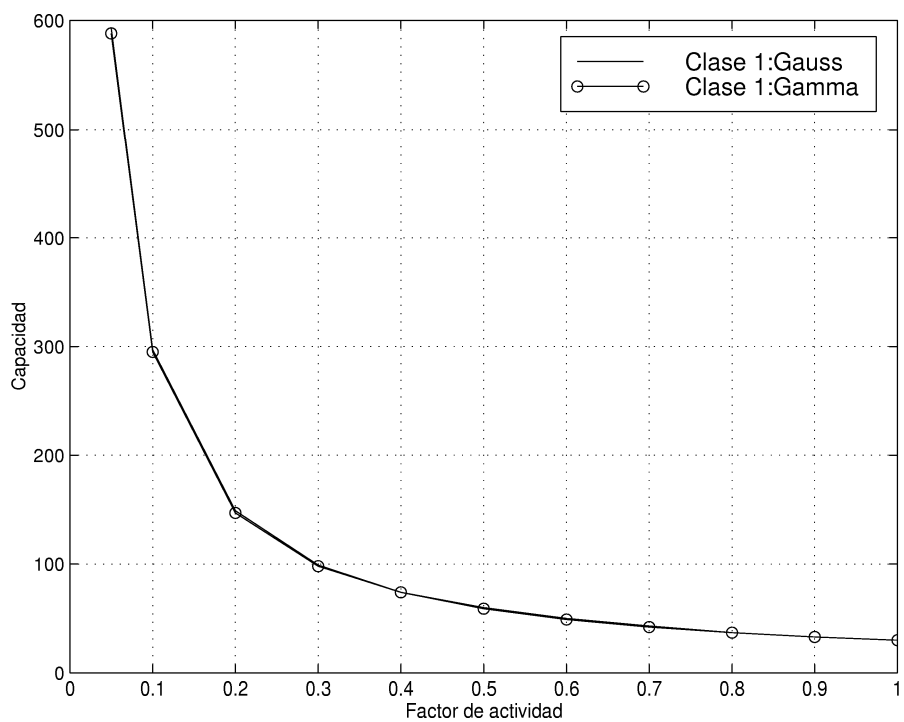


Figura 4.7: Capacidad en un sistema homogéneo (clase H1) modelando la interferencia intercelular con las distribuciones gaussiana y gamma (prueba 5)

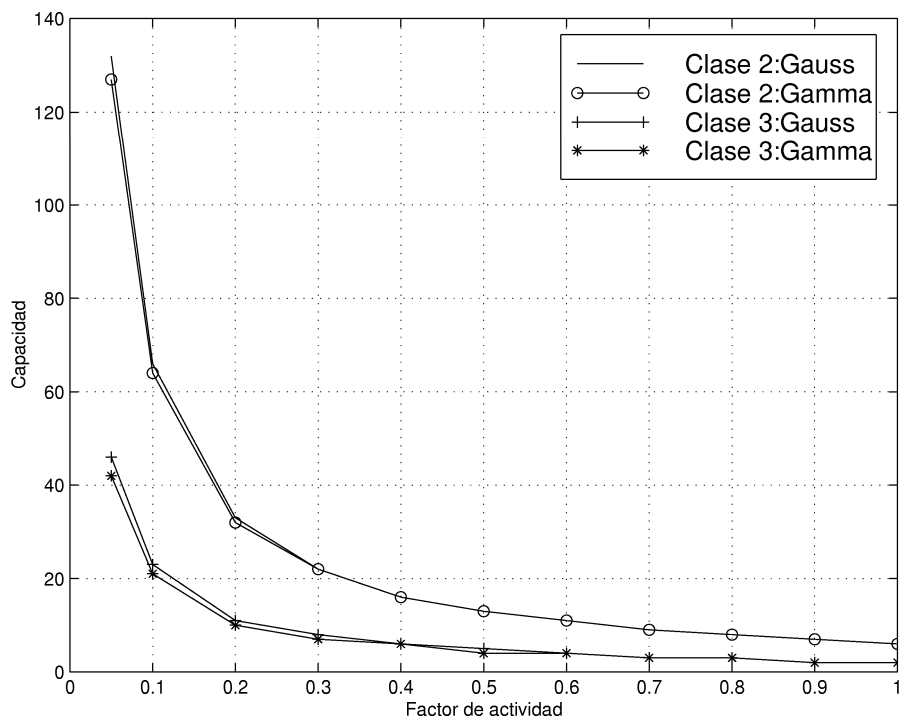


Figura 4.8: Capacidad en un sistema homogéneo (clases H2 y H3) modelando la interferencia intercelular con las distribuciones gaussiana y gamma (prueba 6)

estas diferencias disminuyen aún más a medida que aumenta el factor de actividad. Las curvas muestran un decrecimiento exponencial de la capacidad con respecto al factor de actividad α . Los valores obtenidos demuestran la siguiente regla de dimensionado: Si la capacidad de un sistema es de N_1 usuarios para un servicio con factor de actividad α_1 , el máximo número de usuarios posible N_2 para otro servicio con factor de actividad α_2 es $N_2 = N_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$. Es decir, la capacidad de un sistema es mayor cuanto menor sea el factor de actividad del servicio. Por ejemplo en la figura 4.7 la capacidad es 74 para un factor de actividad de 0.4 y se reduce a la mitad, esto es 37, para un factor de actividad doble de 0.8.

Las relaciones entre los umbrales de admisión de los servicios H1, H2 y H3 son proporcionales a las relaciones entre sus parámetros característicos, si bien no son exactamente iguales. La relación entre los parámetros característicos de las clases i, j se define como $rel_{i,j}$: $rel_{i,j} = \kappa_{i,j} \cdot c_{i,j}$ (tabla 4.2). Si se compara esta relación entre los parámetros de las clases con los cocientes entre sus umbrales de admisión, se obtienen los errores relativos que se indican en la figura 4.9. En esta figura se aprecia que cuanto menor es la relación entre los parámetros característicos de dos servicios y menor es el factor de actividad, más se ajusta el cociente entre umbrales de admisión a la misma. Los errores relativos más pequeños ($< 10\%$) se obtienen para la relación entre los parámetros de servicios de las clases 2 y 3, que es igual a 2.5 y por tanto la menor de todas. Para el caso de las relaciones entre las clases 1 y 2 y las clases 2 y 3, los errores relativos se acotan entre el 10 y el 20% para un factor de actividad menor que 0.8, mientras que para las clases 1 y 3 sube hasta más del 30%. Este comportamiento se justifica porque cuanto mayor sea la variación de los parámetros de calidad, mayor es la variación de la interferencia intercelda, que es una variable gaussiana cuyos parámetros estadísticos son dependientes de estos valores. Por tanto, y dada esta variación en la interferencia intercelda, la disminución de la capacidad es mayor de la esperada. El objetivo de este análisis es concluir que en un sistema con un umbral de admisión conocido N_i para un determinado servicio i , si se quiere conocer la capacidad para un nuevo servicio j , cuyos parámetros estadísticos tienen una relación con los del servicio i que se define en $rel_{i,j}$, se puede aplicar esta sencilla regla de dimensionado: $N_j = \frac{N_i}{rel_{i,j}}$, cometiéndose un error debido al efecto de la interferencia intercelda, que depende de los parámetros del servicio. El error cometido en la aproximación es menor cuanto menor sea el factor de actividad y menores los cambios en el servicio.

- *Influencia de las características del medio* (prueba 7). Las curvas de la figura 4.10 nos muestran la fuerte influencia del factor de propagación en la capacidad. En este caso, se observa que si el factor de propagación se duplica, cambia de 2 a 4, la capacidad

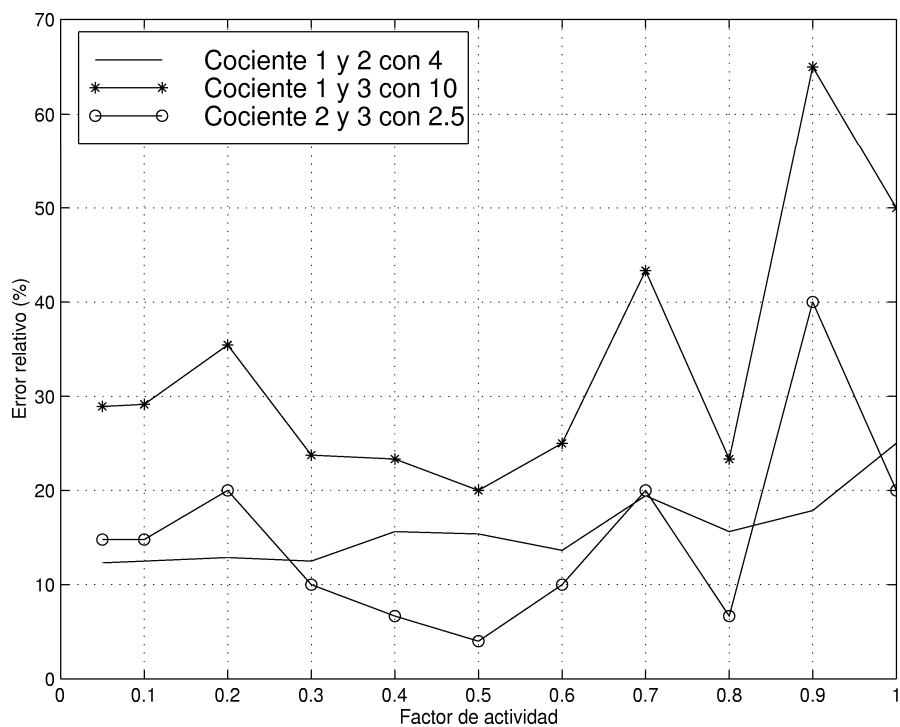


Figura 4.9: Error relativo al comparar el cociente entre los umbrales de admisión de dos clases con la relación entre sus parámetros característicos (pruebas 5 y 6)

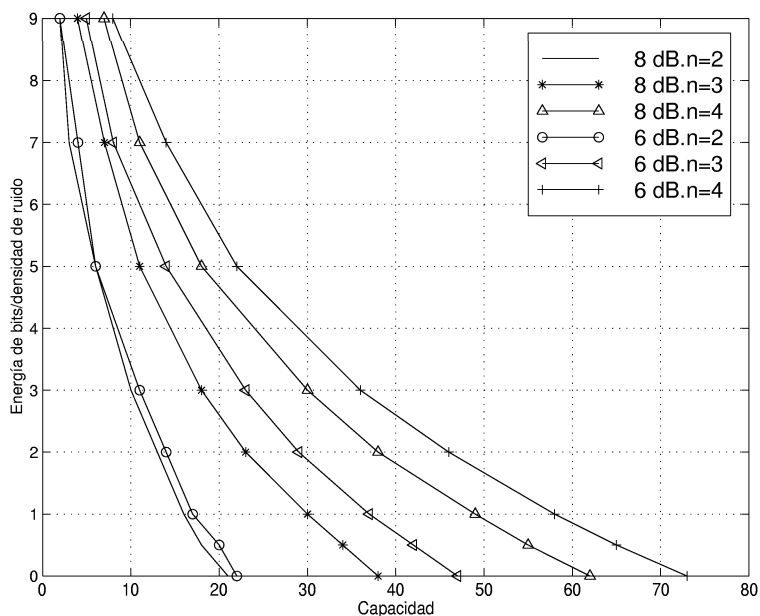


Figura 4.10: Dependencia de la capacidad con el factor de propagación n (de 2 a 4) y con la desviación estándar σ_ξ (8 y 6 dB) para distintos valores E_i (prueba 7)

se hace tres veces mayor (para 3 dB, la capacidad es 10 para $n=2$ y 30 para $n=4$). Esto se explica porque el factor de atenuación tiene una gran influencia sobre la interferencia intercelda, como se ha comentado previamente, de modo que al aumentar la atenuación, disminuye mucho la interferencia de las celdas vecinas. En la tabla 4.7, se aprecia que cuando n pasa de 2 a 4, el decremento en los coeficientes de la media y la varianza de la interferencia intercelda están en torno al 80%, lo que justifica la mejora en la capacidad. Este decremento de los coeficientes de la media y la varianza también se produce al disminuir la desviación estándar del desvanecimiento lento debido a obstáculos. Eso se traduce en un aumento en la capacidad en torno a un 20% cuando la desviación estandar cambia de 8 a 6 dB.

- *Efecto de las imperfecciones del control de potencia* (prueba 8). En la figura 4.11 se muestra como las imperfecciones en el control de potencia pueden favorecer o perjudicar a la capacidad en función del tipo de usuarios al que afecte. Siendo el umbral de interferencias máximo $media \pm i \cdot \sigma_\chi$, si se considera $i = -1$ y se opta por el caso peor, es decir que las imperfecciones afecten negativamente, la capacidad frente al control perfecto (30 usuarios) se reduce en un 16% para 0.5 dB (25 usuarios), un 40% para 1.5 dB (18 usuarios) y un 80% para 3 dB (6 usuarios).

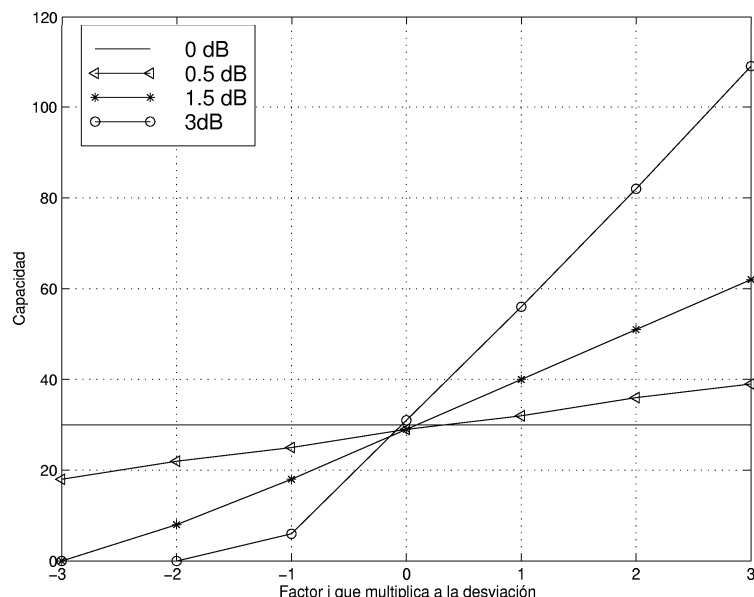


Figura 4.11: Capacidad para distintos valores de la desviación del control imperfecto de potencia. El umbral máximo de interferencia elegido es $media \pm i \cdot \sigma_\chi$, quedando i representado en el eje x (prueba 8)

- *Comparativa de capacidad* (prueba 9). En la tabla 4.8 se aprecia una comparativa de los umbrales de admisión modelando la interferencia intercelda con el factor f y mediante una gaussiana con control perfecto e imperfecto de potencia. El umbral más optimista es el impuesto por el factor f , frente al modelado gaussiano con control perfecto que establece una capacidad en torno al 73% de la primera. Las imperfecciones en el control degradan mucho la capacidad, observándose que si se triplica la desviación estándar de las imperfecciones, la capacidad es un 72% menor.

<i>Interferencia INTERCELDA</i>			
<i>Factor f</i>	<i>Gaussiana</i>		
$f = 0.55$	Control perfecto	Imperfecto 0.5 dB	Imperfecto 1.5 dB
41	30	25	18

Tabla 4.8: Comparativa de capacidad de un sistema homogéneo para la clase de servicio H1

- *Análisis de capacidad en un sistema heterogéneo*

- *Influencia de los parámetros de los servicios* (prueba 10). En la figura 4.12, aparecen diversas curvas correspondientes a valores distintos del n° de usuarios del servicio M1, que es el que se considera como servicio de referencia. La linealidad de estos umbrales se aprecia claramente en la representación en 3 dimensiones de estas curvas incluida en la gráfica. Además con el detalle de cada una de las curvas, se aprecia que la pendiente de todas ellas es similar a la relación entre los parámetros factor de actividad, requisito de calidad y tasa de bits de los servicios M2 y M3. Esta semejanza es mayor cuanto menor sea el factor de actividad y menor la relación entre los parámetros de ambas clases, como ocurría en el estudio anterior del sistema homogéneo. Si se calcula el número efectivo de usuarios N_e máximo en estas curvas, ecuación 4.23, se observa que es inferior en torno a un 10% a la capacidad máxima de un sistema homogéneo que contara sólo con el servicio M1, cuya capacidad máxima es de 154. Por ejemplo, en los puntos $(M1, M2, M3) = (60, 3, 52) = (90, 3, 24)$, el número efectivo es similar a 140, que es un 10% inferior a la máxima capacidad en el sistema homogéneo del servicio de referencia M1.
- *Influencia de las características del medio* (prueba 11). En la figura 4.13 se observa que el decremento del factor de propagación n (intervalo de 3 a 4), que ocasiona un incremento de la interferencia intercelda, ocasiona un decremento prácticamente lineal en la capacidad. La reducción en la capacidad es muy elevada al disminuir n ($(M1, M2, M3) = (30, 0, 114)$ para $n=4$ y $M3=83$ para $n=3.7$). En el caso de la desviación de la atenuación del canal, el incremento de la misma, que da lugar a

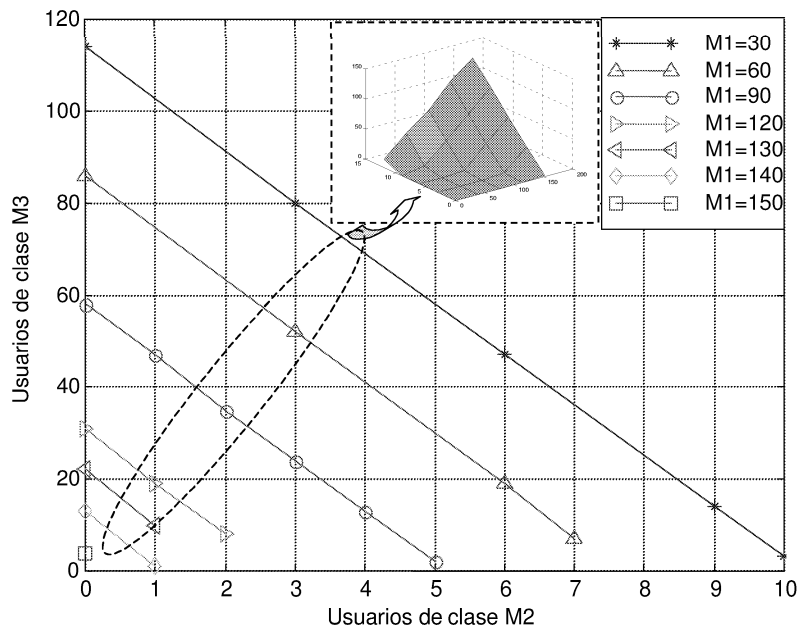


Figura 4.12: Capacidad en un sistema multiservicio integrado por las clases M1, M2 y M3, variando el n° de usuarios de tipo M1 (prueba 10)

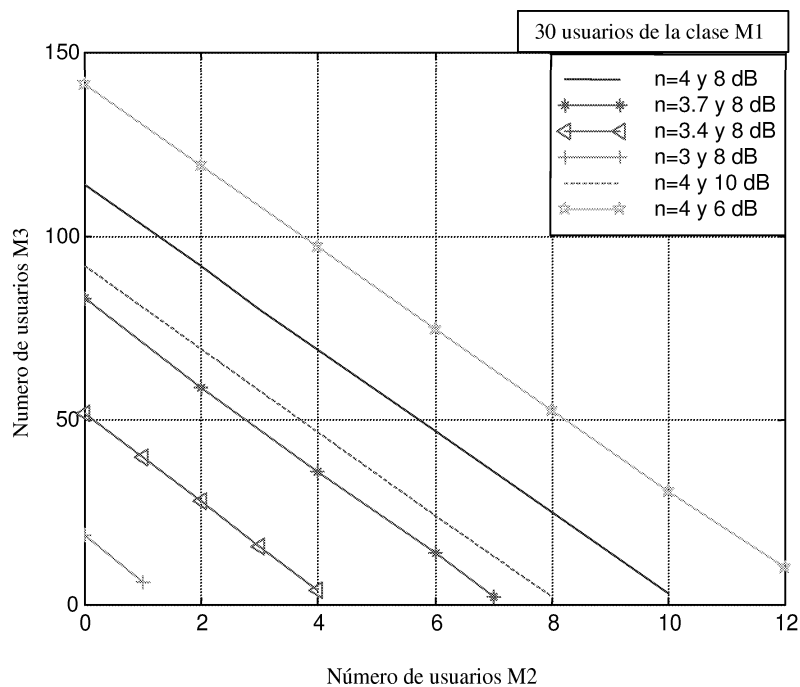


Figura 4.13: Capacidad en un sistema multiservicio integrado con 30 usuarios de tipo M1, variando el entorno de propagación (prueba 11)

una interferencia intercelda mayor, causa una reducción menor en la capacidad que el factor de propagación ((M1, M2, M3)=(30, 0, 114) para 8 dB y M3=92 para 10 dB). Por tanto, tanto en este sistema como en el caso homogéneo se observa la mayor influencia de n frente a la desviación estándar del desvanecimiento lento debido a obstáculos en la interferencia intercelda y por tanto en la capacidad.

- *Comparativa de capacidad* (prueba 12). En la figura 4.14 se aprecia la elevada cota de admisión obtenida con el factor f frente al modelado gaussiano de interferencia intercelda con control perfecto de potencia. Además se observa la fuerte reducción debida a las imperfecciones en el control de potencia.

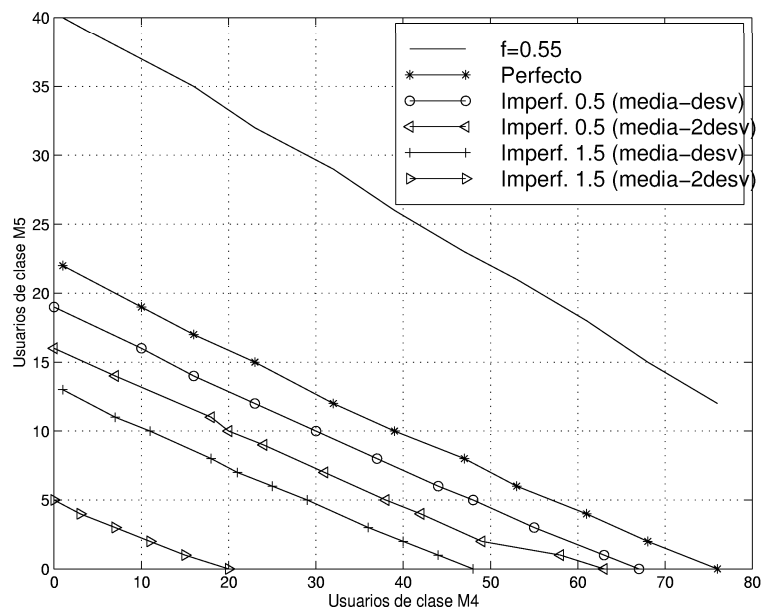


Figura 4.14: Comparativa de la capacidad en un sistema multiservicio integrado por las clases M4 y M5, considerando el factor f y la distribución gaussiana para el modelado de la interferencia intercelda, así como controles de potencia perfecto e imperfecto (prueba 12)

4.8 Conclusiones

Los resultados de este estudio de capacidad constatan el hecho de que, con el modelado de la interferencia intercelda mediante el factor f , se obtienen límites de capacidad muy optimistas. Estos datos nos reafirman la necesidad de un modelado gaussiano de la interferencia intercelda. En el modelo sencillo empleado en este estudio de capacidad, que ha permitido desarrollar un método de cálculo fácilmente portable para el análisis de controles de admisión, [?] y [?], se ha prestado especial atención al modelado de la interferencia intercelda. Las fluctuaciones de potencia de esta interferencia son muy importantes en un sistema WCDMA, donde los requisitos

de las distintas clases de servicio, teniendo en cuenta las simplificaciones efectuadas, se traducen en requisitos de niveles de potencia distintos. Por este motivo, la estimación de la capacidad se convierte en un problema de potencia. Para dotar a nuestro método iterativo de estimación de la capacidad de flexibilidad se ha desarrollado una herramienta analítica que permite adaptar los parámetros estadísticos media y varianza de la interferencia intercelda a las características del medio de propagación y de los servicios.

El análisis de la influencia de los parámetros de los servicios y el medio de propagación en la capacidad revela la linealidad de los umbrales de admisión, cuyas pendientes son similares a la relación entre los parámetros factor de actividad, tasa de bit y calidad requerida de los servicios. Esta similitud es mayor cuanto menores sean las relaciones entre estos parámetros, dada su influencia sobre los parámetros estadísticos de la interferencia intercelda, siendo especialmente destacada la dependencia con el factor de actividad, que debe ser pequeño para que este primer dimensionado sea exacto. Además se observa la importancia del medio en el estudio de la capacidad. En este caso cabe destacar la gran influencia del factor de propagación del medio, de modo que las variaciones de este factor provocan cambios mucho más bruscos en la capacidad que la desviación estándar del desvanecimiento lento del canal. Los resultados obtenidos muestran también la importancia de acotar las imperfecciones en el control de potencia para evitar degradaciones en la capacidad.

Capítulo 5

Análisis del tiempo de acceso en UTRA

5.1 Introducción

Los protocolos de acceso múltiple usados en los sistemas de comunicaciones se pueden definir como el conjunto de reglas que deben cumplir los usuarios para realizar una transmisión con éxito usando un medio común como es el canal de comunicación. El estudio de estos protocolos es una cuestión clave del control de acceso de los usuarios a la red, especialmente en el caso de los sistemas radio caracterizados por la escasez de recursos. Por este motivo en este capítulo se evalúa la problemática del acceso múltiple en un sistema de comunicaciones móviles 3G como UTRA, caracterizado por la integración de servicios que origina un tráfico de paquetes de características muy variables. A tal efecto se analizan las limitaciones de tiempo de acceso impuestas por el protocolo ALOHA ranurado de UTRA y se comparan con las obtenidas empleando el protocolo ISMA (Inhibit Sense Multiple Access).

5.2 Fundamentos

En este apartado se tratan los fundamentos necesarios para analizar las limitaciones impuestas por el protocolo de acceso al sistema UTRA 3G.

5.2.1 Protocolos de acceso múltiple

En esta sección se describen y clasifican los protocolos de acceso múltiple, donde se encuadra la tecnología CDMA en la que está basada UTRA. La clasificación se muestra en la figura 5.1 ([?]), donde se aprecia que CDMA no pertenece a ninguna de las categorías con y sin contención, sino que se sitúa entre los dos grupos. En principio es un protocolo sin contención donde un número de usuarios pueden transmitir simultáneamente sin conflicto. Pero si el número de usuarios

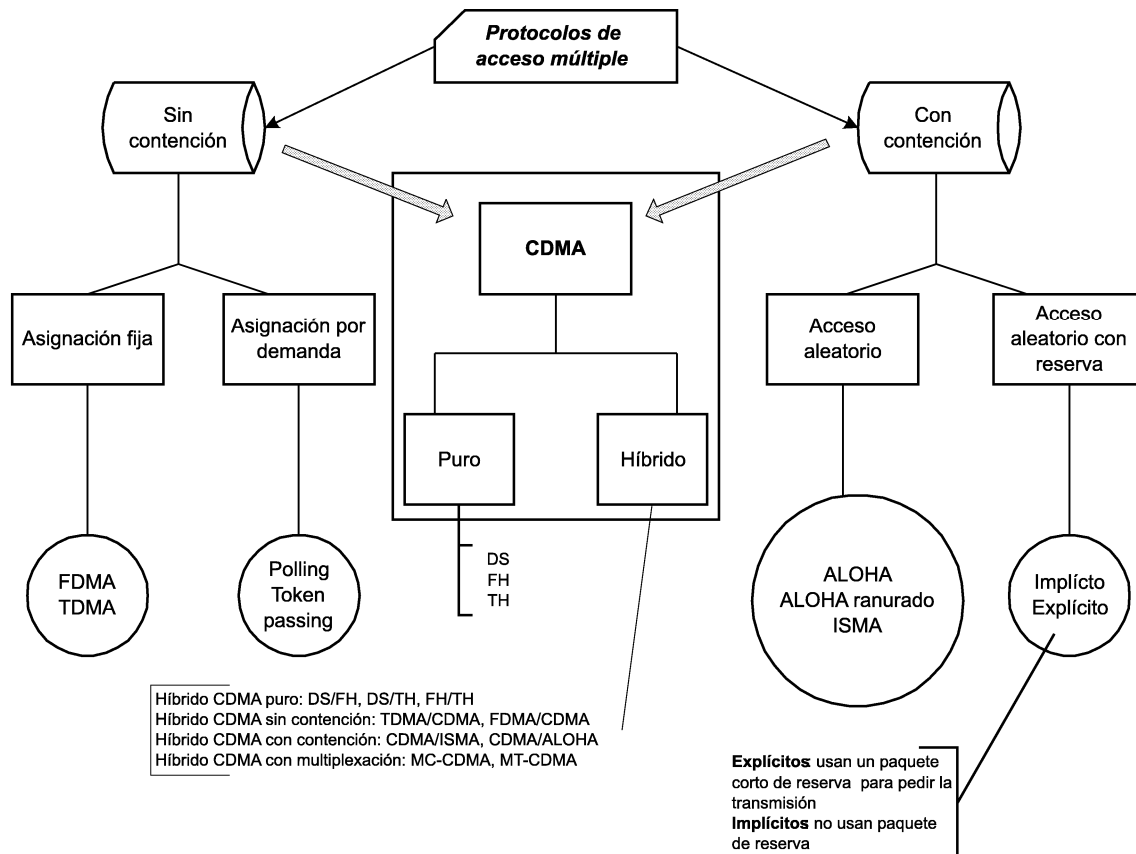


Figura 5.1: Clasificación de los protocolos de acceso múltiple

transmitiendo simultáneamente supera un umbral (garantías de QoS), se produce la contención.

Uno de los protocolos de acceso aleatorio más conocidos es el ALOHA, propuesto en 1970 en la Universidad de Hawai. Es un protocolo muy simple basado en la aleatoriedad en el acceso sin ningún tipo de control por parte de la estación base, con la desventaja de que le afectan mucho las colisiones entre paquetes. La tasa de colisiones se puede reducir efectuando una modificación que consiste en que los mensajes se deben transmitir sólo al inicio de un slot, este es el llamado ALOHA ranurado. Este es el protocolo propuesto en el estándar UTRA para el acceso al canal común. Existe otra clase de protocolos denominados ISMA (Inhibit Sense Multiple Access) en los que la estación base controla el flujo de paquetes desde los móviles, lo que reduce aún más las colisiones. Se distinguen dos subclases de ISMA:

- Protocolos ISMA no persistentes. Si el canal está inactivo, el usuario transmitirá el paquete, si no es así, esperará un tiempo aleatorio para intentarlo de nuevo.
- Protocolos ISMA p-persistentes. Es similar al anterior salvo que cuando el canal está ocupado, el usuario se mantiene monitorizando el canal, de modo que tan pronto como queda libre transmite con una probabilidad p .

La división de protocolos CDMA que aparece en la figura está basada en el método de modulación usado para obtener la señal de banda ancha. El DS-CDMA (Direct Sequence) se caracteriza porque la señal de datos se modula directamente por un código digital, en cambio en FH-CDMA (Frequency hopping) la frecuencia portadora de la señal de información modulada no es constante sino que cambia periódicamente. En TH-CDMA (Time hopping) la señal de datos se transmite en ráfagas en los intervalos de tiempo determinados por el código asignado al usuario.

5.2.2 Canales ascendentes en UTRA

El análisis de la problemática de acceso en UTRA requiere un conocimiento previo de los canales del mismo. Existen dos tipos de canales en el sentido ascendente: canal común, denominado RACH (Random Access Channel) y canales dedicados, denominados DPDCH (Dedicated Physical Data Channel) y DPCCH (Dedicated Physical Control Channel).

Todos los usuarios envían sus peticiones de transmisión por el canal común, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Sincronización: el móvil adquiere sincronización con la estación base.
2. Información: el móvil lee la información que le llega en el canal descendente (*broadcast*): códigos disponibles, nivel de interferencia en la estación base, etc.
3. Selección: el móvil elige un factor de *spreading* para la parte del mensaje.
4. Estimación de potencia: el móvil estima las pérdidas del sentido descendente y determina la potencia ascendente requerida.
5. Acceso: el móvil escoge aleatoriamente un slot de acceso y un código de los disponibles para acceder al canal común y transmite su ráfaga de acceso.
6. Espera: el móvil espera el reconocimiento de la estación base. Este reconocimiento se envía en el canal descendente FACH (Forward Access Channel). Si no se recibe después de un periodo (*timeout*), el móvil vuelve a enviar la petición.

El canal común está basado en ALOHA ranurado, es decir un móvil puede iniciar una transmisión al inicio de ciertos slots. La ráfaga de acceso aleatorio (figura 5.2) tiene dos partes, una parte de control (*preamble*) y una parte de datos, entre las cuales hay un corto periodo de inactividad. La parte de datos lleva la petición de acceso o un paquete de datos del usuario. El factor de spreading está limitado a 256, 128, 64 y 32.

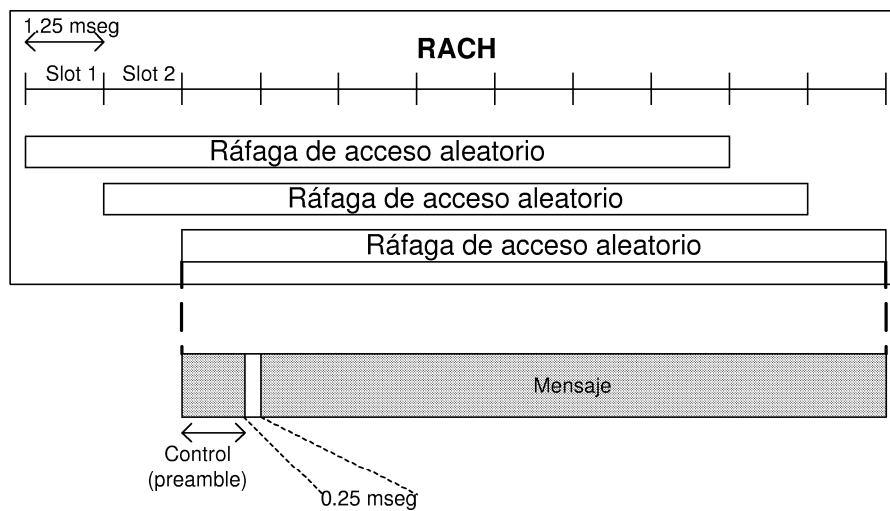


Figura 5.2: Canal común en UTRA

El canal dedicado DPDCH se usa para transmitir datos mientras que el canal DPCCH se usa para llevar información de control, como son los bits piloto para la estimación del estado del canal, los comandos de control de potencia y los formatos de transporte. Ambos canales se transmiten en paralelo, teniendo en cuenta que si se trata de una transmisión multicódigo se usan varios canales DPDCH pero sólo uno DPDCCH. La trama consta de 16 slots, un total de 10 mseg (figura 5.3).

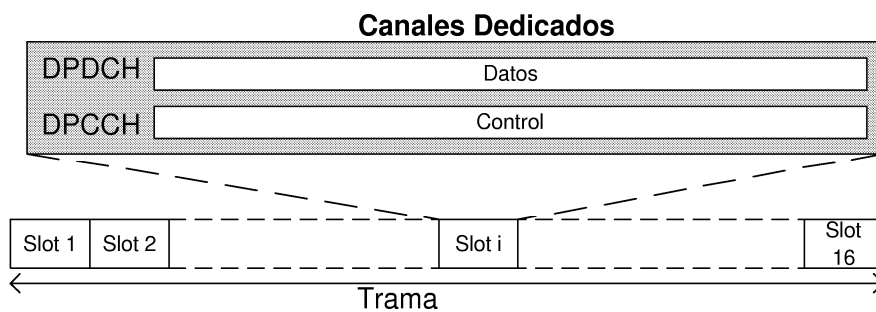


Figura 5.3: Canales dedicados en UTRA

5.2.3 Mecanismos de transmisión en sistemas CDMA integrados

Los modos de operación indicados en WCDMA para los diversos tipos de servicios son los siguientes [?]:

- *Servicios de datos de paquetes*

Los paquetes de datos se pueden transmitir de tres maneras:

- Conmutación de paquetes por contención o canal común

Este método de canal compartido consiste en la transmisión del paquete de usuario en el canal RACH de acceso aleatorio. Este canal de acceso aleatorio no sólo se usa para enviar paquetes de control como las peticiones de transmisión, sino también para enviar paquetes de datos cortos. El paquete de datos que se quiere emitir se anexa a una ráfaga de acceso. Este método es aplicable cuando el usuario sólo tiene una pequeña cantidad de datos que transmitir. En este caso no se usa esquema de reserva, por lo que la sobrecarga necesaria para transmitir un paquete es mínima, es decir, el terminal de usuario no necesita tener asignado un canal, por lo que el retardo de acceso es pequeño.

- Conmutación de paquetes con reserva o canal dedicado

El mecanismo de reserva de canal dedicado se usa para el envío de paquetes grandes y consiste en el envío por parte del usuario de un mensaje de petición de recursos en el canal común de acceso aleatorio, en el que se indica qué tipo de tráfico se va a transmitir (Figura 5.4). Posteriormente, la red evalúa si se pueden asignar los recursos al terminal, si es así se envía un mensaje de asignación de recursos al usuario. En este mensaje se envía el conjunto de formatos de transporte TF (Transmission Format) que el usuario puede usar para transmitir, y en este mismo mensaje o en otro independiente posterior, se indica al usuario cual es el formato que va a usar de los posibles y en qué instante puede empezar la transmisión de datos. La información del conjunto de formatos posibles es necesaria porque el TF se puede cambiar durante la transmisión para el control de las interferencias.

- Canal asignado

Este tercer método se refiere a las situaciones en las que el terminal de usuario ya tiene un canal dedicado a su disposición. Esto puede ser debido a que el usuario haya usado el canal para otro servicio, o bien que en ese instante haya terminado la transmisión. En este caso el canal se mantendrá asignado durante cierto tiempo. Si en este tiempo llegan nuevos paquetes, el terminal puede empezar la transmisión inmediatamente, usando el TF de la última transmisión (paquetes no planificados)

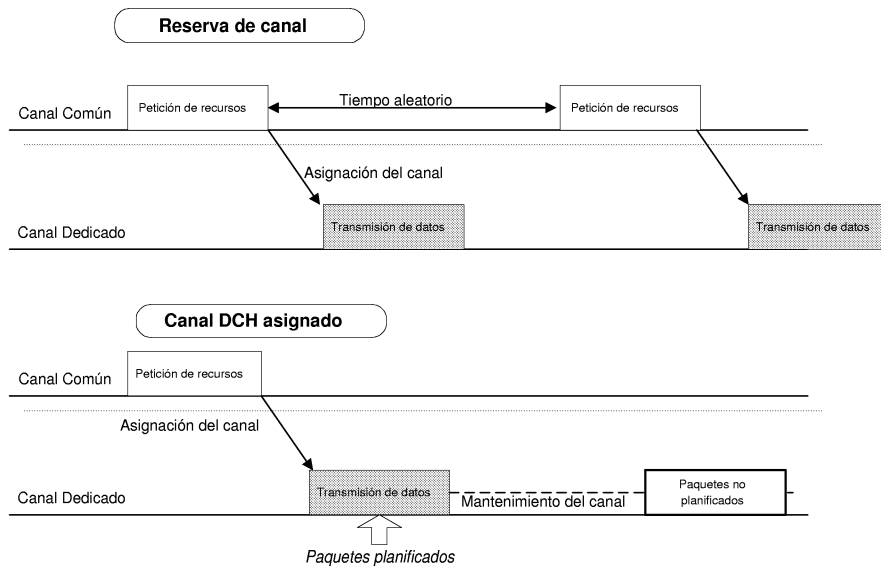


Figura 5.4: Modos de operación para servicios de datos de paquetes (canales ascendentes)

(figura 5.4). El canal dedicado asignado requiere un mantenimiento que consiste en el envío de una señal piloto y comandos de control de potencia, que aseguran una transmisión eficiente. Si no se generan paquetes durante mucho tiempo, el terminal libera el canal. De todas formas, el usuario mantiene el conjunto de TF posibles que le indicó la estación base en la reserva de canal, de forma que cuando vuelva a transmitir sólo envía una petición de acceso corta en el RACH.

La reserva de canal se emplea en situaciones de alta carga donde al usuario no se le permite transmitir inmediatamente, mientras que la alternativa de canal común está indicada en situaciones de carga baja. El canal dedicado se utiliza cuando el usuario tiene paquetes grandes que transmitir, de manera que la sobrecarga causada por el mecanismo de reserva sea despreciable. La transferencia de datos es mucho más fiable en un canal dedicado que en canal común. Esto es debido a que, en el caso del canal dedicado no existen colisiones y además se puede usar control de potencia en bucle cerrado, mientras que el canal común tiene problemas de colisiones y no se puede usar control de potencia en lazo cerrado, por lo que se producen más errores.

- *Servicios en tiempo real*

Para servicios en tiempo real el mecanismo de transmisión es similar a la reserva descrita, salvo que en este caso debido a las fuertes restricciones de retardo, la asignación del canal se mantiene durante toda la llamada, es la denominada conmutación de circuitos. Cuando el terminal de usuario tiene datos que transmitir, primero realiza una petición de recursos en el canal común de acceso aleatorio. Como resultado, la red asigna los recursos requeridos,

mediante un conjunto de TF. Las diferencias de este modo con el modo paquete son, en primer lugar, que el usuario empieza a transmitir justo después de recibir el mensaje de aceptación de la estación base y en segundo lugar, lo hace con cualquiera de los TF indicados (en el modo paquete la estación base le indicaba al terminal el instante en que debía empezar a transmitir y el TF concreto que debía usar). Esta libre elección del TF permite al terminal de usuario soportar servicios de tasa variable como la voz, porque durante la transmisión puede ir cambiando y eligiendo el formato más adecuado según la cantidad de datos que desee transmitir. Es decir, en este caso la transmisión es continua porque el cambio de formato lo realiza de forma libre el terminal, al contrario que en el caso de paquetes que el terminal sólo podía transmitir con el formato que le indicara la estación base. Pero también en este caso la red puede limitar la capacidad del terminal, limitando el conjunto de posibles TF a un subconjunto concreto según la carga de la red.

- *Mezcla de servicios: Multimedia*

Si un usuario quiere transmitir datos de distintos servicios, como por ejemplo un servicio en tiempo real como la voz y un servicio de datos en paquetes, se le asignarán dos conjuntos de TF. Un conjunto se asignará para el servicio en tiempo real y otro para el servicio de datos de paquete. Para el caso del servicio en tiempo real, el terminal puede elegir entre cualquiera de los formatos de transporte asignados, mientras que en el caso del servicio de datos, sólo puede transmitir con el TF que se le haya indicado. Además al terminal se le asigna un umbral de tasa/potencia de salida. La tasa agregada de ambos servicios debe estar siempre por debajo de este umbral.

5.3 Investigación relacionada

El gran potencial de la técnica CDMA para soportar la integración de servicios muy diversos la ha convertido en el principal candidato para los sistemas de tercera generación, como marcan los estándares [?], [?]. Una de sus ventajas es que, dado que la interferencia es generada por un elevado número de fuentes, la varianza de la función distribución de la potencia interferente instantánea disminuye. Esto tiene un efecto de mejora de la capacidad. Sin embargo en CDMA en modo paquete, el acceso aleatorio al canal origina patrones de interferencia aleatorios que incrementan la varianza [?]. Por este motivo es muy importante controlar el acceso de los usuarios en un sistema multiservicio integrado por diversos tipos de tráfico. Diversos estudios se orientan hacia la búsqueda de combinaciones de las técnicas de acceso más conocidas para dar lugar a un protocolo híbrido de mayor eficiencia. Este es el caso de [?] donde se analiza el protocolo híbrido CDMA/PRMA con reserva de paquetes en un sistema de voz y datos. Pero en el caso del estándar UTRA, basado en la técnica WCDMA (UTRA FDD), no se han seleccionado ninguno de estos protocolos híbridos, sino que se establece que las peticiones de transmisión de todos los

usuarios se envíen mediante el canal común RACH basado en el tradicional ALOHA ranurado. En cuanto al protocolo ALOHA ranurado existen diversos trabajos [?], [?] que demuestran que se consiguen significativas mejoras empleando un protocolo de chequeo del estado del canal como CSMA-CD (Channel Sense Multiple Access with Collision Detection), que detecte posibles colisiones. El análisis del protocolo de acceso en trabajos tan actuales como [?] y [?] muestran que este aspecto continúa siendo una línea de investigación para la tercera generación de sistemas de comunicaciones móviles. En [?] se analizan las prestaciones y la estabilidad de los protocolos ALOHA ranurado. El análisis efectuado permite realizar una adecuada elección de la probabilidad de transmisión para que el sistema trabaje en el punto de equilibrio deseado. En [?] se evalúa un protocolo de acceso recomendado para los sistemas integrados UMTS/IMT2000. Este protocolo está basado en una asignación de reserva dinámica que es capaz de manejar tráfico multimedia de forma eficiente y ofrecer garantías de calidad tanto a servicios en tiempo real como a servicios de tipo best-effort. El estudio analítico de este protocolo requiere una gran complejidad matemática. Además existen trabajos como [?] que comparan las prestaciones del protocolo ALOHA ranurado con ISMA para una sólo clase de servicio con modelo de tráfico exponencial.

Otro aspecto interesante en los nuevos sistemas es que el tráfico de paquetes de datos presentará características muy variables en cuanto a tamaño de paquete y longitudes de ráfaga, causadas por la integración de servicios muy diversos. Por este motivo es necesario un esquema de acceso en modo dual, donde las transmisiones puedan tener lugar mediante canal común o canal dedicado. En [?], [?] y [?] se proponen técnicas dinámicas para la elección del modo de transmisión. En [?] se propone una estrategia adaptativa para la elección del modo de transmisión de los paquetes de datos. Esta estrategia consiste en: *a)* en el caso de paquetes cortos que se transmiten con poca frecuencia, elegir canal común; *b)* cuando se transmiten paquetes largos, el mecanismo de transmisión se conmuta temporalmente de canal común a canal dedicado, que se libera cuando se hayan transmitido los datos; *c)* si los paquetes se transmiten frecuentemente, la transmisión se conmuta de canal común a canal dedicado, y este canal dedicado se mantiene hasta nueva instrucción. En [?] y [?] se analiza el modo dual de transmisión en un sistema homogéneo con modelos de tráfico exponenciales. La propuesta es conmutar dinámicamente entre los dos modos de transmisión durante una sesión de usuario para optimizar las prestaciones de retardo del sistema. Además en [?] se proponen dos métodos de resolución de colisiones: esquema de *backoff* lineal y exponencial.

El aspecto de la elección de los modos de transmisión más adecuados en sistemas integrados lleva asociada una extensa investigación que se puede resumir así:

- 1) Se han propuesto 3 posibles esquemas de transmisión para la integración de voz y datos:

- Conmutación de paquetes con reserva para voz y datos [?]
- Conmutación de paquetes con reserva para voz y conmutación de paquetes por contención para datos (en este caso se controla la probabilidad de permiso de transmisión adaptativamente según el estado del canal) [?], [?].
- Conmutación de circuitos para voz y conmutación de paquetes por contención para datos [?]. En [?] se propone este esquema para voz y datos, usando un método de control de tráfico que suaviza la fluctuación de la interferencia. Este método está basado en transmitir los paquetes de datos con los recursos no usados por el tráfico de voz.

2) En [?], [?], [?] y [?] se estudia un sistema integrado por servicios de datos basados en paquetes junto con servicios de tipo *streaming* o también llamados orientados a conexión. Para transportar los servicios de paquetes de una celda se usa un canal común de alta tasa. Por otra parte, los servicios de tipo *streaming*, se transmiten sobre canales de datos independientes, cada uno con un código distinto. En estos servicios orientados a conexión, la transmisión se mantiene continua durante la llamada, en cambio en el caso de los servicios de paquetes el tiempo de servicio es corto y la tasa de transmisión es alta.

El análisis de los métodos de transmisión y el estudio de las prestaciones de los protocolos de acceso son claves para estimar el retardo de acceso de los nuevos servicios de datos en sistemas 3G. Es necesario tener en cuenta que en estos nuevos sistemas de comunicaciones móviles es necesario garantizar la calidad de aplicaciones simultáneas con requisitos de QoS muy diferentes. Por este motivo, es muy importante controlar el acceso de los usuarios al sistema, así como emplear técnicas de gestión de recursos. La discusión por tanto está abierta no sólo en cuanto a la mejora en los tiempos de acceso sino también en lo que a garantías de calidad (nivel de interferencias máximo) se refiere. En esta discusión cabe destacar que un aspecto de interés, sobre el que la investigación no es muy extensa, es la influencia conjunta de protocolos de acceso y modos de transmisión sobre las restricciones de un sistema.

En esta tesis se analizan los tiempos de acceso en un sistema UTRA multiservicio empleando dos protocolos MAC, el ALOHA ranurado y el ISMA. Con esta comparativa se estudia la influencia de estos protocolos junto con los mecanismos de transmisión sobre las limitaciones del sistema. La integración de dos servicios muy distintos, un servicio en tiempo real y un servicio de datos tolerante al retardo, que emplean dos modos de transmisión diferentes, nos permite analizar el impacto de la transmisión por canal común de los servicios de datos sobre el retardo de acceso de los servicios en tiempo real. Además se ha analizado un nuevo servicio de datos de los futuros sistemas móviles como el acceso *web*. El propósito final es evaluar la influencia de las técnicas de acceso sobre las limitaciones del sistema, es decir quién impone las restricciones, el parámetro del tiempo de acceso o los máximos niveles de interferencia permitidos. Para limitar

el máximo nivel de interferencias se estudian técnicas de control de acceso al sistema, como la asignación de probabilidades de acceso basadas en el estado del sistema y el control de admisión.

5.4 Modelo del sistema

Las características del sistema bajo estudio son las siguientes:

- *Canal RACH*

En este caso se ha realizado una comparación del protocolo ALOHA ranurado, propuesto en UTRA, con un ISMA no persistente, caracterizado porque el acceso ya no es aleatorio sino que las estaciones base poseen cierto control. Este control supone que la estación base difunde el estado de ocupación de cada uno de los códigos de acceso al canal común, de manera que un usuario que quiera transmitir selecciona uno de los códigos disponibles e inicia la transmisión del primer paquete. Si no hay colisión, la estación base marca el código seleccionado como ocupado y el usuario lo retiene hasta finalizar la transmisión de la ráfaga. En caso de colisión, el usuario reintentará el acceso en tramas posteriores.

En cuanto al reconocimiento de las peticiones de acceso, se considera un retardo de una trama (10 ms), es decir la petición de acceso enviada en la trama i se reconoce en la trama $i + 1$ [?]. Las peticiones que sufren colisión se vuelven a retransmitir en la trama siguiente, sin limitar el número máximo de reintentos. El objetivo es evaluar el número de reintentos en diversas situaciones de carga.

Se han variado los recursos disponibles en el RACH, esto es los códigos de acceso de 2 a 16, para conocer su influencia en los parámetros de calidad. Además, debido a que en la transmisión por canal común no es posible usar control de potencia en lazo cerrado, se han considerado pérdidas del 10% [?].

- *Control de acceso*

Inicialmente el acceso al canal común es libre para la comparativa de los protocolos de acceso. Posteriormente se controla el acceso al canal para tratar de garantizar el máximo umbral de interferencias de dos maneras: 1) Limitando la probabilidad de acceso de los usuarios al canal común de acceso aleatorio, donde se envían las peticiones de transmisión, en función de la carga del sistema y 2) Implementando un simple control centralizado para asignar permisos de transmisión (control de admisión).

La función de control de la probabilidad de acceso elegida, que se muestra en la figura 5.5, disminuye la probabilidad a medida que la carga del sistema se acerca a la máxima capacidad del mismo, con objeto de limitar el nivel de interferencias en el sistema. La capacidad máxima de un sistema queda determinada por los requisitos de calidad de los distintos servicios (capítulo 4). El control de admisión requiere una estimación de la

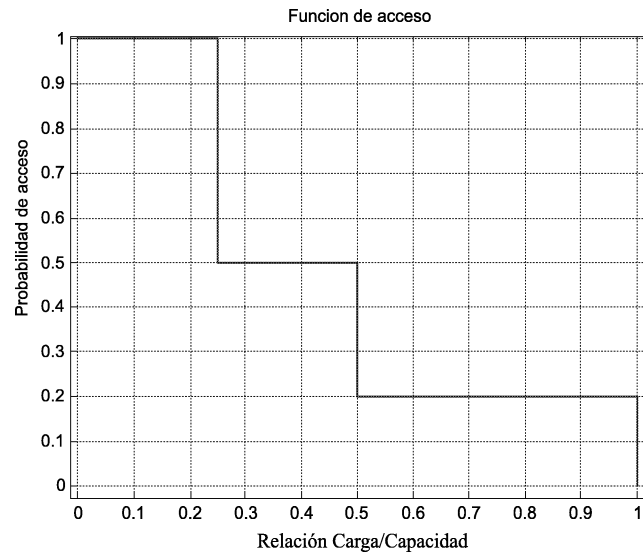


Figura 5.5: Función de control de acceso en función de la carga del sistema

potencia en los próximos instantes para tomar una decisión. En este caso se ha realizado una predicción de potencia por tramas muy simple que asume que la potencia en la trama siguiente es igual a la potencia en la trama anterior.

En este caso se realiza una gestión con prioridad de las peticiones de acceso, de modo que se priorizan las peticiones de los servicios con mayores restricciones de retardo, como los servicios en tiempo real, frente a las peticiones de los servicios de datos tolerantes al retardo.

- *Servicios*

Se han considerado dos tipos de servicios, un servicio en tiempo real como la voz, y servicios de datos tolerantes al retardo. El servicio de voz, por sus características de tiempo real, se transmite en canal dedicado, es decir cada usuario sólo accede al RACH para enviar la petición de transmisión al inicio de la llamada. Se han considerado servicios de datos con modelos de tráfico distintos, y para todos ellos se ha usado la transmisión en canal común. La variación de las características del tráfico que se transmite por el canal común nos permite estudiar los tiempos de acceso de los servicios en tiempo real, muy restrictivos en cuanto a retardo, bajo diversas situaciones de carga en el canal común. Además, para los usuarios que realizan la transmisión por canal común, se emplea el mecanismo *Stop and Wait* que consiste en que el usuario espera que se le reconozca el paquete enviado antes de enviar el próximo paquete.

Se han analizado dos tipos de sistemas: sistemas homogéneos de voz y datos y heterogéneos con integración de voz y datos.

Los parámetros característicos del sistema UTRA estudiado son los indicados en la tabla 4.3 del capítulo 4.

Para efectuar el análisis de las limitaciones que impone el retardo de acceso al sistema, debido a posibles pérdidas y colisiones en el acceso, se ha optado por emplear una técnica de simulación. Esta decisión se basa en la necesidad de diseñar un modelo de sistema completo, donde se deben considerar las estrategias de acceso al canal, las características de los modelos de tráfico y las técnicas de resolución de colisiones. Por este motivo, con objeto de analizar de la forma más aproximada posible el funcionamiento del sistema y emplear modelos complejos para el tráfico de datos, se emplean simulaciones.

El uso de técnicas de simulación requiere considerar ciertos aspectos claves como la duración de las simulaciones para obtener resultados fiables. La duración de una simulación depende de la eficiencia del simulador y de la precisión en los resultados que se desee obtener. Es necesario que las simulaciones sean rápidas pero que al mismo tiempo garanticen la fiabilidad de los resultados. En una simulación existen dos periodos, el periodo transitorio inicial y el estado estacionario. Tras la inicialización de un sistema, se atraviesa una fase transitoria durante la cual sus características varían con el tiempo. Después de un período el sistema se aproxima al equilibrio si es estable. Los datos obtenidos durante el periodo transitorio no son representativos y por tanto conviene eliminarlos. La detección del fin del transitorio es compleja, por lo que se han propuesto numerosas reglas heurísticas basadas en experiencias prácticas. El método que hemos usado en nuestro caso consiste en detectar que el número medio de usuarios presente en el sistema tenga una variación menor que un cierto umbral. De esta forma las duraciones de las simulaciones se eligen lo suficientemente largas para que este periodo transitorio no sea apreciable. En nuestras simulaciones se ha empleado la distribución *t-student* para estimar los intervalos de confianza. Las simulaciones efectuadas han tomado una media de 30 observaciones para conseguir intervalos de confianza del 95%.

Las simulaciones se han efectuado sobre la plataforma Opnet, que es un simulador orientado a eventos, con una jerarquía de niveles que facilita el desarrollo de sistemas complejos.

5.4.1 Modelos de tráfico

Este estudio considera dos clases de servicios, voz y datos, con los siguientes modelos:

- Servicio de voz

El modelo utilizado es un esquema ON-OFF con distribuciones exponenciales de los periodos de llamada (ON y OFF) e inactividad (figura 5.6). Los valores medios de las distribuciones exponenciales son: ON = 1 seg, OFF = 1.35 seg, Llamada = 180 seg e Inactivo =

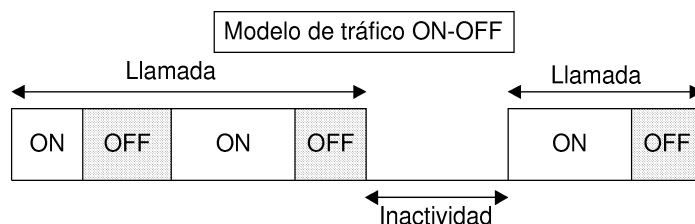


Figura 5.6: Modelo de tráfico ON-OFF

900 seg. El factor de actividad medio de este servicio, $\alpha = \frac{ON}{ON+OFF}$, está en torno a 0.4. Este parámetro es necesario para estimar la capacidad (capítulo 4). Las características del servicio de voz empleado se indican en la tabla 5.1.

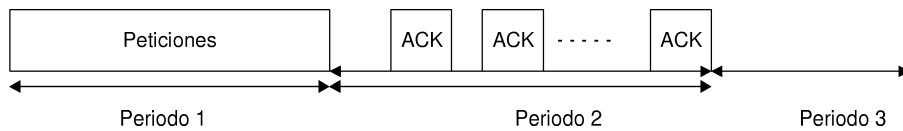
Parámetros de la voz	
Ganancia de proceso	128
Tasa de bits	32 kbps
Modo de transmisión	Canal dedicado
SIR	3 dB

Tabla 5.1: Parámetros del servicio de voz

- Servicio de datos

Se han empleado tres modelos de tráfico distintos para el servicio de datos con objeto de generar flujos de tráfico diferentes en sentido ascendente: modelo de tasa constante, modelo rafagueado ON-OFF con tiempos exponenciales y modelo de acceso *web* con distribuciones Pareto. El modelo rafagueado consta de periodos ON con una longitud media de ráfaga de 10 paquetes y periodos OFF de inactividad con distribuciones de tiempo exponenciales. La duración media de un periodo OFF se ajusta según el tamaño de los paquetes (tasa del RACH) para conseguir distintas tasas de bits por usuario. El modelo de acceso *web* simulado, desarrollado en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga, está basado en trazas reales y su característica principal es su alta variabilidad (varianza infinita) [?]. Para este tráfico, las distribuciones de los periodos ON-OFF no son exponenciales, sino que se usa la distribución de Pareto. En la figura 5.7 se muestra el modelo usado con tres periodos: 1) Peticiones, el usuario pide las páginas *web*, 2) Reconocimientos (ACK), el usuario envía los reconocimientos correspondientes a las páginas recibidas, 3) Tiempo de lectura, el usuario está inactivo. Los parámetros usados para estos periodos se muestran en la tabla 5.2.

El aspecto que nos interesa más de este modelo es su elevada variabilidad, mucho mayor

Figura 5.7: Modelo de tráfico *web*

Periodo	Distribuciones
1	Nº de peticiónes: Pareto, $\iota=2.22$, $b=6.42$ Tamaño de peticiónes: Lognormal, media =352 bytes, desviación = 109.85 bytes
2	Duración del periodo: Pareto $\iota=1.1$, media=35.7 seg Tiempo entre reconocimientos: Exponencial media=0.73 seg Numero de ACKs: Tamaño-página/tamaño-paquete Tamaño página: Pareto $\iota=1.75$, media=40.6 kbytes Tamaño paquete: 800 bytes
3	Duración: Gamma, media=35.286 seg, desviación=147.39 seg

Tabla 5.2: Tabla de parámetros del modelo de tráfico *web*

que la del modelo exponencial. La función densidad de probabilidad $f(t)$ de la distribución Pareto usada tiene esta forma:

$$f(t) = \frac{\iota \cdot b^\iota}{(t + b)^{\iota+1}} \quad \text{media} = \frac{b}{\iota - 1} \quad (5.1)$$

El parámetro ι determina la caída de la función, de forma que si se toman los valores de 1 a 2 la varianza es infinita. El parámetro b depende de la media. En la figura 5.8 se aprecia la comparativa de las distribuciones exponencial y Pareto, cuya diferencia principal es la lenta caída de la función Pareto para valores elevados.

5.5 Entornos analizados

El diagrama de bloques de la figura 5.9 representa el entorno simulado.

El terminal móvil está compuesto de un conjunto de generadores para seleccionar el tipo de tráfico que debe generar el terminal (clase de servicio). El bloque de envío de las peticiónes de transmisión tiene las siguientes misiones: 1) Seleccionar el *slot* y el código de acceso al canal común; 2) Enviar la petición cuando corresponda según el modo de transmisión del tipo de tráfico que se está cursando; 3) Ajustar el envío de la petición al protocolo de acceso al medio seleccionado; 4) Controlar la probabilidad de acceso según el número de reintentos; y 5) Decidir la estrategia de reintentos cuando el receptor de ACK le indica que no se ha recibido ningún

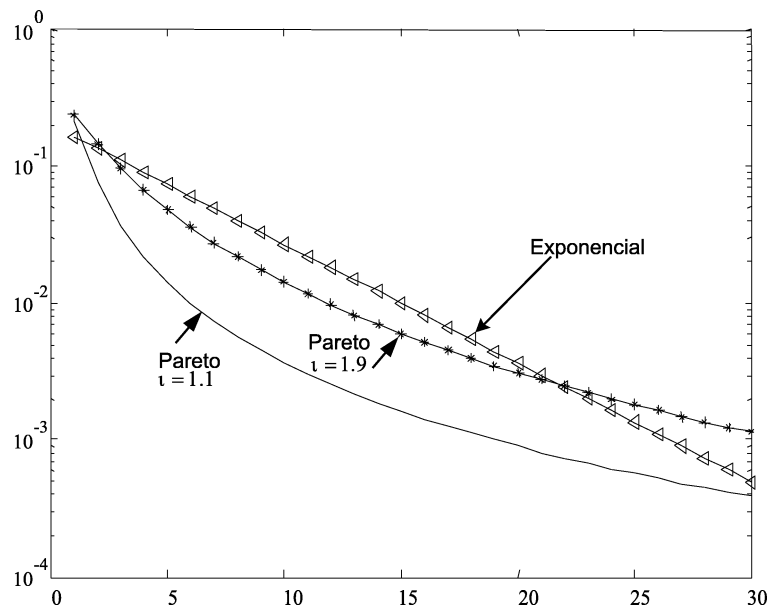


Figura 5.8: Comparativa de las funciones densidad de probabilidad de las distribuciones exponencial y Pareto

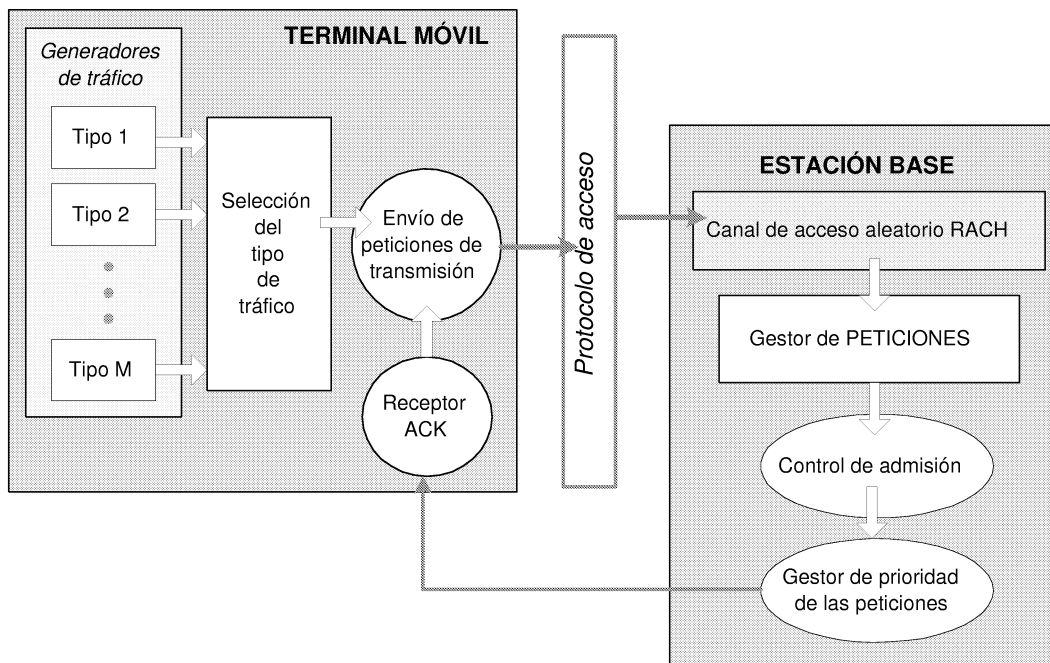


Figura 5.9: Diagrama de bloques del simulador de acceso

reconocimiento (algoritmos de *backoff*).

La estación base consta del módulo de canal común RACH, que le indica al gestor de peticiones las peticiones recibidas junto con las posibles colisiones. Este gestor se comunica con el control de admisión, si lo hay, que decide cuántas peticiones aceptar en función de los recursos disponibles. Pero es el gestor de prioridad el que decide cuáles, de entre todas las peticiones recibidas.

Las medidas efectuadas en estas simulaciones han sido las funciones distribución de los parámetros potencia, retardo de acceso y reintentos, así como el porcentaje de colisiones. La disponibilidad de funciones de distribución nos permite conocer los umbrales máximos de potencia, retardo y reintentos con una probabilidad del 99%. Esto significa que cuando, por ejemplo, se presente un resultado de retardo, lo que se está indicando es que el retardo de acceso de los usuarios será menor o igual al umbral indicado con una probabilidad del 99%.

5.5.1 Comparativa de protocolos de acceso

El objetivo de esta sección es conocer las máximas cargas de tráfico con los protocolos ALOHA e ISMA para las que se alcanza el máximo umbral de interferencias que ofrece garantías de QoS, y medir el retardo de acceso experimentado por los usuarios en estos límites de carga por interferencias. Los resultados que se presentan corresponden a los valores de las funciones distribución de potencia, retardo y reintentos con probabilidad del 99%. Las pruebas efectuadas se resumen en la tabla 5.3.

- Sistema homogéneo de voz
 - *Influencia de la carga de voz* (prueba 1). En este caso se han simulado 4 escenarios con distinto número de usuarios de voz para evaluar los tiempos de acceso. El estudio de este sistema está enfocado a conocer la ocupación del RACH debida al tradicional servicio de voz, lo que nos indica la posibilidad de transmitir datos por este canal común. El elevado número de usuarios empleado se debe a que estos usuarios no están siempre en llamada, sino que permanecen cierto tiempo inactivos (figura 5.6). También se han evaluado los efectos en el tiempo de acceso de los recursos disponibles en el RACH, por lo que los códigos disponibles para el acceso al canal común se han variado de 2 a 16. Los protocolos evaluados para acceso al RACH han sido ALOHA ranurado e ISMA.

Sistemas		Parámetro	Variable	Valores	Pruebas	
Sistema homogéneo	Voz	Potencia Retardo Reintentos Colisiones	Protocolo acceso Nº usuarios	ALOHA e ISMA 100, 300, 500 y 1000 usuarios	P1	
	Datos	CBR	Carga máxima Retardo Reintentos Colisiones	T Tasa de usuario G 8, 16, 30 kbps G=32 4, 8, 14 kbps G=64 ALOHA	P2	
		Rafagueado	Carga máxima Retardo Reintentos Colisiones	T G Protocolo de acceso	T = 3 y 7 dB G=32, 64 ALOHA e ISMA	P3
		web	Potencia Retardo Reintentos Colisiones	Nº usuarios Protocolo de acceso Códigos de acceso	10, 20, 100, 500 ALOHA, ISMA 2, 16	P4
Sistema heterogéneo	Voz y datos web	340 usuarios de voz	Potencia Retardo Reintentos Colisiones	Protocolos de acceso Códigos de acceso Nº usuarios de datos	ALOHA e ISMA 2 códigos 10, 20, 50, 75 usuarios datos 16 códigos 20, 100, 500 usuarios datos	P5

Tabla 5.3: Tabla de los experimentos realizados para analizar la limitación del tiempo de acceso (T es la relación energía de bit/densidad de ruido y G es la ganancia de proceso)

- Sistema homogéneo de datos

El estudio de este sistema con diversos modelos de tráfico, esto es, flujos distintos en el enlace ascendente, está orientado a estimar la influencia de las características del tráfico en el retardo de acceso de una transmisión por canal común. En este caso se han variado las ganancias de proceso del RACH, es decir la tasa del RACH, R_{RACH} , lo que cambia la tasa máxima de transmisión de información. Para calcular esta tasa máxima hay que tener en cuenta que: 1) la ráfaga de acceso aleatorio es de 10 mseg, dentro de la cual 4 bytes se destinan a cabecera y el resto de bits son de información, 2) se supone un codificador de 1/2 y 3) se emplea el mecanismo de *Stop and Wait* para la transmisión por canal común, con lo que cada paquete tarda en enviarse dos tramas, es decir 20 ms (transmisión+reconocimiento). Todo ello implica que la máxima tasa de transmisión de información en canal común R_{max} es: $R_{max} = \frac{R_{RACH} \cdot 10ms - 32}{2 \cdot 20ms}$. El número de bits de información depende, como se comentó anteriormente, de la tasa del RACH, la duración de una ráfaga (10 ms), los 32 bits de cabecera y el codificador 1/2. Con esta ecuación se obtiene

que para las ganancias de proceso del RACH de 32 y 64, las tasa máximas de transmisión de la información por canal común están en torno a 30 kbps y 15 kbps respectivamente.

Además en este caso se consideran diversos requisitos de calidad (relación energía de bit/densidad de ruido T). Los experimentos realizados con los diversos modelos de tráfico tienen como objetivo estimar la carga máxima en kbps permitida para ofrecer garantías de calidad de servicio, es decir para un umbral de interferencias máximo. Además para este límite de carga se evalúa el retardo de acceso, con objeto de discernir en cada caso el factor que impone una limitación mayor: el retardo de acceso o el requisito de calidad. Para evaluar la máxima capacidad o el máximo nivel de interferencias permitido en un sistema se utiliza la herramienta analítica descrita en el capítulo 4.

- *Máxima carga con ALOHA ranurado* (prueba 2). La estimación de la máxima carga y el retardo de acceso se realiza considerando distintas tasas de transmisión por usuario para distintas ganancias de proceso del RACH. El modelo de tráfico empleado es el de tasa constante. En este caso sólo se ha usado el protocolo de acceso ALOHA ranurado, dado que no existen ráfagas para efectuar las reservas por ráfagas de ISMA, es decir los paquetes se transmiten independientemente.
 - *Comparativa de ALOHA ranurado e ISMA* (prueba 3). En este caso se emplea un modelo de tráfico rafagueado. Los tiempos de inactividad se ajustan en cada caso para conseguir la tasa media requerida. Esta prueba analiza la mejora que supone el protocolo ISMA con reserva por ráfagas frente al ALOHA donde cada paquete de la ráfaga se transmite independientemente.
 - *Comparativa de ALOHA ranurado e ISMA en la transmisión de tráfico web* (prueba 4). La comparativa de los protocolos ALOHA ranurado e ISMA se efectúa variando los códigos de acceso al RACH, para analizar la repercusión de los recursos disponibles del RACH en los parámetros de salida.
- Sistema heterogéneo
 - *Efecto de la integración de servicios* (prueba 5). El sistema heterogéneo analizado integra el servicio de voz y el servicio de datos de acceso *web* descritos anteriormente. Con este sistema se analiza la interacción entre los dos tipos de tráfico con distintos mecanismos de transmisión, así como la influencia de esta integración en los parámetros del sistema. Se varían tanto el número de usuarios como los códigos disponibles del RACH para analizar su efecto en un sistema integrado.

5.5.2 Estudio del control de acceso

Las pruebas de control de acceso se realizan sobre un sistema integrado de voz y datos con modelo rafagueado ON-OFF y distribuciones exponenciales. El objetivo en este caso es analizar el retardo considerando las características particulares de cada servicio, que llevan a priorizar la voz frente a los datos. Los parámetros del servicio de datos empleado son una ganancia de proceso de 64 y un requisito de calidad de 7 dB. Para estudiar la eficiencia de las funciones de acceso al aumentar la carga se aumenta el factor de actividad de los usuarios de datos. La comparativa entre las funciones de asignación de probabilidades en función de la carga del sistema y la función de asignación de permisos o CAC (pruebas 6 y 7) se realiza simulando los escenarios indicados en la tabla 5.4. Los usuarios de datos se disminuyen cuando aumenta el factor de actividad para evitar una situación de congestión en el sistema (carga mayor que la máxima capacidad).

<i>Controles de acceso</i>		<i>Parámetro</i>	<i>Variable</i>	<i>Valores</i>	<i>Pruebas</i>
<i>Sistema integrado</i>	Probabilidad de acceso	Retardo acceso Potencia	Nº usuarios datos α_D	40 usuarios voz $\alpha_D=0.2$ 15, 30, 60, 100 usuarios datos $\alpha_D=0.5$ 10, 15, 20, 25 usuarios datos $\alpha_D=0.8$ 2, 5, 10, 15 usuarios datos	P6
	Permisos de acceso	Retardo acceso Potencia	Nº usuarios datos α_D	40 usuarios voz $\alpha_D=0.2$ 15, 30, 60, 100 usuarios datos $\alpha_D=0.5$ 10, 15, 20, 25 usuarios datos $\alpha_D=0.8$ 2, 5, 10, 15 usuarios datos	P7

Tabla 5.4: Tabla descriptiva de las pruebas realizadas sobre el control de acceso

5.6 Resultados

5.6.1 Protocolos de acceso

- *Influencia de la carga de voz* (prueba 1)

Los valores de la tabla 5.5 representan los niveles de potencia con probabilidad del 99% (función distribución), usando 16 códigos de acceso al canal común y los protocolos ALOHA e ISMA. Los valores relativos al uso de 2 códigos para acceso al RACH son muy similares para ALOHA e ISMA, por lo que no se muestran. Aunque con 16 códigos hay pocas diferencias, se aprecia siempre una cierta mejora con el uso de ISMA.

Niveles de potencia		
Usuarios de voz	ALOHA	ISMA
100	19.2	16.8
300	49.37	45.5
500	71.2	65.7
1000	136.5	130.1

Tabla 5.5: Niveles de potencia (valores de potencia de la función distribución con probabilidad del 99%) en un sistema homogéneo de voz con 16 códigos acceso (prueba 1)

La figura 5.10 representa los valores de retardo (probabilidad del 99%). En esta gráfica se aprecia el crecimiento del retardo con el aumento de la carga, y su disminución en función del protocolo usado y el número de códigos de acceso al RACH. El menor retardo es el obtenido con ISMA y 16 códigos y el más elevado es el correspondiente al protocolo ALOHA ranurado con 2 códigos de acceso.

El máximo nivel de interferencias permitido en este sistema depende del requisito de calidad de la voz, de modo que en este caso y según la gráfica 4.7 del capítulo 4, este umbral de interferencias (30) ya se supera con 300 usuarios. Pero lo más interesante es que para un número de usuarios mucho mayor como 1000, los retardos de acceso son perfectamente asumibles, aún usando el protocolo ALOHA ranurado.

En cuanto a los reintentos, el valor es algo mayor que 1 en todos los casos, pero con mínimas diferencias. El porcentaje de colisiones es 0. Esto nos prueba el bajo uso del canal común en la transmisión de voz por canal dedicado, dado que los usuarios sólo acceden al inicio de la llamada para enviar la petición. Por este motivo el retardo obtenido para el caso de 1000 usuarios y tan sólo 2 códigos de acceso es muy pequeño. En cuanto a los protocolos de acceso se observa que existen pequeñas diferencias en el retardo, que se acentúan más a medida que aumenta la carga. Así se aprecia que el ISMA con 2 códigos de acceso ofrece mejores prestaciones que el ALOHA con 16 códigos. Si bien es cierto que, dado el pequeño

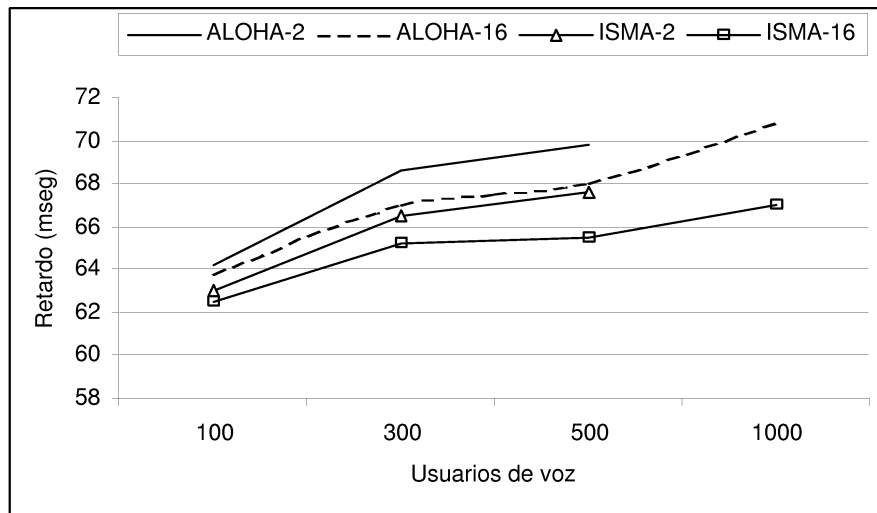


Figura 5.10: Retardo en un sistema homogéneo de voz. Protocolos ALOHA e ISMA con 2 y 16 códigos de acceso al canal común (prueba 1)

margen de variación del retardo (menor que 100 mseg para la máxima capacidad) y la mayor complejidad de ISMA, las prestaciones del protocolo ALOHA son suficientes.

Estos resultados muestran que el sistema está limitado por el nivel de interferencias, y no por el protocolo de acceso puesto que los tiempos de acceso son pequeños en entornos de alta carga en los que se supera la máxima capacidad.

- *Máxima carga con ALOHA ranurado* (prueba 2)

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestra la máxima carga admitida por el sistema para cumplir el requisito de calidad de servicio (máximo nivel de interferencias), al variar las tasas de bit por usuario, la ganancia de proceso y el requisito de calidad. Para cada una de estas cargas, dentro de la barra se indica el retardo de acceso y el porcentaje de colisiones. Estos datos se extraen de las funciones distribución (probabilidad del 99%). En estas gráficas se observa que la máxima carga permitida crece ligeramente cuando aumenta la tasa por usuario, debido a que disminuye el rafagueo en el acceso al canal común, a costa de un leve incremento en el retardo y las colisiones dado que aumentan los requisitos de cada usuario.

Además se observa que cuando se establece un requisito de calidad de servicio más restrictivo (de 3 dB a 7 dB), la carga máxima disminuye de forma proporcional a la relación entre los requisitos de calidad. En las gráficas las cargas máximas se dividen por un factor cercano a 3 siendo la relación entre los requisitos de QoS de 2.5. Además se aprecia que, cuanto más restrictivo es el requisito de QoS, menores retardo de acceso y colisiones se producen en el sistema, dado que se limita la carga máxima. Esta disminución es más notable

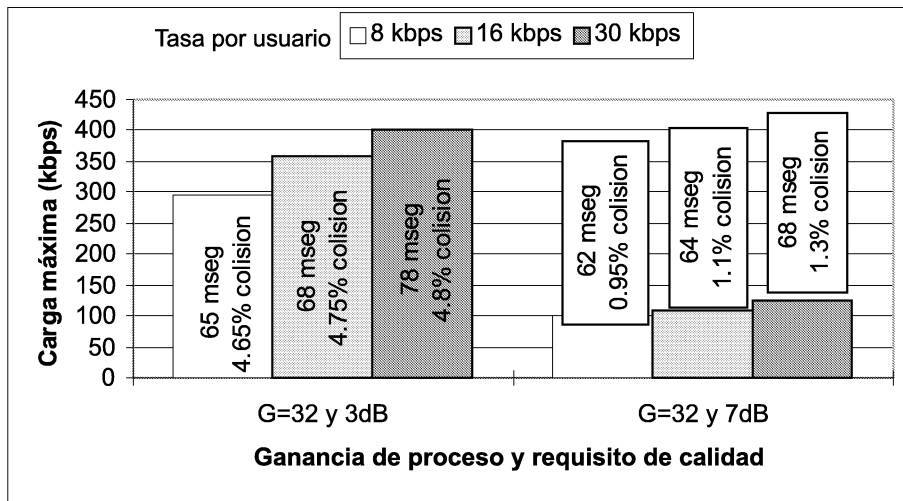


Figura 5.11: Carga máxima, retardo en msec y % de colisiones un sistema homogéneo de datos al variar la tasa por usuario de 8 a 30 kbps (prueba 2)

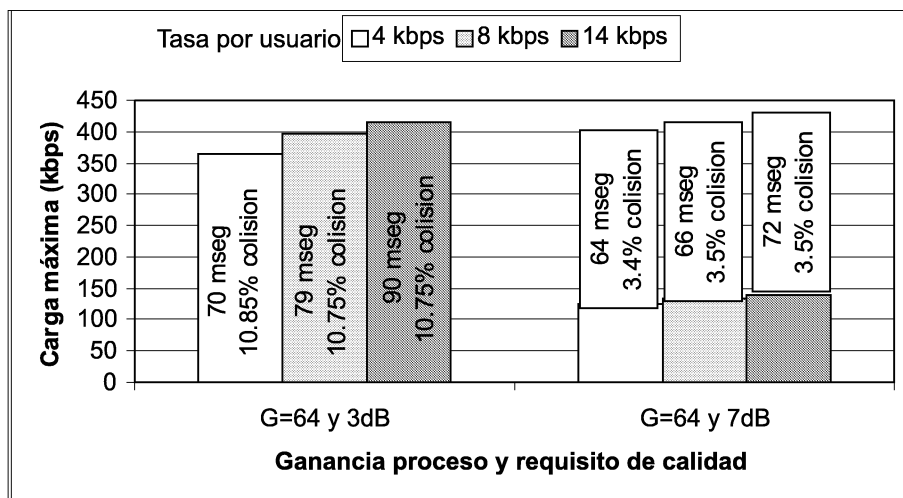


Figura 5.12: Carga máxima, retardo en msec y % de colisiones un sistema homogéneo de datos al variar la tasa por usuario de 4 a 14 kbps (prueba 2)

en las colisiones, que se reducen de 3 a 4 veces al pasar de 3 a 7 dB. Además se observa que cuando se aumenta la ganancia de proceso (disminución de la tasa de bits), las cargas máximas sufren cierto incremento. Finalmente se puede concluir que la limitación de este sistema es el requisito de calidad o nivel de interferencia, porque cuando se alcanzan estos niveles los retardos de acceso son muy pequeños, menores de 100 mseg, tolerables para este tipo de datos.

- *Comparativa de ALOHA ranurado e ISMA (prueba 3)*

En la figura 5.13 se muestran las cargas máximas impuestas por el requisito de calidad (máximo nivel de interferencias) para los protocolos ALOHA ranurado e ISMA variando la ganancia de proceso. Los valores de retardo, reintentos y colisiones para estas cargas máximas se indican en la tabla 5.6. En estas gráficas se aprecia el incremento de la máxima carga cuando la ganancia de proceso cambia de 32 a 64, sobre todo en el caso del ALOHA ranurado, más sensible a los cambios en tasa por su mayor sensibilidad a las colisiones. La comparativa de los protocolos ALOHA e ISMA nos revela que para una ganancia de proceso de 32, la carga máxima para ISMA es un 30% mayor que la de ALOHA para un requisito de QoS de 3 dB, y un 60% mayor para 7 dB. Esta relación entre los porcentajes, prácticamente el doble, es similar para una ganancia de proceso de 64, donde la mejora de ISMA frente a ALOHA es un 18% para el requisito de 3 dB y un 31% para 7 dB. Es decir, cuanto más restrictivo sea el requisito de calidad, esto es, menor umbral de interferencias, más apreciable es la mejora de ISMA. En cuanto al retardo se observa en la tabla 5.6, que ISMA disminuye los retardos de acceso en algo más del 30%, debido a que las colisiones que se producen son mucho menores. Este parámetro de las colisiones es el que denota mayores diferencias entre ALOHA e ISMA. De todas formas es preciso decir que de nuevo en este caso la limitación de la máxima carga la impone el requisito de calidad, obteniéndose retardos aceptables con ALOHA, del orden de 200 mseg, que se reducen con ISMA en torno a un 30%.

- *Comparativa de ALOHA ranurado e ISMA en la transmisión de tráfico web (prueba 4)*

En la figura 5.14 se aprecian los niveles de potencia de ALOHA e ISMA con 2 y 16 códigos de acceso al canal para 4 escenarios de 10, 20, 100 y 500 usuarios de datos. La figura 5.15 muestra los porcentajes de colisiones de estos mismos escenarios, ampliando las curvas correspondientes a ALOHA con 16 códigos e ISMA con 2 y 16 códigos. En primer lugar se aprecia que dos códigos de acceso es insuficiente para ALOHA en escenarios con 100 y 500 usuarios de datos, dado el elevado nivel de potencia (no se cumple el requisito de calidad) generado debido al gran porcentaje de colisiones. En las curvas de colisiones se observa, en primer lugar, que a ISMA le basta con 2 códigos de acceso, aunque su comportamiento mejora con 16 códigos. Además cuanto mayor es la carga de usuarios, mayores son las diferencias entre ambos protocolos, por ejemplo para un escenario de 20 usuarios de datos

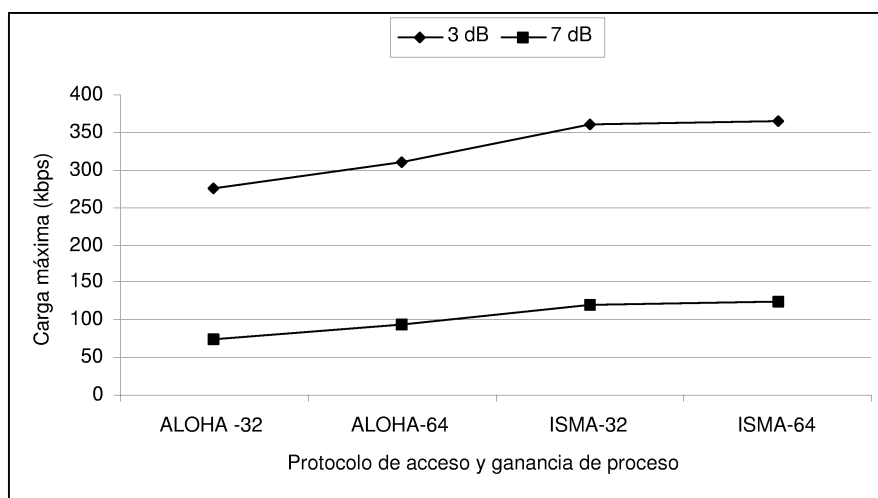


Figura 5.13: Cargas máximas para los protocolos ALOHA e ISMA variando el SIR de 3 a 7 dB (prueba 3). Observe que en el eje de abscisa se representan los protocolos de acceso con dos ganancias de proceso distintas, 32 y 64

Escenario	Retardo (ms)	Reintentos	Colisiones (%)
3 dB			
ALOHA-32	225	1.65	5.25
ISMA-32	130	1.1	0.65
ALOHA-64	250	1.95	11.8
ISMA-64	155	1.5	1.75
7 dB			
ALOHA-32	185	1.25	1.25
ISMA-32	136	1.01	0.03
ALOHA-64	218	1.55	3.75
ISMA-64	137	1.04	0.2

Tabla 5.6: Retardo, reintentos y colisiones para las cargas máximas de los protocolos ALOHA e ISMA con ganancias de proceso de 32 y 64

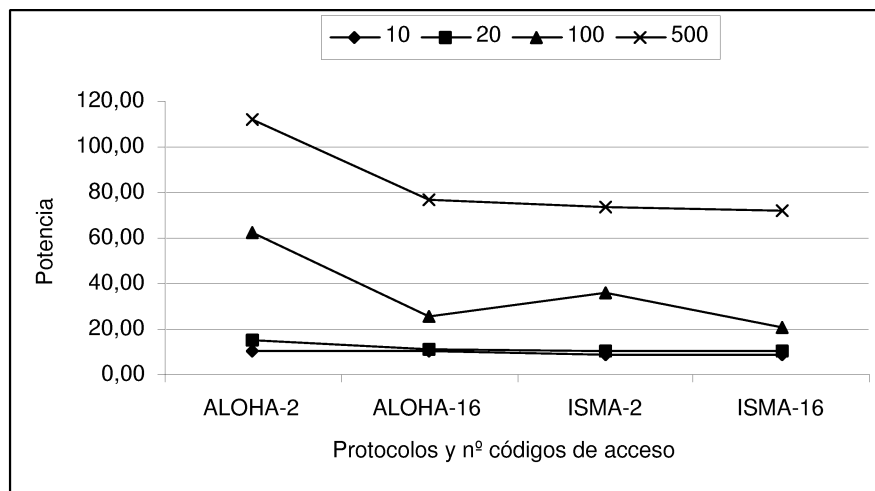


Figura 5.14: Nivel de potencia en un sistema homogéneo de datos web con los protocolos ISMA y ALOHA con 2 y 16 códigos de acceso al RACH (prueba 4). El número de usuarios de datos se ha variado de 10 a 500

las colisiones de ALOHA e ISMA son similares, 0.1 y 0 % respectivamente, en cambio para un escenario con 500 usuarios de voz, las colisiones en ISMA son 4 veces menores que con ALOHA 4, 4.2% de ALOHA frente 1% de ISMA. La conclusión de estas simulaciones es la recomendación de uso de ISMA en sistemas de alta carga o con recursos escasos. En cuanto al retardo, aunque no se presenta ninguna gráfica, se obtienen resultados similares a la prueba anterior, el protocolo ISMA ofrece mayores ventajas en situaciones de alta carga (500, 1000 usuarios) o de recursos escasos (2 códigos de acceso al RACH).

- *Efecto de la integración de servicios* (prueba 5)

La figura 5.16 muestra el retardo de acceso de las peticiones de canal dedicado del servicio de voz. Se aprecia que para 16 códigos de acceso, los retardos con los protocolos ALOHA e ISMA son similares siendo algo superior el de ALOHA, produciéndose un leve incremento en el retardo, del orden del 6%, con el incremento de usuarios de datos de 20 a 500. Pero cuando los códigos de acceso se reducen a 2, el incremento de los usuarios de datos ejerce una influencia mayor sobre el retardo, especialmente con el protocolo ALOHA que es más sensible a las colisiones. En el caso de ALOHA, cuando los usuarios de datos aumentan de 10 a 75, el retardo se incrementa en un 45% (de 62.5 a 90.62 msec), mientras que con ISMA el incremento es sólo del 25% (de 60 a 75 msec). Este retardo más elevado se traduce en un número más elevado de colisiones y por tanto en una mayor nivel de potencia como se muestra en la tabla 5.7. De todas formas se observa que en cuanto a la voz, los retardos de acceso para escenarios donde se supera el máximo nivel de potencia son admisibles, aún en el caso de 2 códigos de acceso, usando el protocolo ALOHA ranurado.

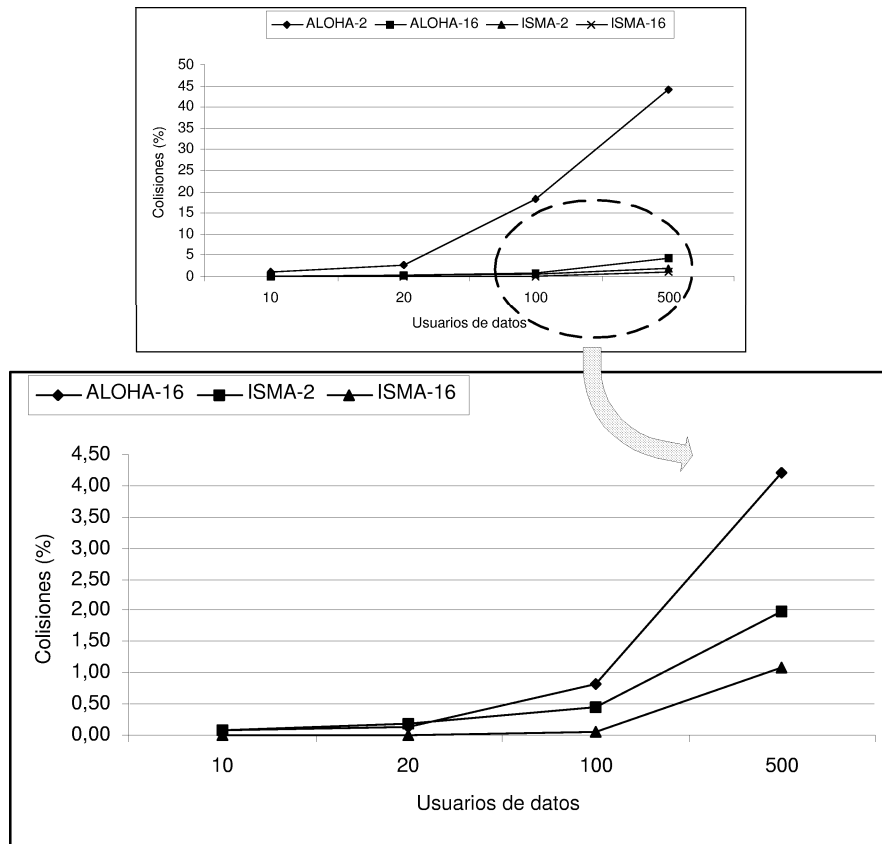


Figura 5.15: Porcentaje de colisiones en un sistema homogéneo de datos web con los protocolos ISMA y ALOHA con 2 y 16 códigos de acceso al RACH (prueba 4). El número de usuarios de datos se ha variado de 10 a 500

Escenarios			Niveles de potencia	
Códigos de acceso	Usuarios de voz	Usuarios de datos	ALOHA	ISMA
16	340	20	60.63	57.8
		100	72.87	67.9
		500	120	113.82
2	340	10	62.97	58.54
		20	65.1	61.96
		50	74.32	69
		75	98.43	86.38

Tabla 5.7: Niveles de potencia de los protocolos ALOHA e ISMA con 2 y 16 códigos de acceso

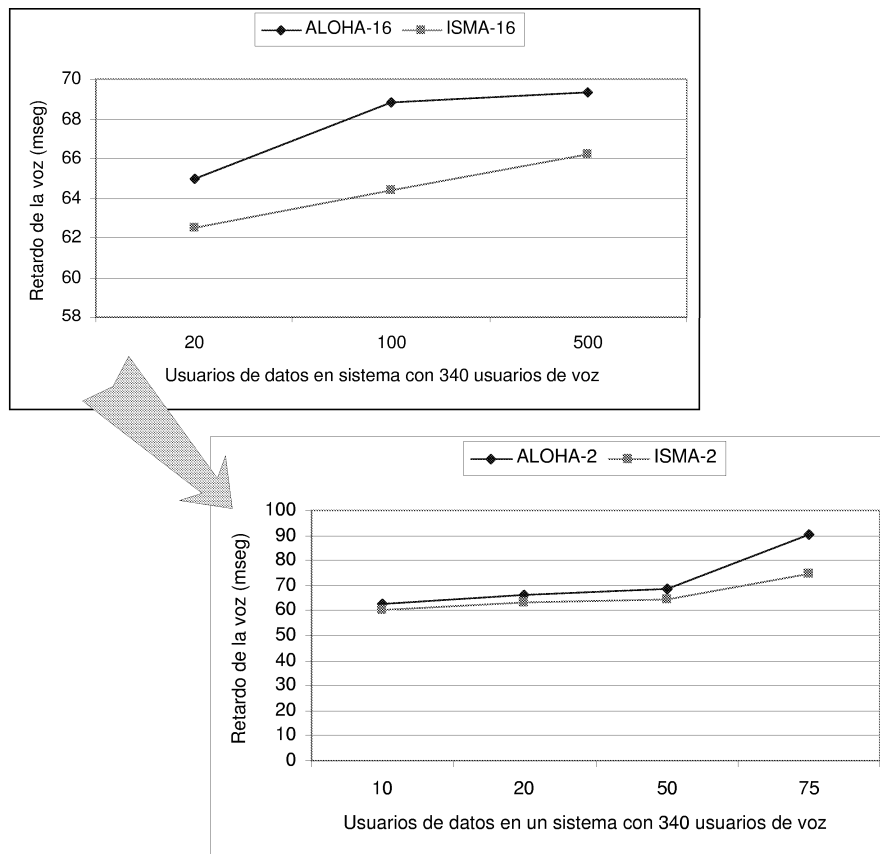


Figura 5.16: Retardo de acceso de las peticiones de voz en un sistema heterogéneo con los protocolos ALOHA e ISMA usando 2 y 16 códigos de acceso al RACH (prueba 5)

El retardo de las peticiones de datos se representa en la figura 5.17. En este caso existen mayores diferencias entre los protocolos ALOHA e ISMA, siendo el retardo en torno a un 13% menor para ISMA frente a ALOHA. Los usuarios de datos se ven más influenciados por el protocolo de acceso por el hecho de que acceden al canal común para enviar cada paquete o ráfaga de paquetes, mientras que los usuarios de voz sólo acceden al inicio de la llamada. El incremento de usuarios de datos tiene mayor influencia en este retardo de peticiones de datos que en el retardo de las peticiones de voz, más importante cuanto menor sea el número de códigos disponibles. Para el caso de 16 códigos de acceso al RACH, el incremento en el retardo al pasar de 20 a 500 usuarios de datos está en torno al 15% en ambos protocolos, en cambio con tan sólo 2 códigos se presenta el dato de que al pasar de 20 a 75 usuarios de datos, se ha obtenido un incremento del 16% en ALOHA y tan sólo un 4% en ISMA, que es menos sensible a las colisiones. Este efecto se aprecia también en la figura 5.18 donde se representan las colisiones.

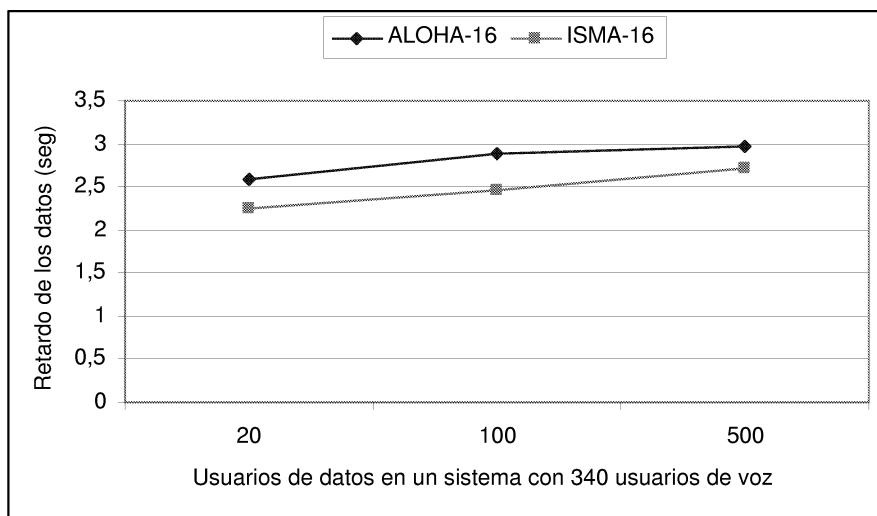


Figura 5.17: Retardo de acceso de las peticiones de datos en un sistema heterogéneo con los protocolos ALOHA e ISMA usando 16 códigos de acceso al RACH (prueba 5)

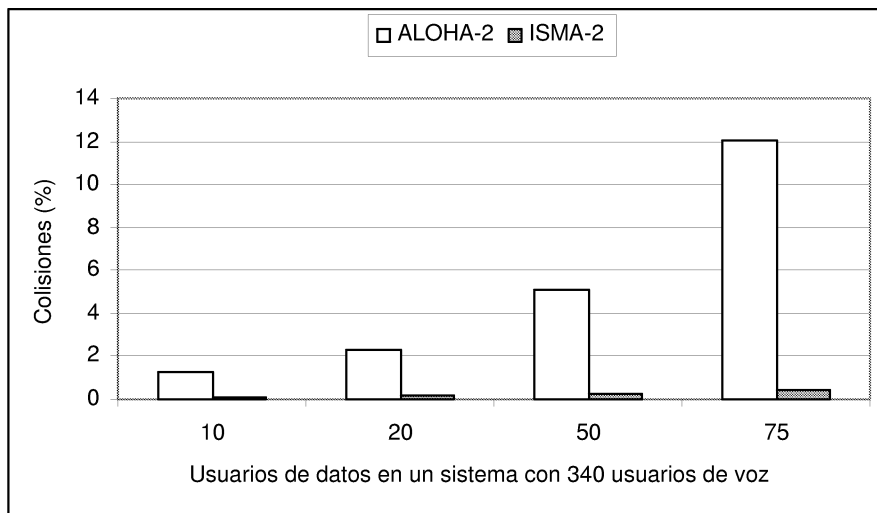


Figura 5.18: Porcentaje de colisiones en un sistema heterogéneo con los protocolos ALOHA e ISMA usando 2 códigos de acceso al RACH (prueba 5)

La diferencia en las colisiones entre ALOHA e ISMA es más acusada cuanto más cargado esté el escenario, es decir mayor número de usuarios de datos o menores recursos disponibles.

5.6.2 Control de acceso

- *Asignación de probabilidades de acceso* (prueba 6)

La tabla 5.8 muestra cómo el retardo de acceso de la voz sufre variaciones muy pequeñas al aumentar la carga de datos en el sistema. Esto es debido al sistema de gestión empleado que prioriza las peticiones de voz frente a las de datos. La asignación de probabilidades de acceso de los datos en función de la carga ocasiona un elevado retardo al aumentar la misma dado que son necesarios muchos reintentos. Los resultados obtenidos muestran un punto de congestión a partir del cual el retardo crece de forma brusca, esto es 60 usuarios de datos para un factor de actividad de 0.2, 20 para 0.5 y 10 para 0.8.

α_D	Usuarios de datos	Retardo de voz (mseg)	Retardo de datos (mseg)
0.2	15	58.25	69.75
	30	60.12	88.87
	60	62.43	203.75
	100	64	612.5
0.5	10	64.12	182.5
	15	64.62	325
	20	65	1050
	25	65.37	1875
0.8	2	64.25	87.75
	5	64.62	170
	10	65.12	1031
	15	65.93	2912

Tabla 5.8: Retardos de acceso en sistema integrado de voz (40 usuarios) y datos al variar el coeficiente de actividad de los datos (0.2, 0.5 y 0.8)

En cuanto a los niveles de potencia obtenidos en estos escenarios, se presentan dos medidas, un nivel de potencia medio (valor de potencia de la función distribución con probabilidad del 50%) y un nivel de potencia máximo (valor de potencia de la función distribución con probabilidad del 99%), con objeto de conocer la eficacia de este método para no superar la máxima capacidad. Las gráficas 5.19, 5.20 y 5.21 muestran estos niveles al variar el factor de actividad de los datos.

El valor de potencia máximo es un caso peor, que presenta mayores diferencias con el nivel

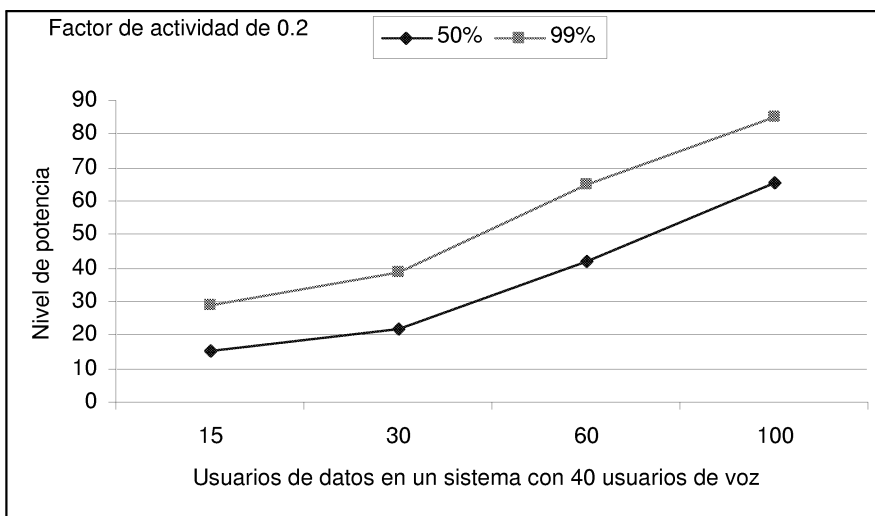


Figura 5.19: Nivel de potencia en un sistema con 40 usuarios de voz, al variar el n° de usuarios de datos con un factor de actividad de 0.2 (prueba 6)

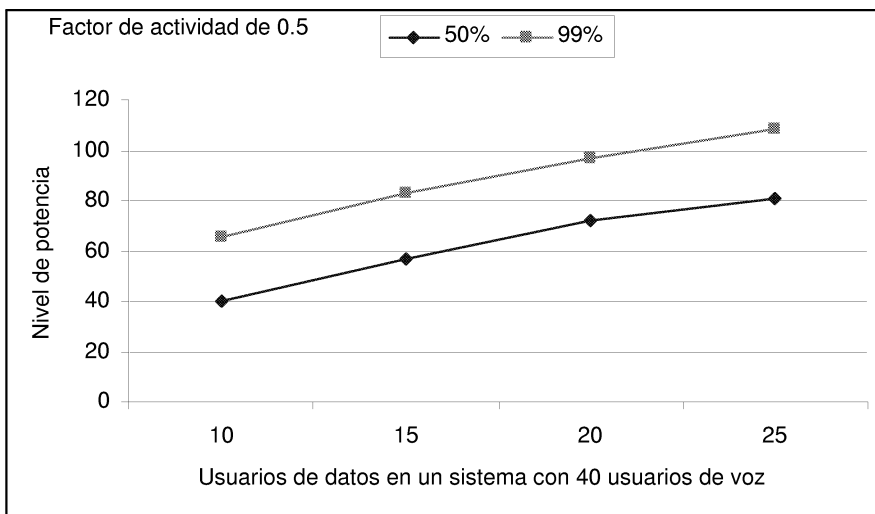


Figura 5.20: Nivel de potencia en un sistema con 40 usuarios de voz, al variar el n° de usuarios de datos con un factor de actividad de 0.5 (prueba 6)

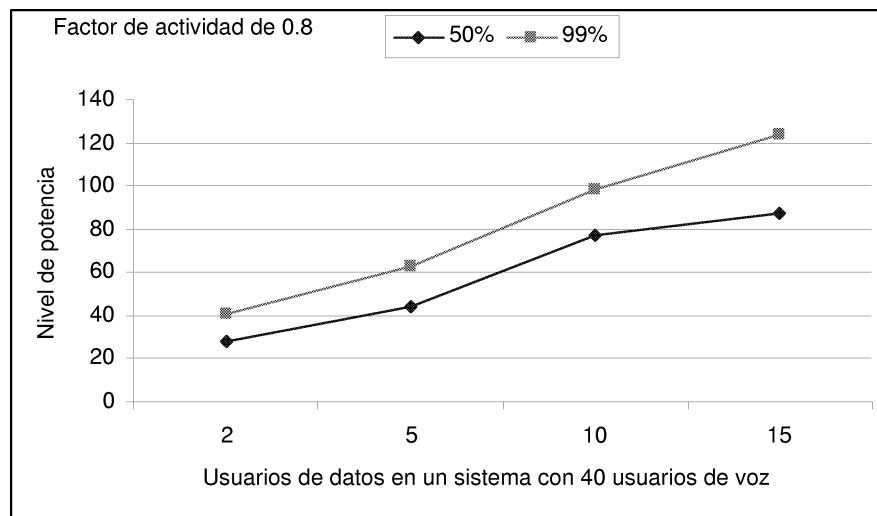


Figura 5.21: Nivel de potencia en un sistema con 40 usuarios de voz, al variar el n^o de usuarios de datos con un factor de actividad de 0.8 (prueba 6)

de potencia medio cuanto menor es el factor de actividad y el número de usuarios de datos. Por ejemplo para un factor de actividad de 0.2 y 15 usuarios de datos, el valor máximo es 1.88 veces mayor que el medio, mientras que para 100 usuarios de datos la relación es de 1.3. Es decir, las diferencias entre el valor medio de potencia y el valor máximo son más acusadas en los escenarios con menos carga. Si se comparan los niveles de potencia al aumentar el factor de actividad, se observa que por ejemplo para 15 usuarios de datos, los niveles de potencia al 50% y al 99% son 15.21 y 28.7 para un factor de actividad de 0.2, 57 y 83 para un factor de actividad de 0.5 y 87.1 y 124.2 para un factor de actividad de 0.8. Es decir al aumentar el factor de actividad se produce un aumento mayor en los niveles de probabilidad del 50% con respecto a los niveles del 99%, para los que el crecimiento en el nivel de potencia es similar al aumento del factor de actividad. Estos niveles de potencia superan la máxima capacidad en los porcentajes que se indican en la tabla 5.9. En esta tabla se aprecia la poca eficiencia de este método de asignación de probabilidades, que en escenarios de elevada carga no consigue limitar el nivel de potencia de forma adecuada, y además ocasiona retardos muy elevados. Este es el caso del escenario con factor de actividad de 0.5 y 15 usuarios de datos, en el que el nivel de potencia supera a la capacidad máxima en un 27%, lo que conlleva pérdidas en el sistema y además ocasiona un retardo de acceso de los datos de 325 milisegundos. Estos resultados justifican el uso de un control de acceso para ofrecer garantías de calidad.

- *Asignación de permisos de transmisión* (prueba 7)

El control de acceso implementado es muy simple, si bien reduce en mucho el porcentaje

α_D	Usuarios de datos	50%	99%
0.2	15	0	0
	30	0	0
	60	0	0
	100	1.07	30.9
0.5	10	0	0
	15	0	27.6
	20	10.9	48.4
	25	24.1	66.6
0.8	2	0	0
	5	0	0
	10	19	51.7
	15	34	83

Tabla 5.9: Porcentajes de superación de la capacidad máxima

de superación de la capacidad frente al anterior control de asignación de probabilidades de acceso, sobre todo en los escenarios de más alta carga (figura 5.22). En este caso siguen existiendo unos porcentajes de superación de la capacidad en los escenarios de mayor carga, debido a que el algoritmo de predicción de potencia implementado es muy simple y no resulta muy eficiente. En este caso en los escenarios de muy alta carga los retardos se disparan debido a que se restringe el acceso, lo que justifica la necesidad de uso de un planificador.

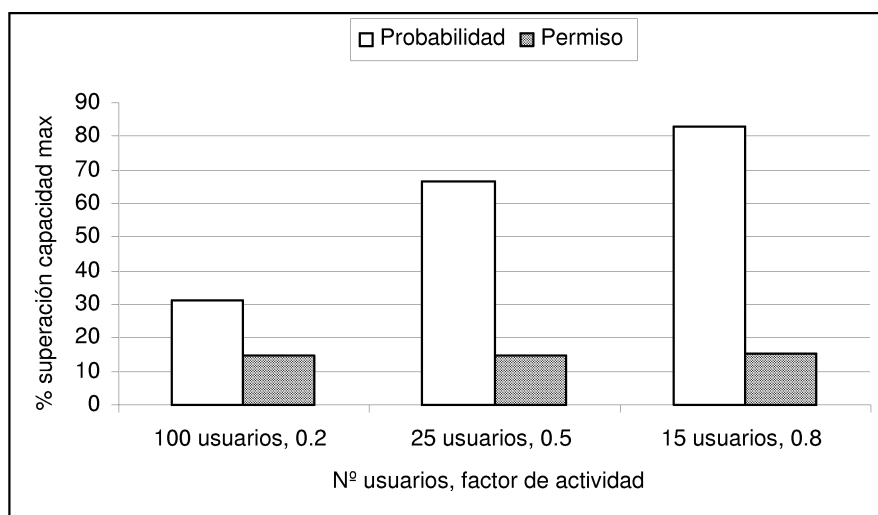


Figura 5.22: Porcentaje de superación de la capacidad máxima con asignación de probabilidades de acceso y asignación de permisos de transmisión (prueba 7)

5.7 Conclusiones

El análisis del acceso efectuado en este capítulo nos revela, en primer lugar, que la limitación más importante en un sistema CDMA de tercera generación es el umbral máximo de interferencias. La comparativa de los protocolos ALOHA ranurado del estándar UTRA e ISMA muestra una mejora en el retardo de éste último, más apreciable cuanto mayor sea la carga del sistema, debido a un mayor número de usuarios o a una disponibilidad menor de recursos de acceso. Si bien se ha mostrado que en los escenarios analizados y con los diversos requisitos de calidad establecidos, la simplicidad del protocolo ALOHA ranurado es una buena razón para la elección del mismo, dado que para la máxima interferencia permitida, los retardos medidos son admisibles. El estudio del sistema integrado con dos servicios tan distintos como la voz y el servicio de datos *web* constata el hecho de que los usuarios de datos se ven más influenciados por el protocolo de acceso dado que acceden al canal común para enviar cada paquete o ráfaga de paquetes, mientras que los usuarios de voz sólo acceden al inicio de la llamada [?], [?]. La importancia del umbral de interferencias, más restrictivo que el retardo de acceso, nos lleva a la necesidad de implementar controles que limiten el acceso de los usuarios al sistema para ofrecer garantías de QoS. En este caso, se ha analizado un control simple basado en la asignación de probabilidades de acceso decrecientes a medida que aumenta la carga del sistema. Se ha considerado un sistema de gestión que prioriza las peticiones de voz, por su característica de servicio en tiempo real frente a los datos. Los resultados obtenidos revelan que este método no es muy eficiente, dado que la capacidad se supera bastante cuando aumenta la carga y además se aumentan mucho los retardos de acceso. Este análisis justifica la necesidad de un control de admisión que asigne permisos de transmisión en un sistema orientado a garantizar requisitos de QoS distintos para diversas clases. Además este estudio muestra la necesidad de un planificador o *scheduler*, es decir un manejador del tráfico, que evite retardos muy elevados para los diversos tipos de tráfico.

Capítulo 6

Controles de admisión y gestión en sistemas CDMA

6.1 Introducción

En un sistema CDMA el número de usuarios simultáneos ocupando una estación base debe ser limitado para que se garantice un nivel apropiado de QoS. Por este motivo el control de admisión juega un papel fundamental en los sistemas CDMA. La diversidad de servicios de los sistemas 3G obliga a pensar en el uso de técnicas de admisión dinámicas que sean capaces de adaptarse a las fluctuaciones de la interferencia de estos sistemas. Además es necesario emplear técnicas de gestión de recursos junto al CAC para maximizar la capacidad. En este capítulo se analizan estos dos controles de acceso, el CAC junto con el gestor de recursos.

6.2 Fundamentos

En este capítulo se analiza la necesidad de estrategias de control de acceso de los usuarios al sistema UTRA para ofrecer garantías de QoS (capítulo 3). Entre estas estrategias se encuentran el control de admisión y el gestor de recursos, también llamado disciplina de servicio o algoritmo de ordenación de las transmisiones, con estrechas relaciones entre ambos. Esta interrelación se muestra en la figura 6.1, donde se aprecia que, dada la limitación de interferencias propia de los sistemas CDMA, el control de acceso necesita información no sólo del nivel de interferencia en la celda de referencia, sino también en las celdas vecinas. Pero además en esta redes radio surge una problemática específica debida al canal radio y a la movilidad de los usuarios. Las características del canal radio implican una baja disponibilidad de recursos, menor que en el caso de las redes con cable, y además en la reserva de recursos es necesario tener en cuenta que los usuarios poseen movilidad y puede haber traspaso entre estaciones base (*handover*). Por este motivo es necesario plantearse la reserva de recursos dentro de una estación base para los posibles traspasos. En [?] se presenta un resumen de las estrategias más frecuentes de reserva

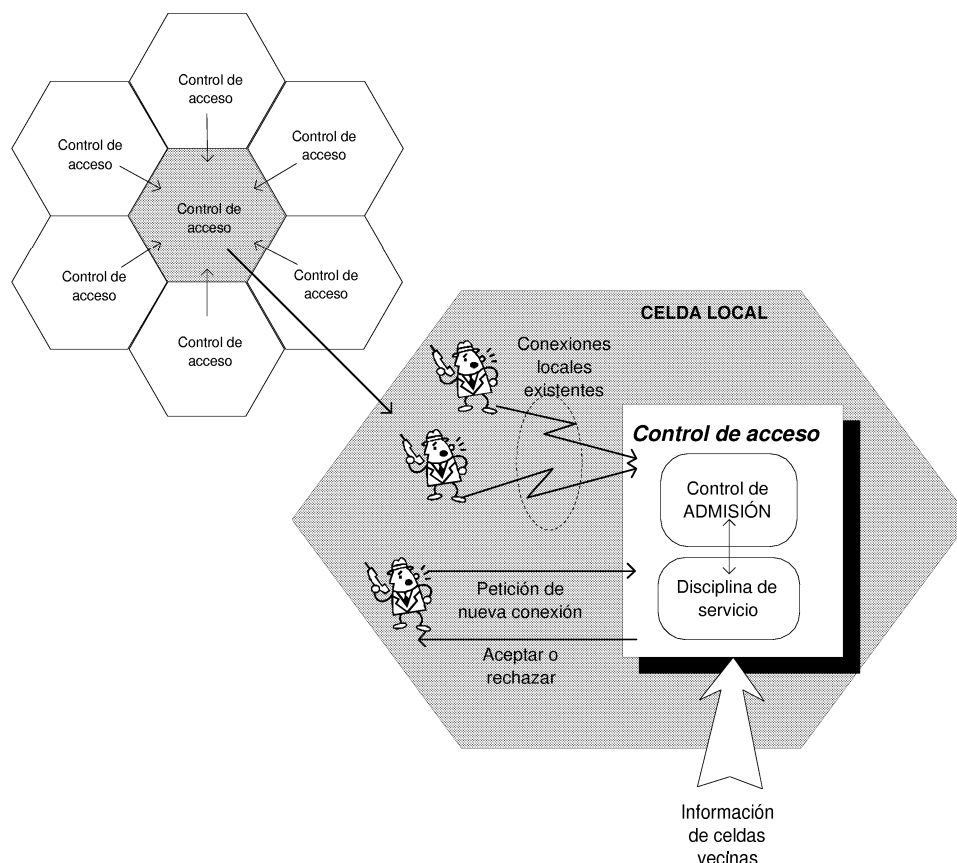


Figura 6.1: Control de admisión y disciplina de servicio en UTRA

para *handover*.

En lo que se refiere a disciplinas de servicio es importante indicar sus características más deseables, como son:

- **Eficiencia.** Una disciplina eficiente conseguirá una elevada utilización de la red.
- **Protección.** Es esencial que la disciplina cumpla los requisitos de los paquetes con garantías de QoS, aún en presencia de usuarios que no se ajusten a sus patrones de tráfico y fluctuaciones de la carga de la red.
- **Flexibilidad.** Dada la diversidad de características de tráfico y requisitos de las aplicaciones existentes, y la incertidumbre acerca de las futuras aplicaciones, la disciplina de servicio debe ser flexible para proporcionar distintos retardos, anchos de banda y tasas de pérdidas a las distintas conexiones de servicios con garantías de QoS.
- **Simplicidad.** La simplicidad de la disciplina es importante para conseguir implementaciones de alta velocidad.

Las disciplinas de servicio se clasifican en dos tipos, *conservativas*, en las que los paquetes se envían tan pronto como sea posible, y *no conservativas*, caracterizadas porque a cada paquete se le asigna, explícita o implícitamente, un tiempo en el que se transmitirá. A continuación se describen diversos ejemplos de ambos tipos de disciplina, [?].

- *Disciplinas conservativas:*

FIFO (First-In-First-Out). Los paquetes se sirven en el orden de llegada.

VC (Virtual Clock). Esta disciplina emula la multiplexación por división en el tiempo, de modo que a cada paquete se le asigna un tiempo de transmisión virtual.

WFQ (Weighted Fair Queueing). Estas disciplinas sirven los paquetes de las colas no vacías a distintas velocidades según el tipo de tráfico.

EDD (Earliest Due Date) o EDF (Earliest Deadline First). Esta disciplina minimiza el máximo retardo de los paquetes. Cuando un paquete llega se le asigna un tiempo de vencimiento (*due date*), que se calcula sumando al tiempo de llegada la tolerancia al retardo del paquete. Con estos tiempos de vencimiento se ordenan los paquetes.

CBQ (Class Based Queuing). Esta disciplina se basa en una distribución jerárquica del ancho de banda basada en clases, [?]. Este algoritmo, como se indica en [?] necesita un clasificador, que clasifica los paquetes en un conjunto de clases predefinidas, un estimador, que estima la necesidad de uso de ancho de banda de cada clase y un gestor de paquetes, que selecciona el siguiente paquete a enviar.

- *Disciplinas no conservativas:*

Entre las disciplinas no conservativas se pueden mencionar *Jitter EDD*, *Stop and Go*, *HRR (Hierarchical Round Robin)* y *RCSP (Rate Controlled Static Priority)*, que asignan los instantes de transmisión de los paquetes en función de parámetros como el máximo *jitter* permitido o los patrones de tráfico de las distintas conexiones.

6.3 Investigación relacionada

El control de admisión juega un papel muy importante en un sistema CDMA, porque es el encargado de mantener el nivel de interferencias o número de usuarios activos por debajo de un umbral máximo para ofrecer garantías a todos los servicios. Este control se debe diseñar para garantizar tanto el grado de servicio (GoS) como la calidad de servicio (QoS). Una medida de este grado de servicio es la tasa de bloqueo. El bloqueo ocurre cuando a un nuevo usuario se le deniega el acceso al sistema. La probabilidad de pérdidas y el retardo son ejemplos de parámetros de QoS. Aunque la problemática sobre el control que se presenta es aplicable en ambas direcciones, en este caso nos centraremos en el enlace ascendente. Los dos principales problemas de diseño de un control de admisión en sistemas CDMA son:

- Establecer un umbral de admisión efectivo para garantizar el GoS y la QoS.
- Estimar la máxima capacidad de la celda

El estudio de capacidad es, por tanto, la base necesaria para la implementación de controles de admisión en UTRA. Muchos de los artículos orientados hacia el estudio de técnicas de admisión simplifican el análisis de la capacidad usando el factor f para modelar la interferencia intercelda, como es el caso de [?] y [?]. Otros como [?] utilizan el factor f de un determinado entorno de propagación para ajustar la media y la varianza de la distribución gamma con la que se modela la interferencia intercelda. En este artículo el problema es que no se propone ningún método para adaptar estos parámetros estadísticos si se producen cambios en el entorno de propagación. El empleo del factor f en estos análisis de controles de admisión es optimista porque no considera las variaciones del nivel de interferencia intercelda, lo que parece implicar una gran bondad en los límites de capacidad.

Las diversas alternativas de CAC se pueden clasificar en dos clases, tal como propone [?], según la manera de establecer el umbral de admisión para alcanzar los objetivos anteriores:

- Tipo 1: Basadas en el número de usuarios
- Tipo 2: Basadas en el nivel de interferencias

En el citado artículo, [?], se efectúa una comparativa de estos dos tipos de técnicas de CAC, que nos permite entender cómo se reflejan las diferencias entre ambos tipos en el estudio analítico, que es bastante complejo aún tratándose de un sistema sólo voz. Pero es el segundo tipo de estrategias, basadas en la estimación de la interferencia, el más usado en sistemas CDMA donde la principal limitación la constituye el nivel de interferencias. Los primeros trabajos como [?] y [?] definen los conceptos fundamentales de estas técnicas y proponen diversas formas de estimar el nivel de interferencias, que no es estático, sino que fluctúa, lo que lleva a pensar en el uso de algoritmos adaptativos. Las estrategias adaptativas ya se usaron en los tradicionales sistemas homogéneos de voz. En [?] se presentan las dificultades de uso de una técnica adaptativa en un sistema homogéneo de voz, en la que el umbral de admisión se debe actualizar dinámicamente en cada celda de acuerdo a ciertas medidas realizadas en la estación base. Además este estudio se menciona porque la técnica propuesta se basa en un parámetro tan ampliamente usado como el SIR, y define el concepto de capacidad residual, que es el número de llamadas que la estación base puede aceptar para mantener los parámetros de QoS por debajo de cierto umbral. Las conclusiones del estudio reafirman la idoneidad de los controles dinámicos, sobre todo en situaciones de muy alta carga. Por este motivo, el uso de técnicas adaptativas se ha extendido hacia los nuevos sistemas integrados de voz y datos. En [?] se propone una estructura muy significativa para analizar la forma de implementación de estas técnicas. La clave de la misma es un gestor

de ancho de banda encargado de decidir si se acepta una nueva llamada mediante el análisis de 3 flujos de información: los parámetros de tráfico, las características del canal y la información de las celdas vecinas relativa tanto al tráfico como al estado del canal. Una dificultad patente en esta estructura es la variedad de flujos de información distintos que es necesario considerar. Otra técnica adaptativa muy interesante es la que se presenta en [?], que se basa en medidas de la carga y el nivel de interferencias para efectuar una asignación dinámica de recursos. Este estudio sólo considera una clase de servicio y emplea un algoritmo adaptativo de asignación de tasas de transmisión. Sería interesante analizar su aplicación en un sistema multiservicio, empleando algoritmos de gestión de recursos más simples.

Existen un conjunto de publicaciones posteriores que proponen técnicas de admisión basadas en el denominado *ancho de banda equivalente*. En [?] se introduce este concepto con objeto de que el análisis de un sistema limitado en interferencias resulte similar al de un sistema limitado en ancho de banda. El ancho de banda equivalente se define como el producto de la tasa por el SIR. Además en este artículo se introduce el factor de la predicción del tráfico para establecer umbrales dinámicos. Para analizar la influencia de esta predicción, se comparan dos controles de admisión, el primero de ellos no predictivo, cuya condición de admisión es que el ancho de banda equivalente consumido por los usuarios locales debe ser menor que el total, tanto en la celda local como en las vecinas, y el segundo de tipo predictivo, que trata de predecir las variación del tráfico durante el tiempo de establecimiento de la llamada. En trabajos tan actuales como [?] se continúa usando este concepto de ancho de banda equivalente para el estudio de un sistema CDMA multiservicio. De los resultados de este estudio merece destacar que, la particular forma de la región de admisión obtenida, resulta muy familiar con el estudio de redes de conmutación de circuitos. En el fondo estas técnicas de ancho de banda equivalente son similares a las basadas en el nivel de interferencias, es decir el ancho de banda equivalente es una medida de la potencia o interferencia generada por cada usuario en función de su tasa y su requisito de calidad (SIR).

Si bien es cierto que toda esta investigación relativa a controles de admisión es muy importante para ofrecer garantías de calidad, es de destacar el hecho que, para controlar de forma eficiente el acceso de los usuarios, es necesario un control de gestión de recursos junto con el CAC. Un buen ejemplo del funcionamiento combinado de estos controles es el estudio realizado en [?], donde se estudia un sistema integrado por voz y datos. En este caso, y debido a las restricciones de retardo del servicio en tiempo real de voz, los usuarios de voz transmiten sus paquetes sin mayor retardo una vez que son admitidos en el sistema por el control de admisión. El tráfico de datos en cambio es regulado tanto a nivel de llamada (control de admisión) como a nivel de ráfaga (disciplina de servicio). En este trabajo se establecen con claridad los objetivos de ambos controles cuando se aplican al tráfico de datos. El control de admisión se aplica, a pesar de ser un servicio tolerante al retardo, para garantizar que los retardos no sean demasiado grandes, y

el gestor de recursos asegura que la tasa de pérdidas de la voz sea menor que cierto umbral de calidad. Es necesario destacar que no existen muchos estudios que analicen el uso combinado de técnicas de admisión y gestión de recursos en el futuro sistema UTRA multiservicio. Algunos de los más actuales como [?] estudia sólo técnicas de gestión de recursos adaptativas para adaptar las potencias de transmisión dinámicamente según las variaciones de tráfico.

Otro aspecto que se muestra en [?] es la complejidad del estudio analítico de prestaciones del sistema integrado (cadenas de Markov). Por este motivo en muchos casos cuando el problema resulta muy complejo se opta por efectuar simulaciones. Este es el caso de [?], [?] y [?] donde se analizan controles adaptativos mediante simulación. En estos trabajos se opta por técnicas adaptativas, que necesitarían de un complejo estudio analítico, por lo que son especialmente indicadas para estudios por simulación. En [?] el CAC propuesto se basa en una reserva de ancho de banda adaptativa tanto en la celda local como en las vecinas para proporcionar garantías de QoS al tráfico multimedia. La cantidad de ancho de banda reservado se ajusta dinámicamente según las condiciones de la red. En [?] y [?] se establece un umbral adaptativo de asignación de tasas de bits, según la carga y el nivel de interferencias en la celda local y las celdas vecinas.

Las publicaciones más recientes continúan abordando el problema de la adaptación dinámica de umbrales de admisión mediante medidas periódicas de diversos flujos de información. En [?] se presenta un análisis numérico de un método adaptativo para acomodar tasas de datos variables. Su principal característica es que es distribuido, es decir, se puede implementar en cada móvil sin interacción con los demás, y está basado en el control de la potencia de los usuarios. En [?] también se aboga por un método dinámico basado en la variabilidad de la capacidad del enlace radio. Por este motivo, los canales se asignan adaptativamente según la variación dinámica de capacidad del canal. En [?] se presenta un control basado en la definición de un vector de asignación de potencias óptimo para ofrecer garantías de QoS. Un análisis numérico examina las prestaciones del control.

Dada la problemática vigente en la actualidad sobre la elección de umbrales de admisión adecuados en sistemas multiservicio, nuestro estudio se orienta hacia estos aspectos. Este análisis se centra en un sistema UTRA multiservicio para el cual se van a evaluar controles de admisión tanto fijos como adaptativos; éstos últimos se adaptan mejor a las fluctuaciones de la interferencia características de un sistema integrado como éste, con el inconveniente de una mayor complejidad. Para efectuar este estudio de CAC nos hemos basado en el cálculo realizado previamente de las limitaciones de capacidad de UTRA. Pero además y para evaluar un control de acceso completo se estudian mecanismos de gestión de recursos. Se proponen dos estrategias de gestión, la primera de ellas basada en el parámetro de QoS del retardo y la segunda de tipo dinámica, basada en ajustar la tasa de transmisión de los usuarios según la carga del sistema.

6.4 Estudio de controles de admisión no adaptativos

En esta sección se realiza un análisis de dos tipos de técnicas de admisión, basadas en el número de usuarios y basadas en el nivel de interferencias. Los umbrales de admisión se establecen de forma estática, es decir, no se adaptan a las variaciones del entorno. En este caso el objetivo es comparar el comportamiento de ambas en un sistema UTRA para distintos flujos de tráfico. Por este motivo se pueden emplear modelos de tráfico sencillos dado que el interés se centra en evaluar el efecto tanto de la intensidad de tráfico como de la integración de flujos distintos, lo que implica que no es necesario un modelo muy riguroso del sistema. Por consiguiente se ha recurrido al uso de técnicas analíticas para evaluar la dificultad de establecer umbrales de admisión con los dos tipos de CAC. Es de destacar el hecho de que la complejidad matemática aumenta cuando se integran diversos servicios en el sistema.

6.4.1 Modelo de sistema

Este estudio se orienta hacia tres tipos de sistemas, un sistema tradicional que cuente sólo con usuarios de voz de baja tasa, un sistema que cuente sólo con usuarios de datos de alta tasa y un sistema integrado de voz y datos. Se analizan el parámetro de GoS de probabilidad de bloqueo y el parámetro de QoS de probabilidad de pérdidas. Los modelos de los servicios de voz y datos tienen las siguientes características:

- Las llamadas son aleatorias (λ es la tasa de llamadas por segundo y $\frac{1}{\mu}$ es la tasa de servicio) y el tráfico ofrecido se mide en Erlangs como $a = \lambda/\mu$.
- Se emplea un mecanismo de detección de la actividad de los usuarios. Un usuario está activo con una probabilidad α (factor de actividad), independientemente del resto de usuarios.
- Todos los usuarios de una misma clase de servicio requieren la misma tasa de bits y el mismo SIR.
- Usan la transmisión en modo circuito debido a que son servicios en tiempo real con fuertes limitaciones de retardo.
- La principal diferencia entre ambos servicios, es la mayor tasa de bits del servicio de datos, lo que implica una ganancia de proceso menor.

Se considera control de potencia perfecto y la interferencia intercelda se modela mediante la distribución gaussiana (en el capítulo 4 se demostró la similitud de las distribuciones gaussiana y gamma). Se analizan dos controles de admisión distintos:

- Basado en el número de usuarios: umbral de admisión N .

Una nueva llamada es bloqueada si ya existen N usuarios ocupando una estación base.

- Basado en el nivel de interferencias: umbral de admisión B .

B indica el número equivalente de usuarios que darían lugar al máximo nivel de interferencias permitido. Una nueva llamada es bloqueada si el nivel de interferencia observado excede el umbral máximo.

6.4.2 Análisis numérico

En este apartado se presentan las expresiones de los parámetros tasa de bloqueo y probabilidad de pérdidas de los dos tipos de controles de admisión estudiados. El estudio está basado en [?] que considera un sistema sólo voz, pero en este caso se extienden las expresiones para un sistema integrado, analizando la problemática de establecer umbrales en estos sistemas multiservicio.

CAC tipo 1: Control de admisión basado en el número de usuarios

Este análisis se presenta en primer lugar para un sistema homogéneo extendiéndose en el caso de un sistema integrado de voz y datos.

- Sistema homogéneo

En este sistema el criterio de admisión es: $n \leq N$, donde n es el número de usuarios presentes en el sistema y N el umbral de admisión.

1) *Probabilidad de bloqueo p_b* : basta con usar la fórmula de ErlangB, considerando que el número de servidores es el umbral de admisión N .

$$p_b = \frac{\frac{a^N}{N!}}{\sum_{i=0}^N \frac{a^i}{i!}} \quad (6.1)$$

2) *Probabilidad de pérdidas p_p* . Este parámetro se define como la probabilidad de que no se obtenga el nivel de calidad requerido, es decir la probabilidad de que el número de usuarios activos supere la capacidad máxima c_{max} para ese nivel de calidad. La estimación de la capacidad se ha efectuado según el método descrito en el capítulo 4. Para calcular este parámetro es necesario calcular la probabilidad de i usuarios activos p_i :

$$p_i = \sum_{j=i}^N b(i; j, \alpha) \frac{\frac{a^j}{j!}}{\sum_{k=0}^N \frac{a^k}{k!}} \quad (6.2)$$

siendo $b(i; j, \alpha)$ una distribución binomial, que indica la probabilidad de i usuarios activos de j usuarios existentes y α el factor de actividad.

La probabilidad de pérdidas p_p se calcula como el cociente de las veces que no se satisface el nivel de comunicación, es decir se supera la capacidad máxima c_{max} , entre el número total de transmisiones.

$$p_p = \frac{\sum_{i=0}^N i \cdot p_i \cdot \int_{c_{max}-i}^{\infty} f(x) \cdot dx}{\sum_{i=0}^N i \cdot p_i} \quad (6.3)$$

donde $f(x)$ es la función densidad de probabilidad gaussiana con que se modela la interferencia intercelda. La diferencia fundamental en el cálculo de estos parámetros en los sistemas de voz y datos reside en los mayores requerimientos de tasa de bits y calidad de los datos.

- Sistema heterogéneo

En este sistema el umbral de admisión es la suma de los usuarios de voz y datos, pero con el matiz de que dadas las diferentes características de ambos servicios, las potencias de transmisión son distintas (capítulo 4). Por este motivo el criterio de admisión es: $n_v + \kappa \cdot n_d \leq N$, donde n_v y n_d son los usuarios de voz y datos respectivamente y κ es la relación entre los parámetros característicos tasa y energía de bit/densidad de ruido de ambos servicios. Los objetivos en este sistema son analizar, para un determinado umbral de admisión N , cómo varía la probabilidad de bloqueo y la tasa de pérdidas de: 1) la voz, al variar el nº de usuarios de datos en el sistema y 2) los datos, al variar el nº de usuarios de voz. En este sistema integrado se ha supuesto que en el resto de celdas sólo hay usuarios de voz (tabla 6.1).

Sistema integrado: Umbral N	
Carga de voz: a_v	Carga de datos: a_d
Nº de usuarios de datos variable: n_d de 0 a $\frac{N}{\kappa}$	Nº de usuarios de voz variable: n_v de 0 a N
Umbral de voz: $N_v = N - \kappa \cdot n_d$	Umbral de datos: $N_d = \frac{N - n_v}{\kappa}$
$p_{b,voz} = \frac{\frac{a_v^{N_v}}{N_v!}}{\sum_{i=0}^{N_v} \frac{a_v^i}{i!}}$ $p_{p,voz} = \frac{\sum_{i=0}^{N_v} i \cdot p_i \cdot \int_{c_{max}-n_d \cdot \kappa - i}^{\infty} f(x) \cdot dx}{\sum_{i=0}^{N_v} i \cdot p_i}$	$p_{b,datos} = \frac{\frac{a_d^{N_d}}{N_d!}}{\sum_{i=0}^{N_d} \frac{a_d^i}{i!}}$ $p_{p,datos} = \frac{\sum_{i=0}^{N_d} i \cdot p_i \cdot \int_{c_{max}-n_v - i \cdot \kappa}^{\infty} f(x) \cdot dx}{\sum_{i=0}^{N_d} i \cdot p_i}$

Tabla 6.1: Probabilidad de bloqueo y pérdidas en un sistema integrado usando un CAC basado en el número de usuarios al variar los usuarios de voz y datos

En este estudio el modelado gaussiano de la interferencia intercelda se realiza empleando la herramienta analítica descrita en el capítulo 4, adaptando los parámetros estadísticos media y varianza a las características de los servicios y del medio de propagación, mientras que en [?] los valores de estos parámetros se estiman mediante unos coeficientes f de interferencia intercelda.

CAC tipo 2: Control de admisión basado en el nivel de interferencias

El análisis de los parámetros de GoS y QoS es más complejo en este caso que en el anterior porque el número de usuarios en el sistema no está limitado, sino que el límite se impone sobre el nivel de interferencias. Por este motivo el criterio de admisión es más complicado porque se basa en estimar si la interferencia existente más la interferencia del nuevo usuario supera el máximo umbral de interferencias B .

- Sistema homogéneo

1) *Probabilidad de bloqueo*. Son necesarios los siguientes cálculos:

a) Resolviendo las ecuaciones del diagrama de estados del número de usuarios en el sistema, ([?]), se obtiene la probabilidad de que existan r usuarios conectados: $p_{r,conec}$

$$p_{r,conec} = \frac{\frac{a^r}{r!} \cdot \prod_{j=0}^{r-1} p(j)}{1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a^j}{j!} \cdot \prod_{i=0}^{j-1} p(i)} \quad (6.4)$$

b) $p(j)$ es la probabilidad de que una nueva llamada sea aceptada si existen j usuarios: $p(j) = 1 - p_b(j)$. La probabilidad de bloqueo $p_b(j)$ si existen j usuarios es la probabilidad de que la interferencia de un nuevo usuario, que consiste en la interferencia de la misma celda y la de otras celdas, haga que la potencia interferente total en la estación base supere el umbral B .

$$p_b(j) = 1 - p(j) = \sum_{i=0}^j b(i; j, \alpha) \cdot \int_{B-i}^{\infty} f(x) \cdot dx \quad (6.5)$$

La probabilidad de bloqueo se obtiene como la suma de todos los posibles estados con j usuarios:

$$p_b = \sum_{j=0}^{\infty} p_{j,conec} \cdot (1 - p(j)) \quad (6.6)$$

2) *Probabilidad de pérdidas*. Es necesario calcular en primer lugar la probabilidad de que existan i usuarios activos, p_i .

$$p_i = \sum_{j=i}^{\infty} p_{j,conec} \cdot b(i; j, \alpha) \quad (6.7)$$

La probabilidad de pérdidas es el cociente de aquellos que no cumplen el nivel de calidad requerido (se supera la capacidad máxima c_{max}) frente al total:

$$p_p = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p_i \cdot \int_{c_{max}-i}^{\infty} f(x) \cdot dx}{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p_i} \quad (6.8)$$

La diferencia de este control respecto al control anterior basado en el número de usuarios, es que el sumatorio es hasta infinito, dado que el número de usuarios no está limitado, lo que está limitada es la interferencia.

- Sistema heterogéneo

En el sistema integrado, el interés se centra en, para un umbral de admisión B analizar cómo varía la probabilidad de bloqueo y las pérdidas de: 1) la voz, al variar el número de usuarios de datos en el sistema y 2) los datos, al variar el número de usuarios de voz en el sistema (tabla 6.2).

6.4.3 Entornos analizados

En este caso se analizan los entornos homogéneos y heterogéneos indicados en la tabla 6.3.

6.4.4 Resultados

- *Variación del umbral de admisión en el CAC tipo 1 (prueba 1)*

La figura 6.2 muestra cómo se estabiliza la probabilidad de pérdidas del sistema homogéneo para cada carga de tráfico a cuando se incrementa el umbral de admisión, respecto a la capacidad máxima. En cambio en la figura 6.3 se aprecia la disminución en la probabilidad de bloqueo a medida que aumenta el umbral de admisión. Así por ejemplo para $a = 60$ E, se observa que para umbrales de admisión mayores que 1.4 veces la capacidad máxima c_{max} , la probabilidad de pérdidas se estabiliza en un 10^{-2} , de forma que la elección de umbral se puede realizar según la tasa de bloqueo deseada, por ejemplo si queremos una tasa menor que 10^{-4} bastaría con tomar un umbral mayor que 1.4 veces la capacidad máxima.

El uso combinando de estas dos gráficas permite la elección de umbrales de admisión que cumplan tanto los requisitos de GoS (bloqueo) como de QoS (pérdidas), [?].

- *Variación del umbral de admisión en el CAC tipo 2 (prueba 2)*

En las figuras 6.4 y 6.5 se aprecia que las curvas de probabilidad de pérdidas y probabilidad de bloqueo tienen un aspecto similar a las correspondientes al CAC tipo 1 cuando varía el umbral de admisión. Las diferencias entre los controles de tipo 1 y 2 radican en la forma de establecer el umbral. Tomando como ejemplo una relación umbral/ c_{max} de 1, en el caso del CAC tipo 1 esto significa que el máximo número de usuarios permitidos en el sistema es igual a la capacidad máxima, pero estos usuarios pueden estar o no activos, con lo que no se está aprovechando toda la capacidad del sistema. En el caso del CAC tipo 2 este umbral significa que se van a admitir usuarios hasta que el nivel de interferencias sea

Sistema integrado: Umbral B	
Carga de voz: a_v	Carga de datos: a_d
Nº de usuarios de datos variable: n_d	Nº de usuarios de voz variable: n_v
Umbral de voz: $B_v = B - \kappa \cdot n_d$	Umbral de datos: $B_d = \frac{B - n_v}{\kappa}$
$p(j)_v = 1 - \sum_{i=0}^j b(i; j, \alpha) \cdot \int_{B_v - \kappa \cdot n_d - i}^{\infty} f(x) dx$	$p(j)_d = 1 - \sum_{i=0}^j b(i; j, \alpha) \cdot \int_{B_d - n_v - \kappa \cdot i}^{\infty} f(x) dx$
$p_{p,v} = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p_i \cdot \int_{c_{max} - n_d \cdot \kappa - i}^{\infty} f(x) \cdot dx}{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p_i}$	$p_{p,d} = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p_i \cdot \int_{c_{max} - n_v - i \cdot \kappa}^{\infty} f(x) \cdot dx}{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p_i}$

Tabla 6.2: Probabilidad de bloqueo y pérdidas en un sistema integrado usando un CAC basado en el nivel de interferencias al variar los usuarios de voz y datos

Entorno	Servicios	Características	Tráfico	CAC	Prueba
Sistema homogéneo	Voz	G=128, $\gamma=3$ dB, $\alpha=0.4$	60:100 E	Tipo 1	P1
				Tipo 2	P2
	Datos	G=128, $\gamma=7$ dB, $\alpha=0.4$	10:100 E	Tipo 1	P3
				Tipo 2	P4
Sistema heterogéneo	Voz y datos	Voz:G=128, $\gamma=3$ dB, $\alpha=0.4$	Voz:10:50 E	Tipo 1	P5
		Datos:G=128, $\gamma=7$ dB, $\alpha=0.4$	n_d variable	Tipo 2	P6
		Voz:G=128, $\gamma=3$ dB, $\alpha=0.4$	Voz:10:50 E	Tipo 1	P7
		Datos:G=32, $\gamma=3$ dB, $\alpha=0.4$	n_d variable	Tipo 2	P8
	Voz y datos	Voz:G=128, $\gamma=3$ dB, $\alpha=0.4$	Voz:10:50 E	Tipo 1	P9
		Datos:G=32, $\gamma=7$ dB, $\alpha=0.4$	n_d variable	Tipo 2	P10

Tabla 6.3: Entornos analizados en el estudio analítico de controles de admisión

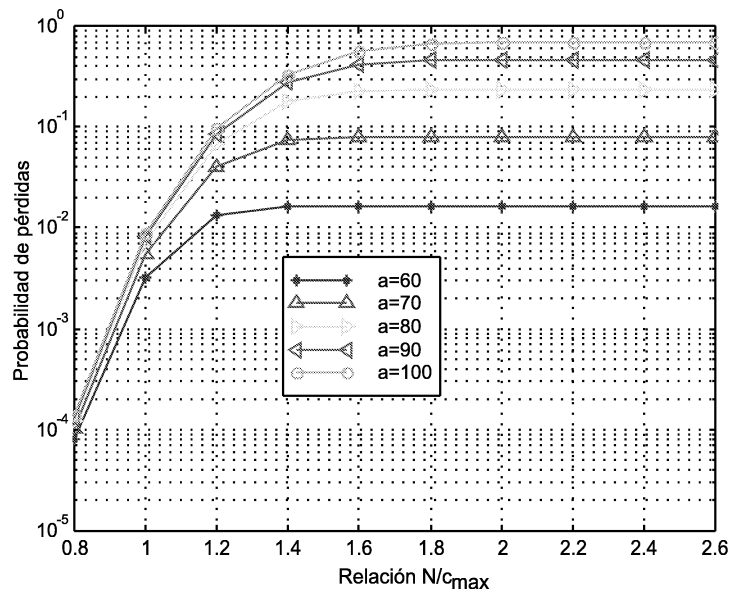


Figura 6.2: Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 1)

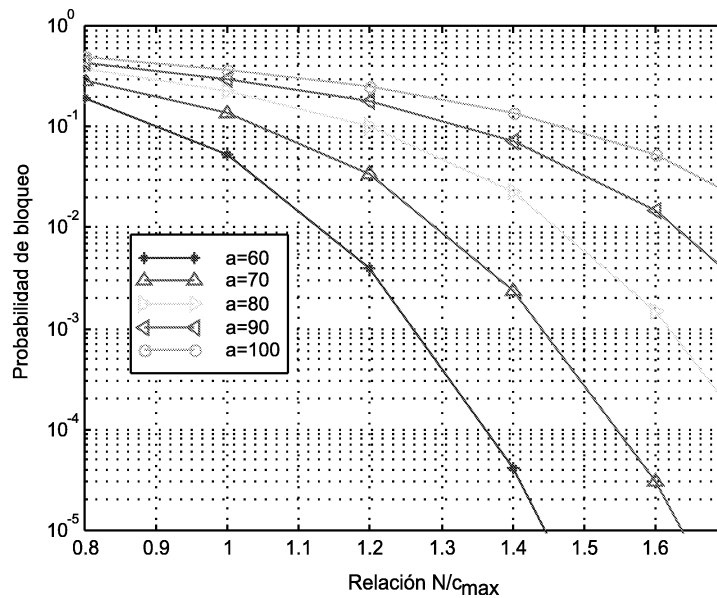


Figura 6.3: Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 1)

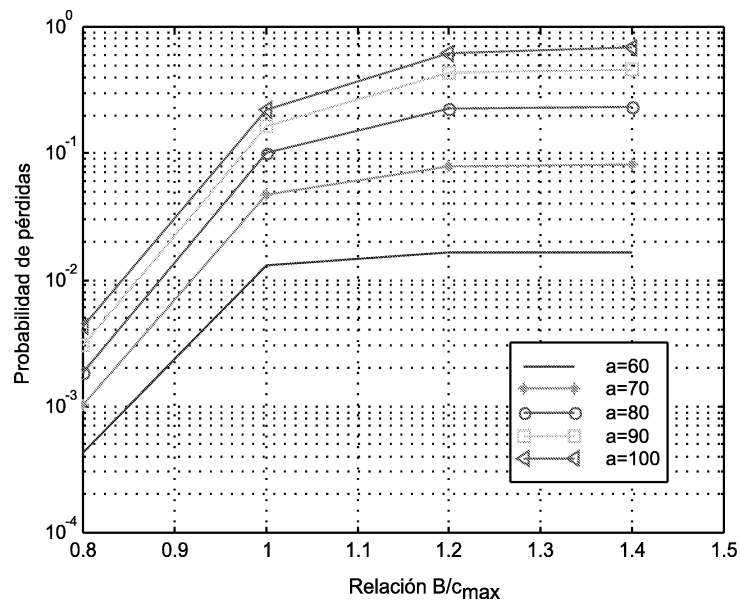


Figura 6.4: Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 2)

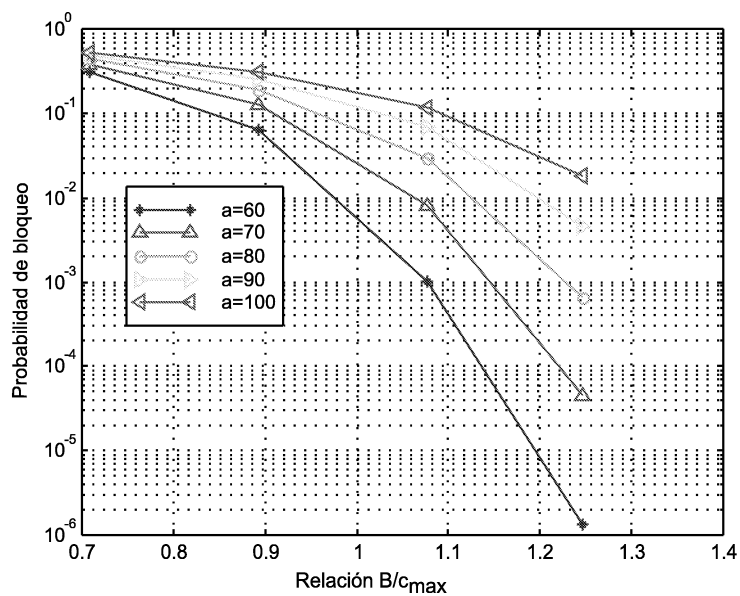


Figura 6.5: Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo voz para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 2)

igual al máximo permitido, esto es, hasta que el número de usuarios activos sea igual a la máxima capacidad.

Esto implica que el CAC de tipo 1 tenga menos pérdidas que el de tipo 2, como se muestra en las gráficas, dado que usa un umbral más conservativo que no aprovecha al máximo la capacidad pero que es muy simple. En cambio el CAC de tipo 2, a costa de una mayor complejidad, aprovecha al máximo la capacidad con lo que consigue menor bloqueo que el CAC de tipo 1. Por ejemplo para 60 E y una relación umbral/ c_{max} de 1, la probabilidad de pérdidas del CAC de tipo 1 es $3 \cdot 10^{-3}$, 10 veces menor que la del tipo 2 de 10^{-2} mientras que la probabilidad de bloqueo del tipo 1 es 10 veces mayor que la del tipo 2, $5 \cdot 10^{-2}$ frente a $4 \cdot 10^{-3}$ (figuras 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5).

- *Efecto de las características del servicio de datos en el CAC tipo 1 (prueba 3)*

En la figura 6.6 se aprecia en primer lugar que las curvas están muy unidas con pocas diferencias al aumentar el tráfico ofrecido. Esto se debe a que estos tráficos suponen fuertes cargas para el sistema por lo que la probabilidad de pérdidas no se estabiliza. En el sistema sólo voz, este tipo de CAC daba lugar a probabilidades de pérdidas de $8 \cdot 10^{-2}$ para umbrales mayores de 1.6 veces la capacidad con un tráfico de 70 E, en cambio para este sistema sólo datos las pérdidas no se estabilizan de modo que para este mismo tráfico se obtienen probabilidades de $6 \cdot 10^{-1}$ para un umbral de 1.6 y de $8 \cdot 10^{-1}$ para un umbral de 1.8 veces la capacidad. Si se ofrecen cargas de tráfico menores, figura 6.7, las pérdidas se estabilizan, obteniéndose probabilidades de pérdidas de $2 \cdot 10^{-2}$ para un tráfico de 20 E con umbrales mayores de 1.4 veces la capacidad (frente a los 70 E anteriores). En cuanto a la probabilidad de bloqueo, en la figura 6.8 se aprecia el fuerte incremento que sufre al aumentar el requisito de calidad de los datos, así para un tráfico de 70 E y un umbral de 1.6, el bloqueo en el sistema sólo voz era de 10^{-5} mientras que en el sistema sólo datos, debido al aumento del requisito de calidad de 3 dB a 7 dB ($\frac{5}{2} = 2.5$ veces), el bloqueo crece hasta $4 \cdot 10^{-1}$.

- *Efecto de las características del servicio de datos en el CAC tipo 2 (prueba 4)*

En la figura 6.9 se observa que para este tipo de CAC las cargas ofrecidas son muy elevadas, lo que ocasiona que las curvas estén muy juntas y las pérdidas no se estabilicen. Si como en el caso anterior se ofrecen cargas de 10 a 50 E, entonces se consiguen pérdidas estables para ciertos umbrales de admisión. Las figuras 6.9 y 6.10 nos muestran que, como en el caso del sistema homogéneo sólo voz, la simplicidad del CAC tipo 1 obtiene pérdidas menores a costa de no aprovechar al máximo la capacidad, frente al CAC de tipo 2 que consigue mejores tasas de bloqueo.

- *Efecto de la integración y las características de los servicios en la probabilidad de pérdidas (pruebas 5, 6, 7, 8, 9 y 10)*

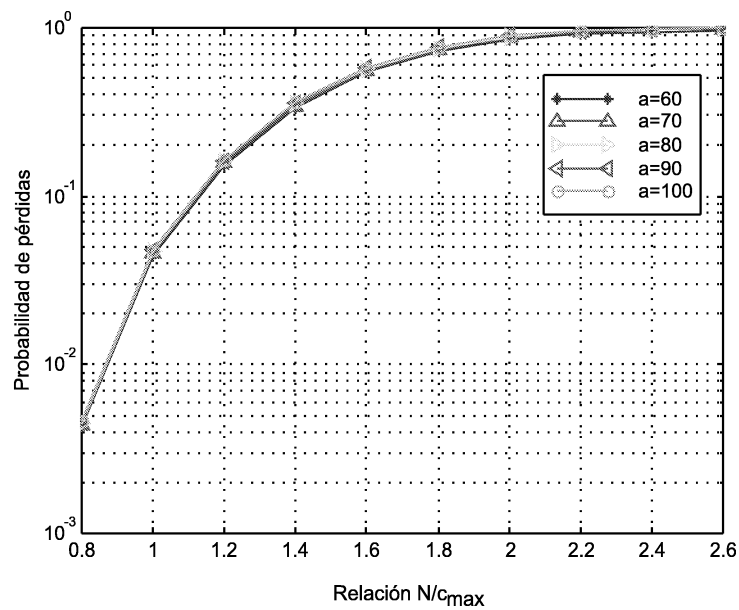


Figura 6.6: Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 3)

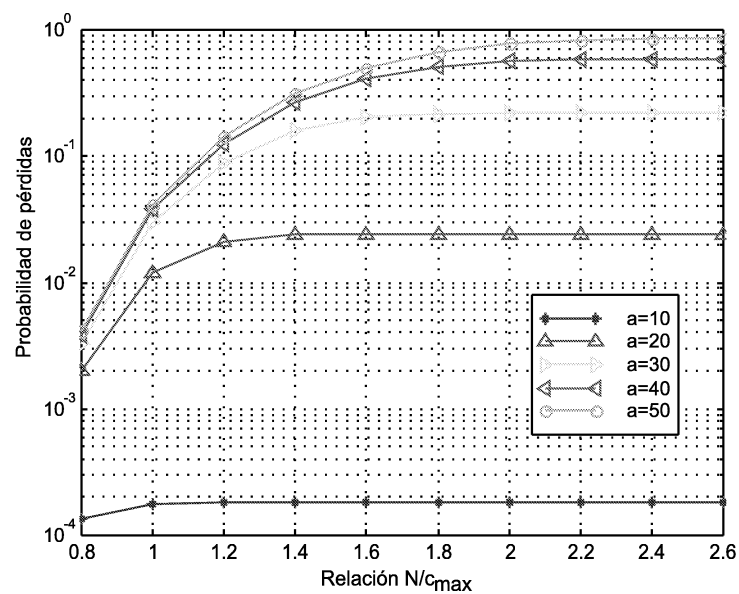


Figura 6.7: Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 3)

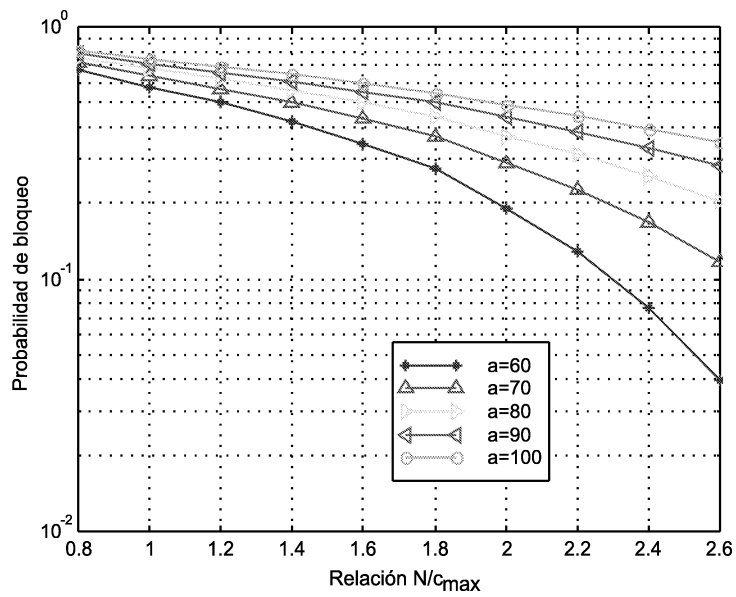


Figura 6.8: Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 3)

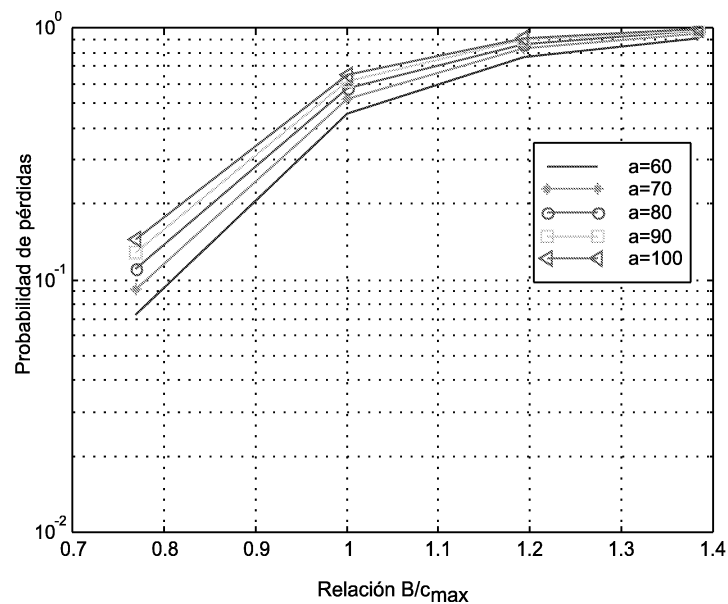


Figura 6.9: Probabilidad de pérdidas en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 4)

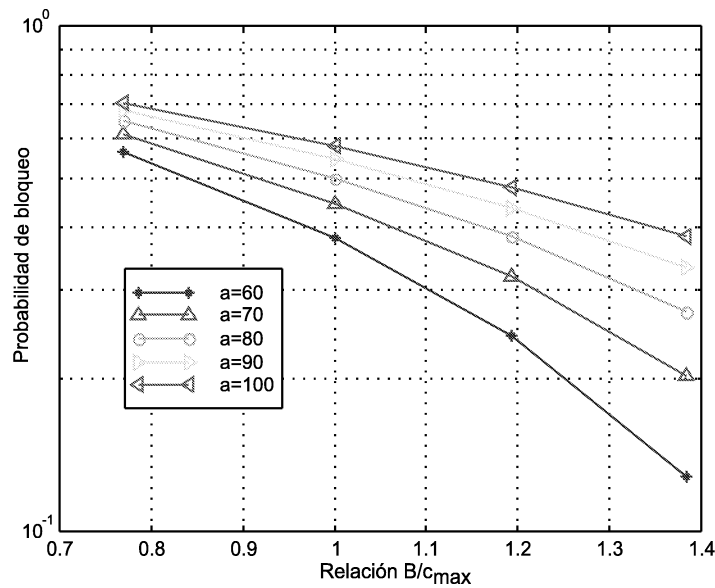


Figura 6.10: Probabilidad de bloqueo en un sistema homogéneo sólo datos para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico ofrecida en Erlang (prueba 4)

La comparativa de la probabilidad de pérdidas se realiza en los tres entornos integrados indicados, donde las relaciones entre las tasas de bits y los requisitos de calidad de los servicios de voz y datos son de 2.5, 4 y 10 respectivamente. En las figuras 6.11 y 6.12, correspondientes a las pruebas 5 y 6, se aprecia que en este sistema integrado la probabilidad de pérdidas no se estabiliza para ninguno de los dos tipos de controles de admisión como ocurría en los sistemas homogéneos, aún empleando cargas bajas de tráfico de voz, lo que dificulta la estimación de los umbrales de admisión que cumplan el GoS y la QoS. Las gráficas correspondientes a las pruebas 7, 8, 9 y 10 presentan curvas de aspecto similar a las anteriores, en las que la probabilidad de pérdidas tampoco se estabiliza. La comparativa de todas estas gráficas nos permite apreciar la fuerte influencia de las relaciones entre los parámetros de los servicios de voz y datos en la probabilidad de pérdidas, debido a que modifican las potencias de transmisión de los usuarios y por tanto la capacidad y los niveles de interferencia. Este efecto se muestra en la tabla 6.4 donde, como ejemplo, se muestra la evolución de las probabilidades de pérdidas al aumentar la relación entre los parámetros de los servicios de voz y datos κ para un escenario con tráfico de voz de 10 E. Para comparar el comportamiento de los dos tipos de CAC para un mismo umbral de admisión de voz, es necesario tener en cuenta que el CAC de tipo 1 considera un caso peor, de modo que si existen, por ejemplo, 2 usuarios de datos en el sistema, el umbral de admisión de voz es $N_v = N - \kappa \cdot 2$. En el caso del CAC tipo 2, si el umbral de admisión de voz es igual al caso anterior, es decir $B_v = N_v$, significa que existen 2 usuarios de datos

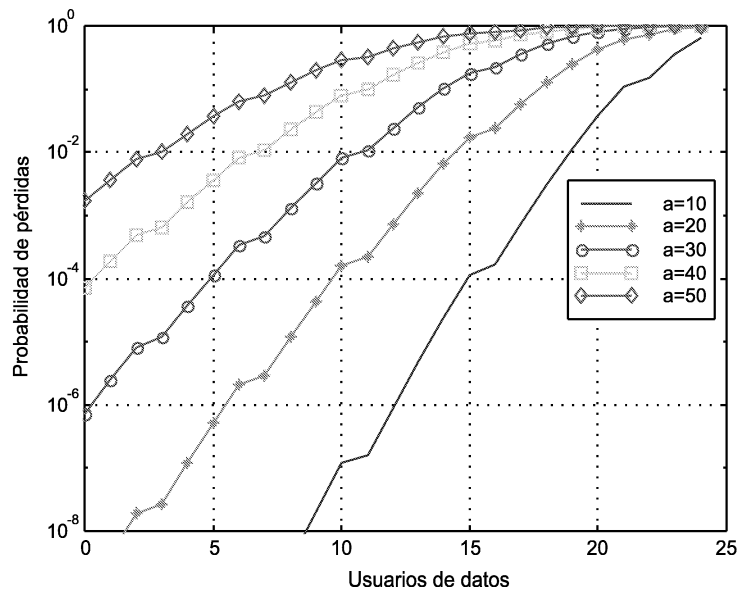


Figura 6.11: Probabilidad de pérdidas en un sistema integrado para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 5)

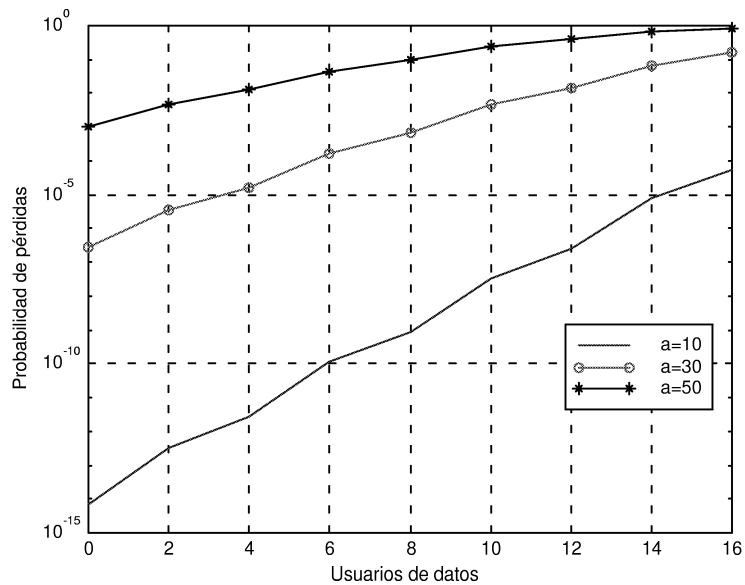


Figura 6.12: Probabilidad de pérdidas en un sistema integrado para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 6)

activos, lo que equivale a que en el sistema exista un número de usuarios de datos igual a $\frac{2}{0.4} = 5$. Estos dos escenarios son los que se comparan en la tabla 6.4.

κ	CAC	Probabilidad de pérdidas
2.5	Tipo 1	10^{-12}
	Tipo 2	$2 \cdot 10^{-11}$
4	Tipo 1	$3 \cdot 10^{-12}$
	Tipo 2	$9 \cdot 10^{-10}$
10	Tipo 1	$4 \cdot 10^{-9}$
	Tipo 2	$5 \cdot 10^{-3}$

Tabla 6.4: Comparativa de la probabilidad de pérdidas en un sistema integrado con tráfico de voz de 10 E

Los resultados de esta tabla muestran una mayor influencia de los parámetros de los servicios en el CAC de tipo 2, dado que el CAC de tipo 1 es muy conservativo, con lo que obtiene pérdidas más bajas a costa de desaprovechar la capacidad. En este CAC de tipo 2 se observa el fuerte crecimiento en la probabilidad de pérdidas con el aumento de κ .

- *Efecto de la integración y las características de los servicios en la probabilidad de bloqueo (pruebas 5, 6, 7, 8, 9 y 10)*

Las figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.16 correspondientes a las pruebas 5, 6, 7 y 8 muestran la evolución de la probabilidad de bloqueo para un tráfico de voz al variar el número de usuarios de datos. Los resultados obtenidos revelan, de igual modo que en el caso anterior, la fuerte influencia de los parámetros del servicio de datos en la probabilidad de bloqueo. Además la comparativa de ambos tipos de CAC nos muestra menores tasas de bloqueo en el CAC basado en el nivel de interferencias que el basado en el número de usuarios, dado que el primero aprovecha mejor la capacidad del sistema. Por ejemplo para un tráfico de voz de 50 Erlang y 10 usuarios de datos, el CAC de tipo 1 obtiene probabilidades de bloqueo de $2 \cdot 10^{-3}$ para $\kappa = 2.5$ y 10^{-1} para $\kappa = 4$, lo que denota la importante influencia de los parámetros de los servicios. Además se observa que para el CAC de tipo 2 si en el sistema hay 10 usuarios activos, esto es 10 o más usuarios presentes en el sistema, se obtienen menores probabilidades de bloqueo ($5 \cdot 10^{-4}$ para $\kappa = 2.5$ y 10^{-2} para $\kappa = 4$).

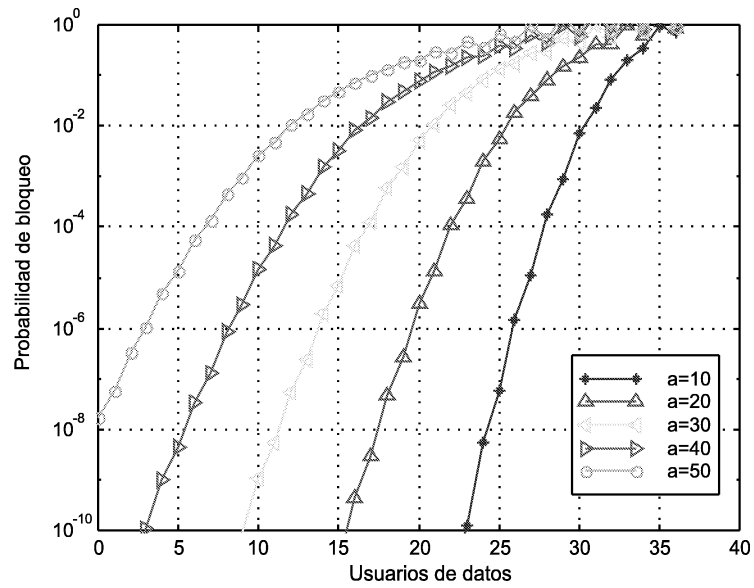


Figura 6.13: Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 5)

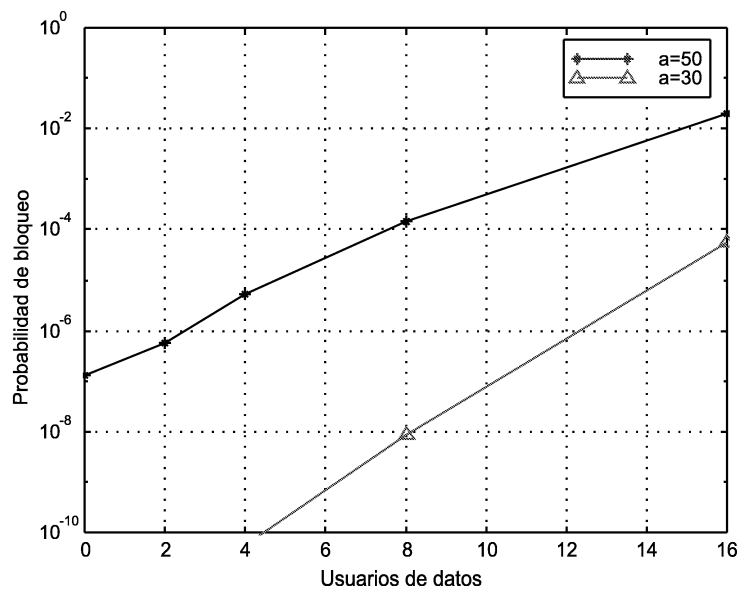


Figura 6.14: Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 6)

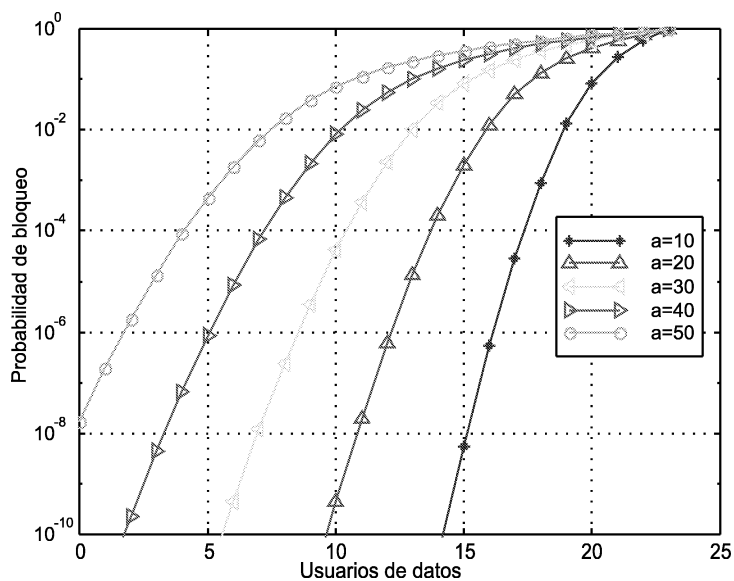


Figura 6.15: Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 1, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 7)

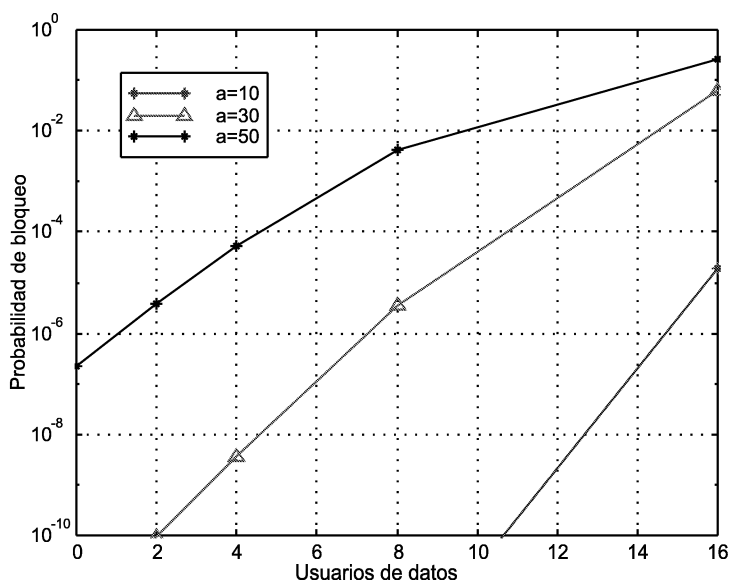


Figura 6.16: Probabilidad de bloqueo en un sistema integrado para un CAC tipo 2, donde a es la carga de tráfico de voz ofrecida en Erlang (prueba 8)

6.4.5 Conclusiones

El estudio realizado nos muestra que en un sistema homogéneo, con los dos tipos de controles analizados, se pueden establecer umbrales de admisión que cumplan los requisitos de QoS y GoS debido a la estabilización que sufren las pérdidas a medida que aumenta el umbral. En este caso es necesario tener en cuenta que las pérdidas se estabilizan tan sólo si la carga de tráfico no es muy elevada. La comparativa de los sistemas homogéneos de voz y datos refleja la importancia de los parámetros característicos de los servicios en la frontera de admisión. Este aspecto queda muy patente en el análisis del sistema integrado, donde se observa la fuerte sensibilidad de los parámetros de GoS y QoS respecto al número de usuarios de datos, dada su elevada interferencia. Pero la conclusión más importante de este estudio de controles en un sistema multiservicio es la dificultad para elegir un umbral adecuado que ofrezca garantías de QoS y GoS, dado que en este caso las pérdidas no se estabilizan al aumentar el umbral con respecto a la capacidad máxima, como ocurría en los sistemas homogéneos.

En cuanto a la comparativa de controles, el primero de ellos, basado en el número de usuarios, tiene la ventaja de la simplicidad pero no maximiza el uso de la capacidad disponible, sino que es muy conservativo en la elección del umbral de admisión. Por este motivo obtiene probabilidades de pérdidas muy pequeñas. El segundo control, basado en el nivel de interferencias, requiere una mayor complejidad porque necesita medidas periódicas de los niveles de interferencia en el sistema, pero a cambio establece un umbral que optimiza la capacidad, con lo que consigue menores probabilidades de bloqueo que el anterior.

6.5 Técnicas de admisión adaptativas y de gestión de recursos

En esta sección se aborda el análisis de controles de admisión adaptativos. La implementación de este tipo de controles lleva asociada una gran complejidad, porque necesitan medidas periódicas de diversos flujos de información del sistema para tomar sus decisiones. En este estudio se busca analizar de forma global el control de acceso de los usuarios al sistema, por lo que no sólo se estudian las técnicas de admisión, sino también las mejoras en las prestaciones del sistema cuando se emplean algoritmos de gestión de recursos junto con el CAC. Entre estas técnicas se han evaluado también las de carácter adaptativo, que varían dinámicamente la tasa de transmisión de los usuarios para adaptarse al estado del sistema. El análisis combinado de estos controles, complejos por su características dinámicas, requiere un modelo de sistema detallado, que permita analizar los cambios en los flujos de información que sirven para adaptar los umbrales de admisión. Por este motivo se han empleado técnicas de simulación, que permiten evaluar el efecto de los servicios de datos de alta tasa de 3G (como los servicios multimedia) sobre el tradicional servicio de voz. En las simulaciones se ha empleado la distribución *t-student* para

conseguir intervalos de confianza del 95%.

6.5.1 Modelo del sistema

Este estudio analiza un sector dentro de una celda formada por 3 sectores, estudiando la contribución a la interferencia intercelda de las dos primeras celdas vecinas, que son las que generan los niveles de interferencia más significativos (figura 6.17). Se ha normalizado a 1 la distancia desde el centro de la celda a cualquiera de sus vértices.

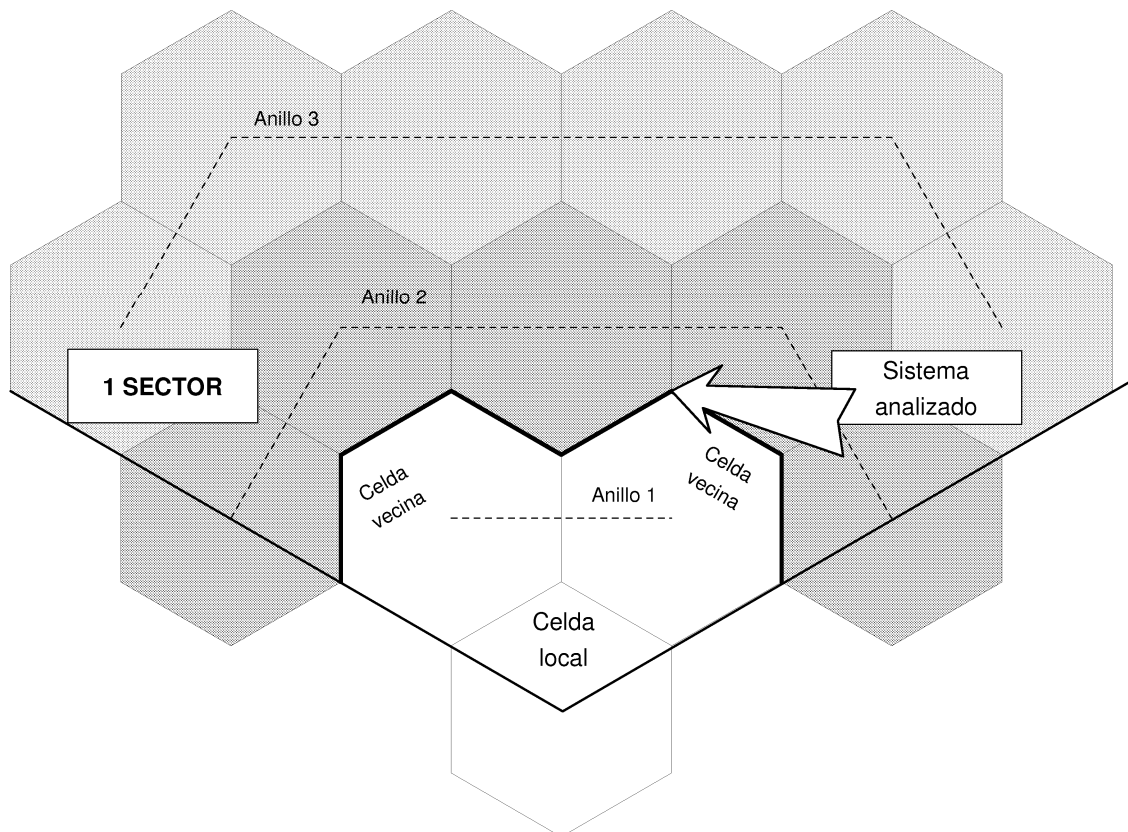


Figura 6.17: Sistema empleado para el estudio por simulación de controles de admisión adaptativos y técnicas de gestión de recursos

El modelo de propagación usado considera la atenuación con la distancia y los desvanecimientos lentos debidos a obstáculos en el camino. Se considera control perfecto de potencia.

En este estudio se analizan los traspasos de estación base de los usuarios. La forma de realizar este cambio asistido de estación base (*soft handoff*) es la siguiente:

- La estación base indica al móvil la lista de las señales piloto.
- El móvil mide periódicamente el nivel de potencia de las señales piloto de su lista.

- Si el nivel de la señal piloto de alguna de las estaciones base a la que no está conectado es mayor que un cierto umbral, la estación base inicia un traspaso (*soft handoff*) para el móvil.

Estas medidas de las señales piloto no sólo se usan para los traspasos, sino que también se emplean en el control de acceso de los usuarios. En la petición de acceso el móvil debe incluir, además de sus requerimientos, información sobre la potencia recibida de las señales piloto de las celdas vecinas en su lista. Estas medidas del móvil indican el nivel de interferencia que ocasionan las transmisiones del usuario en la estación base local y en sus celdas vecinas.

Modelos de tráfico

Los servicios analizados, junto con sus modelos de tráfico, se describen a continuación:

- Servicio de voz

Este servicio en tiempo real no es muy restrictivo, requiere una tasa de bits baja (tasa básica R) y una relación energía de bit/densidad de ruido no demasiado elevada. Por este motivo el máximo número de usuarios que pueden ser admitidos dentro de una celda, para ofrecer garantías de QoS, es suficientemente elevado para considerar una distribución uniforme de los usuarios de voz. Esta distribución implica que la interferencia generada por los usuarios de voz no depende de la distancia de los terminales móviles, sino que se puede aproximar mediante el modelo gaussiano descrito en el capítulo 4.

El tráfico de voz se representa mediante un modelo ON/OFF con distribuciones de tiempo exponenciales. Las características de este servicio son: ganancia de proceso de 128 y relación energía de bits/densidad de ruido de 3 dB.

- Servicio de datos

Este servicio se caracteriza por su alta tasa ($k \cdot R$) y su modelo de tráfico a ráfagas. Esta elevada tasa implica la generación de elevados niveles de interferencia, lo que se traduce en que en una celda sólo pueden ser admitidos un número reducido de usuarios de datos para ofrecer garantías de QoS. Esto significa que no es posible considerar una distribución uniforme de usuarios, lo que implica una dependencia de la interferencia generada por los móviles con la distancia a las estaciones base. Esta dependencia se analiza mediante simulaciones de diversos escenarios.

El modelo del tráfico de datos es de tipo ON/OFF con distribuciones de tiempo exponenciales. La simplicidad del modelo de datos se justifica porque el objetivo de este estudio es conocer el efecto de las ráfagas de datos de alta tasa sobre el servicio en tiempo real de voz. En este caso se consideran dos clases de datos con las siguientes características:

- *clase C1*: ganancia de proceso de 32 y relación energía de bits/densidad de ruido de 7 dB.
- *clase C2*: ganancia de proceso de 64 y relación energía de bits/densidad de ruido de 7 dB.

6.5.2 Controles de admisión y gestión analizados

La figura 6.18 muestra el funcionamiento conjunto de las estrategias de admisión y gestión de peticiones analizadas. Para evitar la fluctuación de la interferencia que se produce en los sistemas CDMA multiservicio, estos controles usan como criterio de decisión tanto la carga del canal como el nivel de interferencia existente, asignando recursos a los usuarios dinámicamente de acuerdo a sus requisitos de calidad.

Control de admisión

El control de admisión simulado pertenece al tipo 2, basado en el nivel de interferencias, y es de tipo adaptativo, es decir realiza medidas periódicas del nivel de interferencia para ajustar el criterio de admisión al sistema. Este control es el denominado LIDA (Load and Interference Based Demand Assignment) [?], [?], cuyo criterio de admisión es que la interferencia total I_t (intracelda e intercelda) sea menor que la máxima tanto en la celda local como en las vecinas. La máxima interferencia viene determinada por los requisitos de QoS de los servicios de voz y datos (capítulo 4). En [?] se plantea que en un sistema con una distribución uniforme de usuarios de voz (igual en todas las celdas) y 1 usuario de datos de alta tasa en la celda local, la interferencia total en las celdas local y vecinas se puede expresar como:

$$I_t = \alpha_v \cdot N_v \cdot (1 + f) + k \cdot \nu \quad (6.9)$$

donde α_v es el factor de actividad de la voz, N_v es el número de usuarios de voz, f es el factor de interferencia intercelda para los usuarios de voz, k indica el número de veces que la tasa de un usuario de datos es mayor respecto a la tasa de un usuario de voz (se supone que los usuarios de voz y datos tienen el mismo requisito de QoS) y ν es el factor de interferencia intercelda de un usuario de datos. En [?] se consideran diversas aproximaciones para estimar este factor, pero la más exacta es:

$$\nu = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{Celda local} \\ \frac{z_1}{z_2} & \text{Celdas vecinas} \end{array} \right\}$$

donde z_1 y z_2 son las medidas de las señales piloto de la celda vecina y de la celda local respectivamente, que incluyen la atenuación con la distancia y con los obstáculos del camino.

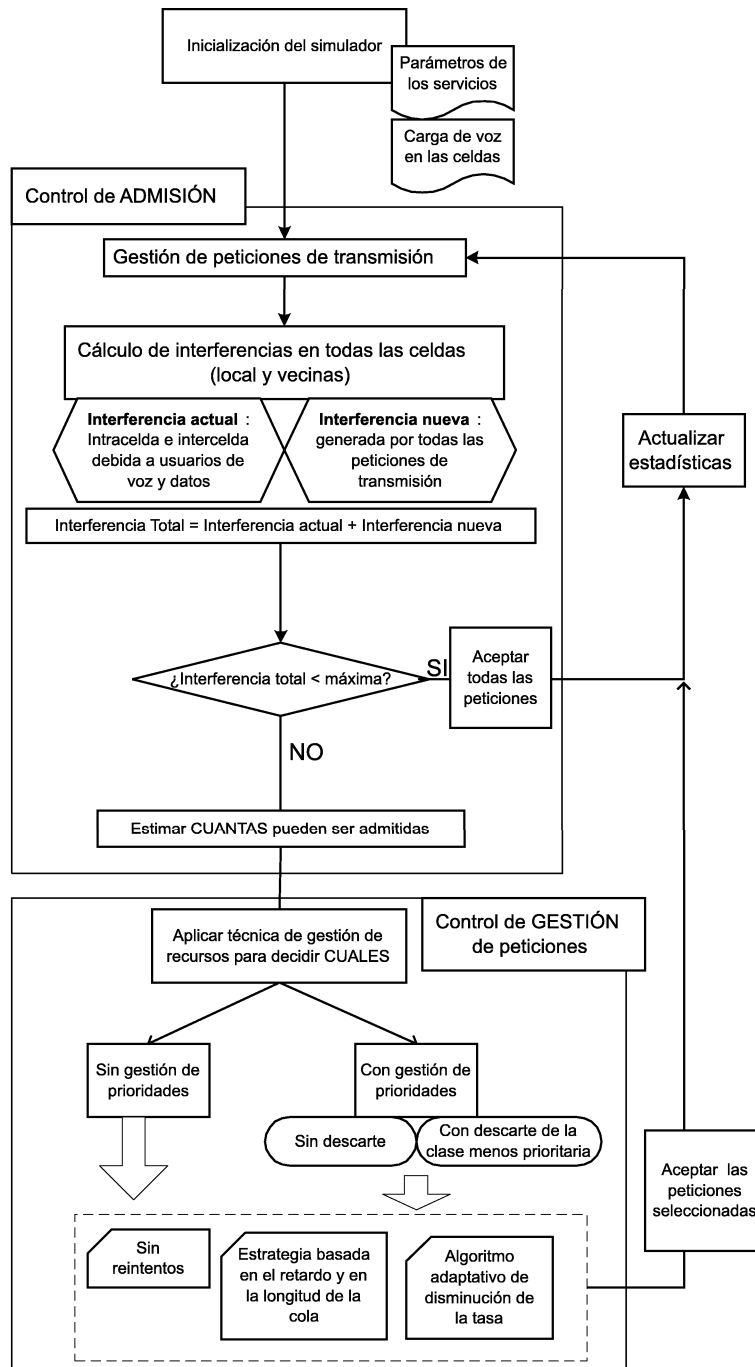


Figura 6.18: Controles de acceso analizados

Este algoritmo, que permite la transmisión de ráfagas de datos a k veces la tasa básica, está basado en la información de carga de la celda local y las celdas vecinas y las medidas de los niveles de potencia de las señales piloto proporcionadas por el móvil. En [?] se proponen dos alternativas para la asignación de posibles tasas de transmisión para el móvil de datos, la primera de ellas usa sólo dos umbrales, es decir el usuario de datos puede transmitir a k veces

la tasa básica o bien a la tasa básica, y la segunda con n umbrales de tasas de transmisión comprendidas desde k veces la tasa básica hasta la tasa básica.

La herramienta de simulación desarrollada nos ha permitido efectuar un análisis completo de este control de admisión con las siguientes aportaciones respecto a [?]:

- *Modelado gaussiano de la interferencia intercelda de los usuarios de voz*

En este caso y apoyándonos en el estudio de la interferencia intercelda para una distribución uniforme de usuarios efectuado en el capítulo 4, se usa un modelo gaussiano para los usuarios de voz, frente factor al f de interferencia intercelda empleado en [?] (ecuación 6.9). Esto nos acerca más al sistema real donde la interferencia intercelda no es estática, sino similar a una variable aleatoria con la distribución indicada.

- *Sistema con múltiples clases de datos y gestión de prioridad*

En este caso se analizan sistemas con integración de diversas clases de datos (en [?] se consideraba una única clase de datos), con diferentes requisitos de calidad. Si se considera un sistema con M clases de datos distintas y se realiza el mencionado modelado gaussiano de la interferencia intercelda de los usuarios de voz, el criterio de admisión para un usuario de datos de la clase i , considerando control perfecto de potencia, se expresa de la siguiente forma (ver capítulo 4):

$$\frac{P_i \cdot G_i}{N_v \cdot \alpha_v \cdot P_v + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} P_j \cdot \alpha_j \cdot \nu_{j,k} + \Psi_v \cdot P_v - P_i \cdot \alpha_i} \geq T_i \quad (6.10)$$

donde:

- P_i y P_v : potencias recibidas en la estación base correspondientes a los usuarios de datos de la clase i y a los usuarios de voz respectivamente. La relación entre estas potencias es proporcional a la relación entre las características de los servicios de voz y datos (tasa de bit y requisito energía de bit/densidad de ruido) como se comentó en el capítulo 4.
- G_i : ganancia de proceso de la clase de datos i .
- N_v y N_j : número de usuarios de voz y número de usuarios de datos de la clase j respectivamente.
- α_v y α_j : factor de actividad de la voz y de los usuarios de datos de la clase j respectivamente.
- Ψ : variable gaussiana de la interferencia intercelda normalizada de los usuarios de voz.
- T_i : relación energía de bit/densidad de ruido requerida por la clase i de datos.

- $\nu_{j,k}$: factor de interferencia del usuario k de la clase j .

Para admitir a un nuevo usuario de datos es necesario que este criterio de admisión se cumpla tanto en la celda local como en las celdas vecinas. En estos dos tipos de celdas el factor ν toma valores distintos: en la celda local vale 1, dado que con control de potencia perfecto la potencia de un usuario de datos j que llega a la estación base local es $P_j \cdot \alpha_j$, en cambio no toda esta potencia llega a las celdas vecinas donde este factor ν tomará un valor correspondiente al cociente entre las potencias de las señales piloto.

Operando, y teniendo en cuenta las relaciones entre las potencias de las distintas clases, el criterio de admisión en las distintas celdas se puede expresar así:

$$\sum_{j=1}^M \frac{\alpha_j \cdot \sum_{k=1}^{N_j} \nu_{j,k}}{\frac{G_j}{T_j}} + \frac{N_v \cdot \alpha_v + \Psi_v}{\frac{G_v}{T_v}} \leq 1 \quad (6.11)$$

En este criterio de admisión se muestran las diferencias entre los usuarios de voz, con un modelado gaussiano de la interferencia intercelda debido a su distribución uniforme, y los usuarios de datos, cuya interferencia depende de la distancia.

- *Movilidad de los usuarios de datos*

Se han efectuado simulaciones con los usuarios de datos en movimiento.

- *Control de gestión de peticiones*

En este caso el control de admisión se complementa con un conjunto de técnicas para la gestión de peticiones que mejoran las prestaciones del sistema.

Gestión de recursos

Las técnicas de gestión de recursos se emplean cuando no se puede permitir el acceso a todas las peticiones realizadas y es necesario decidir cuáles van a ser admitidas (figura 6.18). Para tomar esta decisión se han analizado dos tipos de controles, el primero de ellos es muy simple y selecciona las peticiones que deben ser aceptadas de forma aleatoria, sin considerar las características de las distintas clases, y el segundo tipo realiza una gestión de prioridades (CBQ), de modo que se sirven primero las peticiones de las clases más prioritarias. Además se ha analizado una variante para estas alternativas con gestión de prioridades que realiza descarte, esto es, cuando una petición de una clase más prioritaria no pueda ser aceptada, se descarta temporalmente una de las transmisiones de la clase menos prioritaria para dar cabida a ésta. Esta transmisión descartada volverá a realizar una petición de transmisión y se reanudará cuando sea posible, siempre que no se supere el máximo retardo permitido. Se han simulado tres mecanismos de control de recursos distintos, que pueden realizar o no gestión de prioridades:

- DS1: Sin reintentos. En este caso no existe ningún control, si una petición no es aceptada se rechaza sin reintentarla de nuevo.
- DS2: Esquema basado en el retardo y en la longitud de la cola. Esta estrategia basada en el esquema EDD, selecciona en primer lugar la peticiones de mayor retardo para evitar pérdidas. En caso de que los retardos sean iguales, se elige a aquella con menor número de paquetes en la cola, porque ésta será la que se sirva antes y libere el sistema para atender a la siguiente.
- DS3: Esquema adaptativo de asignación de tasa de transmisión. En este caso se implementa una función que adapta dinámicamente la velocidad asignada a la ráfaga según la carga del sistema. Esta función se presenta en la figura 6.19 para $k = 8$ (la tasa de datos es 8 veces la tasa básica), donde se aprecia que a medida que aumentan los reintentos, debido a que la carga existente en el sistema no permite la transmisión del usuario a una tasa tan alta, se disminuye la tasa de la ráfaga. Esto es posible porque estamos considerando servicios de datos adaptativos, con los que se puede negociar la disminución de la tasa de bits.

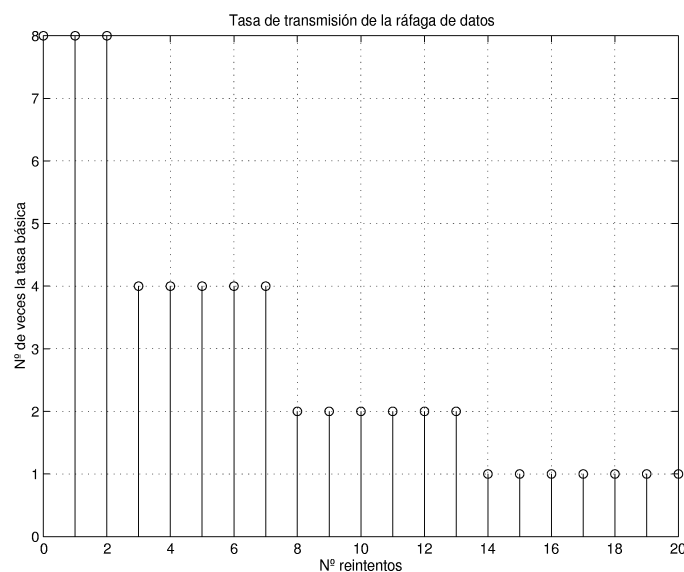


Figura 6.19: Función dinámica para adaptar la tasa de transmisión de una ráfaga de datos a la carga de la red

En los esquemas DS2 y DS3, cuando una petición no se atiende, el usuario lo vuelve a intentar en la próxima trama o en un número aleatorio de tramas, hasta que se supere un número máximo de reintentos.

6.5.3 Entornos analizados

El entorno analizado es un sistema UTRA de tercera generación que integra los servicios de voz y datos. Las peticiones de transmisión se envían por el canal común RACH de acceso aleatorio (protocolo ALOHA ranurado). En este caso se considera un número de usuarios de voz activos por celda con distribución uniforme que permanece constante durante la simulación. Esto es así porque el objetivo de estas simulaciones es analizar el impacto de los usuarios de datos de alta tasa. Los entornos estudiados varían el número de usuarios de datos en la celda local, que pueden pertenecer a una o dos clases de servicio distintas. En la tabla 6.5 se presentan los escenarios simulados.

Datos	Clases de datos	Parámetro	VARIABLES	DS	Prueba
1	C1	p_c p_b p_r p_{tasas}	D N_v N_v N_v	Ninguno DS1, DS3 DS3 DS3	P1
N	C1	p_b p_r	N_d, N_v, α_d, l_r N_d, N_v	DS2, DS3 DS2, DS3	P2
2 clases	C1 y C2	p_b p_r	$N_v, N_{d1,2}$	DS1, DS2(descarte), DS3 DS1, DS2 (descarte),DS3	P3

Tabla 6.5: Entornos analizados por simulación

- *Probabilidad de conexión a las estaciones base en función de la distancia del móvil de datos al centro de la celda y efecto de la carga de voz (prueba 1)*

En este escenario con 1 usuario de datos se analiza en primer lugar la probabilidad de conexión p_c del usuario de datos a las distintas estaciones base, es decir la probabilidad de que el nivel de la señal piloto de alguna de las estaciones base a la que no está conectado el móvil sea mayor que un cierto umbral y se inicie un traspaso. Esta probabilidad se estudia en función de la distancia del móvil D al centro de la celda local (radio normalizado a la unidad).

En segundo lugar se calcula la probabilidad de bloqueo p_b al aplicar un control de admisión al sistema de tipo LIDA, cuyo criterio de admisión se aplica tanto en la celda local como en las celdas vecinas. En este caso se comparan las probabilidades obtenidas en dos situaciones: 1) No se aplica gestión de peticiones, sino que aquellas que no son aceptadas se rechazan sin volverlo a reintentar (DS1) y 2) Las peticiones rechazadas lo reintentan en la próxima trama o tras un tiempo aleatorio de tramas, aplicando el esquema de asignación de tasa adaptativo (DS3), que disminuye la tasa de transmisión a medida que aumenta el

número de reintentos (elevada carga en el sistema). En este caso no tiene sentido aplicar el planificador basado en el retardo y en la longitud de cola (DS2) porque se cuenta con sólo un usuario de datos. En el esquema adaptativo es interesante analizar el retardo que sufren las peticiones hasta que son aceptadas (p_r : probabilidad de retardo). A medida que aumenta el retardo o número de reintentos, este algoritmo adaptativo disminuye la tasa de transmisión según la función de la figura 6.19. Por este motivo es interesante analizar las probabilidades de transmisión de las distintas tasas p_{tasas} , que en este caso son 4 veces, 2 veces y 1 vez la tasa básica.

- *Influencia de la carga de datos (prueba 2)*

En primer lugar se analiza la probabilidad de bloqueo p_b obtenida al aplicar el control de admisión al sistema junto con dos tipos de planificadores, planificador de retardo (DS2) y adaptativo (DS3). En esta comparativa se varían las cargas de voz y datos del sistema N_d y N_v , junto con los parámetros del servicio de datos: factor de actividad α_d y longitud media de ráfaga l_r . Posteriormente se analiza la probabilidad de que un usuario de datos sufra un determinado retardo p_r . En este caso se analiza un escenario con 8 usuarios de datos y se considera un retardo máximo de 20 tramas. Si el usuario sufre un retardo mayor, la llamada se pierde.

- *Efecto de la integración de diversas clases de datos (prueba 3)*

El objetivo de esta fase es analizar la gestión de peticiones de dos clases de datos distintas, C1 y C2. En este caso se aplica gestión de prioridades y se considera que la clase C1 es más prioritaria. Por este motivo con todos los tipos de planificadores las peticiones de la clase 1 se sirven en primer lugar. En cuanto a los planificadores se emplea el planificador adaptativo de velocidad (DS3), el planificador de retardo (DS2) y la opción simple sin reintentos (DS1). En el caso del planificador de retardo se ha considerado la opción de descartar las transmisiones de la clase 2 menos prioritaria para servir las peticiones de la clase 1. De este modo se analiza este planificador con la opción de descarte y sin ella. El objetivo en este caso es estudiar y comparar los valores del bloqueo medio p_b cuando se aumenta la carga de usuarios de voz y el número de usuarios de datos de cada clase N_{d1} y N_{d2} para distintos tipos de planificadores.

6.5.4 Resultados

- *Probabilidad de conexión a las estaciones base en función de la distancia del móvil de datos al centro de la celda (prueba 1)*

En la figura 6.20 se muestran las probabilidades de conexión del móvil a las 3 estaciones base. En este caso el móvil está situado en el área derecha de la celda local a una distancia variable. Por este motivo se aprecia que la probabilidad de conexión a la estación base

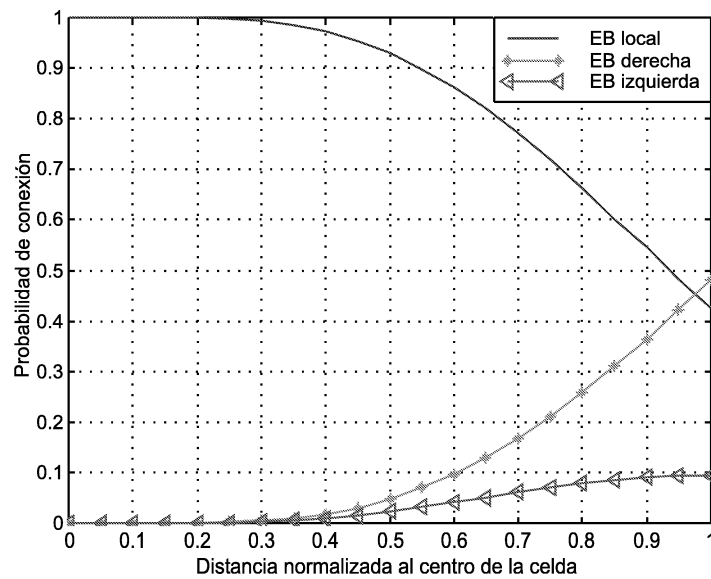


Figura 6.20: Probabilidad de conexión de 1 usuario de datos a las 3 estaciones base (EB) al variar su distancia normalizada al centro de la estación base local (prueba 1)

de la izquierda es muy pequeña aunque el usuario se encuentre en el borde de la celda (probabilidad de 0.1 para una distancia de 1). En cuanto a las estaciones base local y derecha, se aprecia que hasta una distancia normalizada en torno a 0.25, la probabilidad de conexión a la celda local es 1. Pero a partir de este punto esta probabilidad de conexión a la celda local comienza a disminuir a medida que aumenta la probabilidad de conexión a la celda derecha. De este modo para una distancia de 1, la probabilidad de conexión a la celda derecha es similar a la probabilidad de conexión a la celda local, siendo la primera algo mayor (0.47 frente a 0.43). En cualquiera de las distancias la suma de las probabilidades de conexión a las 3 estaciones base es igual a la unidad. Como conclusión se puede destacar el hecho de la alta probabilidad de cambios de base cuando el usuario está cerca del borde de la celda, llegando a alcanzar prácticamente la misma probabilidad de conexión las dos celdas vecinas cuando el usuario está justo en el borde.

- *Efecto de la carga de voz sobre la probabilidad de bloqueo (prueba 1)*

En la figura 6.21 se muestran los resultados de la probabilidad de bloqueo al variar la carga de voz. Esta gráfica nos permite estimar la mejora obtenida con la aplicación de un planificador de peticiones. Esta mejora es muy destacable para 40 usuarios de voz donde, si no se reintenta, la probabilidad de bloqueo es de 0.85, mientras que con el uso del esquema adaptativo DS3 disminuye a 0.1. A pesar de esta gran mejora, el uso del gestor no evita la aparición de un punto de congestión, donde la probabilidad de bloqueo se hace

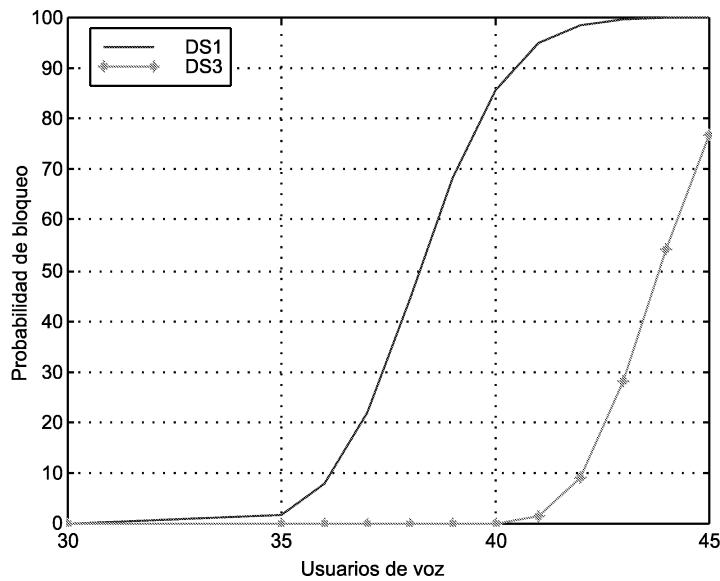


Figura 6.21: Probabilidad de bloqueo de 1 usuario de datos al variar la carga de usuarios de voz (prueba 1)

mayor de 0.5, que en el caso sin reintentos está en torno a 30 usuarios de voz y con el uso del planificador se desplaza a unos 45 usuarios. Esta congestión es debida al nivel de interferencias que supera el máximo umbral permitido. Se han analizado dos esquemas para los reintentos, el primero consiste en reintentar en la próxima trama y el segundo en un tiempo aleatorio de tramas, y los resultados obtenidos son similares. Esto se debe a que el acceso al sistema no está limitando las prestaciones, sino el nivel de interferencia existente. De igual modo ocurre con la movilidad, se ha probado a variar la posición del móvil 4 veces/segundo y los resultados obtenidos son similares, dado que el punto de congestión en este caso no depende de la posición del móvil.

- *Efecto de la carga de voz sobre la probabilidad de retardo (prueba 1)*

En la figura 6.22 se analiza la probabilidad de que el retardo sea de 1, 2, 3 ó más tramas de acceso al variar el número de usuarios de voz, cuando se aplica el algoritmo adaptativo de tasa de transmisión. Cuando existen 35 usuarios de voz la probabilidad de retardo de 1 trama es del 100%, esto es, se permite el acceso al sistema la primera vez que lo intenta. Pero a medida que aumenta la carga, aumenta la probabilidad de un retardo mayor, es decir que la petición sea aceptada tras algunos intentos. Por ejemplo para 40 usuarios de voz, la probabilidad de que el retardo sea de 1 trama es del 15%, de 2 tramas es del 70% y de 3 tramas del 15%, y para 45 usuarios de voz la probabilidad de retardo de 1 trama es del 0%, de 2 tramas es del 5%, de 3 tramas es del 20% y de más de 3 tramas del 75%. Es decir

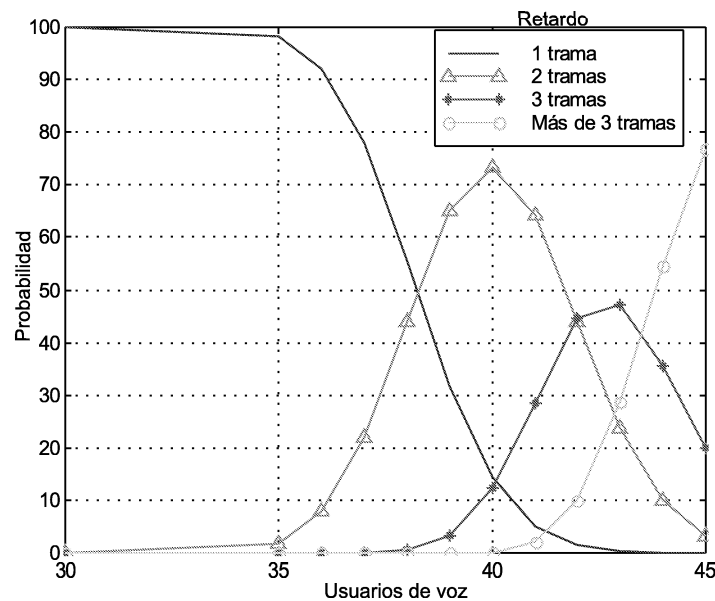


Figura 6.22: Probabilidad de retardo de un usuario de datos al variar la carga de usuarios de voz con el algoritmo adaptativo de tasa de transmisión (prueba 1)

al aumentar la carga hasta 40 usuarios de voz el retardo más probable es de 2 tramas, mientras que para 45 usuarios de voz el retardo es de más de 3 tramas. La congestión está por tanto en este punto donde el retardo crece mucho debido al elevado nivel de interferencias. Tanto si los reintentos se programan para la próxima trama o después de un número aleatorio de tramas, los resultados son similares. De la misma forma los cambios de posición del usuario apenas afectan, dando que el factor principal que limita al CAC es el nivel de interferencias.

- *Efecto de la carga de voz sobre la probabilidad de tasas de transmisión (prueba 1)*

A medida que aumenta la carga de usuarios de voz, el planificador permite la transmisión a tasas más bajas como se aprecia en la figura 6.23. De este modo se aprecia que para 35 usuarios de voz la probabilidad de transmisión a la tasa máxima (4 veces la tasa básica) es del 100% (baja carga). Cuando el número de usuarios de voz crece hasta 40, la probabilidad de transmisión de la tasa máxima disminuye hasta el 15%, siendo de un 70% la probabilidad de transmitir a 2 veces la tasa básica y de un 15% la de transmitir a la tasa básica. Para 45 usuarios de voz, la probabilidad de transmitir a la tasa máxima es de 0, un 5% para 2 veces la tasa básica y un 20% para la tasa básica (el porcentaje restante son las pérdidas).

- *Influencia de la carga de datos sobre la probabilidad de bloqueo (prueba 2)*

En las figuras 6.24, 6.25 y 6.26 se muestran las probabilidades de bloqueo obtenidas con el planificador de retardo al variar el factor de actividad de los datos de 0.4 a 0.8 y la longitud

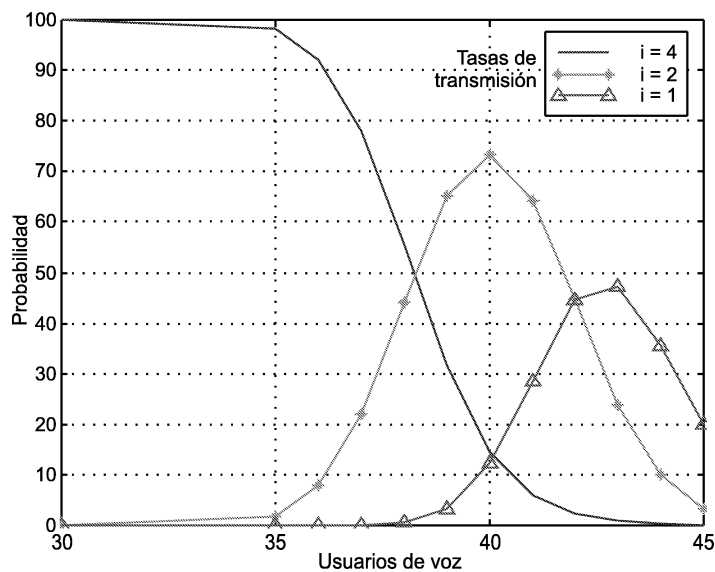


Figura 6.23: Probabilidad de tasas de transmisión de un usuario de datos al variar la carga de usuarios de voz. La tasa de transmisión es igual a i veces la tasa básica (prueba 1)

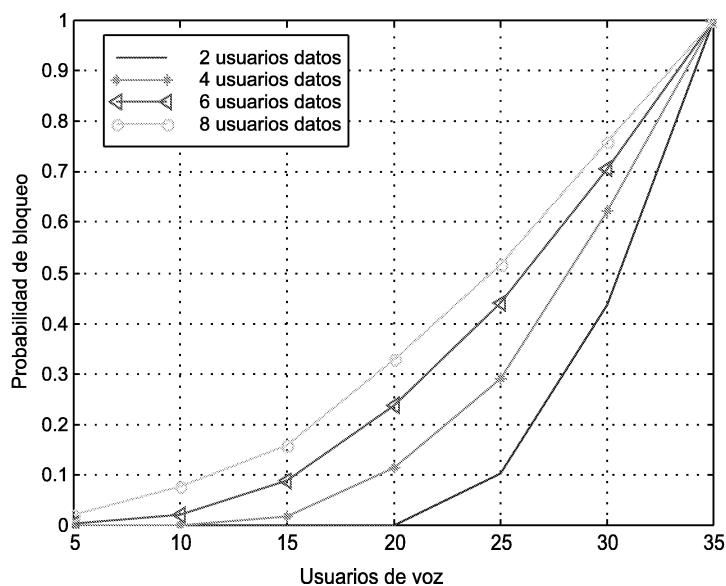


Figura 6.24: Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.4 y una longitud media de ráfaga de 100 paquetes. Planificador de retardo (prueba 2)

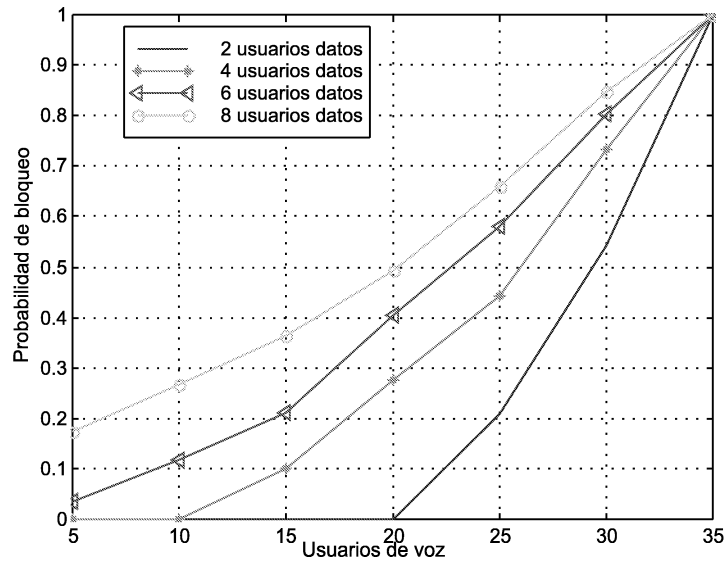


Figura 6.25: Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.8 y una longitud media de ráfaga de 100 paquetes. Planificador de retardo (prueba 2)

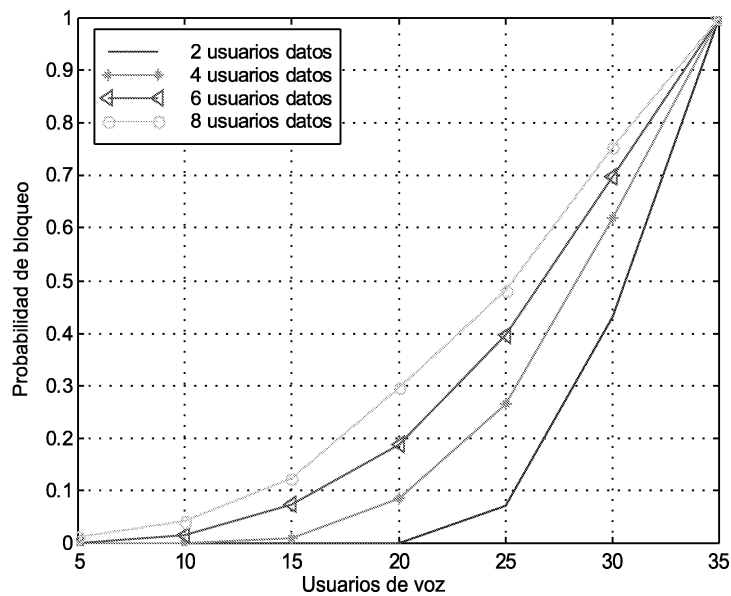


Figura 6.26: Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.4 y una longitud media de ráfaga de 50 paquetes. Planificador de retardo (prueba 2)

de ráfaga de 50 a 100. En primer lugar se aprecia que la influencia del factor de actividad es mayor cuanto menor sea la carga de voz y datos en el sistema. Por ejemplo para un sistema con 25 usuarios de voz y 2 de datos, el bloqueo medio cambia de 0.1 a 0.2 si el factor de actividad aumenta de 0.4 a 0.8, en cambio para un sistema con 30 usuarios de voz y 2 de datos, al aumentar así el factor de actividad, el bloqueo medio pasa de 0.44 a 0.55. En las figuras 6.25 y 6.26 se aprecia la leve influencia de la longitud media de la ráfaga sobre el bloqueo medio. Por ejemplo para 25 usuarios de voz y 2 de datos, el bloqueo es de 0.1 para una longitud media de 100 y de 0.07 para una media de 50 paquetes. Las gráficas muestran también que el bloqueo crece de forma exponencial al aumentar el número de usuarios de voz. Por ejemplo en un sistema con 2 usuarios de datos, el bloqueo crece de 0.1 a 0.44 al aumentar el número de usuarios de voz de 25 a 30 cuando el factor de actividad es 0.4 y la longitud de ráfaga de 100. Si el factor de actividad es 0.8, el bloqueo crece de 0.2 a 0.55 (mayor carga, menor crecimiento del bloqueo). El aumento en el número de usuarios de datos da lugar también a un aumento exponencial del bloqueo. De este modo en un sistema con factor de actividad de datos de 0.4, longitud de ráfaga de 100 y 25 usuarios de voz, el bloqueo es de 0.1 para 2 usuarios de datos, 0.3 para 4 usuarios de datos, 0.45 para 6 usuarios de datos y 0.5 para 8 usuarios de datos. Es decir, incrementos más apreciables en zonas de menor carga.

Si se usa el planificador de velocidad, se obtienen los resultados de la figura 6.27. La comparativa de estos datos con los obtenidos con el planificador de retardo (tabla 6.6), nos muestra el mejor comportamiento de este planificador que se adapta a las condiciones de carga del sistema. En este caso si se varía el factor de actividad de los datos se obtienen los resultados de la tabla 6.7. Estos datos muestran la mayor influencia del factor de actividad cuanto menor es la carga de los datos. En la tabla 6.8 se presenta la poca influencia de la longitud de la ráfaga sobre el bloqueo medio.

- *Influencia de la carga de datos sobre la probabilidad de retardo (prueba 2)*

En las figuras 6.28 y 6.29 se muestra la probabilidad de retardo al usar los dos tipos de planificadores, basados en el retardo y en la velocidad de transmisión. En la primera de ellas, se muestra que con el planificador de retardo los valores más probables se encuentran en los extremos (1 y 20 tramas) y los valores intermedios son poco probables. En cambio con el planificador adaptativo, estos retardos intermedios son más probables, dado que en caso de congestión, el planificador disminuye la tasa para que la transmisión pueda comenzar con un retardo menor. En la tabla 6.9 se muestran las probabilidades de retardo de 1 y 20 tramas para ambos planificadores y su evolución con el número de usuarios de voz. Estos valores muestran, en primer lugar, que la probabilidad de un retardo de 20 tramas es siempre menor con el planificador adaptativo de velocidad, es decir con este planificador se obtiene mejor QoS (menores pérdidas). Además se aprecia que con 35 usuarios de voz el

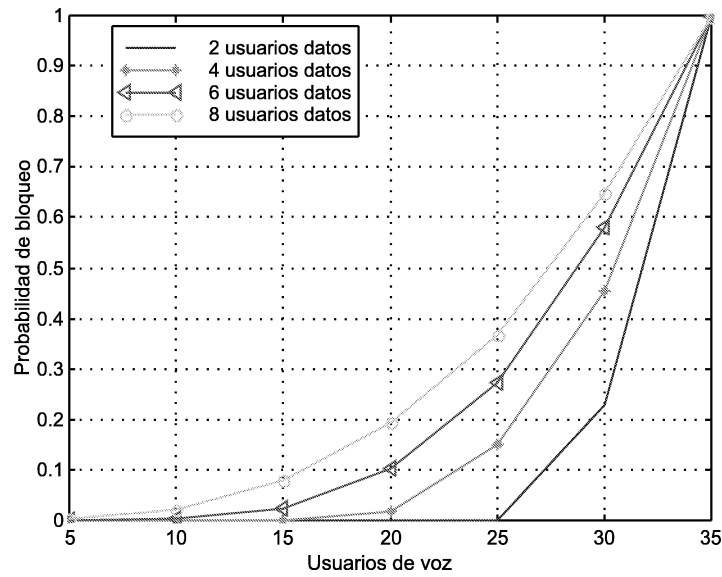


Figura 6.27: Probabilidad de bloqueo en un sistema al variar el número de usuarios de voz y datos. Los parámetros del servicio de datos son un factor de actividad de 0.4 y una longitud media de ráfaga de 100 paquetes. Planificador de velocidad (prueba 2)

Probabilidad de bloqueo		
Usuarios de datos	Planificador de retardo	Planificador adaptativo de velocidad
2	0.1	0
4	0.3	0.15
6	0.44	0.27
8	0.52	0.37

Tabla 6.6: Probabilidad de bloqueo con los planificadores de retardo y de velocidad adaptativo en un sistema con 25 usuarios de voz, factor de actividad de 0.4 y longitud de ráfaga de 100

Probabilidad de bloqueo		
Usuarios de datos	$\alpha_d = 0.4$	$\alpha_d = 0.8$
2	0	0.2
4	0.15	0.3
6	0.27	0.5
8	0.37	0.6

Tabla 6.7: Probabilidad de bloqueo usando un planificador adaptativo de velocidad en un sistema con 25 usuarios de voz y longitud de ráfaga de 100 (α_d es el factor de actividad de los datos)

Usuarios de datos	$l_r = 100$	$l_r = 50$
2	0	0
4	0.15	0.1
6	0.27	0.23
8	0.37	0.34

Tabla 6.8: Probabilidad de bloqueo usando un planificador adaptativo de velocidad en un sistema con 25 usuarios de voz y factor de actividad de 0.4 (l_r es la longitud de ráfaga)

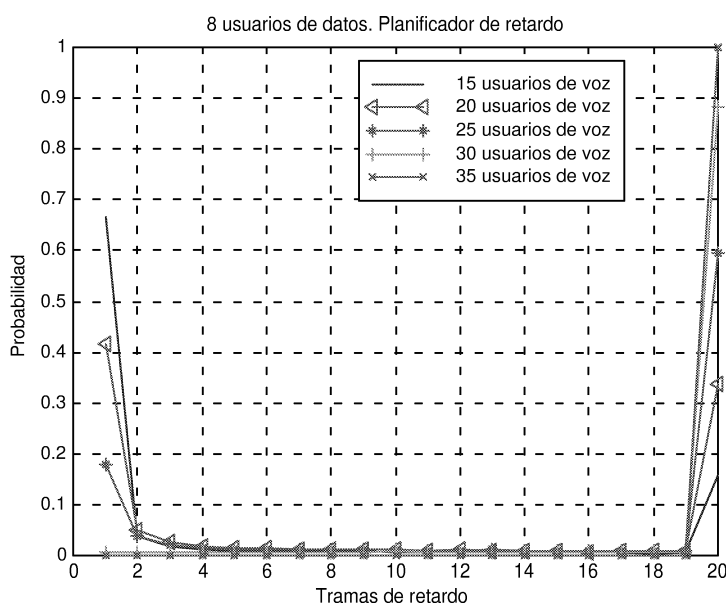


Figura 6.28: Probabilidad de retardo en un sistema con 8 usuarios de datos usando el planificador de retardo (prueba 2)

Probabilidad de retardo				
	DS2		DS3	
Usuarios de voz	1 trama	20 tramas	1 trama	20 tramas
15	0.65	0.15	0.55	0.1
20	0.4	0.3	0.3	0.2
25	0.18	0.6	0.1	0.43
30	0	0.87	0	0.7
35	0	1	0	1

Tabla 6.9: Probabilidad de retardo de 1 y 20 tramas al usar los planificadores de retardo y velocidad

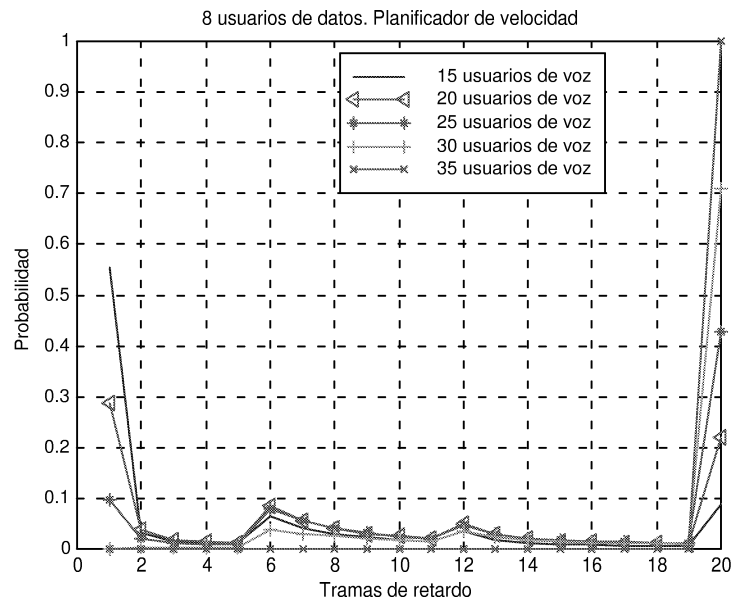


Figura 6.29: Probabilidad de retardo en un sistema con 8 usuarios de datos usando el planificador adaptativo de velocidad (prueba 2)

sistema ya está congestionado y la probabilidad de pérdidas (retardo mayor de 20 tramas) es de 1 con ambos planificadores.

También se aprecia que en situaciones de poca carga, el planificador de retardo es mejor porque obtiene una mayor probabilidad de retardo de 1 trama, en cambio su funcionamiento empeora a medida que aumenta la carga.

- *Efecto de la integración de diversas clases de datos sobre el bloqueo medio (prueba 3)*

Las figuras 6.30 y 6.31 muestran el bloqueo medio de las clases 1 y 2 en un escenario con 2 usuarios de cada tipo de servicio de datos. La evolución de estas curvas muestra la fuerte influencia de la carga del sistema sobre la probabilidad de bloqueo. Si tomamos como ejemplo dos puntos de carga baja y alta como 25 y 30 usuarios de voz, los bloqueos obtenidos se muestran en la tabla 6.10.

Estos datos nos muestran que en lo que se refiere a la clase 1 para una carga baja el planificador más eficiente es el de velocidad adaptativo, que obtiene una tasa de bloqueo 3 veces menor que el de retardo con descarte, mientras que los planificadores de retardo sin descarte y sin reintentos obtienen resultados muy similares. En caso de que aumente la carga, las diferencias entre los valores de bloqueo son mayores revelándose el planificador adaptativo como el mejor y aumentando las diferencias entre el planificador de retardo sin descarte y la opción sin reintentos. En cuanto a la clase 2 se aprecian tasas de bloqueo mucho menores que para la clase 1 debido a la característica de tasa de bit más restrictiva de la clase 1. Con baja carga los tres primeros planificadores obtienen resultados similares

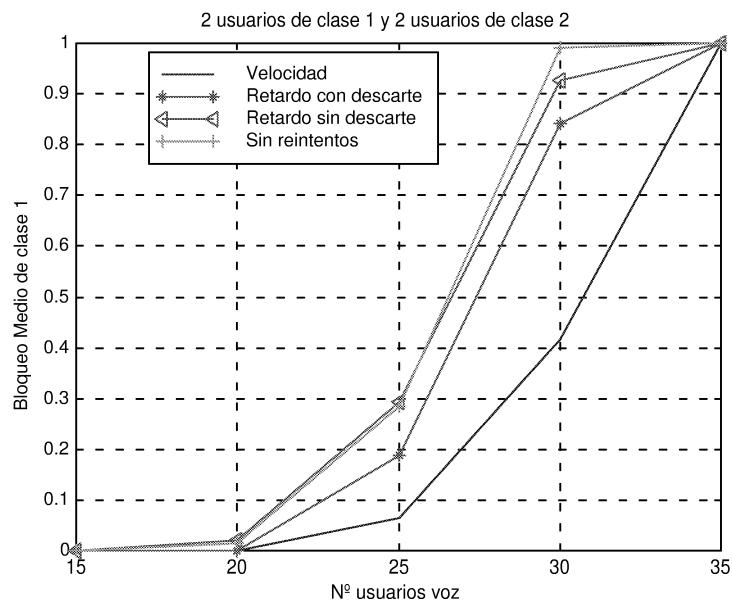


Figura 6.30: Bloqueo medio de la clase 1 en un sistema con 2 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3)

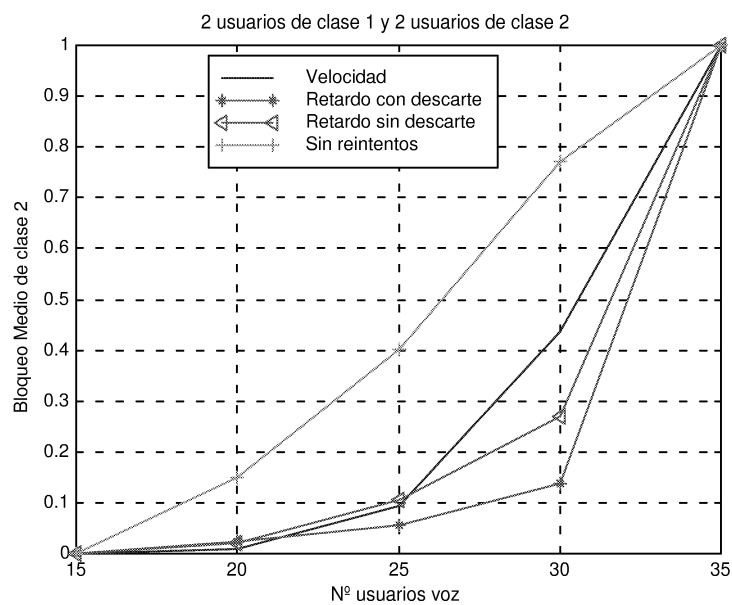


Figura 6.31: Bloqueo medio de la clase 2 en un sistema con 2 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3)

Bloqueo medio					
		2 de clase 1 y 2 de clase 2		4 de clase 1 y 4 de clase 2	
Clase	Planificador	25 voz	30 voz	25 voz	30 voz
1	Velocidad	0.06	0.41	0.3	0.64
	Retardo con descarte	0.19	0.84	0.4	0.85
	Retardo sin descarte	0.29	0.92	0.5	0.95
	Sin reintentos	0.29	0.99	0.53	0.99
2	Velocidad	0.09	0.43	0.3	0.6
	Retardo con descarte	0.05	0.14	0.07	0.13
	Retardo sin descarte	0.1	0.27	0.22	0.48
	Sin reintentos	0.4	0.77	0.51	0.78

Tabla 6.10: Bloqueo medio de las clases 1 y 2 en un sistema integrado con usuarios de voz y el número de usuarios de datos de cada clase indicados en la tabla

para la clase 2, mucho mejores que la opción sin reintentos. En cambio, si se aumenta la carga el planificador de retardo con descarte se revela como el mejor, seguido por el de retardo sin descarte con una tasa de bloqueo tres veces mayor. El planificador de velocidad adaptativo obtiene una tasa de bloqueo tres veces mayor que la del planificador de retardo sin reintentos y finalmente se encuentra la opción sin reintentos con un bloqueo mucho mayor. Los datos muestran que el bloqueo de la clase 2 se ve menos afectado por el incremento de usuarios de voz que el de la clase 1, debido a que esta clase es menos restrictiva. Además se aprecia que con el planificador de velocidad adaptativo los bloqueos de las clases 1 y 2 son similares, aumentando las diferencias con el resto de planificadores. Las figuras 6.32 y 6.33 muestran el bloqueo medio en un escenario donde el número de usuarios de cada clase se aumenta hasta 4. Los datos muestran el crecimiento del bloqueo para ambas clases, que se hace más evidente en las situaciones de baja carga.

- *Efecto de la integración de diversas clases de datos sobre la probabilidad de retardo (prueba 3)*

Las figuras 6.34 y 6.35 muestran la probabilidad de retardo de las clases 1 y 2 respectivamente de 1 a 20 tramas que es el retardo máximo en un escenario con 25 usuarios de voz, 4 usuarios de la clase 1 y 4 usuarios de la clase 2. En cuanto a la clase 1 se aprecia que la probabilidad está mucho más distribuida en el planificador adaptativo de velocidad que en los demás. En el caso del planificador de retardo cuando hay descarte los retardos más probables son de 1 a 4 tramas, mientras que si no se considera descarte los más probables son de 1 a 10 tramas. Estos aspectos se aprecian con más claridad en la ampliación de las curvas que se presenta en la figura 6.35. En el caso de no aceptar reintentos, los únicos estados admisibles son el retardo de 1 trama o las pérdidas, es decir retardos de 20 tramas.

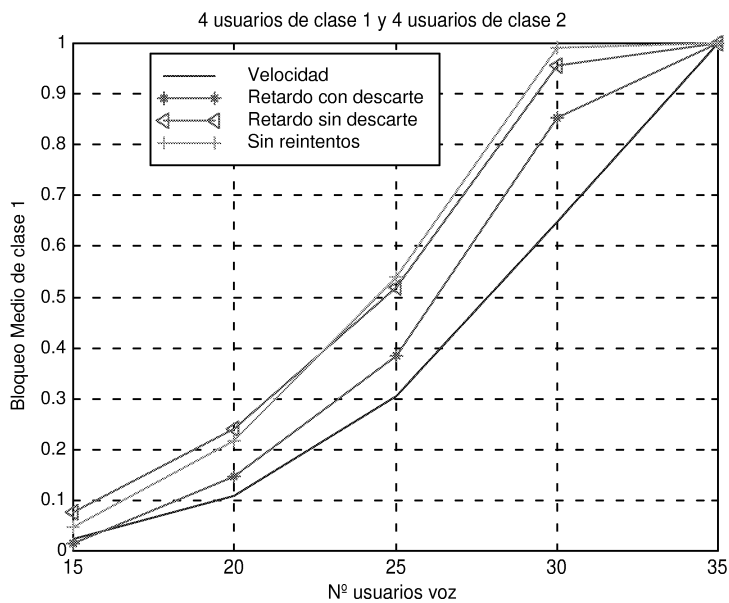


Figura 6.32: Bloqueo medio de la clase 1 en un sistema con 4 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3)

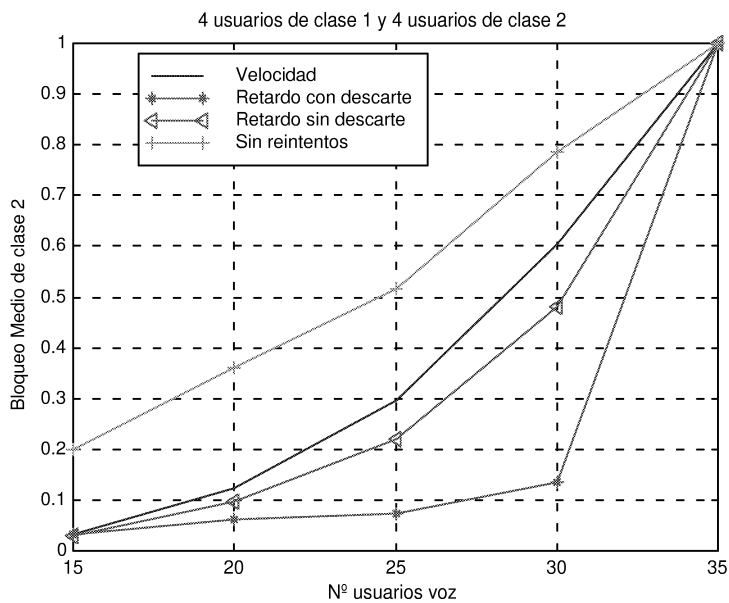


Figura 6.33: Bloqueo medio de la clase 2 en un sistema con 4 usuarios de cada una de las dos clases de datos existentes (prueba 3)

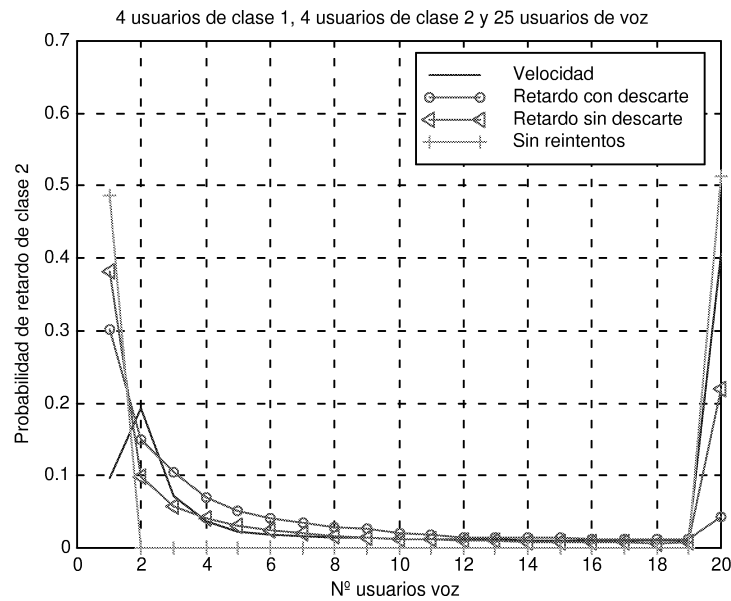


Figura 6.34: Probabilidad de retardo de la clase 1 en un sistema con 25 usuarios de voz, 4 usuarios de la clase 1 y 4 usuarios de la clase 2 (prueba 3)

Probabilidad de retardo			
Clase	Planificador	1 trama	20 tramas
1	Velocidad	0.1	0.43
	Retardo con descarte	0.4	0.37
	Retardo sin descarte	0.2	0.52
	Sin reintentos	0.47	0.53
2	Velocidad	0.1	0.4
	Retardo con descarte	0.3	0.05
	Retardo sin descarte	0.38	0.22
	Sin reintentos	0.48	0.52

Tabla 6.11: Probabilidad de retardo de las clases 1 y 2 en un sistema con 25 usuarios de voz, 4 usuarios de la clase 1 y 4 usuarios de la clase 2

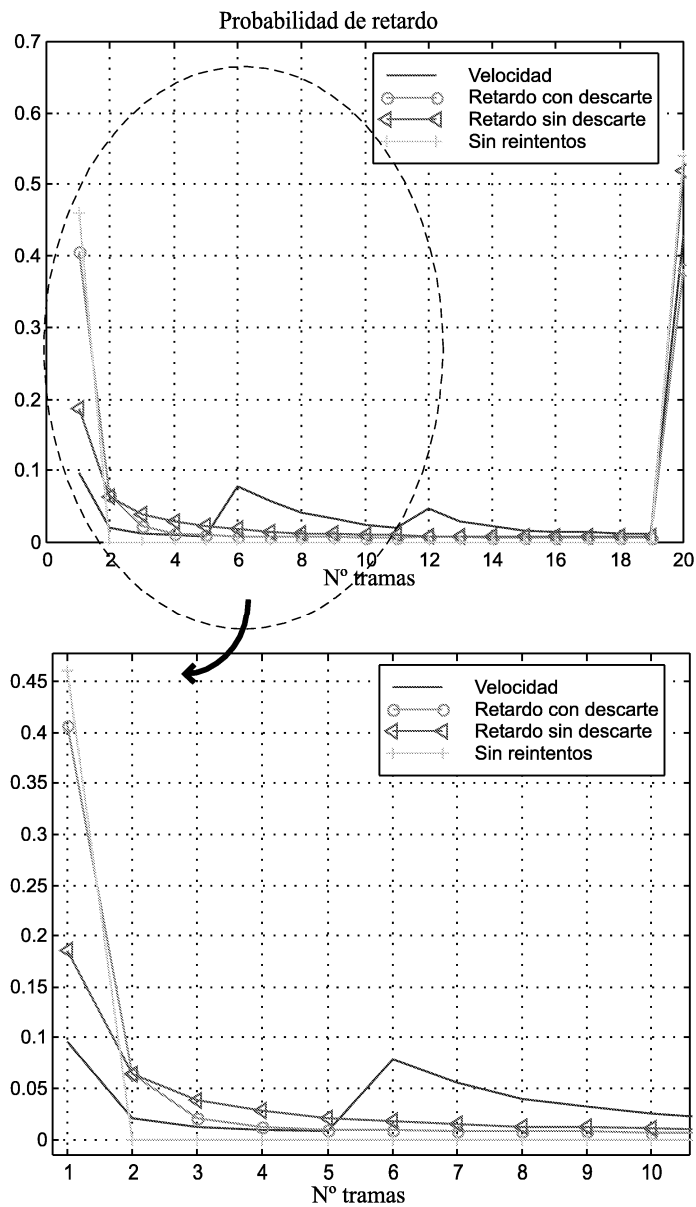


Figura 6.35: Probabilidad de retardo de la clase 2 en un sistema con 25 usuarios de voz, 4 usuarios de la clase 1 y 4 usuarios de la clase 2 (prueba 3)

Para la clase 2, en cambio, el planificador de velocidad obtiene probabilidades de retardo más concentradas que en el caso de la clase 1 (de 1 a 10 tramas). Pero es el planificador de retardo con y sin reintentos el que consigue probabilidades de retardo más distribuidas de 1 a 12 tramas. Las probabilidades de retardo de 1 y 20 tramas para ambas clases se indican en la tabla 6.11. Con estos datos se aprecia como el planificador de retardo obtiene probabilidades de retardo mucho más distribuidas para la clase 2 que para la clase 1. La ventaja del planificador adaptativo de velocidad es que obtiene retardos más distribuidos de 1 a 20 tramas, pero a costa de una menor probabilidad de un retardo mínimo de 1 trama.

6.5.5 Conclusiones

El análisis realizado con un sólo usuario de datos muestra el incremento de la probabilidad de *handoff* a medida que el usuario se acerca al borde de la celda, siendo en este caso igualmente probable la conexión a cualquiera de las dos celdas vecinas. Además, estas simulaciones iniciales muestran la importancia de la estrategia de gestión de peticiones, que consigue desplazar el punto de congestión del sistema maximizando la capacidad del mismo. El algoritmo de velocidad simulado optimiza la capacidad por su carácter dinámico, disminuye la probabilidad de transmisión a tasas elevadas a medida que el sistema se acerca al punto de congestión, de esta manera se disminuyen las interferencias generadas por los usuarios de datos. Las pruebas relativas a diversos esquemas de reintentos y a distintos perfiles de movilidad del usuario muestran resultados muy similares, dado que la congestión del sistema no se debe al esquema de acceso ni a la movilidad, sino al nivel de interferencias alcanzado.

Las simulaciones con diversos usuarios de datos de la misma clase muestran la estrecha dependencia del bloqueo con la carga de datos. Esto se debe al elevado nivel de interferencias generado por los usuarios de datos de alta tasa y estrictos requisitos de QoS. Además se pone de manifiesto que la influencia del factor de actividad sobre los parámetros de QoS es mayor cuanto menor sea la carga del sistema. La comparativa de las estrategias de gestión de peticiones basadas en el retardo y en la adaptación de la velocidad de transmisión muestra las mejores prestaciones de la segunda. Si bien, esta primera estrategia tiene la ventaja de la simplicidad y se puede aplicar en entornos donde la carga no sea muy elevada, consiguiendo en estos casos retardos menores que la técnica adaptativa.

La gestión de dos clases de datos con prioridad se ha llevado a cabo considerando la opción de descartar las transmisiones de la clase menos prioritaria para dar cabida a las de la más prioritaria. En este caso se han observado prestaciones muy similares entre la estrategia adaptativa de velocidad y el algoritmo de retardo con descarte. Estas dos técnicas son las mejores alternativas en lo que se refiere a la clase más prioritaria, en la que se centra nuestro interés.

6.6 Conclusiones finales

La principal conclusión que se puede extraer de este estudio es que la aplicación de controles de admisión junto con técnicas de gestión de peticiones maximiza la capacidad del sistema, especialmente si estos controles tienen carácter adaptativo y se adaptan a las fluctuaciones del entorno.

En la primera fase de este trabajo se ha efectuado un estudio analítico para analizar dos controles de admisión distintos, basados en el número de usuarios y en el nivel de interferencias, en un sistema integrado por los servicios de voz y datos. Los resultados obtenidos revelan la dificultad de establecer umbrales en estos sistemas multiservicio que cumplan tanto los requisitos de QoS como de GoS, frente a las sencillas reglas propuestas en [?] para un sistema sólo voz. Además la consideración de servicios distintos muestra la fuerte sensibilidad de los parámetros de GoS y QoS respecto al servicio más restrictivo, los datos, que, debido a sus requisitos de elevada tasa y SIR, generan un nivel de interferencia mucho mayor que la voz. Finalmente, cabe destacar que la simplicidad del control basado en el número de usuarios ocasiona que no se aproveche al máximo la capacidad del sistema porque establece un umbral muy conservativo. Por este motivo obtiene probabilidades de pérdidas menores que el control basado en el nivel de interferencias, cuyo umbral optimiza la capacidad y consigue menores probabilidades de bloqueo que el anterior.

Estas recomendaciones nos sirven como primera aproximación, pero en este estudio se ha considerado una distribución uniforme de usuarios de voz y datos para que sea tratable analíticamente. Esta simplificación es menos cierta cuanto menor sea el número de usuarios permitidos en la celda, es decir, cuanto más restrictivos sean los requisitos de los usuarios de datos. Por este motivo, en una segunda fase se ha realizado un estudio por simulación que permite eliminar esta simplificación y estudiar la interferencia de los usuarios de datos en función de la distancia al centro de la celda. Este estudio se centra en el análisis de un control de admisión adaptativo basado en el nivel de interferencias, que ajusta el umbral de admisión dinámicamente mediante medidas periódicas de los niveles de interferencia intracelda e intercelda. A este control, basado en [?] y [?], se le han añadido una serie de características que aumentan su complejidad, pero cuyo estudio es abordable mediante simulación. Estas aportaciones son la consideración de un sistema integrado por diversas clases de datos de alta tasa, un modelado gaussiano de la interferencia intercelda de aquellas clases de servicios con distribución uniforme de usuarios, como la voz, el aspecto de la movilidad de los usuarios y la implementación de técnicas de gestión de peticiones para optimizar el control de acceso. Dentro de la multitud de técnicas de gestión existentes, la primera disciplina propuesta es una combinación de criterios de retardo y longitud de cola y la segunda se caracteriza por su carácter dinámico, por lo que es especialmente indicada para un sistema CDMA multiservicio con fluctuaciones en el nivel de interferencia. La técnica

adaptativa propuesta modifica la velocidad de transmisión del usuario según las condiciones de carga del sistema. Además todas las pruebas se han efectuado considerando un sistema UTRA de 3G y se ha implementado la problemática de acceso al canal común RACH, lo que supone una aportación adicional.

Las simulaciones muestran la importancia de la estrategia de gestión de peticiones, que consigue maximizar la capacidad del sistema. Los resultados obtenidos indican que la principal causa de congestión es el nivel de interferencias en el sistema, por lo que este punto se ve poco afectado por aspectos como el esquema de acceso o la movilidad. En cuanto a las prestaciones de estas estrategias, la técnica adaptativa de velocidad de transmisión presenta mejores prestaciones que la disciplina basada en el retardo y la longitud de la cola, también en el caso de aplicar gestión de prioridades para diversas clases de datos. En cambio, la estrategia basada en el retardo tiene la ventaja de la simplicidad y se puede aplicar en entornos donde la carga no sea muy elevada, consiguiendo en estos casos retardos menores que la técnica adaptativa. La gestión de dos clases de datos con prioridad nos revela prestaciones muy similares entre la estrategia adaptativa de velocidad y el algoritmo de retardo si se aplica descarte, es decir se eliminan las transmisiones en curso de la clase menos prioritaria para dar cabida a las nuevas peticiones de la clase más prioritaria. Estas dos técnicas son las mejores alternativas en lo que se refiere a la clase más prioritaria, en la que se centra nuestro interés.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas futuras

7.1 Conclusiones

El objetivo de esta tesis ha sido el estudio de las estrategias de control de acceso en un sistema UTRA multiservicio. A tal efecto se ha comenzado por efectuar un análisis de capacidad enfocado hacia el posterior desarrollo de técnicas de admisión. Una vez evaluadas las limitaciones de interferencia, se han estudiado las restricciones impuestas al sistema por el protocolo de acceso al canal común. Finalmente se ha realizado un análisis de controles de admisión fijos y adaptativos, funcionando conjuntamente con técnicas de gestión de recursos para optimizar las prestaciones del sistema.

Para efectuar el estudio completo propuesto como objetivo de esta tesis ha sido necesaria una intensa labor de investigación para elaborar un estado del arte sobre todas las cuestiones de interés, así como un importante análisis de los fundamentos de los sistemas CDMA, especialmente los de tercera generación, y de las técnicas de control de acceso.

En el análisis de capacidad efectuado en primer lugar se han tomado como punto de partida dos consideraciones fundamentales, la primera de ellas ha sido la búsqueda de una técnica de cálculo apropiada para su uso en la implementación de controles de admisión, y la segunda, la característica de multiservicio del sistema UTRA estudiado. Por este motivo se ha propuesto un método iterativo sencillo que simplifica la estimación de la capacidad en un sistema multiservicio como UTRA. Este método nos permite conocer la dependencia de la capacidad con las características de los distintos servicios, así como con el medio de propagación [?].

El modelo de sistema considerado en este estudio es sencillo y cuenta con ciertas simplificaciones para acotar su complejidad analítica. Pero se ha prestado especial atención al modelado de la interferencia intercelda dada su fuerte influencia en la capacidad. Por este motivo no se ha empleado el factor f de interferencia intercelda, que da lugar a límites muy optimistas de

capacidad, tal como se ha demostrado en esta tesis. Se ha recurrido a un modelado de la interferencia intercelda mediante las distribuciones gaussiana y gamma, cuyos parámetros estadísticos media y varianza dependen del número de usuarios, de las características de los servicios (factor de actividad) y del entorno de propagación. Para adaptar estos parámetros estadísticos a los diversos entornos se ha desarrollado una herramienta analítica para la caracterización de la interferencia intercelda [?]. Los resultados obtenidos con esta herramienta muestran la similitud entre las distribuciones gaussiana y gamma propuestas para el modelado de esta interferencia. La caracterización de la interferencia intercelda en sistemas integrados simplifica en gran manera el estudio de sistemas multicelda, en los que la atención se podrá centrar sólo en la celda de interés.

El estudio de la capacidad en sistemas CDMA multiservicio es una estimación de los niveles de interferencia generados por las distintas clases en función de sus requerimientos. Con las simplificaciones efectuadas en nuestro modelo estas diferencias de requisitos entre clases de QoS se traducen en relaciones conocidas entre niveles de potencia. Considerando estas relaciones, los resultados obtenidos revelan la linealidad de las fronteras de admisión en sistemas multiservicio, así como la dependencia de las mismas con los parámetros factor de actividad, tasa de bit y SIR característicos de los servicios. Además se aprecia la gran importancia del medio de propagación, debido a su efecto sobre la interferencia intercelda, y la necesidad de acotar las imperfecciones en el control de potencia para evitar una degradación excesiva de la capacidad. Este estudio nos ha revelado las claves para un primer dimensionado de un sistema 3G como UTRA.

Para analizar las limitaciones impuestas al sistema UTRA multiservicio por el protocolo de acceso al canal común se han evaluado dos protocolos MAC: ALOHA ranurado (recomendado en el estándar UTRA) e ISMA. Además se ha tenido en consideración el efecto sobre el tiempo de acceso de la elección de mecanismos de transmisión adecuados para los distintos servicios. Para analizar estas restricciones se ha desarrollado un simulador que permite modelar el sistema UTRA de forma suficientemente detallada para considerar todos los aspectos mencionados [?]. La comparativa de estos protocolos revela que con ISMA se obtiene una mejora en el retardo de acceso al sistema con respecto a ALOHA ranurado, más apreciable cuanto mayor sea la carga del sistema. Si bien, se concluye que en los diferentes escenarios analizados con diversos tipos de servicios, la simplicidad del protocolo ALOHA ranurado es una buena razón para la elección del mismo, dado que para la máxima interferencia permitida por los requisitos de QoS de los servicios, los retardos medidos son admisibles. Además este análisis nos permite constatar que el retardo de acceso de los servicios con conmutación de paquetes presenta una mayor dependencia con el protocolo MAC que los servicios en tiempo real con conmutación de circuitos.

El estudio del retardo de acceso en un sistema UTRA con los protocolos mencionados nos revela que la limitación del sistema más importante es el máximo nivel de interferencias [?]. Esta

conclusión subraya la necesidad de implementar controles para limitar el acceso de los usuarios al sistema si se quieren ofrecer garantías de calidad. En esta tesis se ha analizado un control de acceso muy simple, basado en la asignación de probabilidades de acceso decrecientes a medida que aumenta la carga del sistema. Además se ha realizado una gestión de prioridades de las diversas clases soportadas. Los resultados obtenidos revelan que este método no es eficiente, dado que cuando la carga supera cierto umbral aumentan mucho los retardos de acceso, y no se consigue limitar el nivel de interferencias. Este análisis nos permite concluir la necesidad de un control de admisión centralizado, de mayor complejidad, para ofrecer garantías de QoS.

En lo que respecta el estudio de controles de admisión, se han evaluado dos tipos, aquellos que establecen un umbral de admisión fijo y los adaptativos, que modifican el umbral dinámicamente según el estado del sistema. Este segundo tipo requiere una mayor complejidad pero es especialmente adecuado para sistemas multiservicio donde existe una gran fluctuación del nivel de interferencia. Dentro de los CAC no adaptativos, se ha estudiado una primera clase muy simple con un umbral basado en el número de usuarios y una segunda clase de mayor complejidad basada en el nivel de interferencias.

El análisis de las dos alternativas de CAC fijos muestra la gran dificultad en sistemas multiservicio como UTRA para establecer umbrales de admisión que cumplan tanto los requisitos de QoS como de GoS. Además indica la fuerte sensibilidad de estos parámetros de GoS y QoS respecto a las clases de servicio más restrictivas, dado que generan los niveles de interferencia más elevados. Para obtener estos resultados se ha desarrollado una herramienta analítica que estima los parámetros de QoS y GoS en función de los umbrales de admisión fijados [?].

El estudio más global sobre el sistema UTRA multiservicio se realiza combinando el control de admisión adaptativo, especialmente adecuado para este sistema, con diversas técnicas de gestión de recursos. La complejidad de este CAC es muy elevada dado que necesita medidas periódicas de la carga del canal y la interferencia existente para tomar sus decisiones. El CAC estudiado es el denominado LIDA [?], [?], al que se le han añadido ciertas aportaciones como la consideración de un sistema integrado por diversas clases de datos de alta tasa, el modelado gaussiano de la interferencia intercelda de aquellas clases de servicios con distribución uniforme de usuarios, como la voz, el aspecto de la movilidad de los usuarios y la implementación de técnicas de gestión de peticiones para optimizar el control de acceso. Además se ha implementado la problemática de acceso al canal común RACH para considerar su efecto sobre nuestros controles.

En esta tesis se han propuesto dos técnicas de gestión, la primera de ellas está basada en la combinación de los criterios de retardo y longitud de cola, y la segunda se caracteriza por su

carácter dinámico, por lo que es especialmente indicada en sistemas CDMA multiservicio. La técnica adaptativa propuesta adapta la velocidad de transmisión del usuario a las condiciones de carga del sistema.

Para efectuar el estudio conjunto de estos controles de acceso ha sido necesario implementar un simulador para modelar un sistema con flujos de información variables sobre cuyas medidas se basan las decisiones de las técnicas adaptativas. Los resultados obtenidos constatan la optimización de la capacidad que se obtiene con el uso combinado de técnicas de admisión y gestión de recursos. Además señalan las mejores prestaciones del gestor de recursos adaptativo, aunque la disciplina basada en el retardo tiene la ventaja de la simplicidad y se puede aplicar en entornos donde la carga no sea muy elevada, consiguiendo en estos casos retardos menores que la técnica adaptativa. La gestión de dos clases de datos con prioridad nos revela prestaciones muy similares entre las estrategias mencionadas si se aplica descarte, es decir se eliminan las transmisiones en curso de la clase menos prioritaria para dar cabida a las nuevas peticiones de la clase más prioritaria. Todos estos datos concluyen la necesidad del uso combinado de los controles de admisión y gestión de recursos para optimizar las prestaciones de un sistema UTRA multiservicio.

7.2 Líneas futuras

Las posibles mejoras y líneas de trabajo con que se pueden continuar este estudio podrían ser:

- *Variación de las condiciones iniciales en la caracterización de la interferencia intercelda*
El estudio de los parámetros característicos de la interferencia intercelda se puede realizar de forma más exhaustiva, considerando aspectos como: 1) Diversos tipos de distribuciones de usuarios en las celdas. 2) Modelado del factor de actividad de los usuarios, de modo que no se emplee el factor de actividad medio, sino una caracterización más exacta del mismo. 3) La influencia de las imperfecciones en el control de potencia sobre los parámetros media y varianza de la interferencia intercelda. Si bien es verdad que será necesario esperar a la implantación de los sistemas 3G, para efectuar las medidas oportunas sobre el sistema real, que nos permitan enriquecer el modelo de interferencia intercelda con las características del tráfico que domine estas redes.
- *Análisis detallado de la incidencia de las imperfecciones del control de potencia sobre los umbrales de admisión*

La caracterización de los umbrales de admisión realizada en este trabajo se podría mejorar y ampliar en lo respectivo a las imperfecciones en el control de potencia, analizando con más detalle el efecto de estos errores sobre los máximos niveles de interferencia permitidos

en los distintos entornos multiservicio. Un aspecto interesante sería evaluar el efecto de las limitaciones de potencia de un terminal móvil, lo que dificulta los mecanismos para ofrecer garantías de QoS.

- *Modelos de tráfico*

Sería interesante analizar en detalle las características de los diversos tipos de tráfico, especialmente los nuevos servicios de datos, para desarrollar modelos que los representen, efectuando una comparativa de los ya propuestos.

- *Comparativa de controles de acceso*

Otra posible línea de investigación sería la comparativa de las numerosas propuestas de protocolos de acceso, para posicionar mejor al ALOHA ranurado, seleccionado para UTRA, y aportarle ciertas características añadidas que mejoren sus prestaciones para determinadas clases de tráfico. También se podría realizar una comparativa más extensa de las diversas propuestas de controles de admisión y disciplinas de servicio para profundizar más en la idoneidad de cada una de ellas según los patrones de tráfico cursados. En lo que se refiere a algoritmos de admisión se podrían evaluar diversas técnicas de predicción de potencia para evitar degradaciones de la calidad de QoS. Entre estas técnicas se puede pensar en la aplicación de redes neuronales, aspecto que constituye una línea de investigación importante en el Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga.

- *Medio de propagación*

Una línea interesante es considerar un modelo de propagación más detallado que incluya los desvanecimientos rápidos debidos al multitrayecto. Además con este modelo se podrían analizar las repercusiones en la capacidad de las imperfecciones en el control de potencia. Otro aspecto interesante sería efectuar una caracterización detallada del canal radio, en los sentidos ascendente y descendente. Un posible modelo de canal es el basado en cadenas de Markov en el que existen diversos estados caracterizados por probabilidades de pérdidas distintas. Para corregir las pérdidas debidas a estados críticos del canal se podrían estudiar protocolos de control de errores (ARQ, FEC, ...), analizando su impacto particular sobre diversos tipos de tráfico. Otra cuestión de interés sería evaluar la mejora en las prestaciones de UTRA mediante el uso de antenas adaptativas o receptores multiusuario.

Apéndice A

Modelado gaussiano de la interferencia intercelda

El clásico modelado gaussiano de la interferencia intercelda, basado en [?], considera un sistema homogéneo con distribución uniforme de usuarios. Asume que el control de potencia es perfecto, con lo que la potencia recibida en la estación base de todos los usuarios locales es P , y emplea un modelo de propagación que considera la atenuación con la distancia (n) y el desvanecimiento lento debido a obstáculos ξ con distribución lognormal (*shadowing*). La interferencia intercelda generada por un móvil i en una celda vecina, situado a distancia r_m de la estación base de su celda y a distancia r_o de la estación base de la celda local que se está estudiando (figura A.1) es igual a (ecuación 4.7):

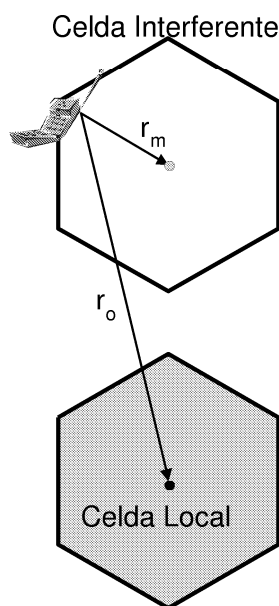


Figura A.1: Móvil situado en una celda interferente

$$\frac{P_{r_o}}{P_{r_m}} = \frac{P_t \cdot r_o^{-n} \cdot 10^{\frac{\xi_o}{10}}}{P_t \cdot r_m^{-n} \cdot 10^{\frac{\xi_m}{10}}} \quad P_{r_m} = P \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{P_{r_o}}{P} = \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^n \cdot 10^{\frac{\xi_o - \xi_m}{10}} \quad (\text{A.2})$$

donde el primer factor se debe a la atenuación causada con la distancia y el segundo es el efecto del control de potencia para compensar la atenuación en la celda local del móvil vecino interferente. Integrando esta interferencia se obtiene una variable gaussiana normalizada Ψ con los siguientes parámetros estadísticos [?]:

$$E(\Psi) = \alpha \cdot \int \int \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^n \cdot f\left(\frac{r_m}{r_o}\right) \cdot \rho \cdot dA \quad (\text{A.3})$$

$$Var(\Psi) = \alpha \cdot \int \int \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^{2n} \cdot \left\{ g\left(\frac{r_m}{r_o}\right) - \alpha \cdot f\left(\frac{r_m}{r_o}\right) \right\} \cdot \rho \cdot dA \quad (\text{A.4})$$

siendo las funciones $f\left(\frac{r_m}{r_o}\right)$ y $g\left(\frac{r_m}{r_o}\right)$ iguales a:

$$f\left(\frac{r_m}{r_o}\right) = \exp\left[\left(\frac{\sigma_\xi \ln 10}{10}\right)^2\right] \left\{ 1 - Q\left[\frac{40}{\sqrt{2\sigma_\xi^2}} \cdot \log_{10}\left(\frac{r_o}{r_m}\right) - \sqrt{2\sigma_\xi^2} \frac{\ln 10}{10}\right] \right\} \quad (\text{A.5})$$

$$g\left(\frac{r_m}{r_o}\right) = \exp\left[\left(\frac{\sigma_\xi \ln 10}{5}\right)^2\right] \left\{ 1 - Q\left[\frac{40}{\sqrt{2\sigma_\xi^2}} \cdot \log_{10}\left(\frac{r_o}{r_m}\right) - \sqrt{2\sigma_\xi^2} \frac{\ln 10}{5}\right] \right\} \quad (\text{A.6})$$

donde α es el factor de actividad del servicio, $\rho = \frac{2N_s}{\sqrt{3}}$ es la densidad de usuarios con N_s igual al n° de usuarios por sector y radio normalizado a la unidad y dA es el diferencial de área como variable de integración. De las expresiones de la media y la varianza se deduce que los valores de estos parámetros dependen tanto de las características del medio de propagación (n y ξ) como del factor de actividad medio del tipo de servicio y el número de usuarios.

Si se consideran imperfecciones en el control de potencia (variable χ), la ecuación A.1 de la interferencia intercelda se convierte en (figura A.1):

$$\frac{P_{r_o}}{P_{r_m}} = \frac{P_t \cdot r_o^{-n} \cdot 10^{\frac{\xi_o}{10}} \cdot 10^{\frac{\chi_o}{10}}}{P_t \cdot r_m^{-n} \cdot 10^{\frac{\xi_m}{10}} \cdot 10^{\frac{\chi_m}{10}}} \quad (\text{A.7})$$

Suponiendo que las imperfecciones de potencia no afectan demasiado al nivel de potencia recibido en la estación base de los usuarios locales, es decir $P_{r_m} \simeq P$, pero sí al nivel de potencia recibido de los usuarios situados en las celdas vecinas, se llega a:

$$\frac{P_{r_o}}{P} \simeq \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^n \cdot \frac{10^{\frac{\xi_o + \chi_o}{10}}}{10^{\frac{\xi_m + \chi_m}{10}}} \quad (\text{A.8})$$

En este caso se define una nueva variable aleatoria gaussiana $\varphi = \xi + \chi$. La media de esta variable φ es la suma de las medias de las variables ξ y χ , es decir 0, y la varianza es la suma de

las varianzas. De esta forma la ecuación anterior se puede expresar de forma similar a la ecuación del control perfecto de potencia (ecuación 4.7), con la diferencia de que la variable gaussiana φ simboliza los efectos del desvanecimiento lento y aproxima las imperfecciones del control de potencia:

$$\frac{P_{r_o}}{P} \simeq \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^n \cdot 10^{\frac{\varphi_o - \varphi_m}{10}} \quad (\text{A.9})$$

Con estas consideraciones, la interferencia intercelda se puede aproximar por una variable gaussiana cuyos parámetros estadísticos media y varianza tienen las expresiones anteriores (A.3, A.4).

Apéndice B

Caracterización de la interferencia intercelda

En este apéndice se describe el método analítico desarrollado, basado en la geometría del sistema de celdas hexagonales, que permite caracterizar la media y la varianza de la interferencia intercelda en función de las características del servicio (factor de actividad) y el tipo de medio de propagación. En la figura B.1 se aprecia un sector de un sistema multicelda con 3 sectores sobre el que vamos a realizar nuestro estudio, analizando la contribución de cada una de las celdas vecinas a la interferencia intercelda. El primer paso ha sido clasificar las celdas en distintos tipos según la distancia de su centro al centro de la celda de referencia. Todas las celdas del mismo tipo contribuyen de igual forma a la interferencia intercelda dado que están a la misma distancia de la celda local. En la figura B.1 se observa que, si numeramos los anillos del sistema partiendo de 1, en cada anillo par aparece un nuevo tipo de celda, que sigue apareciendo en todos los siguientes.

La distancia de una celda vecina de tipo t en el anillo p a la celda de referencia, $r_{t,p}$ se comprueba que cumple la ecuación B.1, donde v es el radio de la celda y las variables t y p indican el tipo de celda y el número de anillo respectivamente, comenzando a numerar por 0 en el caso del tipo de celda y por 1 en el caso de los anillos:

$$r_{t,p} = v \cdot \sqrt{3 \cdot (p \cdot (p - t) + t^2)} \quad (\text{B.1})$$

En un determinado anillo se encuentran presentes las siguientes celdas:

- Tipo 0: 2 celdas
- Otros tipos:
 - 2 celdas si el tipo aparece por primera vez en ese anillo
 - 4 celdas si no es así

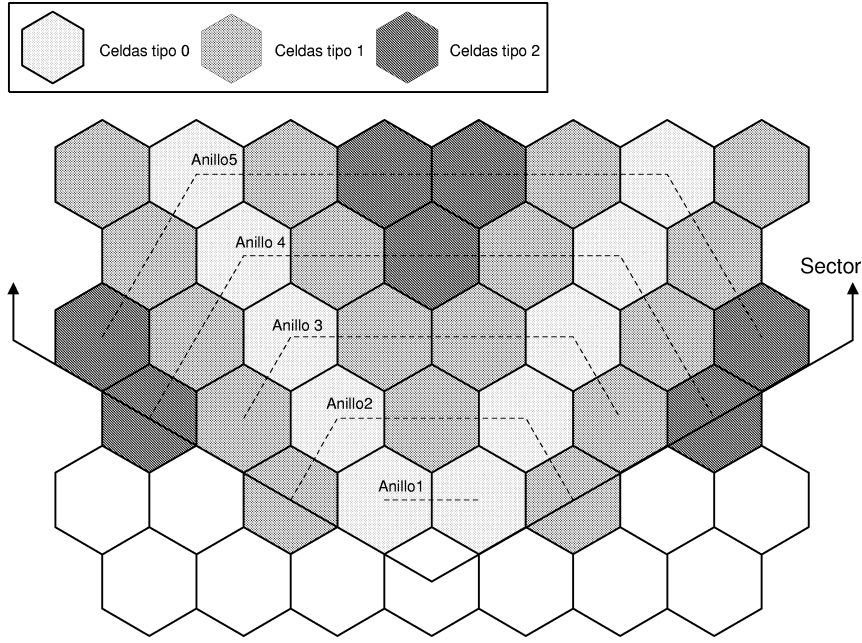


Figura B.1: Sistema de celdas hexagonales

Esta clasificación de celdas es muy útil para estimar los parámetros estadísticos de la interferencia intercelda, dado que en cada anillo sólo es necesario integrar en una celda de cada tipo y sumar las contribuciones de todas las celdas del mismo tipo presentes en el anillo. Por este motivo, la segunda fase en este estudio es desarrollar un método para integrar sobre una sólo celda. En este caso se han usado coordenadas polares, de forma que las integrales de la media y la varianza (ecuaciones A.3, A.4) se pueden expresar así:

$$\iint \Gamma(r_m, r_o) \cdot dA = 2 \cdot \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{r_m=0}^{r_{max}} \Gamma(r_m, r_o) \cdot r_m \cdot dr_m d\theta \quad (\text{B.2})$$

donde $\Gamma(r_m, r_o)$ representa las funciones dentro de la integral relacionadas con estos dos parámetros. Las variables de integración son el ángulo θ y la distancia r_m , que para cada ángulo puede variar de 0 a un valor máximo (figura B.2).

El primer cálculo efectuado es el valor máximo de r_m para cada ángulo θ . En la figura B.2 se pueden comprobar las siguientes ecuaciones:

$$b = 120 - \theta \quad (\text{B.3})$$

$$v \cdot \text{sen}(\theta) = h \cdot \text{sen}(b) \quad (\text{B.4})$$

$$r_{max} = v \cdot \text{cos}(\theta) + h \cdot \text{cos}(b) \quad (\text{B.5})$$

$$(\text{B.6})$$

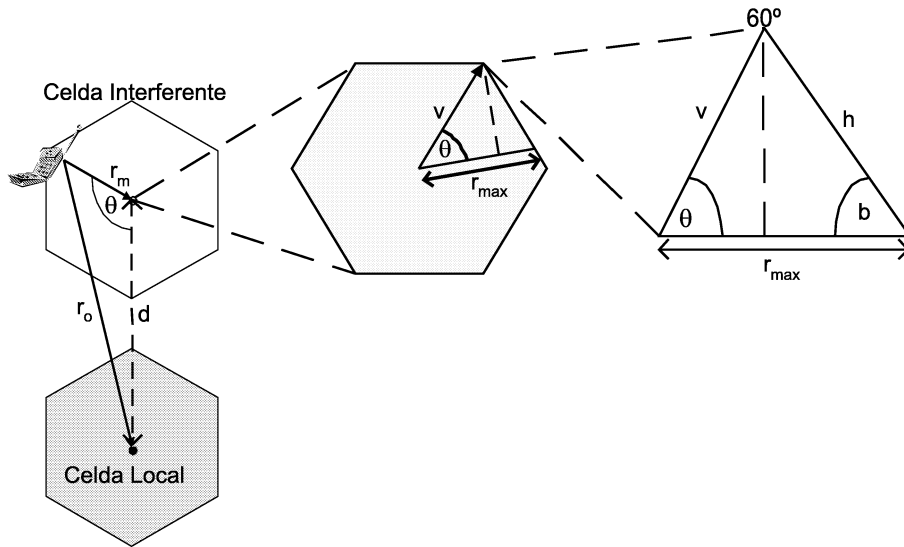


Figura B.2: Móvil en celda interferente. Variables de integración θ y r_m para estimar los parámetros estadísticos de la interferencia intercelda

de donde se despeja:

$$r_{max} = v \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3} \cdot \cos(\theta) + \sin(\theta)} \quad (\text{B.7})$$

El segundo cálculo necesario para resolver la integral es expresar r_o en función de la variable de integración r_m . Observando la citada figura B.2 se comprueba que:

$$r_o^2 = r_m^2 + d^2 - 2 \cdot r_m \cdot d \cdot \cos(\theta) \quad (\text{B.8})$$

Para validar este sencillo método de integración se han comparado nuestros resultados con los presentados en [?] y se han obtenido valores muy similares con una desviación estándar de 6.3 dB. Esto es así, porque si bien la desviación estándar se debe expresar en decibelios, parece que el valor de $10^{\frac{8}{10}} = 6.3$ es el usado para los resultados de Gilhousen, como se ha confirmado posteriormente en [?] y [?]. Resolviendo las integrales se observa que las expresiones de la media y varianza de la interferencia intercelda normalizada Ψ son:

$$E(\Psi) = \lambda_{media} \cdot N \quad (\text{B.9})$$

$$Var(\Psi) = \lambda_{var} \cdot N \quad (\text{B.10})$$

$$(\text{B.11})$$

$$\lambda_{media} = \alpha \cdot \Lambda_m \quad (\text{B.12})$$

$$\lambda_{var} \propto \alpha(1 - \alpha) \cdot \Lambda_v \quad (\text{B.13})$$

$$(\text{B.14})$$

donde N es el número de usuarios, α es el factor de actividad medio y λ_{media} y λ_{var} engloban las características del medio de propagación. El parámetro λ_{media} es lineal con α , frente a λ_{var} que es proporcional a $\alpha(1 - \alpha)$.