

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES

*Contribución al diseño de los niveles físico y MAC/LLC de  
redes de comunicaciones móviles orientadas a  
aplicaciones y servicios multimedia*

Roberto Sanz Gil

TESIS DOCTORAL

Santander, 2000

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES

*Contribución al diseño de los niveles físico y MAC/LLC de  
redes de comunicaciones móviles orientadas a  
aplicaciones y servicios multimedia*

Autor: Roberto Sanz Gil

Director: Luis Muñoz Gutiérrez

Tesis Doctoral presentada en la  
Universidad de Cantabria para la obtención del  
Título de Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Santander, Noviembre de 2000

De conformidad con el artículo 9 del Real Decreto 778/1998 de 30 de Abril, y la propuesta de la Comisión de Doctorado, el Excmo. Sr. Rector Magfco. de esta Universidad, ha resuelto nombrar el siguiente Tribunal, a fecha      de      de 2001.

Presidente:    Dr.

Vocal:        Dr.

Vocal:        Dr.

Vocal:        Dr.

Secretario:    Dr.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis Doctoral el día      de      de 2001.

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

## **Certificado del Director de Tesis**

**D. Luis Muñoz Gutiérrez**, Profesor Titular de Universidad en el Área de Telemática del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria.

HACE CONSTAR:

Que la tesis titulada **“Contribución al Diseño de los Niveles Físico y MAC/LLC de Redes de Comunicaciones Móviles Orientadas a Aplicaciones y Servicios Multimedia”** presentada por Roberto Sanz Gil para optar al título de Doctor Ingeniero de Telecomunicación ha sido realizada en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria y reúne las condiciones exigidas a los trabajos de Doctorado.

Santander, Noviembre de 2000

Fdo.: Luis Muñoz Gutiérrez

A mi madre, mi hermana y mi esposa,  
las mujeres que han marcado mi vida

A mi padre, que el destino le ha otorgado  
la posibilidad de verme convertido en doctor

## AGRADECIMIENTOS

---

Alcanzado este punto, al que no ha costado poco llegar, he de demostrar mi agradecimiento, aunque sea tan sólo mencionándolas en este apartado de la tesis, a todas las personas que de una manera u otra han hecho que estas letras aparezcan impresas en este documento.

En primer lugar, he de expresar mi gratitud hacia mi director de tesis, Luis Muñoz, sin cuyo empuje, ánimo y apoyo durante todos estos años no hubiera sido posible la finalización de este trabajo. Mis más sinceras gracias.

Por supuesto, he de agradecerles a todos mis colegas (y sin embargo compañeros) del Grupo de Ingeniería Telemática su paciencia y compañía, no sólo a lo largo de la elaboración de la tesis, sino desde mis comienzos laborales en esta escuela. Marta, Klaus, Jota (ponerte J me parecía demasiado simple para ti), Alberto, muchas gracias a todos.

Tampoco me olvido de todos los becarios y proyectandos que han pasado por el departamento en este tiempo, especialmente a los más recientes, pues ellos son los que más han sufrido la recta final de esta tesis. A todos ellos quiero agradecerles su apoyo y ánimos recibidos. Johnny, ¡por fin la he terminado!

Y por último, pero no por ello menos importante, quiero agradecer a mi familia toda la paciencia que ha tenido conmigo, pues ellos son los que me han aguantado de verdad, especialmente en los malos momentos, sacrificando muchas veces sus quehaceres por culpa de esta tesis y de un servidor. Soy consciente, desgraciadamente, de que nunca podré recompensaros por todo ello.

## RESUMEN

---

Esta tesis tiene como objetivo final la propuesta de un protocolo de acceso al medio imbricado con los parámetros de nivel físico que dan soporte a dicho protocolo. Puesto que la propuesta se basa en un esquema TDMA, se eligen como base del análisis los sistemas de segunda generación GSM, TETRA y DECT, a partir de los cuales se extrapolan determinados parámetros a fin de sintonizarlos con los sistemas de tercera generación en su especificación TDMA.

Para ello, en primer lugar, se realiza una evaluación de los sistemas mencionados a nivel físico obteniendo curvas de tasa de error en función del modelo de canal de propagación y de la técnica de compensación implementada en el receptor. Para esta última, se utilizan dos soluciones diferentes: ecualizadores implementados sobre filtros transversales por un lado, y antenas adaptativas por otro. Los algoritmos de ecualización evaluados abarcan desde los más sencillos como son LMS o RLS hasta algoritmos bidireccionales sobre ecualizadores DFE. La elección de una u otra opción condicionará fuertemente el diseño del protocolo de acceso propuesto en el subnivel MAC.

Puesto que la opción que mejores resultados arroja a nivel físico es la de las antenas adaptativas, el diseño del protocolo de acceso al medio está supeditado a la utilización de éstas. Por ello, se ha implementado un sistema basado en acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA) con multiplexación de los enlaces ascendente y descendente según un esquema TDD. El análisis de este protocolo se ha realizado utilizando fuentes de tráfico de distinta naturaleza: CBR para las conexiones de voz y VBR/ABR en el caso de los datos, atendiendo a parámetros como probabilidad de bloqueo y tiempo de acceso para los servicios CBR, y pérdida de paquetes y retardo de acceso para el caso VBR/ABR. El modelo de tráfico CBR utilizado en el caso de la voz sigue un proceso de Poisson, mientras que el tráfico VBR/ABR de datos corresponde a fuentes ON/OFF atendiendo a dos tipos diferentes de modelos: el caso tradicional en el que se sigue un proceso de Poisson, o bien el modelo de tráfico auto-similar regido por distribuciones denominadas heavy-tailed dado que se asemejan más al comportamiento real del tráfico de datos en redes IP. La evaluación de prestaciones del protocolo de acceso propuesto se ha llevado a cabo mediante la simulación de diferentes políticas de servicio, corroboradas para el caso del modelo de Poisson mediante un estudio analítico basado en teoría de colas.

# ABSTRACT

---

This thesis has as final aim the proposal of a medium access protocol (MAC) closely related to the physical layer parameters that support such protocol. As the proposal is based on a TDMA scheme, three representative systems belonging to the second generation of mobile communication systems have been chosen: GSM, TETRA and DECT, which are employed to extract some parameters in order to tune them with the third generation systems in its TDMA specification.

Firstly, such mentioned systems are evaluated at physical layer obtaining bit error rate curves according to the propagation channel model and the compensation technique implemented on the receiver. Two different solutions are utilized: equalizers based on digital filters, on the one hand, and adaptive antennas, on the other. The equalization algorithms evaluated include from the simplest ones like LMS or RLS to bidirectional algorithms over DFE structure. Choosing one or another option will strongly condition the design of the proposed access protocol within the MAC sublayer.

As adaptive antennas is the option that yields the best performance, the design of the medium access protocol is subordinated to their use. Therefore, a system based on TDMA has been implemented, multiplexing both uplink and downlink following a TDD scheme. The protocol analysis has been made using traffic sources of different nature: CBR for voice connections and VBR/ABR in the case of data, attending to parameters like blocking probability and access time for the CBR services, and packet loss and access delay for the VBR/ABR case. The CBR traffic model follows a Poisson process, while VBR/ABR data traffic corresponds to ON/OFF sources managed by two different types of models: the traditional case in which a Poisson process is considered, and the self-similar traffic model ruled by heavy-tailed distributions due to its behavior close to the real traffic in IP networks. The performance evaluation of the proposed access protocol has been made through the simulation of several service policies, corroborated for the case of the Poisson model by means of an analytical study based on queuing theory.



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos .....	1
1.2. Estructura de la tesis .....	2
1.3. Alcance de la tesis .....	3
1.4. Estandarización .....	4
1.5. Estado del arte de las comunicaciones móviles .....	4
1.5.1. Clases de servicios .....	6
1.5.2. Nivel físico .....	8
1.5.3. Técnicas de compartición de recursos radio .....	9

## CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DEL NIVEL FÍSICO

2.1. Introducción .....	13
2.2. Sistemas evaluados .....	13
2.2.1. Sistema GSM .....	15
2.2.2. Sistema DECT .....	16
2.2.3. Sistema TETRA .....	16
2.3. Modelado de canal .....	17
2.4. Consideraciones de propagación en exteriores .....	21
2.4.1. Variación temporal del canal .....	22
2.4.2. Ensanchamiento temporal de la señal .....	24
2.5. Ecuación en sistemas de comunicaciones móviles .....	24
2.6. Antenas adaptativas .....	26
2.6.1. Array lineal .....	26
2.6.2. Array circular .....	27
2.6.3. Array rectangular .....	28

## CAPÍTULO 3. ECUALIZACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES.

### ALGORITMOS Y PRESTACIONES

3.1. Introducción .....	31
3.2. Descripción del sistema .....	31
3.3. Algoritmos lineales .....	32
3.3.1. LMS (Least Mean Square) .....	33
3.3.2. RLS (Recursive Least Square) .....	34
3.3.3. CMA (Constant Modulus Algorithm) .....	35

3.4. Algoritmos no lineales .....	36
3.4.1. Ecuador Realimentado por Decisión (DFE) .....	37
3.4.2. Ecuador ciego .....	38
3.5. Algoritmos bidireccionales .....	40
3.6. Antenas adaptativas .....	42
3.7. Entorno de simulación .....	43
3.8. Evaluación de prestaciones .....	44
3.8.1. GSM .....	44
3.8.2. DECT .....	47
3.8.3. TETRA .....	48
3.9. Conclusiones .....	51

#### **CAPÍTULO 4. INTRODUCCIÓN A LOS PROTOCOLOS DE ACCESO**

4.1. Introducción .....	53
4.2. Estado del arte .....	53
4.2.1. Asignación fija .....	54
4.2.2. Asignación aleatoria .....	55
4.2.3. Asignación dinámica .....	55
4.2.4. Principales protocolos MAC existentes .....	56
4.3. Bases para el diseño del protocolo MAC propuesto .....	57
4.4. Parámetros de evaluación de un protocolo MAC .....	59
4.4.1. Parámetros para tráfico CBR .....	60
4.4.2. Parámetros para tráfico VBR y ABR .....	61
4.5. Modelado de fuentes de tráfico .....	63
4.5.1. Modelado de fuentes CBR .....	64
4.5.2. Modelado de fuentes VBR y ABR .....	65
4.6. Árbol de conexiones virtuales .....	67
4.6.1. Control distribuido en la red fija central .....	68
4.6.2. Implementación .....	70
4.6.3. Control de admisión .....	70

#### **CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL PROTOCOLO MAC PROPUESTO**

5.1. Introducción .....	73
5.2. Condicionantes físicos .....	73
5.2.1. Frecuencia portadora .....	74
5.2.2. Modulación digital .....	76
5.2.3. Velocidad binaria .....	76

---

5.3. Diseño de la trama .....	77
5.3.1. Señalización .....	77
5.3.2. Ranuras de datos .....	79
5.3.3. Duración de la trama .....	79
5.3.4. Overhead .....	80
5.3.5. Formato de la parte de acceso .....	81
5.3.6. Formato final de la trama .....	82
5.4. Protocolo de acceso .....	83
5.4.1. Acceso mediante sondeo (polling) .....	83
5.4.2. Acceso mediante contención (Aloha ranurado) .....	84
5.4.3. Acceso híbrido sondeo/contención (polling/Aloha, PA) .....	85
5.5. Características del tráfico .....	86
5.5.1. Tráfico de voz .....	87
5.5.2. Tráfico de datos .....	87
5.6. Política de asignación de recursos .....	88
5.6.1. Asignación de tráfico CBR .....	89
5.6.2. Asignación de tráfico VBR .....	89
5.6.3. Asignación de tráfico ABR .....	90
5.6.4. Aprovechamiento de silencios en los slots CBR .....	90
5.7. Política de servicio y sistemas de colas .....	90
5.7.1. Tráfico CBR .....	90
5.7.2. Tráfico de datos con FCFS .....	92
5.7.3. Tráfico de datos con TOE .....	92
5.7.4. Tráfico de datos con SAD .....	92
5.8. Entorno de simulación .....	94
5.9. Evaluación analítica de prestaciones del protocolo propuesto .....	96
5.9.1. Eficiencia del sistema .....	96
5.9.2. Modelo de prestaciones del tráfico CBR .....	98
5.9.3. Modelo de prestaciones del tráfico VBR y ABR .....	100
5.10. Evaluación del protocolo propuesto mediante simulación .....	107
5.10.1. Tráfico CBR .....	107
5.10.2. Política de servicio FCFS .....	108
5.10.3. Política de servicio TOE .....	109
5.10.4. SAD .....	110
5.10.5. PA+SAD .....	112
5.10.6. Carga cursada .....	113
5.11. Conclusiones .....	113

**CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

6.1. Sumario de aportaciones .....	115
6.1.1. Publicaciones .....	116
6.2. Futuras líneas de investigación .....	117

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>119</b>
---------------------------	------------

<b>GLOSARIO .....</b>	<b>127</b>
-----------------------	------------

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1. Objetivos

En la segunda mitad de la década de los años 90, se ha procedido a la conquista final de dos desafíos tecnológicos: movilidad y multimedia. La utilización, cada vez mayor, de los terminales móviles (en movimiento mientras se comunican) y movibles/nomádicos (pueden cambiar de ubicación física pero son estáticos mientras se comunican) por parte de los usuarios, ha obligado a los sistemas de comunicaciones inalámbricas a soportar nuevos conceptos de servicios bajo una creciente demanda, siendo necesario adoptar nuevas políticas de asignación de recursos. Estudios realizados [1] demuestran que los actuales estándares de comunicaciones móviles (GSM, DECT) no son adecuados para enviar información multimedia debido a que fueron diseñados en un principio para cursar casi exclusivamente tráfico de voz. Como solución a estas necesidades y limitaciones, se han realizado muchas propuestas englobadas en el marco de los llamados Sistemas Inalámbricos de Banda Ancha (*Wireless Broadband Systems*) [2]. Debido a la propensión de las redes por cable actuales de migrar hacia redes del tipo B-ISDN basadas en ATM, una de las propuestas que posibilitan el soporte de tráfico multimedia a través de una red inalámbrica de banda ancha, es la evolución de las redes ATM de cable al mundo inalámbrico. Esta solución es conocida como tecnología *Wireless ATM*<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Wireless ATM: ATM inalámbrico.

El concepto de Wireless ATM fue seriamente considerado como una estructura potencial para las redes de comunicaciones inalámbricas de tercera generación, capaz de soportar servicios multimedia con diferentes requerimientos de QoS. Esta migración al entorno inalámbrico necesita la adecuación de diversos aspectos claves en el diseño de los subsistemas de redes ATM inalámbricas. En primer lugar, hay que tener en cuenta el entorno de propagación de la señal transmitida, lo que conlleva una adecuada elección de la modulación, técnicas de ecualización, antenas, etc. utilizadas en el diseño. Por otra parte, desde el punto de vista de asignación de recursos a los usuarios, es muy importante que el protocolo de control de acceso al medio (MAC) se ajuste a las necesidades y al comportamiento del tráfico que se genera en la red.

Desde estas dos perspectivas nace el objetivo principal de esta tesis. Primeramente, realizar un estudio previo del medio de propagación en el que se ubicará el sistema inalámbrico, proponiendo soluciones a nivel puramente físico de la modulación y método de ecualización más convenientes en cada escenario; y, posteriormente proponer un protocolo de control de acceso al medio cuyo diseño, caracterizado por las limitaciones y condicionantes impuestos por el nivel físico, permita a los terminales inalámbricos acceder a los recursos ofrecidos por la red con similares prestaciones en cuanto a QoS que las ofrecidas por las redes de cable.

## **1.2. Estructura de la tesis**

Este trabajo comienza en el presente capítulo de introducción. En él se intenta situar la tesis dentro del amplio escenario de las comunicaciones móviles. Se comenta brevemente el proceso de estandarización de la tecnología Wireless ATM y se presenta, a continuación, el estado del arte de los niveles físico y MAC, haciendo una clasificación de los servicios ATM en función de las exigencias de tasa binaria requerida. Finalmente, se exponen las técnicas de acceso múltiple más utilizadas actualmente.

Los dos siguientes capítulos se dedican al nivel físico. Así, el Capítulo 2 presenta los tres sistemas que se han utilizado en esta tesis para su evaluación: GSM, DECT y TETRA. Puesto que existen unos modelos de canal para cada sistema, éstos son explicados a continuación, teniendo en cuenta ciertas consideraciones de la propagación en exteriores. Cierran el capítulo algunas puntualizaciones sobre ecualización en sistemas de comunicaciones móviles junto con un apartado dedicado a las antenas adaptativas. El Capítulo 3 presenta, en primer lugar, la descripción del sistema de comunicaciones sobre el que se evalúan los algoritmos de ecualización explicados. Algoritmos lineales, no lineales, bidireccionales y antenas adaptativas son implementados obteniéndose una serie de resultados que son presentados y comentados.

Los Capítulos 4 y 5 abordan el nivel MAC. En el Capítulo 4 se presenta una visión del estado del arte de los protocolos de acceso, diferentes políticas de asignación de recursos y de multiplexación de trama. También se exponen los parámetros de evaluación que permiten determinar las prestaciones de un

protocolo de acceso. Se comenta, además, la técnica de admisión de terminales mediante un árbol de conexiones virtuales. Finalmente, se realiza el modelado del tráfico, tanto de voz como de datos, que se ha utilizado en este trabajo. En el Capítulo 5 se aborda el diseño y análisis del protocolo de acceso propuesto. Se estudian las interacciones entre el nivel físico y el subnivel de acceso al medio, tratando de relacionarlos de manera que el diseño final sea coherente con los requerimientos impuestos por ambos. El protocolo se diseña partiendo de una estructura de trama incluyendo el estudio de las dos formas de acceso más utilizadas: acceso por sondeo o *polling*, y acceso por contención mediante técnicas basadas en el protocolo Aloha. Se comentan los dos modelos de tráfico de datos: el tradicional proceso de Poisson y el auto-similar generado mediante la distribución de Pareto. Los recursos disponibles se reparten entre los diversos tipos de tráfico de acuerdo a diferentes políticas de asignación evaluadas: FCFS, TOE y SAD. Posteriormente, se presenta el entorno de simulación en el que se fijan los parámetros del sistema. Con ellos se realiza un análisis teórico de prestaciones utilizando algunas herramientas de teoría de colas, mostrando, finalmente, los resultados obtenidos en las simulaciones del protocolo.

Finalmente, el Capítulo 6 recoge las conclusiones, en las que se recapitula todo lo que se ha realizado a lo largo de esta tesis, indicando las futuras líneas de investigación que deberían seguirse.

### **1.3. Alcance de la tesis**

El campo de las comunicaciones móviles es muy amplio y, si bien el término Wireless ATM representa una parte relativamente pequeña, no está completamente acotado. Por ello, con objeto de realizar un estudio ajustado y coherente, es necesario abarcar un reducido pero razonable sector de dicha panorámica. La tesis asume que el lector está familiarizado con la tecnología ATM y que, por lo tanto no discute en profundidad sus fundamentos, aunque en capítulos sucesivos se describen algunos aspectos que se consideran importantes resaltar por estar muy relacionados con el estudio de los protocolos MAC en el entorno de Wireless ATM. Si se desea un estudio más detallado acerca de la tecnología ATM se puede recurrir a literatura especializada [3] y [4].

Las características de los sistemas de comunicaciones móviles podrían ser contempladas, a grandes rasgos, desde dos puntos de vista generales: el medio *radio* y la *red*. El enfoque de la tesis está centrado sobre ambos aspectos. El primero correspondería al nivel 1 de la arquitectura OSI, mientras que el diseño del protocolo de acceso está relacionado con la parte inferior del nivel 2 de OSI. Como se verá más adelante, el protocolo MAC está íntimamente relacionado con las características del nivel físico y repercute notablemente en las prestaciones de los protocolos de niveles superiores, aunque de éstos no se tratará ya que cada sistema particular está abierto a un gran número de posibilidades.

## 1.4. Estandarización

Hasta la fecha, organizaciones internacionales de telecomunicaciones, como ITU o ATM Forum, han lanzado propuestas de estandarización sobre los diferentes aspectos que conciernen a la tecnología Wireless ATM, pero aún no existe ningún estándar definitivo. Desde 1996 aproximadamente, varias empresas han desarrollado infraestructuras basadas en prototipos para implementar la tecnología Wireless ATM [5], [6], [7], [8]. De estos, los tres principales prototipos desarrollados pertenecen a Lucent, NEC, y al proyecto Magic WAND dentro del marco del programa europeo de investigación ACTS. Para unificar dichos estudios, en 1996 se creó el grupo de trabajo denominado ATM Forum con la finalidad de definir un estándar para las comunicaciones móviles de banda ancha basadas en tecnología ATM. El trabajo de este grupo comenzó recientemente con el desarrollo de las especificaciones para el acceso radio, el nivel MAC y el soporte de movilidad para Wireless ATM. Tras numerosos aplazamientos, se estima que el estándar esté listo a principios del año 2001, con lo que los productos podrían aparecer en el mercado durante la primera década del siglo XXI.

## 1.5. Estado del arte de las comunicaciones móviles

Como ya se ha comentado, uno de los campos de las telecomunicaciones que mayor desarrollo ha experimentado en la última década ha sido el de las comunicaciones móviles celulares<sup>2</sup> propiciado principalmente por el rápido avance de la nueva tecnología digital [9], [10], [11]. Este creciente interés tanto comercial como de I+D se ha visto catalizado por diversos factores de convergencia: proliferación de comunicaciones de diferente naturaleza (teléfonos móviles, correo electrónico, videojuegos on-line, etc); liberalización del espectro radioeléctrico y de los procedimientos para proporcionar el acceso al mismo de los usuarios; mejoras sustanciales en la relación coste/tamaño/consumo de la electrónica digital; etc.

Aunque, en un principio, la principal aplicación de los sistemas de comunicaciones móviles celulares era la transmisión de voz, actualmente, con la posibilidad de digitalizar cualquier tipo de fuente de información, está claro que los sistemas tienden a evolucionar ofreciendo una amplia gama de aplicaciones multimedia, en las que la información transmitida puede ser audio (voz, música, etc.), vídeo, datos, etc. A su vez, las redes de área local inalámbricas, diseñadas en sus orígenes para la transmisión convencional de datos, han de afrontar la creciente demanda de aplicaciones en las que se incorporan elementos multimedia como imágenes, audio, vídeo, etc. Así, la demanda de redes inalámbricas en diferentes entornos que soporten este tipo de servicios multimedia es potenciada por la tendencia a la integración de voz, audio y vídeo en una misma aplicación.

---

<sup>2</sup> Generalmente, se distingue entre *celulares* y *personales* en función del tamaño del área de cobertura de la EB. Así, un sistema celular típico es GSM, asociándole el término *macromovilidad*; mientras que un sistema personal representativo podría ser DECT, hablándose en este caso de *micromovilidad*.



Las redes de comunicaciones móviles de tercera generación deben coexistir con las redes de banda ancha basadas en infraestructura de fibra óptica y cable coaxial, volviéndose éstas últimas cada vez más omnipresentes durante la primera década del siglo XXI. Estos sistemas de banda ancha, como por ejemplo RDSI-BA/ATM [12] o LAN sobre ATM [13], ofrecen servicios de diferente naturaleza (CBR, VBR, ABR, UBR), así como servicios de conmutación de paquetes<sup>3</sup> diseñados para soportar aplicaciones multimedia. Con objeto de evitar un fuerte desajuste entre las futuras redes de cable y las inalámbricas, es necesario realizar una serie de consideraciones acerca de los sistemas inalámbricos de banda ancha con similares capacidades de servicio [14], [15], [16]. Las redes de comunicaciones envueltas en el escenario de las aplicaciones multimedia deben proporcionar nuevas prestaciones como transmisión de alta velocidad, asignación dinámica del ancho de banda, tasas binarias configurables, selección de la calidad de servicio requerida, etc. Sin lugar a dudas, la implementación de estas prestaciones de banda ancha en un entorno vía radio es una tarea tecnológicamente más compleja que sobre un medio de cable, pero es importante apuntar hacia diseños de sistemas que suministren prestaciones cualitativamente similares aunque cuantitativamente no se pueda establecer una equivalencia clara con las características de una red de fibra o cable.

A diferencia de los sistemas de telefonía celular de primera [17] y segunda generación [18], los sistemas iniciales de tercera generación van a requerir una potencia de transmisión relativamente baja (mW frente a W), así como células de menores dimensiones (microcélulas de cientos de metros de radio frente a km.) [19]. Esto, junto con la necesidad de ofrecer servicios multimedia de manera eficiente e integrada, ha provocado que la transmisión, realizada originalmente sobre conmutación de circuitos<sup>4</sup> convencional para el caso de sistemas exclusivamente de voz, migre hacia sistemas basados en conmutación de paquetes de alta velocidad (Mbps).

Desde el punto de vista técnico, es crucial para el correcto funcionamiento del sistema, y a la vez poco estudiado de forma conjunta, la elección de un adecuado nivel físico sobre el que se asiente un eficiente mecanismo de control de acceso al medio y de compartición del canal al que acceden los diferentes usuarios de la red. Los mecanismos a nivel físico utilizados para contrarrestar la degradación de la señal propagada vía radio (técnicas de ecualización, diseño de las antenas tanto de la estación base como del terminal de usuario), así como la técnica de acceso múltiple implementada tendrán un impacto significativo en las prestaciones proporcionadas al usuario, en la capacidad del sistema, en la complejidad del terminal, en el consumo del mismo, en el precio final del terminal, etc. Existen diversas alternativas al diseño del mecanismo de acceso en un sistema de comunicaciones móviles. Las principales opciones son las siguientes: protocolo Aloha ranurado sobre acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA) utilizando tasa binaria constante (CBR), similar al sistema celular GSM [20], [21]; TDMA dinámico soportando tanto CBR como VBR [22], [35], [36]; acceso múltiple por detección de portadora (CSMA)

---

<sup>3</sup> Básicamente, la conmutación de paquetes se refiere a la transmisión de la información troceada en bloques (paquetes) que se transmiten utilizando un recurso que es compartido por otros terminales. De esta manera, la transmisión de un paquete no asegura la posibilidad de transmitir otro a continuación, ya que depende, entre otras cosas, de la carga y características del tráfico que genere la población de terminales.

<sup>4</sup> Por el contrario, la conmutación de circuitos se basa en la ocupación de un recurso durante todo el tiempo que dura la conexión, asegurando la disponibilidad del medio de transmisión desde que se establece hasta que se libera.

[23], como la técnica utilizada en algunas redes de área local inalámbricas; acceso múltiple por división de código (CDMA) [24], utilizado por algunas redes de telefonía celular de segunda generación [25], [26], [27], y en el futuro estándar UMTS.

Cronológicamente, las principales mejoras relativas a las prestaciones ofrecidas por los sistemas de comunicaciones móviles, dentro del marco GSM, son los servicios GPRS, HSCSD y EDGE proporcionando transmisión de datos a velocidades superiores a 150 Kbps. Este desarrollo lógico y obligado de los sistemas móviles a nivel mundial tiene, para este siglo que comienza, un punto al que deben converger las redes de toda Europa, llamado UMTS [28], [31]. El sistema UMTS pertenece a la familia IMT-2000 [32] de sistemas de tercera generación. Se está gestando internacionalmente dentro del proyecto 3GPP, siendo el ETSI el que lo desarrolla para Europa. Las propuestas actuales para UMTS [29], [30] presentan una pila de protocolos basada en ATM utilizando AAL de tipo 5 junto con el sistema SS7 para la interfaz entre la red de acceso radio y la red dorsal de transporte. A medida que aumenten los servicios de conmutación de paquetes, evolucionando a partir del sistema GPRS de GSM, la pila de protocolos migrará hacia AAL de tipo 2 para aplicaciones con requerimientos de tiempo real. Con objeto de desarrollar un sistema que soporte las actuales redes IP, se ha definido un estadio intermedio de esta transición en el que se propone una solución IP sobre ATM, así como la especificación de niveles AAL adecuados para UMTS. UMTS estará disponible próximamente en dos modalidades de acceso, 384 Kbps y 2 Mbps, utilizando enlaces tanto terrestres (UTRA) como vía satélite. Puesto que las redes mundiales de telefonía celular evolucionan hacia UMTS, las primeras versiones de este sistema utilizarán, dependiendo de cada país, CDMA o TDMA como método de acceso múltiple. La primera fase de implantación comenzará en el año 2002 y su completa comercialización tendrá lugar entre 2002 y 2005.

### **1.5.1. Clases de servicios**

Las redes ATM ofrecen un conjunto específico de clases de servicios que el usuario puede configurar o elegir al establecer una conexión. Estas clases se utilizan para diferenciar entre los tipos de conexiones posibles, cada una con características de tráfico y unos parámetros de QoS concretos. Las clases que están definidas a fecha de hoy por ATM Forum, recogidas en la especificación UNI 4.0 [33], son las que se explican a continuación.

Tasa Binaria Constante (CBR): tipo de servicio que trata de emular a un circuito conmutado, utilizado por terminales que generen tráfico a velocidad constante con una relación temporal entre paquetes permanente.

Tasa Binaria Variable - Tiempo Real (VBR/RT): esta clase de servicio es utilizado por terminales que generan tráfico a velocidad variable con requerimientos de tiempo real, como por ejemplo aplicaciones de vídeo con tasa de compresión variable y relación temporal entre paquetes constante.

Atributo	Categorías de Servicios ATM					
	CBR	VBR/RT	VBR/NRT	ABR	UBR	Parámetro
Relación de Pérdida de Paquetes (CLR)	Especificado	Especificado	Especificado	Especificado	No especificado	QoS
Retardo Máximo de Transferencia (CTD) y Variación de Retardo Pico-a-pico (CDV)	CDV y CTD máximo	CDV y CTD máximo	Sólo CTD medio	No especificado	No especificado	QoS
Tasa Máxima de Transferencia (PCR) y Tolerancia a la Variación del Retardo (CDVT)	Especificado	Especificado	Especificado	Especificado	Especificado	Tráfico
Tasa Sostenible (SCR) y Tolerancia a las Ráfagas (BT)	-	Especificado	Especificado	-	-	Tráfico
Tasa Mínima de Transferencia (MCR)	-	-	-	Especificado	-	Tráfico
Control de Congestión	No	No	No	Sí	No	-

Tabla 1.1. Clases de servicios y sus parámetros aplicables.

Tasa Binaria Variable – No Tiempo Real (VBR/NRT)<sup>5</sup>: servicio utilizado en conexiones que transportan tráfico de tasa variable sin especificar una relación temporal entre paquetes. Sin embargo, se garantiza una QoS mínima desde el punto de vista de ancho de banda y de latencia de los paquetes. Este servicio se utilizaría, por ejemplo, en interconexión de redes Frame Relay en las que se asegura un mínimo ancho de banda mediante el parámetro CIR.

Tasa Binaria Disponible (ABR): este servicio soporta conexiones de velocidad variable sin ningún requerimiento temporal entre paquetes. Sin embargo, a diferencia del servicio VBR/NRT, ABR no asegura ningún ancho de banda mínimo al usuario, siguiendo una política de servicio denominada "best effort" (mayor esfuerzo) en la que se implementan mecanismos de control de flujo con objeto de optimizar el aprovechamiento del ancho de banda de la red, incrementándolo cuando no hay congestión y reduciéndolo durante los episodios de congestión. A través de este control de flujo, la red puede gestionar la cantidad de tráfico en la misma y minimizar la pérdida de paquetes por congestión.

El ATM Forum ha definido el bit EFCI dentro de las celdas ATM para indicar al terminal transmisor la presencia de congestión en la red. Las principales aplicaciones del servicio ABR se centran en el mapeo de protocolos utilizados en LAN's que utilizan tanto ancho de banda como esté disponible, pero cuyo tráfico generado puede ser detenido temporalmente en momentos de congestión, como por ejemplo tráfico del tipo LAN *Emulation*.

<sup>5</sup> Este tipo de servicio no está claro aún que se incluya en UNI 4.0, pues no ha sido definido por el ITU-T, y su utilidad está siendo estudiada por ATM Forum.

Tasa Binaria Sin Especificar (UBR): el servicio UBR no ofrece ninguna garantía en la QoS. El usuario es libre de enviar la cantidad de datos que desee (hasta alcanzar un valor máximo), mientras que la red no garantiza ningún límite en cuanto a pérdida de paquetes, retardo, jitter o cualquier otro parámetro relativo a la QoS. El servicio UBR, junto con ABR, es actualmente el modelo de tráfico que mejor se adapta a los protocolos implementados sobre LAN.

### 1.5.2. Nivel Físico

La elección del método de modulación y el conjunto de velocidades binarias disponibles para operar en macro/micro/pico células es uno de los aspectos más importantes del diseño de los sistemas móviles de tercera generación. Las tasas binarias reales dependerán del balance entre los requerimientos del servicio y las limitaciones impuestas por la calidad de la señal, el ancho de banda utilizable y el consumo de potencia.

Aplicación	Tipo de Servicio	QoS	Rango de velocidades
Telefonía (PCM, ADPCM)	Orientado a conexión / CBR	- Bloqueo de llamadas permitido - Pérdida de paquetes: $10^{-4} - 10^{-6}$ - Retardo: 10 – 150 ms - Isócrono	16, 32, 64 Kbps
Voz comprimida (CELP)	Orientado a conexión / VBR	- Bloqueo de llamadas permitido - Pérdida de paquetes: $10^{-6} - 10^{-8}$ - Retardo: 10 - 150 ms - Jitter < 130 ms	9.6 - 16 Kbps
Audio digital de alta calidad	Orientado a conexión / CBR	- Bloqueo de llamadas permitido - Pérdida de paquetes baja - Jitter bajo	128 – 1400 Kbps
Fax Grupo III	Orientado a conexión / CBR	- Bloqueo de llamadas permitido - Pérdida de paquetes baja - Jitter bajo	14.4 Kbps
Fax Grupo IV	Orientado a conexión / CBR	- Bloqueo de llamadas permitido - Pérdida de paquetes baja - Jitter bajo	64 Kbps
Videoconferencia	Orientado a conexión / CBR o VBR	- Bloqueo de llamadas permitido - Multiplexación estadística (VBR) - Pérdida de paquetes: $10^{-9}$ - Retardo: 150 – 350 ms - Jitter < 130 ms	64 Kbps – 14 Mbps
HDTV	Orientado a conexión / VBR	- Pérdida de paquetes baja/media - Retardo < 0.8 ms - Jitter < 1 ms	15 – 20 Mbps
Datos entre usuarios (TELNET, etc)	No orientado a conexión / ABR	- No existe bloqueo de llamadas - Pérdida de paquetes baja - Retardo < 1 s - Jitter medio	0.1 – 1 Mbps
Correo electrónico	No orientado a conexión / ABR o UBR	- No existe bloqueo de llamadas - Pérdida de paquetes baja/media - Insensible al jitter	9.6 – 128 Kbps
Transferencia de ficheros	No orientado a conexión / ABR	- No existe bloqueo de llamadas - Pérdida de paquetes muy baja - Retardo y jitter medios	1 – 10 Mbps

Tabla 1.2. Características y requisitos de los servicios ofrecidos en la tercera generación de comunicaciones móviles

A la vista de la Tabla 1.2, se observa que, a excepción de HDTV, la mayoría de las restantes aplicaciones pueden soportarse a través de un enlace de radio con una tasa binaria en el rango de 5 a 10 Mbps. De esta manera, se puede conseguir una QoS aceptable utilizando un enlace con una tasa de unos 8 Mbps, valor que es totalmente alcanzable para entornos pico y microcelulares, como se verá a lo largo de la tesis.

### 1.5.3. Técnicas de compartición de recursos radio

#### FDMA

El acceso múltiple por división de frecuencia es la técnica más antigua de compartición del medio de transmisión utilizada en comunicaciones móviles. Consiste en asignar, dentro del espectro disponible, una banda de frecuencias para el enlace ascendente y otra para el descendente. A su vez, cada enlace se subdivide en canales, los cuales son asignados a cada usuario que lo solicite. De esta forma, suponiendo que la comunicación es bidireccional simultánea, una conexión entre dos usuarios requiere dos canales, uno en cada sentido (terminal ↔ EB). Además, la asignación de los canales es permanente durante la duración de la comunicación, pasando a estar disponibles únicamente al finalizar la conexión.

La primera generación de comunicaciones móviles analógicas utilizaba esta técnica de acceso, modulando la voz en FM y los datos de control y señalización (todos ellos de baja velocidad) mediante FSK [34]. La ventaja de este método es que, al asignar un canal tan estrecho a cada usuario, los desvanecimientos generalmente son planos, con lo que sus efectos no suelen ser nocivos. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes, es que la EB requiere un transceptor (conjunto de transmisor y receptor) por cada canal, siendo necesarias antenas de alta potencia para transmitir adecuadamente la combinación de todos los canales del enlace descendente.

#### CDMA

Las técnicas de espectro ensanchado presentan notable robustez frente a situaciones de interferencia y propagación multicamino típicas del entorno radio [37], [38]. Además, CDMA proporciona una solución muy eficaz desde el punto de vista de reutilización de frecuencias y de acceso múltiple [24], [39], [40]. Sin embargo, el principal inconveniente de CDMA es que, para un ancho de banda dado, el ensanchamiento del espectro reduce notablemente la tasa de pico por usuario a niveles inferiores a los alcanzados con sistemas de banda estrecha. Por ejemplo, con un ancho de banda de 50 MHz y un factor de ensanchamiento de 512, la velocidad binaria de usuario se ve limitada a unos 100 Kbps, problema que puede ser mitigado asignando múltiples códigos a cada usuario, o CDMA de múltiple velocidad [41], lo cual hace que el sistema se vuelva más complejo de diseñar. Otros aspectos de suma importancia en el diseño son: el control de potencia dinámico para evitar el efecto cerca-lejos, la sincronización de los códigos de ensanchamiento, el consumo de potencia de los terminales, etc.

### TDMA

En este caso se asigna todo el ancho de banda (asociado a una portadora) a cada usuario durante una fracción de tiempo. De esta forma, se multiplexan las diferentes conexiones en el tiempo agrupándolas en secuencias periódicas denominadas tramas. Esta multiplexación conlleva a la distinción entre la velocidad de fuente (o demultiplexada), es decir, la tasa binaria a la que genera el terminal la información, y por otro lado la velocidad agregada (o multiplexada), esto es, el régimen binario al que se transmite la trama en el medio de transmisión.

En este tipo de sistemas, a nivel físico, es típico utilizar una modulación digital del tipo QPSK o MSK a una tasa binaria adecuada al entorno celular atendiendo a las limitaciones impuestas por el ancho de banda disponible y al nivel máximo de interferencia cocanal permitido. Diversas publicaciones [43], [44], [45], [46], coinciden en afirmar que con objeto de alcanzar unos niveles de disponibilidad de señal razonables (en torno al 99% del tiempo) y una tasa binaria alta (2-10 Mbps) es necesario utilizar diversas técnicas que mejoren las prestaciones del sistema. Desde el punto de vista de la EB, éstas pueden estar basadas bien en la diversidad espacial (como es el caso de la doble antena del receptor de la EB en GSM), bien en la sectorización (aumentando el factor de reuso de frecuencia), o bien en incrementar la directividad (como sucede con las antenas adaptativas). Por parte de los terminales, éstos suelen incorporar técnicas sencillas de ecualización adaptativa [42] con objeto de limitar tanto su coste como el consumo de energía.

### TDMA Dinámico

Con objeto de optimizar el rendimiento de los sistemas TDMA tradicionales, los cuales, además de soportar conexiones de tráfico de voz CBR [20], [49], necesitan incorporar servicios de datos VBR y aplicaciones de conmutación de paquetes ABR/UBR, se ha de evolucionar hacia una utilización de recursos dinámica, aprovechando eficazmente el ancho de banda disponible. Esta clase de asignación de recursos bajo demanda fue inicialmente desarrollada para redes de comunicaciones vía satélite [50], [51], y muchas de sus técnicas pueden ser aplicadas a los sistemas móviles terrestres. Uno de los primeros sistemas inalámbricos con integración de voz y datos propuesto fue el protocolo PRMA (acceso múltiple por reserva de paquetes) [22], al que siguieron otras variantes del TDMA dinámico para aplicaciones multiservicio [39], [40]. El principal problema en un sistema de este tipo es el diseño del control de acceso a un entorno compartido en el que conviven servicios isócronos CBR con servicios de datos VBR, ABR y UBR, permitiendo alcanzar una elevada utilización de canal asegurando, a su vez, una gestión eficiente de la QoS.

A grandes rasgos, la trama TDMA se subdivide en dos grupos de ranuras. Un primer grupo dedicado a la gestión de las peticiones para asignación de recursos, y un segundo grupo utilizado para la transmisión de información (CBR/VBR/ABR/UBR). Cada ranura de información transmite un bloque de bits de longitud fija cuyo valor depende de las condiciones de diseño del sistema (limitaciones desde el

punto de vista de ecualización a nivel físico, adaptación a múltiplos del tamaño de celdas ATM si el sistema utiliza éstas como unidad mínima de información, etc). La demanda de recursos ubicada en la primera parte de la trama puede gestionarse bien siguiendo una política de sondeo, en la que cada terminal es interrogado por la estación base, o bien de contención (Aloha), en la que cada terminal envía su solicitud de transmisión en una ranura de petición aleatoriamente con la consiguiente posibilidad de colisionar con otras solicitudes. Del total de ranuras dedicadas a transmisión, sólo puede asignarse un número de ellas a conexiones CBR debido a la naturaleza isócrona de este tipo de tráfico. El tráfico que no es CBR se ubica dinámicamente en el resto de la trama, pudiendo viajar, si el sistema incorpora detección de actividad de voz, en los silencios que generan las conexiones CBR, aprovechando éstos para cursar tráfico con requerimientos de tiempo no-crítico. Por supuesto, los mensajes que no puedan transmitirse completamente en una trama serán segmentados y transmitidos en múltiples tramas sucesivas.

El funcionamiento general del método de acceso combina la reserva de ranuras en modo circuito conmutado para las conexiones CBR, junto con la asignación dinámica de los recursos restantes para los demás tipos de tráficos. En el caso de VBR, su asignación estará basada en algoritmos de multiplexación estadística que reparten los recursos disponibles en función del parámetro de utilización especificado durante el establecimiento de la conexión. Para el tráfico restante (ABR y UBR), el modo de operación por defecto es FCFS, es decir, “el primero que llega es el primero en ser servido”, aunque algunas veces se aplica, sobre todo en el caso de transferencia de ficheros, la política de servicio a ráfagas.

Como alternativa más avanzada, se puede aplicar un esquema de servicio de colas basado en el tiempo de expiración del paquete de datos (TOE) [52], [53], asignando la prioridad de transmisión inversamente proporcional al TOE de cada paquete. Los paquetes pertenecientes a aplicaciones en tiempo real poseerán un valor de TOE notablemente inferior a los paquetes que transportan información no-crítica desde el punto de vista temporal. El protocolo DQRUMA [54] se basa en este principio para realizar una eficiente asignación dinámica de recursos, consiguiendo buenas prestaciones en cuanto a la reducción del retardo y la pérdida de paquetes críticos en escenarios donde coexisten el tráfico crítico con el no-crítico.

### OFDMA

Como alternativa a las técnicas de compartición citadas hasta ahora está el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA). Esta técnica se basa en dividir el ancho de banda disponible en subportadoras que la red asigna a cada usuario en función de la tasa binaria demandada. Así, cada usuario puede disponer de una o más subportadoras de forma que el conjunto de ellas es recibido por la EB en forma de señal multiplexada ortogonalmente en frecuencia (OFDM). Las portadoras suelen estar moduladas en QPSK o QAM, cada una de ellas con un ancho de banda menor que el de coherencia del medio radio [47]. Tiene la ventaja de que aplicando sencillos algoritmos basados en la FFT la modulación y la demodulación de la señal se realizan de forma directa [48]. Comparado con otros esquemas de

modulación, este es mucho menos sensible a la interferencia multicamino, permitiendo trabajar a tasas binarias inferiores a la velocidad nominal del canal, proporcionando así soporte para terminales que, por sus limitaciones de consumo, no pueden transmitir a velocidades mayores. Por supuesto, también posee algunos inconvenientes como por ejemplo la alta linealidad requerida por los amplificadores y el alto consumo de potencia VLSI.



# CAPÍTULO 2

## INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DEL NIVEL FÍSICO

---

### 2.1. Introducción

En este capítulo se tratará de proporcionar un análisis detallado del medio de propagación en el que se enmarcan los sistemas que posteriormente serán evaluados. Se definirán las condiciones en las que se han realizado los estudios a nivel físico, introduciendo brevemente las soluciones propuestas para mejorar dichos sistemas que serán explicadas en profundidad en el Capítulos 3.

### 2.2. Sistemas evaluados

El comienzo del estudio a nivel físico tiene como puntos de referencia tres de los sistemas de comunicaciones inalámbricas de segunda generación existentes actualmente: GSM, DECT y TETRA. No se va a profundizar en las características de diseño de cada uno de ellos, pero sí se van a resumir a continuación las características que más relevancia conllevan para el presente estudio. En la Tabla 2.1 se comparan estos sistemas desde el punto de vista de los parámetros a nivel físico y técnicas de compartición del medio.

	<b>GSM</b>	<b>DECT</b>	<b>TETRA</b>
<b>Tipo de sistema</b>	Telefonía celular exteriores	Telefonía de interiores	Trunking corporativo exteriores
<b>Escala geográfica de cobertura</b>	Macro células	Pico células	Macro células
<b>Velocidad del canal (Kbps)</b>	270.833	1152	36
<b>Duración de un bit (µs)</b>	3.692	0.868	27.778
<b>Velocidad por usuario (Kbps)</b>	33.854	48	9
<b>Codificación de la voz</b>	RPE-LTP	ADPCM	ACELP
<b>Velocidad de la voz (Kbps)</b>	13	32	7.2
<b>Codificación de canal</b>	Convolutacional $r=1/2$	CRC	RCPC y CRC
<b>Potencia transmitida por el terminal móvil (media/max)</b>	125 mW / 1 W	10 mW / 250 mW	1W a 30 W
<b>Rango de frecuencias enlace ascendente/descendente (MHz)</b>	890-915 / 935-960 <sup>6</sup>	1880-1990 <sup>7</sup>	380-450 / 450-520 <sup>8</sup>
<b>Modulación</b>	GMSK (BT=0.3)	GFSK (BT=0.5)	$\pi/4$ -DQPSK (Roll-off=0.35)
<b>Separación entre canales (KHz)</b>	200	1728	25
<b>Eficiencia espectral (bps/Hz)</b>	1.35	0.67	1.44
<b>Número de portadoras/ Usuarios por canal</b>	124 / 8	10 / 12	400-2800 / 4
<b>Método de compartición del medio y multiplexación</b>	TDMA / FDMA (FDD)	TDMA / FDMA (TDD)	TDMA / FDMA (FDD)
<b>Duración de la trama / de la ranura (ms)</b>	4.615 / 0.577	10 / 0.417	56.667 / 14.167
<b>Bits por trama / por ranura</b>	1250/ 156.25	11520 / 480	2048 / 510
<b>Bits para entrenamiento del ecualizador (por ranura)</b>	26 (16.64%)	32 (6.67%)	44 (8.63%)

Tabla 2.1. Características técnicas de los principales sistemas de segunda generación

<sup>6</sup> Existe una versión de banda extendida con 880-915 / 925-960.

<sup>7</sup> En sistemas TDD se utiliza la misma banda para el enlace ascendente y el descendente.

<sup>8</sup> Generalmente sólo se utilizan 10 MHz de ambas bandas.

2.2.1. Sistema GSM

El estándar de comunicaciones celulares GSM es el sistema de telefonía móvil utilizado en Europa y en un total de 110 países de todo el mundo englobando un total de 200 redes GSM (incluyendo DCS1800 y PCS1900), con un total de más de 215 millones de usuarios en Europa y 90 millones más entre Asia y la zona del Pacífico, datos relativos al mes de julio del año 2000 [55], prediciendo superar los 730 millones en 2004. Utiliza TDMA para la compartición de recursos, con una estructura de trama compuesta por 8 ranuras, que junto con las 124 portadoras proporciona acceso a un total de 992 usuarios. La jerarquía de tramas GSM se presenta en la Figura 2.1.

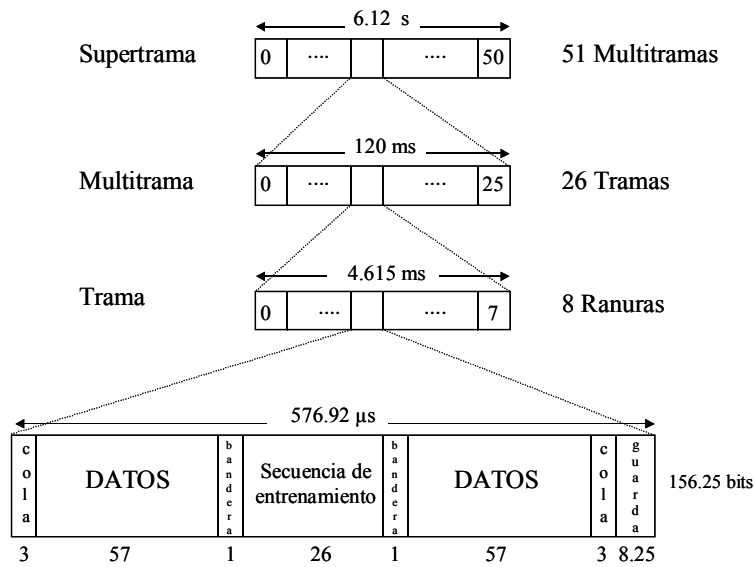


Figura 2.1. Estructura de trama GSM de un canal de tráfico normal (TCH). Válida para enlace ascendente y descendente

La Figura 2.1 muestra la estructura de datos dentro de una ráfaga normal de tráfico [56]. Está formada por 148 bits que se transmiten a una velocidad binaria de 270.833 Kbps (8.25 bits al final de la ráfaga, denominados *time advance*, proporcionan un tiempo de guarda para evitar solapamientos en la transmisión de varios terminales al desplazarse por la célula). Del total de 148 bits por ranura 114 son bits de información que se transmiten en dos secuencias de 57 bits al comienzo y al final de la ranura. En el centro hay una secuencia de 26 bits de entrenamiento que permiten al ecualizador adaptativo del terminal móvil o de la EB, procesar las características del canal de radio antes de descodificar los datos. A cada lado de la secuencia de entrenamiento se encuentran dos banderas que indican si la ranura transporta información de control (FACCH) o datos de voz (TCH), ambos con el mismo canal físico. Durante una trama, el móvil utiliza una única ranura para transmitir y recibir (cada una en una banda), aunque puede usar seis ranuras para medir el nivel de potencia recibido por estaciones base adyacentes así como la de su propia estación base a la que está enlazado.

### 2.2.2. Sistema DECT

El sistema DECT utiliza un esquema dúplex por división temporal (TDD) para la multiplexación de los enlaces ascendente y descendente. Por lo tanto, dentro de la estructura de la trama, se distinguen dos partes: las 12 primeras ranuras dedicadas a la comunicación de la estación base al terminal móvil, y las 12 segundas destinadas al enlace del móvil a la estación base. El contenido de las ranuras es independiente del sentido de la transmisión. Todas ellas poseen el formato que se muestra en la Figura 2.2. Los primeros 32 bits son utilizados como referencia en el período de entrenamiento del ecualizador adaptativo, mientras que los 384 bits siguientes (control, CRC y datos), son considerados información. La ventaja que tiene utilizar un sistema TDD desde el punto de vista de la ecualización es que la frecuencia portadora es la misma tanto para el enlace ascendente como para el descendente, es decir, el comportamiento del canal es totalmente recíproco en ambos sentidos. Esto proporciona la posibilidad de utilizar la información de la estimación del canal en un sentido para ajustar los valores iniciales del ecualizador remoto en el otro sentido de la transmisión. Esto se explicará en detalle más adelante.

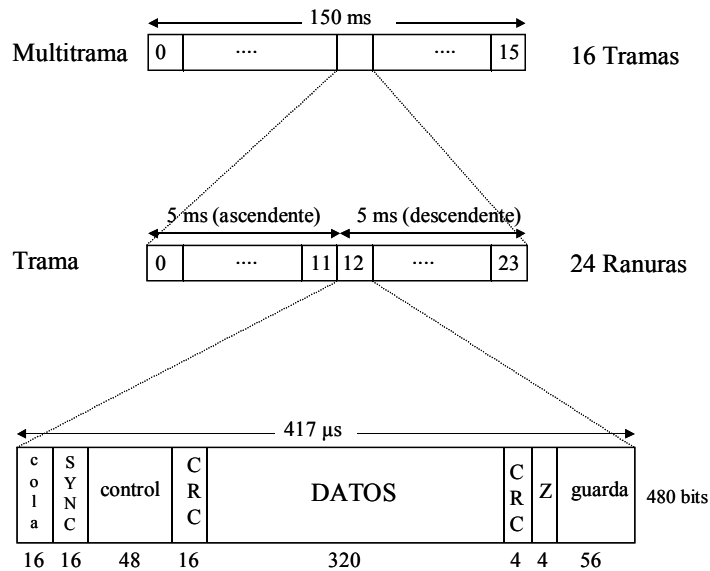


Figura 2.2. Estructura de trama DECT. Válida para enlace ascendente y descendente

### 2.2.3. Sistema TETRA

El esquema de la Figura 2.3 muestra la jerarquía de tramas del sistema TETRA [57] [58]. Es un sistema FDD, con lo cual se utiliza una frecuencia portadora para el enlace ascendente y otra para el descendente. Básicamente, la trama se divide en 4 ranuras cuyo contenido depende del sentido del enlace. El formato de la trama ascendente comienza con 34 bits utilizados para linealizar la respuesta del amplificador de potencia. Los siguientes 4 bits indican el comienzo de la primera parte de datos que ocupa 216 bits. A continuación, aparece la secuencia de entrenamiento de 22 bits, seguida por un bloque de 10 bits cuyo uso está aún sin definir. Por último, se transmite el segundo bloque de datos de 216 bits seguido de un delimitador de 4 bits y un período de guarda de 4 bits. Por lo tanto, la trama ascendente

consta de 22 bits de secuencia de entrenamiento y dos bloques de información de 254 y 230 bits (sin incluir la guarda) respectivamente.

La trama descendente es muy similar, pero al ser la trama que envía la estación base a los usuarios, consta de campos utilizados para transmitir información de radiodifusión que ha de ser recogida por todos los usuarios que estén asociados a una EB en particular. Así, la principal diferencia afecta a la ubicación de la secuencia de entrenamiento, que en esta ocasión se encuentra repartida en tres campos: 12 bits al principio de la ranura, 22 bits en el centro y 10 bits al final. Por lo tanto, se puede observar que mientras que en el enlace ascendente se ecualizan unos 500 bits con 22 bits de entrenamiento, en el descendente se ecualizan unos 230 bits con la misma secuencia de entrenamiento. Aunque a primera vista esto parezca así, en realidad, si se utiliza un método de ecualización bidireccional como los que se verán más adelante, en el caso de la trama descendente, si se contempla la trama como una secuencia de ranuras, se observa un patrón de repetición de 22 bits de entrenamiento seguidos de 232 bits de información. Por contra, en el enlace ascendente no se puede hacer uso de la ecualización bidireccional puesto que las cuatro ranuras que forman la trama pueden pertenecer a comunicaciones de diferentes terminales con canales de propagación completamente distintos.

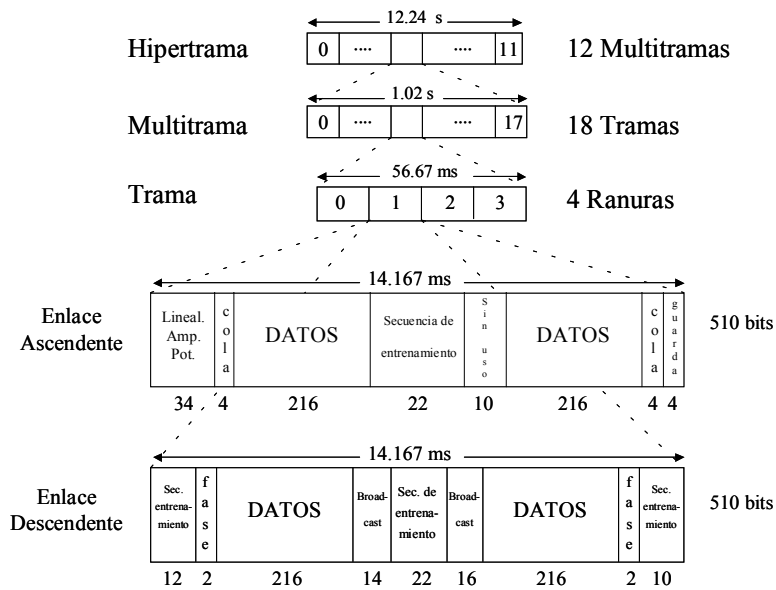


Figura 2.3. Formato de trama TETRA

### 2.3. Modelado de canal

El estudio del nivel físico de cualquier sistema de comunicaciones implica el conocimiento de las características del canal de transmisión, siendo más importante aún en el caso de canales de radio como es el caso de esta tesis. En un sistema inalámbrico, la señal transmitida interactúa con el entorno de una manera muy compleja. Existen reflexiones debidas a superficies más o menos grandes, difracciones de las ondas electromagnéticas en los objetos, dispersión de la señal, etcétera.

Modelo	Descripción
<i>Modelo de Lee</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Supone que existen dispersores distribuidos en torno a un anillo circular que rodea el terminal móvil.</li> <li>- Basándose en modelos de los ángulos de llegada (AOA), calcula el coeficiente de correlación.</li> <li>- Inclusión del efecto Doppler.</li> </ul>
<i>Distribución Uniforme Discreta</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dado un cierto rango de ángulos de llegada se distribuyen <math>N</math> elementos dispersores.</li> <li>- Predice el coeficiente de correlación utilizando un modelo AOA discreto.</li> </ul>
<i>Modelo basado en geometría circular</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asume que los elementos dispersores están en torno a un anillo que rodea al terminal móvil.</li> <li>- Proporciona información sobre ángulos de llegada, tiempos de llegada, desviación Doppler y amplitudes.</li> <li>- Apropiado para entornos macrocelulares donde las alturas de las antenas son relativamente grandes.</li> </ul>
<i>Modelo basado en geometría elíptica (modelo de banda ancha)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asume que los elementos dispersores están uniformemente distribuidos en una elipse de manera que la estación base y el terminal móvil son los focos de dicha elipse.</li> <li>- Proporciona información sobre ángulos de llegada, tiempos de llegada, desviación Doppler y amplitudes.</li> <li>- Apropiado para entornos microcelulares donde las alturas de las antenas son relativamente pequeñas.</li> </ul>
<i>Modelo GWSSUS</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se agrupan <math>N</math> dispersores en racimos.</li> <li>- Proporciona un modelo analítico para la matriz de covarianza del array.</li> </ul>
<i>Modelo GAA</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caso especial del modelo GWSSUS con un único racimo y ángulos de llegada estadísticos con distribución gaussiana en torno al ángulo nominal.</li> <li>- Modelo de canal de banda estrecha.</li> <li>- Proporciona un modelo analítico para la matriz de covarianza del array.</li> </ul>
<i>Modelo de Rayleigh</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asume que la energía de la señal que queda fuera de la región del terminal móvil sufre un desvanecimiento de tipo Rayleigh.</li> <li>- Dispersión angular.</li> <li>- Proporciona desvanecimiento Rayleigh y propiedades sobre la constelación espacial teórica.</li> </ul>
<i>Typical Urban</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelos simulados para GSM, DCS1800 y PCS1900.</li> <li>- Propiedades en el dominio del tiempo similares al GSM-TU definido en GSM-0.5.</li> <li>- 120 dispersores distribuidos aleatoriamente dentro de un radio de 1 km respecto al terminal móvil.</li> <li>- La señal recibida se calcula a partir de la posición de cada uno de los dispersores y de la del terminal móvil (variante con el tiempo).</li> <li>- Las estadísticas sobre los AOA se suponen aproximadamente gaussianas.</li> </ul>
<i>Bad Urban</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo de simulación para GSM, DCS1800 y PCS1900.</li> <li>- Se suponen reflectores grandes y no muy próximos al terminal móvil.</li> <li>- Idéntico al modelo TU pero con la adición de un segundo racimo de dispersores con un offset de 45° respecto del primero.</li> </ul>
<i>Distribución mediante sectores uniformes</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asume que los dispersores están uniformemente distribuidos dentro de cierto ángulo y con cierto incremento radial con respecto al terminal móvil.</li> <li>- La fase y la magnitud asociadas a cada dispersor se seleccionan de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme.</li> </ul>
<i>Modelo Saleh-Valenzuela modificado</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extensión del modelo Saleh-Valenzuela que incluye información de los AOA.</li> <li>- Asume que el tiempo y los ángulos son estadísticamente independientes.</li> <li>- Está basado en medidas de interiores.</li> </ul>
<i>Modelo extendido de línea de retardo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo de banda ancha.</li> <li>- Extensión del modelo estadístico tradicional que incluye información sobre los AOA.</li> <li>- Las funciones de densidad de probabilidad de los diferentes parámetros deberían ser calculadas a partir de medidas.</li> </ul>
<i>Modelo espacio-temporal (Modelo de Lu, Lo y Litva)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo de propagación multicamino basado en la distribución de los dispersores en subregiones elípticas que corresponden a un rango concreto de exceso de retardo.</li> </ul>
<i>Modelo de canal basado en medidas</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parámetros basados en medidas.</li> <li>- Caracteriza el canal en términos de puntos dispersores.</li> </ul>
<i>Modelo basado en trazado de rayos (Ray-tracing)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo determinístico basado en la teoría geométrica de la reflexión, difracción y dispersión.</li> <li>- Utiliza información específica del lugar, como bases de datos de edificios o dibujos de la arquitectura.</li> </ul>

Tabla 2.2. Modelos espaciales de canal

El resultado de estas numerosas interacciones es la presencia de múltiples componentes de señal (señales multicamino) que llegan al receptor. Si, además, se contempla la posibilidad de que la distancia entre el transmisor y el receptor no sea constante en el tiempo, debido fundamentalmente al movimiento

del terminal móvil, la presencia del efecto Doppler es un fenómeno nocivo de notable importancia [59]. Así, con objeto de poder simular el comportamiento del canal, es necesario extraer un modelo matemático que recoja todos estos efectos que puede sufrir la señal transmitida. En la Tabla 2.2 se resumen los principales modelos espaciales de canales existentes [60].

Los modelos de canal indicados en la Tabla 2.2 pueden dividirse en tres grupos:

- Modelos estadísticos.
- Modelos más específicos del lugar basados en mediciones de campo.
- Modelos completamente específicos del lugar.

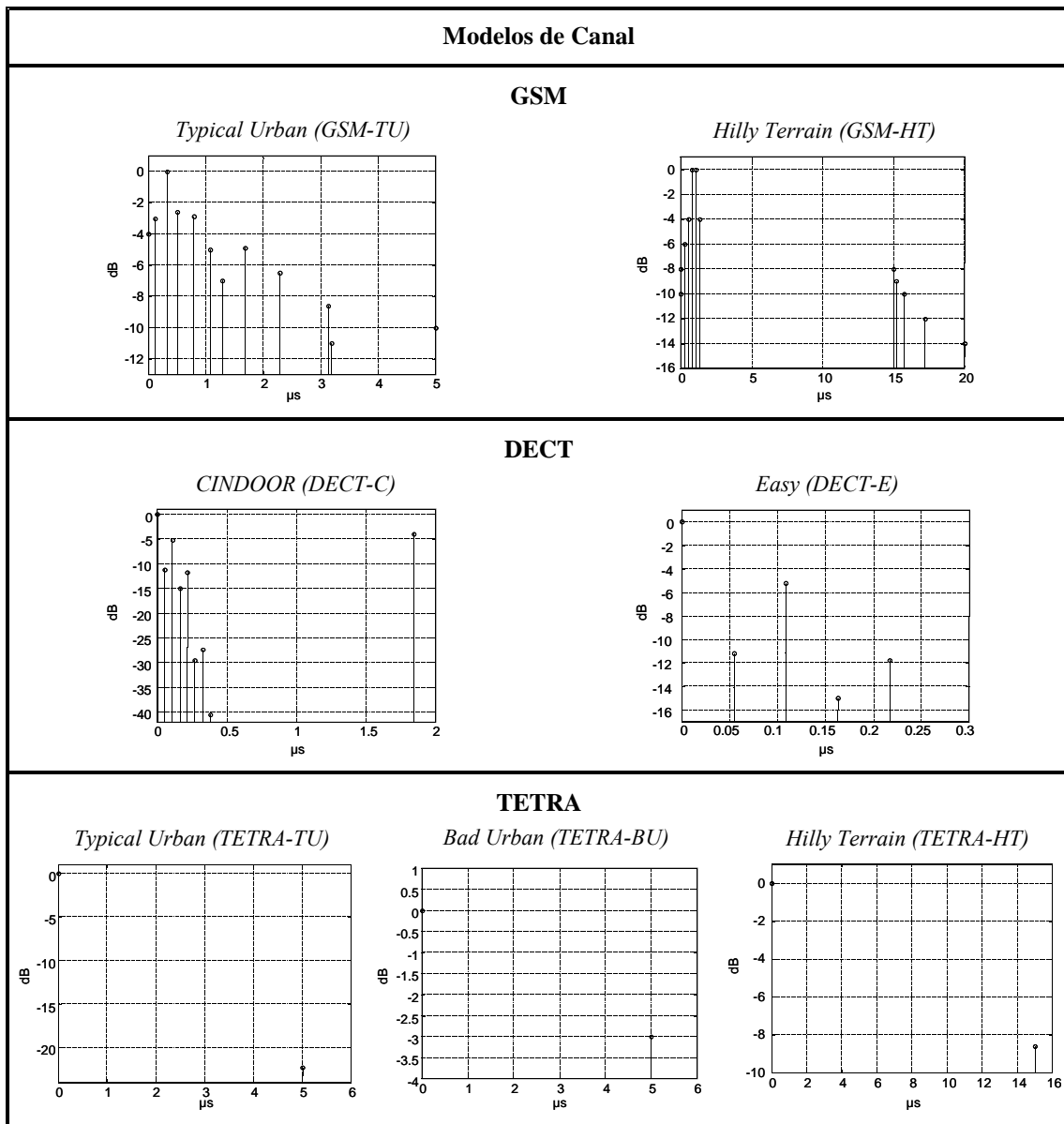


Tabla 2.3. Modelos de canal utilizados en las simulaciones de cada sistema

El primer grupo de modelos (Modelo de Lee, Distribución Uniforme Discreta, Modelo basado en geometría circular, Modelo basado en geometría elíptica, Modelo GWSSUS, Modelo GAA, Modelo de Rayleigh, Typical Urban, Bad Urban, Distribución mediante sectores uniformes, Modelo Saleh-Valenzuela modificado, Modelo espacio-temporal) son útiles para analizar el rendimiento general de un sistema. Los modelos del segundo grupo (Modelo extendido de línea de retardo, Modelo de canal basado en medidas) presentan datos más precisos al basarse en medidas de campo. El tercer grupo de modelos (Modelo basado en trazado de rayos o Ray-tracing) tiene el potencial de ser muy preciso pero requiere una importante descripción física del entorno de propagación así como de medidas para validar los modelos. Los modelos de canal utilizados en este estudio dependen del sistema evaluado. En la Tabla 2.3 se presentan las respuestas al impulso discretas (en potencia) de los canales asociados a cada sistema, con los cuales se han realizado las simulaciones de las que se tratará más adelante.

Los modelos TU y BU pertenecen a entornos urbanos donde los principales elementos reflexivos son los edificios. En estos casos los retardos de propagación de los rayos secundarios son relativamente bajos, si tenemos en cuenta que los canales del tipo HT, pertenecientes a entornos rurales ligeramente montañosos, presentan retardos aproximadamente tres veces mayores para el mismo nivel de potencia. Sin embargo, la mera visualización de la respuesta temporal de los canales no es suficiente para poder concluir lo perjudicial que pueden o no ser si no se contemplan otros parámetros más específicos que puedan aportar una idea más clara del efecto que la ISI y los desvanecimientos tendrán sobre la señal recibida. Así, los parámetros *retardo medio de propagación* ( $\bar{\tau}$ ) y *dispersión RMS del retardo* ( $\bar{\tau}_{RMS}$ ) se utilizan para describir cuantitativamente el retardo introducido por el canal y se calculan como sigue:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad [\text{Ec.2.1}]$$

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N p_i \tau_i^2}{\sum_{i=1}^N p_i} \quad [\text{Ec.2.2}]$$

$$\bar{\tau}_{RMS} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad [\text{Ec.2.3}]$$

donde  $p_i$  es la potencia relativa de cada uno de los  $N$  rayos ( $\max\{p_i\}=0 \text{ dB}$ ); y  $\tau_i$  es el retardo de cada rayo respecto del primero, es decir,  $\tau_1=0$ . En la Tabla 2.4 se muestran los valores de cada parámetro para los diferentes canales así como las relaciones entre éstos y la duración del tiempo de símbolo  $T_s$  para cada sistema de comunicaciones.



Sistema	CANAL	$\bar{\tau}$ ( $\mu s$ )	$\bar{\tau}_{RMS}$ ( $\mu s$ )	$\alpha_1 = \bar{\tau} / T_s$	$\alpha_2 = \bar{\tau}_{RMS} / T_s$
GSM ( $T_s=7.3846 \mu s$ )	GSM-TU	0.8952	1.0206	0.1212	0.1382
	GSM-HT	2.7379	5.0862	0.3708	0.6888
DECT ( $T_s=1.736 \mu s$ )	DECT-C	0.4259	0.7432	0.2452	0.4281
	DECT-E	0.0382	0.0616	0.0220	0.0355
TETRA ( $T_s=55.55 \mu s$ )	TETRA-TU	0.0293	0.3814	0.0005	0.0069
	TETRA-BU	1.6693	2.3580	0.0301	0.0424
	TETRA-HT	1.8194	4.8970	0.0327	0.0882

Tabla 2.4. Características temporales de los canales

Los índices  $\alpha_{1,2}$  cuantifican la medida en que la señal recibida es afectada por la interferencia entre símbolos. Como se puede ver, los canales de entornos rurales (HT) con un retardo intrínsecamente mayores que los demás, poseen unos índices superiores dentro de cada uno de los sistemas. GSM es el más afectado debido a que la duración de la respuesta del canal es más de dos veces la duración de un símbolo.

### 2.4. Consideraciones de propagación en exteriores

En un sistema de comunicaciones móviles, la señal transmitida puede llegar al receptor a través de múltiples caminos de reflexión, los cuales no tienen por qué incluir la mayoría de las veces el camino directo o *rayo principal*. Este fenómeno es conocido como *propagación multicamino*, provocando sobre la señal recibida fluctuaciones de amplitud, fase y ángulo de llegada. La causa de esta degradación es lo que se denomina *desvanecimiento multicamino*. Los diferentes tipos de desvanecimientos pueden clasificarse según se muestra en la Tabla 2.5 [61].

Tipos de desvanecimientos							
Desvanecimientos a gran escala debidos a desplazamientos por grandes áreas		Desvanecimientos a pequeña escala debido a ligeros cambios de posición					
Atenuación media de la señal vs. distancia	Variaciones sobre la media	Variación temporal del canal				Ensanchamiento temporal de la señal	
		Descripción en el dominio del tiempo		Descripción en el dominio Doppler		Descripción en el dominio del retardo temporal	
		Desv. rápido	Desv. lento	Desv. rápido	Desv. lento	Desv. selectivo en frecuencia	Desv. plano
						Desv. selectivo en frecuencia	Desv. plano

Tabla 2.5. Clasificación de los tipos de desvanecimientos

El tipo de desvanecimiento que se da depende del entorno en el que se encuentre el sistema. En exteriores la propagación multicamino puede ser más perjudicial que en interiores, aunque también es muy diferente si se habla de propagación en medio rural o en zonas urbanas. Los desvanecimientos *a gran escala* se producen debido a los contornos del terreno (montes, bosques, bloques de edificios, etc.)

situados entre el transmisor y el receptor, modelados como pérdidas de propagación en función de la distancia según una distribución log-normal. Los desvanecimientos *a pequeña escala* se deben a la variación de la distancia entre el transmisor y el receptor cuando uno de éstos o ambos están en movimiento. Por ello, los canales de comunicaciones móviles son variantes en el tiempo. Este tipo de desvanecimientos se suele denominar desvanecimientos de Rayleigh, ya que cuando el número de caminos de propagación es grande y el rayo principal LOS no existe, la envolvente de la señal recibida se puede describir estadísticamente mediante una FDP de tipo Rayleigh. Cuando sí existe una componente principal sin desvanecimiento, la envolvente se modela como una FDP de Rice [62].

### 2.4.1. Variación temporal del canal

La caracterización de los desvanecimientos a pequeña escala puede realizarse bien desde el dominio frecuencial o Doppler, o bien desde el dominio temporal. Esta segunda visión se basa en el desplazamiento en frecuencia sufrido por el espectro de la señal recibida cuando la distancia entre transmisor y receptor varía con el tiempo. La Figura 2.4 muestra la densidad espectral de potencia de la función Doppler, correspondiente a un tono puro sin modular captado por una antena vertical con ganancia acimutal constante y cualquier ángulo de llegada uniformemente distribuido entre 0 y  $2\pi$ . La función de transferencia viene dada por [Ec.2.4] [63]:

$$D(f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi f_d \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_d}\right)^2}} & |f| < f_d \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad [\text{Ec.2.4}]$$

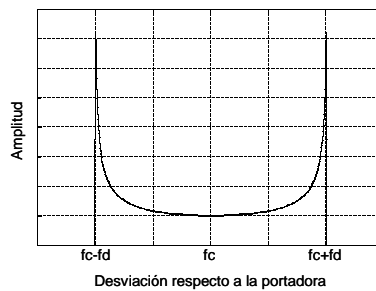


Figura 2.4. Densidad espectral de potencia Doppler

Esta ecuación puede variar en función de la aplicación de la que se trate, aunque es adecuada para el entorno de comunicaciones móviles en el que se centra este estudio. La frecuencia Doppler  $f_d$  indica el máximo desplazamiento, en valor absoluto, que puede sufrir el espectro de la señal recibida debido al movimiento del terminal móvil, siendo directamente proporcional a la velocidad del terminal  $v$  y a la frecuencia portadora  $f_c$  e inversamente proporcional a la longitud de onda  $\lambda$  según:

$$f_d = \frac{v}{c} f_c = \frac{v}{\lambda} \quad [\text{Ec.2.5}]$$

donde  $c$  es la constante de la velocidad de la luz en el vacío. La desviación de frecuencia puede ser positiva o negativa dependiendo de si el terminal se está acercando o alejando de la EB respectivamente.

Si se acude a una caracterización en el dominio del tiempo, el desvanecimiento puede clasificarse en *rápido* y *lento*. La diferencia entre desvanecimiento rápido y lento depende de la relación entre  $T_c$  y  $T_s$ .  $T_c$  es el tiempo de coherencia del canal y se define como el intervalo temporal durante el que se puede considerar al canal invariante.  $T_s$  es la duración del tiempo de símbolo. El desvanecimiento es rápido cuando  $T_c < T_s$ , es decir, el canal se comporta de manera correlada durante poco tiempo respecto a la duración de un símbolo, provocando distorsión de los símbolos en banda base (ISI), reducción de la relación señal a ruido (SNR), obtención de una BER irreducible y problemas de recuperación de sincronismo, así como degradación de las prestaciones del filtro adaptado del receptor. Por otro lado, se dice que el canal introduce desvanecimientos lentos cuando  $T_c > T_s$ . Esto hace que la correlación temporal del canal se mantenga estable durante un intervalo mayor que la duración de un símbolo, siendo menos perjudicial que el desvanecimiento rápido, ya que en este caso, igual que cuando el desvanecimiento es plano, la principal consecuencia es la pérdida de SNR.

La relación entre el tiempo de coherencia y la frecuencia Doppler se podría presumir a priori como la relación inversa que existe en cualquier señal periódica entre su período y su frecuencia, esto es,  $T_c = 1/f_d$ . Sin embargo, existen definiciones más precisas, basadas en la correlación de la respuesta del canal a un tono [64] que estiman el tiempo de coherencia como:

$$T_c = \frac{9}{16\pi f_d} \quad [\text{Ec.2.6}]$$

La Figura 2.5 muestra un ejemplo de desvanecimiento a pequeña escala con variación temporal del canal. Es un caso particularizado para una frecuencia portadora de 450 MHz y una velocidad del terminal móvil de 200 Km/h, con lo que la frecuencia Doppler es de 83.33 Hz. Si se calcula el tiempo necesario para recorrer la mitad de una longitud de onda (la amplitud de la envolvente tiene desvanecimientos cada  $1/2f_d$ ), resulta que la distancia  $\lambda/2$  se recorre en 6 ms, es decir, se produce un desvanecimiento, que puede ser más o menos profundo, cada  $\lambda/2$  metros. Así, observando que el tiempo de coherencia es el tiempo que se puede estimar al canal invariante, si se considera el valor absoluto de la envolvente, los desvanecimientos se producen cada  $T_c$ , calculado según:

$$T_c = \frac{1}{2f_d} \quad [\text{Ec.2.7}]$$

valor que será utilizado desde ahora en esta tesis.

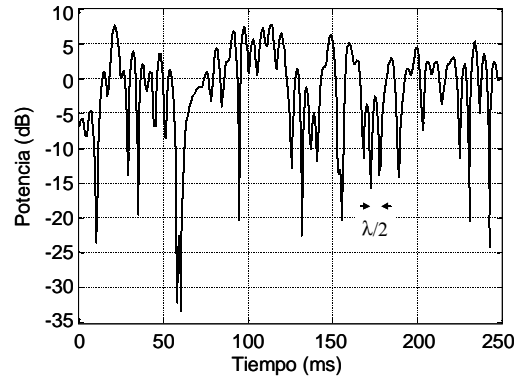


Figura 2.5. Envoltura típica de desvanecimiento Rayleigh (450 MHz, 200 Km/h)

### 2.4.2. Ensanchamiento temporal de la señal

La relación entre la duración o ensanchamiento de la respuesta al impulso del canal y la duración del tiempo de símbolo, se puede contemplar en términos de desvanecimientos *planos* y desvanecimientos *selectivos en frecuencia*. La elección de cuál es el último rayo recibido depende del valor umbral de potencia elegido, cuyo valor suele variar de 10 a 20 dB relativos a la máxima potencia recibida. Así, un canal posee desvanecimientos selectivos en frecuencia cuando  $T_r > T_s$ , es decir, la duración de la respuesta del canal es mayor que el tiempo de símbolo. Este fenómeno produce valles en la respuesta espectral del canal, con lo que existen zonas frecuenciales dentro de la banda de interés con diferentes niveles de potencia, produciendo la distorsión temporal previamente comentada o ISI.

Por otro lado, cuando  $T_r < T_s$  se dice que el canal presenta desvanecimientos planos, ya que el espectro de la respuesta del canal es en este caso plano en toda la banda de transmisión, afectando al nivel de SNR de la señal recibida.

El retardo medio del canal tiene su parámetro análogo en el dominio frecuencial, llamado *ancho de banda de coherencia*,  $B_r$ , definido como:

$$B_r \approx \frac{1}{\bar{\tau}} \quad [\text{Ec.2.8}]$$

y da una idea aproximada del rango de frecuencias en las que la respuesta espectral del canal se comporta constante en amplitud y lineal en fase. Con lo cual, un desvanecimiento plano afectaría de la misma manera a todas las componentes frecuenciales dentro del ancho de banda de coherencia.

## 2.5. Ecuación en sistemas de comunicaciones móviles

Los principales sistemas de comunicaciones móviles en funcionamiento actualmente y descritos al principio de este capítulo, utilizan en el receptor diferentes técnicas de ecualización y de protección frente a los efectos perjudiciales del canal, como los desvanecimientos multicamino o la interferencia entre símbolos, intentando reducir al mínimo las consecuencias de estos perjuicios.

La característica que tienen en común la gran mayoría de técnicas y algoritmos de ecualización es la de disponer de una secuencia de bits conocidos tanto por la estación base como por el terminal móvil, que insertadas en una o más partes de la trama, son utilizadas por el ecualizador del receptor para estimar la respuesta del canal en un instante temporal concreto, calculando de esta manera los coeficientes adecuados para procesar la información que se reciba posteriormente. Esta porción de bits se denomina *secuencia de entrenamiento* que junto con el campo de información posterior, formarán lo que se denominará de aquí en adelante como *período de ecualización*,  $T_{ec}$ . La secuencia de entrenamiento, dependiendo del sistema que se trate y del grado de hostilidad del entorno, puede variar en longitud. En ubicaciones de interiores, cuando el tiempo de bit es mucho mayor que la dispersión del canal, la señal está afectada principalmente por atenuación, ya que la dispersión produce desvanecimientos planos, con lo que la ISI no es un grave problema. Sin embargo, en entornos de exteriores, la dispersión y variabilidad temporal del canal son mayores debido a la propagación multicamino y a la movilidad de los terminales, produciéndose desvanecimientos selectivos en frecuencia que hacen necesario aplicar métodos de ecualización adaptativa.

Desde el punto de vista de ecualización, el entorno de propagación de la señal repercute notablemente sobre la estructura de la trama. En la Figura 2.6 se muestran las distintas posibilidades que pueden suceder relativas al efecto que produce un desvanecimiento con un tiempo de coherencia dado sobre la duración del período de ecualización. Si el tiempo de coherencia  $T_c$  es mayor que  $T_{ec}$ , la tasa de desvanecimientos por período de ecualización,  $F_r$ , definida como:

$$F_r = \frac{T_{ec}}{T_c} \quad [\text{Ec.2.9}]$$

es menor que 1, es decir,  $F_r = T_{ec} / T_c < 1$  con lo que si el desvanecimiento no es muy profundo, el ecualizador podrá recuperar o minimizar la degradación de la señal. En el segundo caso, cuando  $F_r \approx 1$  el peor instante en el que puede ocurrir el desvanecimiento es dentro de la secuencia de entrenamiento, ya que el ecualizador no es capaz de estimar correctamente el canal ni de ajustar sus coeficientes de manera adecuada, con lo que la recepción del campo de información puede ser defectuosa. Por último, si  $F_r > 1$  se dan las dos situaciones anteriores, es decir, pueden ocurrir desvanecimientos tanto en el entrenamiento como en la información, siendo necesario aplicar técnicas de ecualización bidireccional [65], las cuales serán explicadas en capítulos posteriores.

En general, para que la señal recibida se pueda recuperar a nivel físico con la menor tasa de errores, se deberá cumplir que  $F_r \leq 1$ . Si se desarrolla esta condición, se tiene que:

$$T_c \geq T_{ec} \Rightarrow \frac{c f_c}{2v} \geq \frac{L_{ec}}{V_b} \quad [\text{Ec.2.10}]$$

donde  $f_c$  (Hz) es la frecuencia portadora;  $v$  es la velocidad del terminal móvil (m/s);  $V_b$  es la velocidad binaria (bps); y  $L_{ec}$  es la longitud del período de ecualización (bits). Esta ecuación refleja la relación entre parámetros de diseño de diferente naturaleza que hay que tener en cuenta a la hora de definir la estructura de la trama e implementar el método de ecualización.

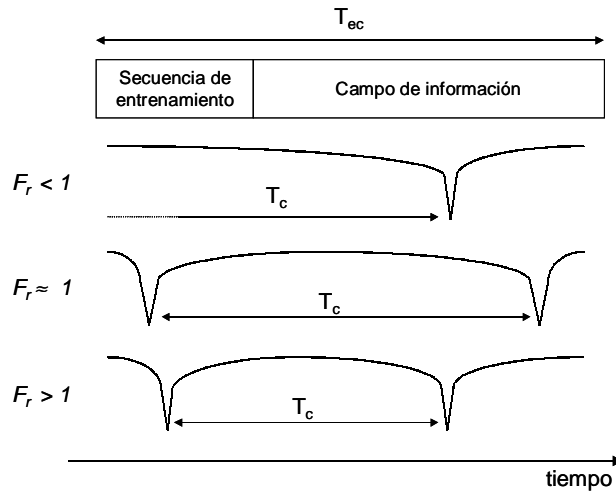


Figura 2.6. Efecto del tiempo de coherencia sobre el formato de la trama

## 2.6. Antenas adaptativas

Este trabajo incluye un estudio sobre las prestaciones derivadas de incorporar antenas inteligentes, denominadas también antenas adaptativas [66], [67], en el equipo receptor de la estación base. Este tipo de antenas opera en el dominio espacial, puesto que cada elemento del array recibe la señal por diferentes caminos de propagación. Así, se podría contemplar la relación entre los ecualizadores transversales y las antenas adaptativas como la dualidad de la ecualización en el dominio temporal y en el espacial respectivamente. Esto provocará que en entornos de propagación en los que predomine el efecto de un multicamino severo, se obtengan mejores resultados cuando se introduzca una antena adaptativa en la estación base.

Puesto que la intención de esta tesis no es profundizar exhaustivamente en el comportamiento y caracterización de las antenas adaptativas, se proporcionará una visión somera de las prestaciones que puede introducir su utilización. En los siguientes apartados se explican los diferentes tipos de *arrays* de antenas evaluados, tanto desde el punto de vista de su estructura física como de los algoritmos implementados sobre ellas, con objeto de poder utilizarlos en el protocolo de acceso al medio que se diseñe en el Capítulo 5.

### 2.6.1. Array lineal

En la Figura 2.7 se muestra un array de antenas en el que la distribución de los elementos básicos, o dipolos, es lineal. Cada uno de estos elementos tiene un peso variable que controla la aportación del mismo sobre la estructura completa del array. El hecho de agrupar varios dipolos provoca la modificación del patrón de radiación del conjunto con respecto al de un único elemento. Esta modificación viene cuantificada por el *factor de array* [59].

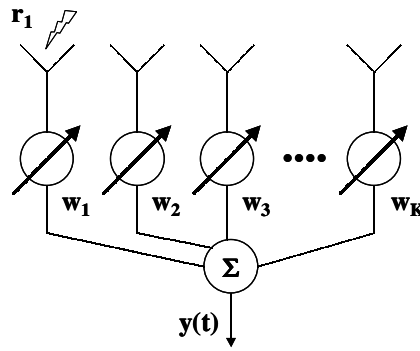


Figura 2.7. Array lineal

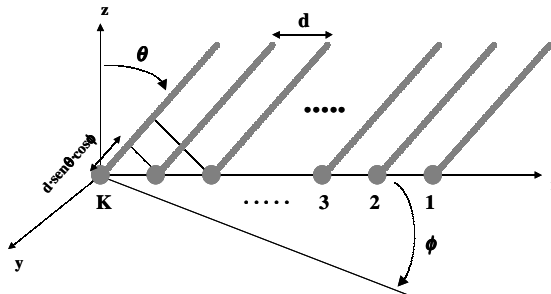


Figura 2.8. Esquema de un array lineal sobre el eje X

El factor de array para una estructura lineal situada sobre el eje X (ver Figura 2.8) viene dado por:

$$FA_L = \sum_{i=1}^K w_i \cdot e^{j(i-1)\beta \cdot d \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{cos}\phi} \quad [\text{Ec.2.11}]$$

donde  $\beta=2\pi/\lambda$ ;  $w_1...w_K$  son los pesos del array;  $d$  es la distancia entre dipolos;  $K$  es el número de antenas simples y  $(\theta, \phi)$  son los ángulos de elevación y acimut respectivamente.

### 2.6.2. Array circular

Otra posible configuración de un array es en geometría circular como el que se muestra en la Figura 2.9. Cada uno de los elementos tiene un peso variable que controla la aportación del mismo sobre el array completo. Al agrupar varios dipolos formando un círculo se tiene una modificación del patrón de radiación del conjunto con respecto al de un único elemento que viene representada por el factor de array.

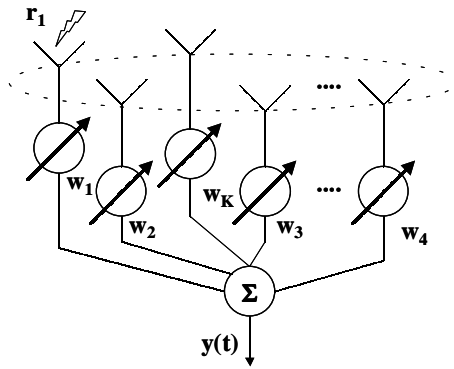


Figura 2.9. Array circular

Si, como en la Figura 2.10, tenemos que el array circular está situado sobre el plano XY, el factor de array viene dado por:

$$FA_C = \sum_{i=1}^K w_i \cdot e^{j\beta \cdot a \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos(\phi - \phi_i)} \quad [\text{Ec.2.12}]$$

$$\phi_i = i \frac{360^\circ}{K} \quad i = 1 \dots K \quad [\text{Ec.2.13}]$$

donde las variables son las mismas que en el array lineal, siendo  $a$  el radio del array.

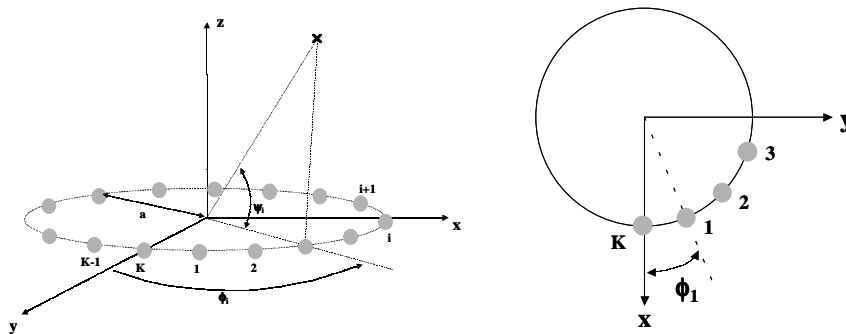


Figura 2.10. Esquema de un array circular sobre el plano XY

### 2.6.3. Array rectangular

La última configuración de arrays que se va a ver es la rectangular. De nuevo, cada uno de los elementos tiene un peso variable que controla la aportación del mismo sobre el array completo. La modificación del patrón de radiación del conjunto con respecto al de un único elemento, igual que en las estructuras anteriores, viene representada por el factor de array. Si, como en la Figura 2.11, se tiene que la malla rectangular está situada sobre el plano XY, el factor de array viene dado por:

$$FA_R = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot e^{j(m-1)\beta \cdot d_x \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\phi} \cdot e^{j(n-1)\beta \cdot d_y \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\phi} \quad [\text{Ec.2.14}]$$



donde  $d_x$  y  $d_y$  son las distancias entre dipolos en cada eje;  $M$  es el número de dipolos en el eje X;  $N$  es el número de dipolos en el eje Y (hay un total de  $K=M \cdot N$  elementos).

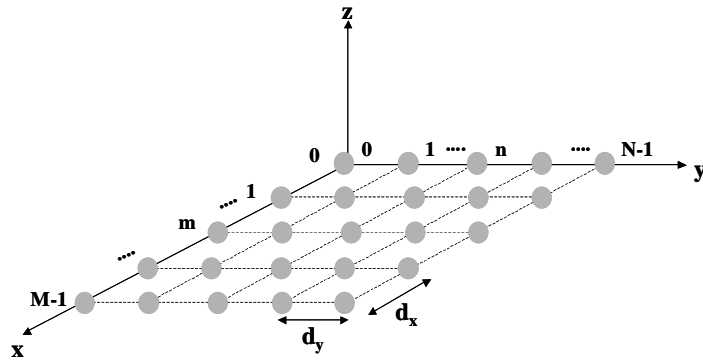


Figura 2.11. Esquema de un array rectangular sobre el plano XY



# **CAPÍTULO 3**

## **ECUALIZACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES. ALGORITMOS Y PRESTACIONES**

---

### **3.1. Introducción**

Este capítulo realiza un estudio del nivel físico de diferentes sistemas de comunicaciones móviles existentes, evaluando sobre ellos un conjunto de algoritmos implementados tanto en ecualizadores como en antenas adaptativas, realizando una comparación de las diferentes prestaciones conseguidas en cada uno de los escenarios. Asimismo, se propone un diseño de nivel físico ajustado a las características de un entorno de propagación en exteriores que cumpla las mínimas condiciones de calidad requeridas.

No es el objetivo de este capítulo presentar un análisis exhaustivo del funcionamiento de cada algoritmo. Simplemente se realiza una exposición de cada uno describiendo brevemente sus principales características y prestaciones.

### **3.2. Descripción del sistema**

El estudio llevado a cabo sobre los métodos de ecualización se ha basado en el diagrama de

bloques mostrado en la Figura 3.1. En éste se presentan los componentes funcionales del transmisor, del canal y del receptor a nivel banda base. El esquema es el mismo para cualquiera de los sistemas móviles tratados, tan sólo puede variar el tipo de modulación, el canal utilizado, las respuestas de los filtros y otros parámetros en función del sistema evaluado.

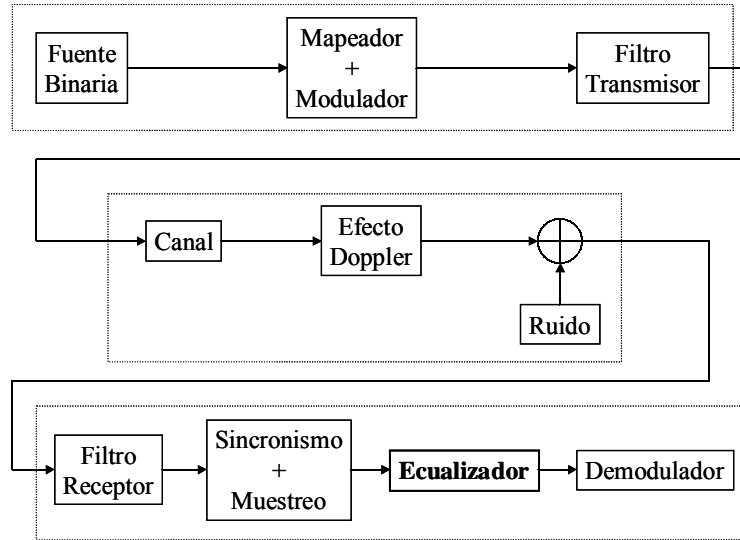


Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema simulado

### 3.3. Algoritmos lineales

El esquema de un ecualizador lineal es representado generalmente en estructura de filtro transversal como el que se muestra en la Figura 3.2.

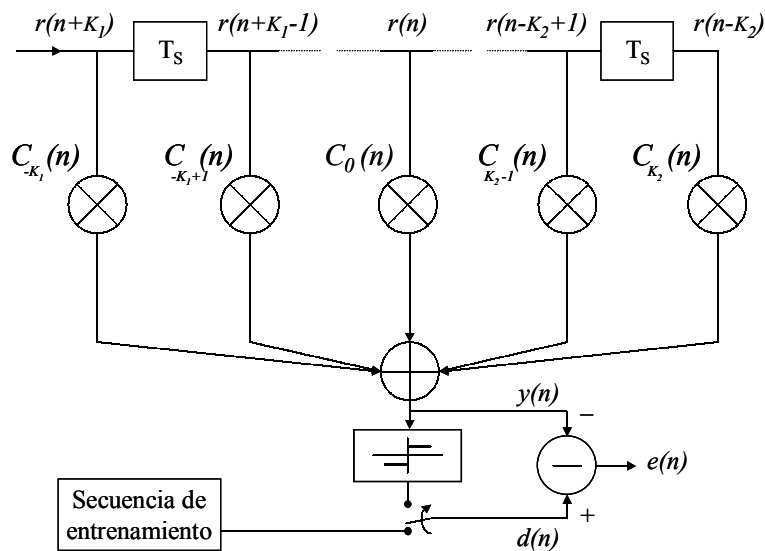


Figura 3.2. Ecuador lineal en estructura de filtro transversal

El conjunto de los  $N$  pesos o coeficientes  $\vec{C}(n)$  del ecualizador están divididos en dos partes: la parte no causal ( $K_1$ ) y la causal ( $K_2$ ), cada una a un lado del coeficiente central  $C_0(n)$ , siendo  $N=K_1+K_2+1$ . Estos coeficientes ponderan las muestras de la señal recibida  $r(n)$  retardadas un múltiplo del tiempo de símbolo. Se da por supuesto que es función del recuperador de sincronismo y del muestreador del receptor entregar al ecualizador las muestras que maximicen la apertura del diagrama de ojos. Así, lo que se obtiene a la salida del filtro transversal no es más que el producto escalar del vector de la señal recibida  $\vec{r}(n)$  por la respuesta impulsiva del ecualizador  $\vec{C}(n)$ , la cual se obtiene fácilmente sin más que representar de forma discreta (espaciados  $T_s$ ) los coeficientes del ecualizador. La señal ecualizada resulta:

$$y(n) = \vec{C}^T(n) \cdot \vec{r}(n) = \sum_{i=-K_1}^{K_2} C_i(n) \cdot r(n-i) \quad [\text{Ec.3.1}]$$

donde  $T$  denota transpuesto, siendo  $\vec{C}(n)$  y  $\vec{r}(n)$  vectores columna con  $N$  filas cuyo contenido es:

$$\vec{C}(n) = [C_{-K_1}(n) \quad C_{-K_1+1}(n) \quad \dots \quad C_0(n) \quad \dots \quad C_{K_2-1}(n) \quad C_{K_2}(n)] \quad [\text{Ec.3.2}]$$

$$\vec{r}(n) = [r(n+K_1) \quad r(n+K_1-1) \quad \dots \quad r(n) \quad \dots \quad r(n-K_2+1) \quad r(n-K_2)] \quad [\text{Ec.3.3}]$$

Dentro de los algoritmos lineales, los más conocidos son dos: LMS y RLS. Ambos son de sencilla implementación y reducida complejidad, lo que les hace ideales para entornos en los que los perjuicios del canal no sean muy severos, es decir, baja ISI y nivel de potencia de ruido moderado. El tercer algoritmo denominado CMA, aunque no utiliza la estructura de un filtro transversal, es incluido dentro de los algoritmos lineales por seguir dicha filosofía. De hecho, éste es el de mayor sencillez de implementación, con unas características que le convierten en un candidato ideal para entornos con reducidos niveles de ISI, es decir, con canales de bajo retardo medio de propagación donde el principal factor degradante es el efecto Doppler, el cual en estas condiciones produce desvanecimientos planos o poco selectivos en frecuencia. El funcionamiento de todos ellos se presenta a continuación.

### 3.3.1. LMS (Least Mean Square)

El algoritmo LMS se basa en la minimización del error cuadrático menor (LSE) instantáneo  $J(n)=|e(n)|^2$ , siendo  $e(n)$  la diferencia entre la señal deseada y la salida del ecualizador. El algoritmo, basándose en la estimación del gradiente del LSE,  $\nabla(J(n))$ , realiza la actualización de los coeficientes en los pasos que se explican a continuación.

Sea  $\vec{C}(n)$  el vector de coeficientes del ecualizador en el símbolo  $n$ ;  $\vec{r}(n)$  el vector de muestras de la señal recibida;  $y(n)$  la señal de salida del ecualizador en cada instante;  $d(n)$  la señal deseada, que al inicio de la trama equivale al símbolo de entrenamiento correspondiente;  $\mu$  el parámetro de convergencia que controla la velocidad de adaptación y la estabilidad del algoritmo ( $0 < \mu < 2/\lambda_{max}$ , donde  $\lambda_{max}$  es el mayor autovalor de la matriz de covarianza de la señal recibida);  $e(n)$  el error cometido en cada iteración; el algoritmo LMS puede resumirse de la siguiente manera [68]:

Para cada trama:

- ❑ Inicializar el vector de coeficientes a cero,  $\vec{C}(0) = \vec{0}$ .
- ❑ En cada iteración  $n$  se calcula un símbolo de salida y se actualizan los coeficientes mediante el siguiente algoritmo:

$$y(n) = \vec{C}^T(n-1) \cdot \vec{r}(n) \quad [\text{Ec.3.4}]$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad [\text{Ec.3.5}]$$

$$\vec{C}(n) = \vec{C}(n-1) + \mu \cdot e(n) \cdot \vec{r}^*(n) \quad [\text{Ec.3.6}]$$

donde  $*$  denota complejo conjugado. La señal deseada  $d(n)$  en cada iteración es conocida durante la fase de entrenamiento, mientras que durante el período de seguimiento corresponde a la señal detectada por el decisor a la salida del ecualizador, tal y como aparece en la Figura 3.2.

Este algoritmo, debido a su lenta convergencia, ha sido desestimado para su implementación individual. Sin embargo, será utilizado en las antenas adaptativas como se explica más adelante.

### 3.3.2. RLS (Recursive Least Square)

La convergencia del algoritmo LMS es muy lenta, especialmente cuando los autovalores de la matriz de covarianza de la señal de entrada al ecualizador tiene una gran dispersión, es decir,  $\lambda_{max}/\lambda_{min} \gg 1$ . Por ello, para conseguir mayor rapidez de convergencia se recurre a la estimación del error en términos de media temporal, en lugar de la media estadística llevada a cabo en LMS. En este caso el LSE se define como:

$$J(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} \cdot e^*(i) \cdot e(i) \quad [\text{Ec.3.7}]$$

Manteniendo las mismas variables que en LMS, el algoritmo RLS puede resumirse de la manera siguiente [68]:

Para cada trama:

- ❑ Inicializar las siguientes variables:

$$\vec{C}(0) = \vec{0}$$

$$\vec{p}(0) = \vec{0}$$

$$d(0) = 0$$

$$[R(0)]^{-1} = \delta \cdot [I]$$

siendo  $[I]$  la matriz identidad de dimensiones  $N \times N$ ,  $\delta$  una constante escalar positiva grande,  $[R]$  la matriz  $N \times N$  de correlación de la señal de entrada al ecualizador, y  $\vec{p}$  un vector auxiliar de dimensiones  $N \times 1$  cuya funcionalidad viene reflejada en el algoritmo a continuación.

- ❑ En cada iteración se calcula un símbolo de salida y se actualizan los coeficientes mediante el siguiente algoritmo:

$$y(n) = \bar{C}^H(n-1) \cdot \bar{r}(n) \quad [\text{Ec.3.8}]$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad [\text{Ec.3.9}]$$

$$\bar{p}(n) = \frac{\bar{r}(n) \cdot [R(n-1)]^{-1}}{\lambda + \bar{r}(n) \cdot [R(n-1)]^{-1} \cdot \bar{r}^T(n)} \quad [\text{Ec.3.10}]$$

$$[R(n)]^{-1} = \frac{[R(n-1)]^{-1} - \bar{p}(n) \cdot \bar{r}^T(n) \cdot [R(n-1)]^{-1}}{\lambda} \quad [\text{Ec.3.11}]$$

$$\bar{C}(n) = \bar{C}(n-1) + \bar{p}(n) \cdot e^*(n) \quad [\text{Ec.3.12}]$$

donde  $^H$  denota complejo conjugado transpuesto y  $\lambda$  es un factor dependiente de la variabilidad temporal del canal. Generalmente, éste oscila entre 0.5 para canales muy variantes y 1 para canales estáticos.

Analizando las expresiones anteriores, se llega a la conclusión de que la matriz  $[R]^{-1}$  siempre es una matriz diagonal (esto es debido a la inicialización de la misma como una constante multiplicada por la matriz identidad) donde todos los elementos de dicha diagonal son iguales. Teniendo en cuenta esto, se puede realizar una mejora del algoritmo sustituyendo la matriz  $[R(n)]$  por un escalar  $R(n)$  igual al valor de la diagonal principal. Así, el cálculo de  $p(n)$  y  $R(n)$  se simplifica como sigue:

$$\bar{p}(n) = \frac{R^{-1}(n-1) \cdot \bar{r}(n)}{\lambda + R^{-1}(n-1) \cdot \bar{r}(n) \cdot \bar{r}^T(n)} \quad [\text{Ec.3.13}]$$

$$R^{-1}(n) = \frac{R^{-1}(n-1)}{\lambda} \cdot (1 - \bar{p}(n) \cdot \bar{r}^T(n)) \quad [\text{Ec.3.14}]$$

Puesto que los algoritmos lineales no presentan buenas prestaciones cuando las perturbaciones del canal son excesivas, se ha decidido, igual que con LMS, desestimar la implementación de RLS sobre un filtro transversal y utilizarlo combinado con una antena adaptativa, como se verá más adelante.

### 3.3.3. CMA (Constant Modulus Algorithm)

Como su propio nombre indica, el algoritmo CMA realiza un control automático de ganancia para mantener el módulo de la señal recibida constante<sup>9</sup>, mientras que la fase es corregida respecto de la original. Si bien CMA no es estrictamente un algoritmo de ecualización al no compensar la ISI introducida por el canal, se incluye dentro de este género al realizar funciones de corrección de módulo y fase propias de un ecualizador.

El funcionamiento de CMA se basa en el cálculo de un factor corrector  $W$ , escalar complejo, que se encarga de devolver los símbolos recibidos a sus puntos correctos dentro de la constelación correspondiente. El valor de  $W$  puede ser actualizado trama a trama (estático) o símbolo a símbolo (adaptativo). En su versión estática el algoritmo se resume como sigue:

<sup>9</sup> Siempre y cuando los símbolos de la constelación de la señal estén situados en una circunferencia.

Para cada trama:

- Una vez recibida toda la secuencia de entrenamiento, calcular el valor medio de  $W$  según:

$$\bar{W} = E \left\{ \frac{d(n)}{r(n)} \right\} \quad n = 0 \dots N_E - 1 \quad [\text{Ec.3.15}]$$

donde  $d(n)$  son los símbolos de entrenamiento originales esperados;  $r(n)$  son los símbolos de entrenamiento recibidos; y  $N_E$  indica el número de símbolos de entrenamiento en cada trama.

- El resto de símbolos de la trama se calcula como sigue:

$$y(n) = \bar{W} \cdot r(n) \quad n = N_E \dots N_T - 1 \quad [\text{Ec.3.16}]$$

donde  $N_T$  es el número de símbolos que contiene una trama.

En el caso adaptativo, la corrección se realiza mediante una función lineal calculada a partir de la tendencia de  $W$  obteniendo, durante la fase de entrenamiento, la pendiente  $\Delta$  (dividida en módulo y fase) de  $d(n)/r(n)$ . Así, el algoritmo resulta de la siguiente manera:

Para cada trama:

- Una vez recibida toda la secuencia de entrenamiento, calcular  $\bar{W}$  según:

$$\text{mod}(\Delta) = \frac{\text{mod} \left( \frac{d(N_E - 1)}{r(N_E - 1)} \right) - \text{mod} \left( \frac{d(0)}{r(0)} \right)}{N_E} \quad [\text{Ec.3.17}]$$

$$\text{fase}(\Delta) = \frac{\text{fase} \left( \frac{d(N_E - 1)}{r(N_E - 1)} \right) - \text{fase} \left( \frac{d(0)}{r(0)} \right)}{N_E} \quad [\text{Ec.3.18}]$$

$$\bar{W}(n) = \Delta \cdot n + \frac{d(0)}{r(0)} \quad n = 0 \dots N_E - 1 \quad [\text{Ec.3.19}]$$

- El resto de símbolos de la trama se calcula como sigue:

$$y(n) = \bar{W}(n) \cdot r(n) \quad n = N_E \dots N_T - 1 \quad [\text{Ec.3.20}]$$

Como se puede comprobar a la vista del algoritmo, con CMA únicamente se consigue compensar la rotación de fase introducida por la llegada al receptor de la señal afectada por desviación Doppler o por reflexiones en el rayo principal del canal. Por lo tanto, será un algoritmo válido en entornos de propagación LOS en los que el retardo medio del canal sea muy bajo y el desvanecimiento sea plano.

### 3.4. Algoritmos no lineales

Cuando la distorsión introducida por el canal es demasiado severa para utilizar un ecualizador lineal, es necesario recurrir a los ecualizadores no lineales. En particular, en los casos en los que el canal presenta nullos en su respuesta frecuencial, el ecualizador lineal no responde adecuadamente, ya que



tiende a asignar mayor ganancia entorno del nulo, incrementando así el ruido aditivo en la señal ecualizada [69].

Los principales métodos de ecualización no lineal son tres: ecualización realimentada por decisión (DFE) [70], probabilidad máxima a posteriori (MAP) [71] y estimación de secuencia con máxima verosimilitud (MLSE) [72]. En este trabajo sólo se trata la primera opción, el DFE, por ser un tipo de ecualizador ampliamente utilizado en los sistemas de comunicaciones móviles mencionados a lo largo de la tesis.

### 3.4.1. Ecualizador Realimentado por Decisión (DFE)

La idea básica de un DFE es que una vez que un símbolo ha sido detectado, la ISI residual que aún contiene y que afectará a los símbolos futuros puede ser estimada y extraída de dichos símbolos. Esta idea es implementada sobre una estructura de filtro transversal, como se muestra en la Figura 3.3, dividida en dos partes: la parte hacia adelante o de alimentación directa (FFF) y la parte hacia atrás o realimentada (FBF). Esta segunda es alimentada por los símbolos detectados en la parte directa, adaptando sus coeficientes para cancelar la ISI del símbolo actual procedente de símbolos previamente detectados. La manera de ajustar dichos coeficientes, tanto de la parte directa como de la realimentada, es la misma que en un ecualizador lineal, es decir, se pueden utilizar los algoritmos LMS o RLS explicados anteriormente, teniendo en cuenta que ahora se adaptan dos bloques de coeficientes separados por la pre-detección que divide a ambos.

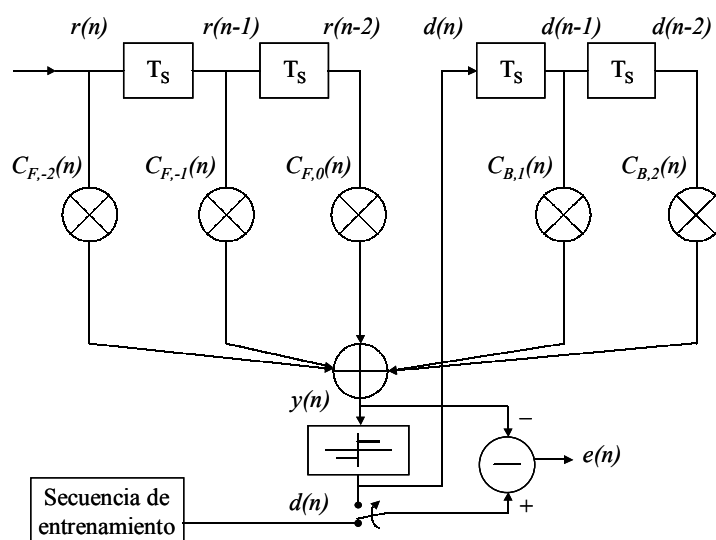


Figura 3.3. Ecualizador DFE en estructura de filtro transversal

El algoritmo LMS se ha desestimado debido a su lenta convergencia para implementarlo en un ecualizador DFE. A continuación, se presenta la secuencia de ecualización de un DFE, cuyos coeficientes se actualizan mediante el algoritmo RLS basado en el gradiente.

Para cada trama:

- Inicializar las siguientes variables:

$$\vec{C}_F(0) = \vec{0} \quad \vec{C}_B(0) = \vec{0}$$

$$\vec{p}(0) = \vec{0}$$

$$d(0) = 0$$

$$[R(0)]^{-1} = \delta \cdot [I]$$

donde  $\vec{C}_F(n)$  y  $\vec{C}_B(n)$  son los vectores de coeficientes de dimensiones  $N_F \times 1$  y  $N_B \times 1$  de la parte directa y de la realimentada respectivamente, siendo  $N = N_F + N_B$ .

- En cada iteración se calcula la salida de la parte directa y de la realimentada:

$$y_F(n) = \vec{C}_F^H(n-1) \cdot \vec{r}_F(n) \quad [\text{Ec.3.21}]$$

$$y_B(n) = \vec{C}_B^H(n-1) \cdot \vec{r}_B(n) \quad [\text{Ec.3.22}]$$

$$y(n) = y_F(n) - y_B(n) \quad [\text{Ec.3.23}]$$

donde  $\vec{r}_F(n)$  y  $\vec{r}_B(n)$  son los símbolos almacenados en ese momento en cada parte del ecualizador.

- Se calcula la señal de error:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad [\text{Ec.3.24}]$$

y la actualización de los coeficientes se realiza concatenando los vectores  $\vec{r}_F(n)$  y  $\vec{r}_B(n)$  en uno solo:

$$\vec{r}(n) = [\vec{r}_F^T(n) \quad \vec{r}_B^T(n)]^T \quad [\text{Ec.3.25}]$$

$$\vec{p}(n) = \frac{\vec{r}(n) \cdot [R(n-1)]^{-1}}{\lambda + \vec{r}(n) \cdot [R(n-1)]^{-1} \cdot \vec{r}^T(n)} \quad [\text{Ec.3.26}]$$

$$[R(n)]^{-1} = \frac{[R(n-1)]^{-1} - \vec{p}(n) \cdot \vec{r}^T(n) \cdot [R(n-1)]^{-1}}{\lambda} \quad [\text{Ec.3.27}]$$

$$\vec{C}_F(n) = \vec{C}_F(n-1) + \vec{p}_F(n) \cdot e^*(n) \quad [\text{Ec.3.28}]$$

$$\vec{C}_B(n) = \vec{C}_B(n-1) - \vec{p}_B(n) \cdot e^*(n) \quad [\text{Ec.3.29}]$$

donde  $\vec{p}_F(n)$  y  $\vec{p}_B(n)$  son las dos partes del vector  $\vec{p}(n)$ .

Las buenas prestaciones del ecualizador DFE, desde el punto de vista de reducción de ISI, combinadas con la rápida convergencia de algoritmos del tipo RLS, hacen de éste, como se verá más adelante en la presentación de resultados, una elección muy adecuada para entornos de comunicaciones inalámbricas.

### 3.4.2. Ecualizador ciego

Todos los algoritmos presentados hasta aquí requieren una secuencia de entrenamiento inicial para ajustar sus coeficientes de manera que en la fase de seguimiento puedan seguir las variaciones del

canal adecuadamente. Sin embargo, existe un tipo de ecualizadores que no necesitan esta secuencia previa para funcionar correctamente [73]. Este es el caso del ecualizador ciego [74], llamado así precisamente por la naturaleza de su mecanismo.

Este tipo de algoritmos proporcionan ecualización y recuperación de portadora conjuntamente. La única diferencia respecto de los algoritmos anteriores es una pequeña modificación en la estimación del error que, como se verá, no incrementa el grado de complejidad. La primera etapa del algoritmo ciego es realizar un período de inicialización y configuración del ecualizador para conmutar posteriormente al modo estándar de operación. Si durante el funcionamiento en este modo sucede algún cambio brusco en el comportamiento del canal se retrocede al modo de inicialización, conmutando nuevamente al modo estándar. Debido a que el formato de la trama en todos los sistemas evaluados en esta tesis posee un período de entrenamiento, se aprovechará esta característica para realizar la inicialización del ecualizador ciego, aunque como se ha comentado, dicha inicialización puede ser realizada sin un entrenamiento propiamente dicho.

Generalmente, los ecualizadores ciegos se implementan sobre filtros transversales del tipo DFE, por lo que se dividen en dos: la parte hacia adelante o directa y la realimentada. La secuencia de operaciones realizadas para implementar el algoritmo ciego evaluado en este trabajo se resume a continuación [74]:

Para cada trama:

- Inicializar las siguientes variables:

$$\vec{C}_F(0) = \vec{0} \quad \vec{C}_B(0) = \vec{0}$$

$$d(0) = 0$$

- En cada iteración se calcula la salida de la parte directa y de la realimentada:

$$y_F(n) = \vec{C}_F^H(n-1) \cdot \vec{r}_F(n) \quad [\text{Ec.3.30}]$$

$$y_B(n) = \vec{C}_B^H(n-1) \cdot \vec{r}_B(n) \quad [\text{Ec.3.31}]$$

$$y(n) = y_F(n) - y_B(n) \quad [\text{Ec.3.32}]$$

- La señal de error se calcula en dos pasos:

$$e_T(n) = y(n) - d(n) \quad [\text{Ec.3.33}]$$

$$e(n) = (k_1 + k_2 |e_T(n)|) \cdot e_T(n) \quad [\text{Ec.3.34}]$$

donde  $e_T(n)$  se define como el pseudo-error entre la salida del ecualizador y el símbolo detectado, siendo  $k_1$  y  $k_2$  constantes cuyos valores dependen del tipo de modulación.

- Los coeficientes se actualizan como sigue:

$$\vec{C}_F(n) = \vec{C}_F(n-1) - \mu \cdot \vec{r}_F(n) \cdot e^*(n) \quad [\text{Ec.3.35}]$$

$$\vec{C}_B(n) = \vec{C}_B(n-1) + \mu \cdot \vec{r}_B(n) \cdot e^*(n) \quad [\text{Ec.3.36}]$$

donde  $\mu$  es un factor de ganancia que marca la rapidez de adaptación de los coeficientes.

### 3.5. Algoritmos bidireccionales

Cuando las condiciones de propagación son severas desde el punto de vista de los desvanecimientos, se hace necesario aplicar técnicas mejoradas de ecualización que traten de reducir al mínimo las consecuencias de estos fenómenos. La solución aplicada en estos casos es la ecualización bidireccional [75], [76], [77]. Esto significa que cada trama se ecualiza tanto en sentido normal (hacia adelante) como en sentido inverso (del final de la trama hacia el principio).

Los algoritmos bidireccionales realizan la ecualización hacia adelante utilizando la secuencia de entrenamiento normalmente como se ha explicado hasta ahora en anteriores apartados. Sin embargo, para llevar a cabo la ecualización hacia atrás se emplea la secuencia de entrenamiento ubicada a continuación del último símbolo de la trama. Es decir, la trama está, en este caso, delimitada por sendas secuencias de entrenamiento, correspondientes a la ecualización hacia adelante y hacia atrás respectivamente. En la Figura 3.4 se muestra un ejemplo gráfico de esta técnica.

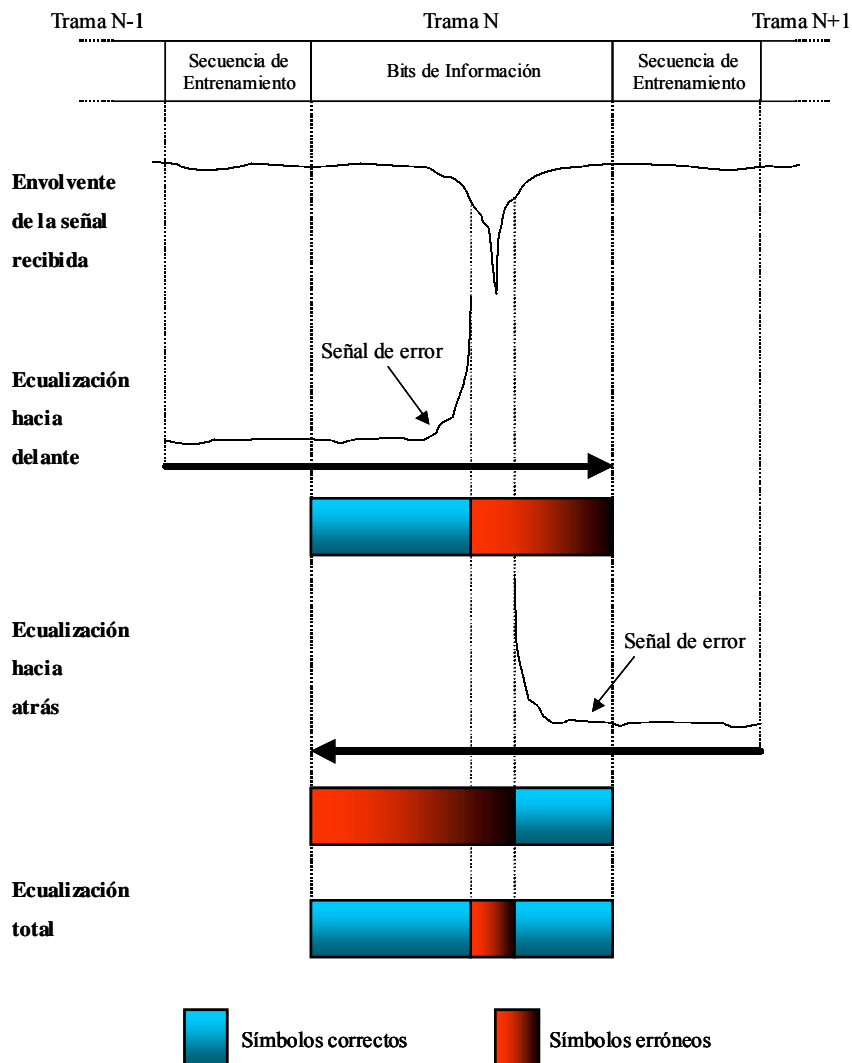


Figura 3.4. Funcionamiento de la ecualización bidireccional

Una vez que se ha realizado la ecualización en cada sentido, se comparan los vectores de error de cada uno, eligiéndose los símbolos cuyo error sea menor. Así, si aparece un desvanecimiento profundo a lo largo de la trama, la ecualización hacia adelante dejará de funcionar correctamente a partir de dicho instante. Sin embargo, los símbolos correctamente ecualizados hacia atrás corresponden precisamente a esos que se han recibido a partir del desvanecimiento. Con lo cual, combinando ambas pasadas del ecualizador se obtiene una trama con un número de símbolos erróneos mucho menor que si se hubiera realizado una ecualización unidireccional convencional. Además, se solventa otra situación indeseada que ocurre cuando el desvanecimiento sucede durante la recepción de la secuencia de entrenamiento, lo que impide que el ecualizador se ajuste a las características del canal y realice correctamente su función. En estos casos, sólo será útil una de las dos pasadas del ecualizador: la realizada hacia adelante si el desvanecimiento se produce en la segunda secuencia de entrenamiento, o la pasada hacia atrás si se produce en la primera secuencia.

A la vista del funcionamiento de este método, se puede afirmar que la ecualización bidireccional no introduce mayor complejidad al bloque del ecualizador (incrementa ligeramente la carga computacional) y únicamente aumenta el retardo en la recepción de los símbolos, ya que es necesario esperar a recibir la trama completa (incluida la segunda secuencia de entrenamiento) para poder entregar los símbolos ecualizados al demodulador correspondiente. Por otro lado, este aumento puede compensarse si se repara en el aleatorizado que sufren los bits antes de transmitirse. Si la ecualización bidireccional consigue disminuir la longitud de las ráfagas erróneas, entonces se puede reducir la profundidad del entrelazado, disminuyendo de esta manera el retardo que éste introduce. Se aprecia así un compromiso entre el máximo retardo de procesado permitido, el nivel de BER aceptado en el receptor y la complejidad del algoritmo implementado.

Por lo tanto, un ecualizador bidireccional puede ser implementado utilizando una estructura lineal, DFE u otra. Además, puede actualizar sus coeficientes mediante algoritmos sencillos, como LMS, RLS o más complejos como el del ecualizador ciego. En este trabajo, para lograr un compromiso adecuado entre la complejidad del ecualizador y las prestaciones deseadas, se ha implementado el ecualizador bidireccional sobre estructura DFE con el algoritmo RLS, cuyos resultados se presentan más adelante.

Hasta este punto, los algoritmos presentados trabajan todos ellos en el dominio temporal, esto es, la señal llega al receptor y los símbolos detectados son procesados por el ecualizador de forma secuencial. Sin embargo, en un sistema de comunicaciones vía radio, además del tiempo, se dispone de la componente espacial, ya que la señal que parte del transmisor llega al receptor a través de múltiples caminos incidiendo en la antena receptora con ángulos diferentes. Por lo tanto, si se aprovecha esta característica bimodal de la propagación de la señal se consigue, desde el punto de vista del procesado de señal, un sistema con dos grados de libertad muy importantes. En estos dos dominios se basa el funcionamiento de las antenas adaptativas que a continuación se presentan.

### 3.6. Antenas adaptativas

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de bloques simplificado del enlace ascendente, en el que se utiliza una antena adaptativa en el receptor. La señal equivalente paso bajo que sale del transmisor y entra al canal,  $s(t)$ , se puede expresar de la forma:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{M-1} [a_i \cdot e^{j\gamma_i} \cdot \Pi(t - iT_S)] \quad [\text{Ec.3.37}]$$

siendo  $M$  el número de símbolos contenidos en una trama;  $a_i$  y  $\gamma_i$  son el módulo y la fase, respectivamente, de la señal modulada;  $T_S$  la duración del tiempo de símbolo; y  $\Pi(t)$  un pulso rectangular de anchura  $T_S$ .

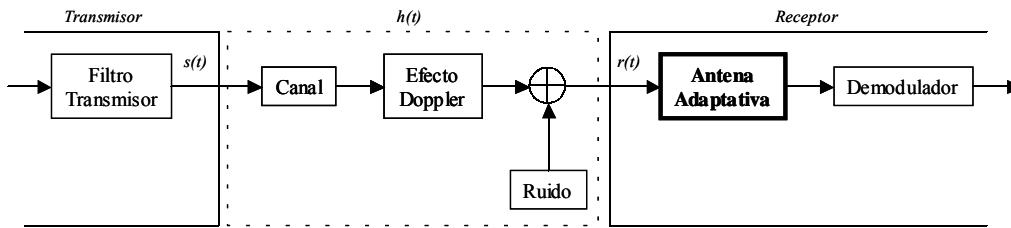


Figura 3.5. Diagrama de bloques del enlace ascendente utilizando una antena adaptativa

La respuesta del canal en el dominio del tiempo,  $h(t)$ , viene expresada según:

$$h(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha_n \cdot e^{j\psi_n} \cdot \delta(t - \tau_n) \cdot g_n(t)] \quad [\text{Ec.3.38}]$$

donde  $N$  es el número de rayos;  $\alpha_n$ ,  $\psi_n$  y  $\tau_n$  son la amplitud, la fase y el retardo, respectivamente, de cada rayo; y  $g_n(t)$  es el desvío Doppler que afecta a cada rayo separadamente. Por lo tanto, la salida del canal vendrá dada por la convolución de  $s(t)$  con  $h(t)$ , lo que resulta:

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \alpha_n \cdot e^{j\psi_n} \cdot g_n(t) \cdot \sum_{i=0}^{M-1} a_i \cdot e^{j\gamma_i} \cdot \Pi(t - \tau_n - iT_S) \right] + n(t) \quad [\text{Ec.3.39}]$$

donde  $n(t)$  es el ruido aditivo gaussiano blanco.

En función del tipo de geometría de la antena, la señal detectada en cada dipolo elemental varía ligeramente, pues el factor de array es distinto (ver Capítulo 2). Despreciando el ruido, las siguientes expresiones corresponden a la señal recibida en cada dipolo para una antena lineal, circular y rectangular, respectivamente.

$$r_k(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha_n \cdot e^{j\psi_n} \cdot g_n(t) \cdot s(t - \tau_n) \cdot e^{j\beta \cdot d \cdot (k-1) \cdot \text{sen}\theta_n \cdot \cos\phi_n}] \quad (\text{lineal}) \quad [\text{Ec.3.40}]$$

$$r_k(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha_n \cdot e^{j\psi_n} \cdot g_n(t) \cdot s(t - \tau_n) \cdot e^{j\beta \cdot d \cdot (k-1) \cdot \text{sen}\theta_n \cdot \cos(\phi_n - \phi_k)}] \quad (\text{circular}) \quad [\text{Ec.3.41}]$$

$$r_{k_x, k_y}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha_n \cdot e^{j\psi_n} \cdot g_n(t) \cdot s(t - \tau_n) \cdot e^{j\beta \cdot d_x \cdot (k_x-1) \cdot \text{sen}\theta_n \cdot \cos\phi_n} \cdot e^{j\beta \cdot d_y \cdot (k_y-1) \cdot \text{sen}\theta_n \cdot \text{sen}\phi_n}] \quad (\text{rectangular}) \quad [\text{Ec.3.42}]$$

Donde:

- $k=1, 2, \dots, K$  es el número de dipolo en un array lineal o circular.
- $k_x, k_y$  con  $k_{x,y}=1, 2, \dots, K_{x,y}$  son las coordenadas del dipolo en un array rectangular.
- $\beta$  se define como  $2\pi/\lambda$ .
- $d$  es la separación entre dipolos en un array lineal o el radio en uno circular.
- $d_x$  y  $d_y$  son las separaciones entre dipolos en cada dimensión para el array rectangular.
- $\theta_n$  y  $\phi_n$  son los ángulos de elevación y azimut de cada rayo del canal.
- $\varphi_k$  es la posición angular de cada elemento del array circular, según:  $\varphi_k=2\pi k/K$ .

Finalmente, discretizando las señales según  $t=n \cdot T_s$ , los símbolos detectados por la antena  $y(n)$  son combinación de cada señal recibida en cada dipolo:

$$\vec{W}^H = [ w_1^*, w_2^*, \dots, w_k^* ] \quad [\text{Ec.3.43}]$$

$$\vec{r} = [ r_1, r_2, \dots, r_k ] \quad [\text{Ec.3.44}]$$

$$y(n) = \vec{W}^H(n) \cdot \vec{r}(n) \quad [\text{Ec.3.45}]$$

donde  $\vec{W}^H$  es el vector de pesos de la antena transpuestos conjugados y  $\vec{r}(n)$  es el vector de símbolos recibidos en cada dipolo en el instante  $n$ . Como se ha explicado anteriormente, la actualización de los pesos se realiza mediante los algoritmos lineales LMS o RLS.

### 3.7. Entorno de simulación

El entorno de simulación que se ha construido combina la herramienta *MatLab* de la que se ha aprovechado el interfaz gráfico y la potencia de procesamiento de datos, con la programación en *C*, la cual posee una rapidez computacional que no se puede obtener con una herramienta de propósito general como *MatLab*. Así, todas las funciones y subrutinas que componen los diferentes diagramas de bloques del sistema están programadas en *C* e invocadas desde *MatLab* como subrutinas *MEX*.

Algoritmo		Nº Coeficientes parte directa	Nº Coeficientes parte realimentada
LINEAL A	CMA A.1	1	-
	DFE-RLS B.1	5 o 3	3 o 1
NO LINEAL B	DFE-Ciego B.2	5 o 3	3 o 1
	Bidir-DFE-RLS B.3	5 o 3	3 o 1
	Lineal-RLS C.1	6	-
ANTENAS ADAPTATIVAS C	Circular-RLS C.2	6	-
	Rectangular-RLS C.3	3x3	-

Tabla 3.1. Tipos de ecualizadores y algoritmos implementados en las simulaciones

En cuanto a las simulaciones realizadas, en la Tabla 3.1 se presenta una lista con los algoritmos evaluados y la configuración de cada uno. Asimismo, en la Tabla 3.2 se especifica el tipo de algoritmo y modelo de canal con el que se ha analizado cada sistema.

<b>Sistema</b>	<b>Canal</b>	<b>Algoritmos</b>
<b>GSM</b>	TU50	B2, B3, C1, C2, C3
	HT200	B2, B3, C1, C2, C3
<b>DECT</b>	DECT-C	B2, B3
	DECT-E	B2, B3
<b>TETRA</b>	TU50	A1, B2, B3, C1, C2, C3
	BU50	A1, B2, B3, C1, C2, C3
	HT200	A1, B2, B3, C1, C2, C3

Tabla 3.2. Canales y algoritmos simulados en cada sistema

### 3.8. Evaluación de prestaciones

En este apartado se presentan las curvas de BER correspondientes a los tres sistemas evaluados con diferentes algoritmos de ecualización. Puesto que mostrar las curvas de los tres sistemas con todos los algoritmos explicados en este capítulo resultaría tedioso y redundante, las gráficas se han reducido exclusivamente a los resultados más interesantes y susceptibles de comentarios.

#### 3.8.1. GSM

El sistema GSM tiene como canales más representativos el TU50, un canal urbano típico a 50 Km/h, y el HT200, un canal rural con una suave orografía a 200 Km/h. En primer lugar, la BER obtenida solamente con ruido (AWGN) sin ningún tipo de ecualización en el receptor es la que muestra en la Figura 3.6. En ella aparecen las curvas para los dos canales junto con la del canal ideal y el valor máximo recomendado [78].



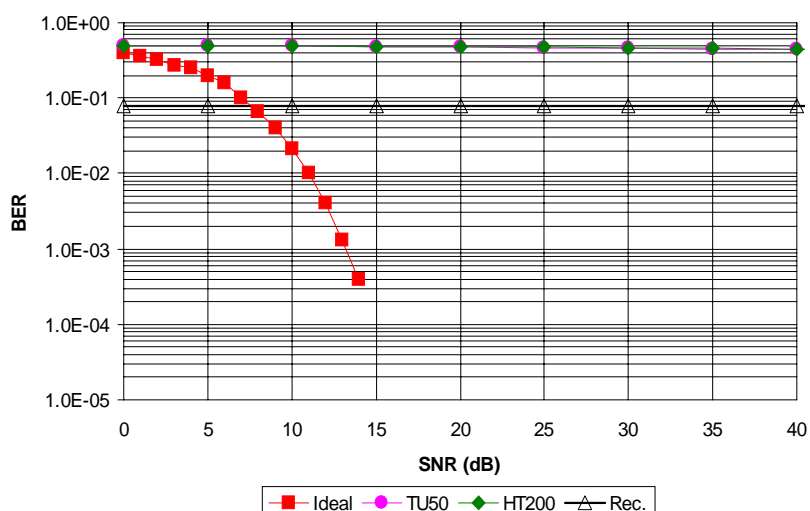


Figura 3.6. BER sin ecualización para canales: ideal, TU50 y HT200

En la Figura 3.7 se muestran las curvas correspondientes a un ecualizador DFE con  $N_F=3$  y  $N_B=1$  con dos tipos de algoritmos, ciego y bidireccional-RLS. El algoritmo ciego consigue reducir en poco más de un orden de magnitud la BER original, sobre todo en el canal menos nocivo, el TU50. Sin embargo, el algoritmo bidireccional, diseñado especialmente para entornos de alto Doppler, obtiene mejores prestaciones, llegando a los dos órdenes de magnitud para el caso del TU50, en la zona de SNR donde el ruido puede considerarse despreciable frente a la ISI y al Doppler. De hecho, en el caso del canal HT200 se consigue mejorar el valor de BER recomendado únicamente con el ecualizador bidireccional. Comparando estos resultados con los obtenidos mediante otros algoritmos [79] se ve cómo es necesario, para alcanzar resultados similares, utilizar un detector MLSE con un algoritmo de Viterbi de 16 estados o bien un ecualizador DFE con  $N_F=6$  y  $N_B=4$ .

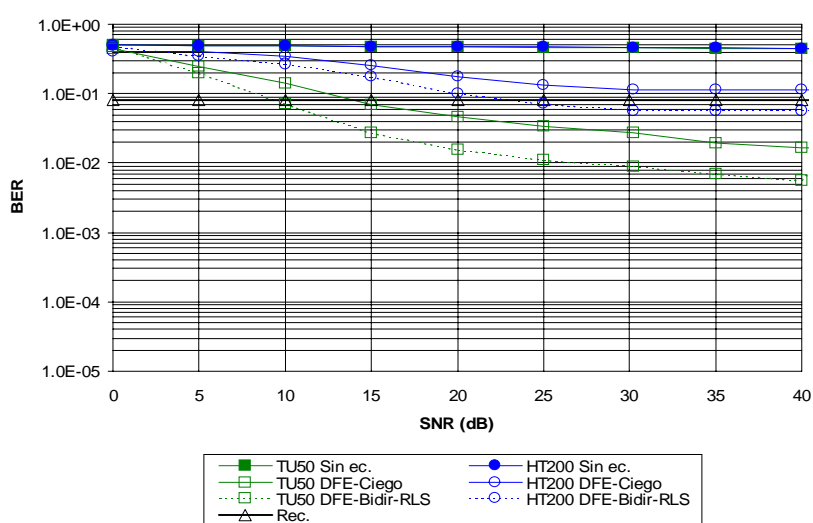


Figura 3.7. BER con ecualizador DFE ( $N_F=3$ ,  $N_B=1$ ), algoritmos ciego y bidireccional-RLS

Por último, se han evaluado las prestaciones de las antenas adaptativas sobre GSM. En la Figura 3.8 se presenta la BER para el canal TU50 y en la Figura 3.9 para el canal HT200, respectivamente. En cada gráfica aparecen las curvas para los tres tipos de geometrías: lineal, circular y rectangular. La configuración lineal posee 6 dipolos sobre el eje  $X$  separados  $\lambda/2$  (16.67 cm) entre sí; en la circular los 6 dipolos están dispuestos sobre una circunferencia de radio  $\lambda/2$  en el plano  $XY$  separados  $\pi/3$  radianes; y la rectangular está formada por una rejilla cuadrada de  $3 \times 3$  dipolos (9 en total) en el plano  $XY$  separados  $\lambda/2$  entre sí. Por este orden, además, se pueden clasificar las prestaciones de cada tipo de antena. En el caso del TU50, existe una diferencia de un orden de magnitud entre el array lineal y el rectangular. Para el HT200 no es tan grande, pero en ambos casos, la geometría rectangular es la que mejores resultados arroja.

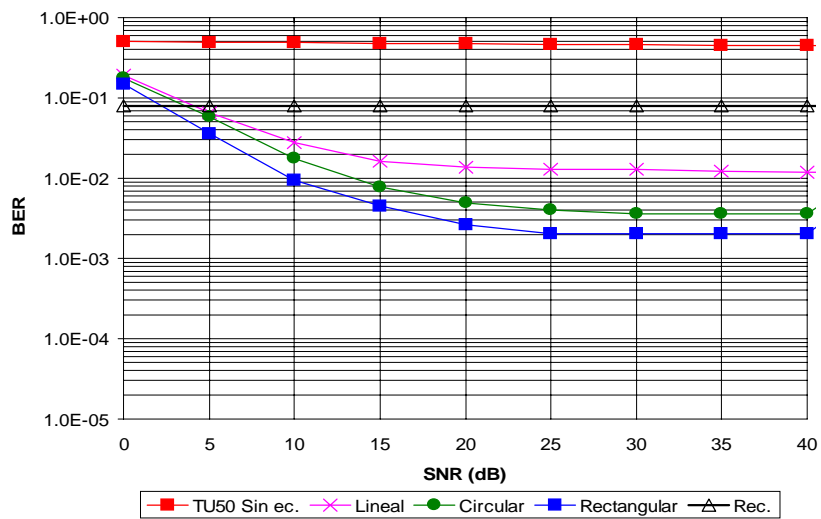


Figura 3.8. BER con antena adaptativa para el canal TU50 (lineal y circular 6 dipolos; rectangular 3x3; RLS)

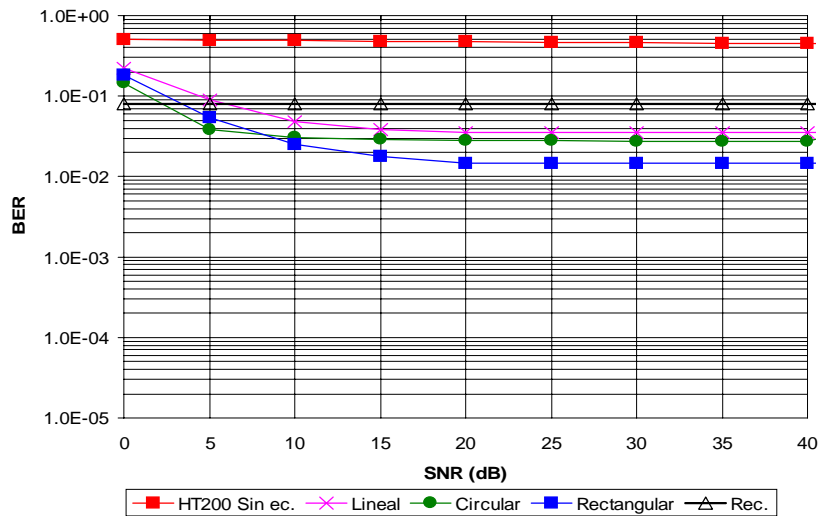


Figura 3.9. BER con antena adaptativa para el canal HT200 (lineal y circular 6 dipolos; rectangular 3x3; RLS)

En cualquier caso, resulta claro que el esquema de compensación de los efectos del canal que mejores prestaciones logra de todos los evaluados para GSM es el de las antenas adaptativas, particularmente la geometría rectangular, con la que se alcanza una BER de  $2 \cdot 10^{-3}$  y  $1.5 \cdot 10^{-2}$  sobre los canales TU50 y HT200, respectivamente, mejorando en todos los casos la BER recomendada.

### 3.8.2. DECT

El examen del sistema DECT se ha realizado sobre los canales DECT-E y DECT-C a 5 Km/h, velocidad máxima estimada en un entorno de interiores. Estos canales, sin ningún tipo de ecualización, presentan las curvas de BER que se muestran en la Figura 3.10. Debido a la demodulación coherente de la señal GMSK la probabilidad de error obtenida, aunque sea a velocidades tan bajas como 5 Km/h, ronda el 50% de bits erróneos. En la misma gráfica se representa, además, el valor máximo de BER aceptada [80]. Este valor corresponde a la peor situación en la que la señal recibida ronde el valor de sensibilidad del receptor (-83 dBm).

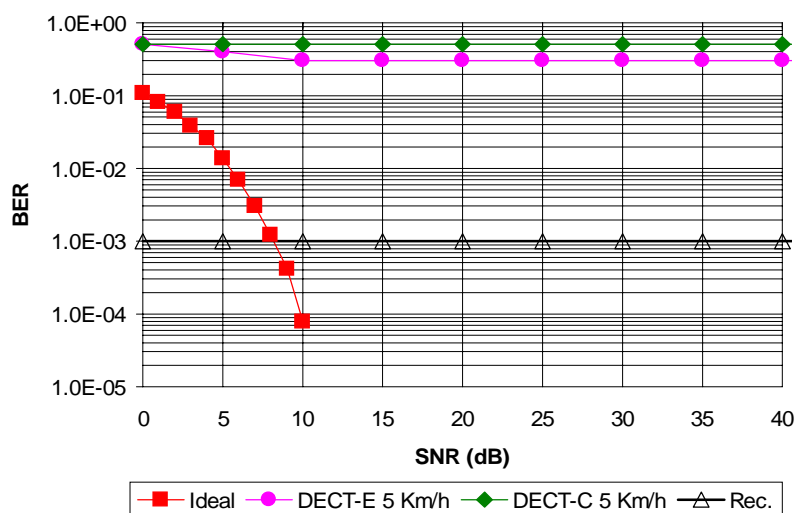


Figura 3.10. BER sin ecualización para canales: ideal, DECT-E a 5 Km/h y DECT-C a 5 Km/h

Sin embargo, la BER puede ser drásticamente reducida empleando ecualizadores DFE con el algoritmo ciego o bidireccional-RLS. Este es el caso que representa la Figura 3.11, en la que se ha implementado un DFE con  $N_F=3$  y  $N_B=1$  con estos dos algoritmos. Es evidente el buen funcionamiento de éstos en este tipo de sistema para interiores en los que el efecto Doppler es prácticamente despreciable y los desvanecimientos se deben principalmente a la dispersión del canal. Obviamente, los mejores resultados los obtiene el DFE bidireccional-RLS en ambos canales, llegando hasta una BER de  $10^{-5}$  cuando la relación señal-ruido es superior a los 30 dB.

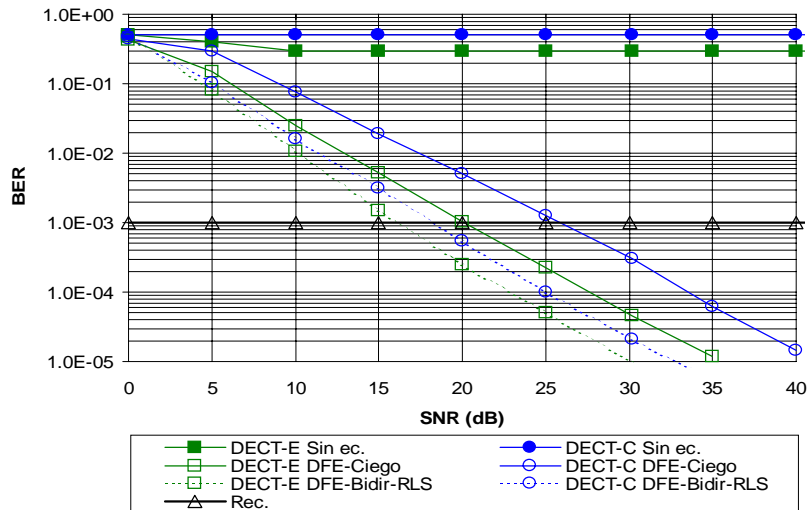


Figura 3.11. BER con ecualizador DFE ( $N_F=3$ ,  $N_B=1$ ), algoritmos ciego y bidireccional-RLS, 5 Km/h

Debido al buen comportamiento de estos dos algoritmos, se ha desestimado la implementación de antenas adaptativas en el caso particular de DECT, pues la mejora conseguida no justificaría el encarecimiento y complejidad de la EB. Es necesario recordar que, a diferencia de sistemas en exteriores como GSM y TETRA, en este caso cada EB da cobertura a un máximo de una decena de terminales. En sistemas actualmente en desarrollo, como el proyecto europeo WIND-FLEX [81], en los que parámetros tales como velocidad binaria (hasta 100 Mbps), ancho de banda o frecuencia portadora (17 GHz) son de uno a dos órdenes de magnitud mayores que en DECT, sería necesario estudiar la utilización de antenas adaptativas, pues las condiciones de propagación serían mucho más perjudiciales que las que se han mostrado en este caso particular.

### 3.8.3. TETRA

En el estándar TETRA se especifican unos modelos de canal con gran dispersión, especialmente en entornos rurales, debido a las dimensiones de sus células. Éstas pueden ser de gran tamaño ya que el número de usuarios es mucho menor que el de un sistema de telefonía celular pública como GSM. Este hecho, junto con el efecto Doppler a altas velocidades, hace que canales como el HT200 de TETRA sean un desafío para cualquier técnica de ecualización. En la Figura 3.12 se muestran las curvas de BER para los tres canales evaluados: TU50, BU50 y HT200, junto con los valores de BER máximos recomendados [57]. Todos ellos presentan, a priori, curvas de valor constante en torno a  $10^{-1}$  para valores de SNR a partir de 20 dB.

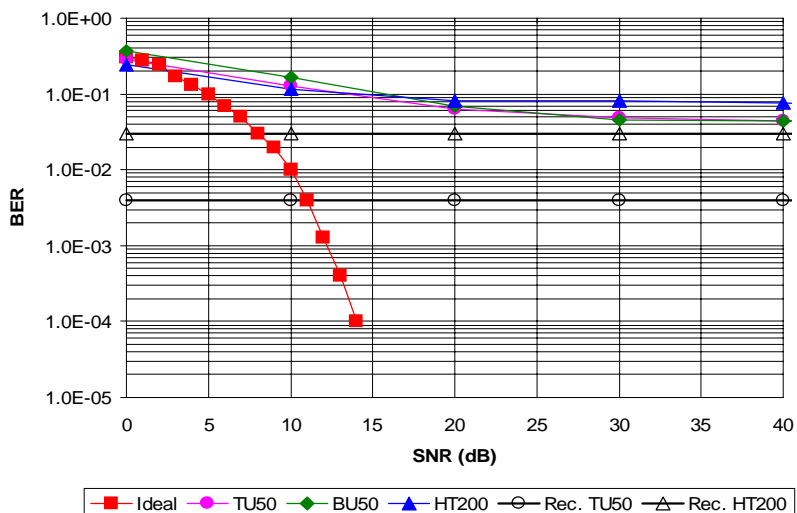


Figura 3.12. BER sin ecualización para canales: ideal, TU50, BU50 y HT200

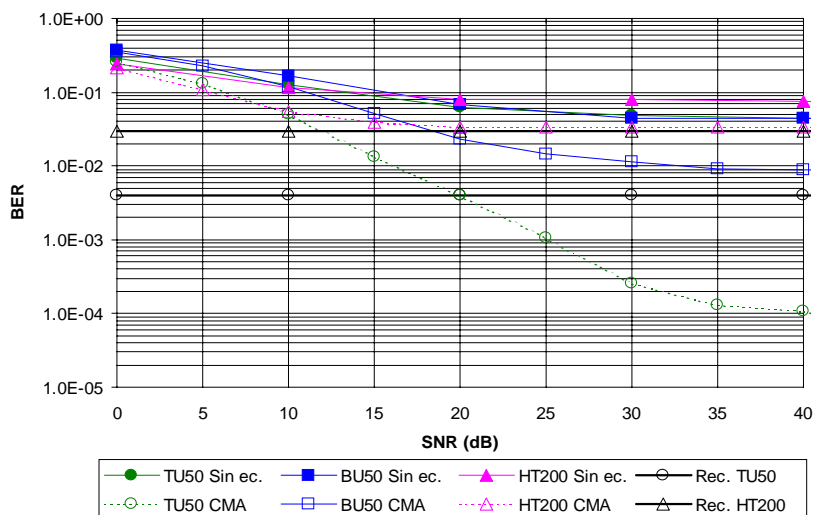


Figura 3.13. BER con algoritmo CMA para canales: TU50, BU50 y HT200

En la Figura 3.13 se muestran los resultados obtenidos sobre los canales de TETRA con el algoritmo CMA. Ya se explicó que este algoritmo funciona mejor cuanto menor sea la dispersión del canal, puesto que está básicamente diseñado para compensar la rotación de fase introducida en la señal recibida por el efecto Doppler. En particular, en la estructura de la trama del enlace descendente (Figura 2.3) existen dos campos utilizados para la corrección de fase con objeto de poder realizar una demodulación coherente. Así, se puede ver que se obtienen resultados aceptables para los canales TU50 y BU50 (los de menor dispersión), mientras que para el HT200 se consigue llegar apuradamente a la cota máxima de BER recomendada ( $10^{-2}$  para BU50 y  $3 \cdot 10^{-2}$  para HT200).

En el caso de implementar un ecualizador DFE con los algoritmos ciego y bidireccional-RLS, las prestaciones mejoran. En la Figura 3.14 se muestran los resultados para los canales BU50 y HT200. Respecto al caso anterior del CMA, la BER se ha reducido en un orden de magnitud para BU50 y la curva

del HT200 ahora cae por debajo del límite máximo recomendado. En cualquier caso, se aprecia la fuerte influencia del efecto Doppler que hace que la curva se sature para valores de SNR a partir de 15 dB.

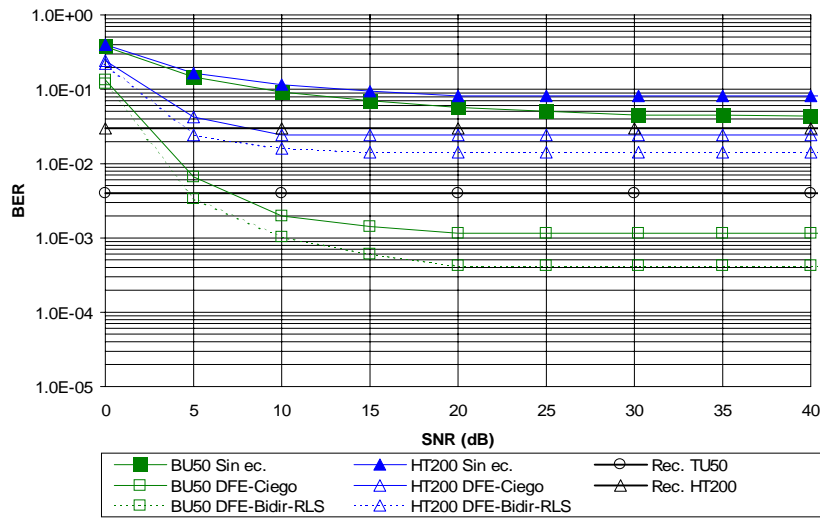


Figura 3.14. BER con ecualizador DFE ( $N_f=3$ ,  $N_b=1$ ), algoritmos ciego y bidireccional-RLS

Finalmente, se evalúan las consecuencias de introducir antenas adaptativas en la estación base [82]. Se ve como para los tres modelos de canal los resultados son los mejores de todos los obtenidos con los demás algoritmos (ver Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17). El hecho de trabajar en la banda de 450 MHz hace que la frecuencia Doppler no sea muy alta (83.33 Hz a 200Km/h); y además, utilizar una modulación diferencial, como  $\pi/4$ -DQPSK, ayuda en gran medida a recuperar la fase de la señal original. Todo ello, unido a la diversidad espacial intrínseca de la antena adaptativa, consigue ecualizar correctamente la señal recibida, alcanzando valores de BER como los que aparecen en las gráficas.

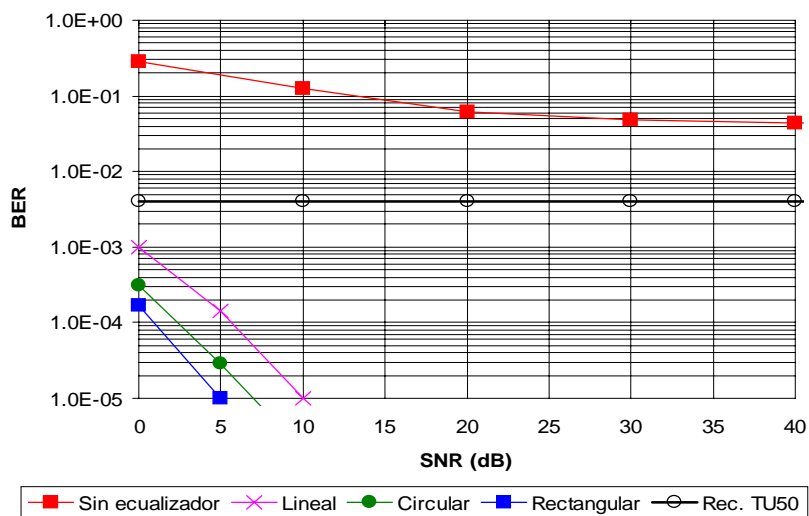


Figura 3.15. BER con antena adaptativa para el canal TU50 (lineal y circular 6 dipolos; rectangular 3x3; RLS)

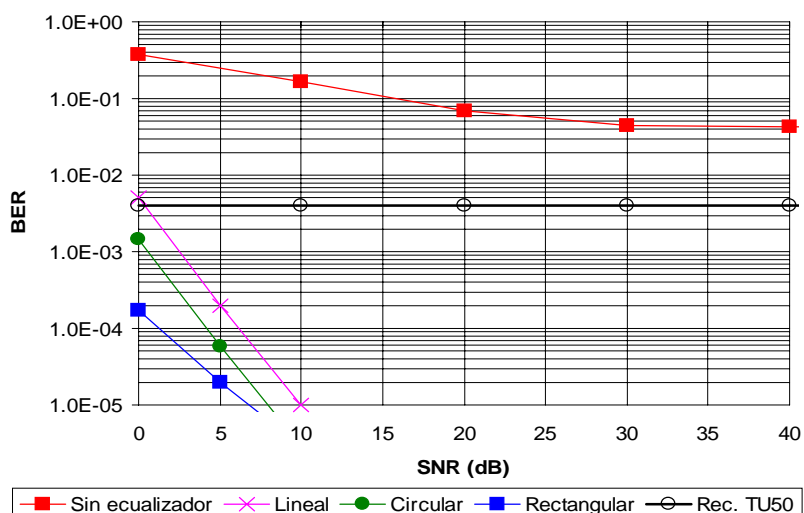


Figura 3.16. BER con antena adaptativa para el canal BU50 (lineal y circular 6 dipolos; rectangular 3x3; RLS)

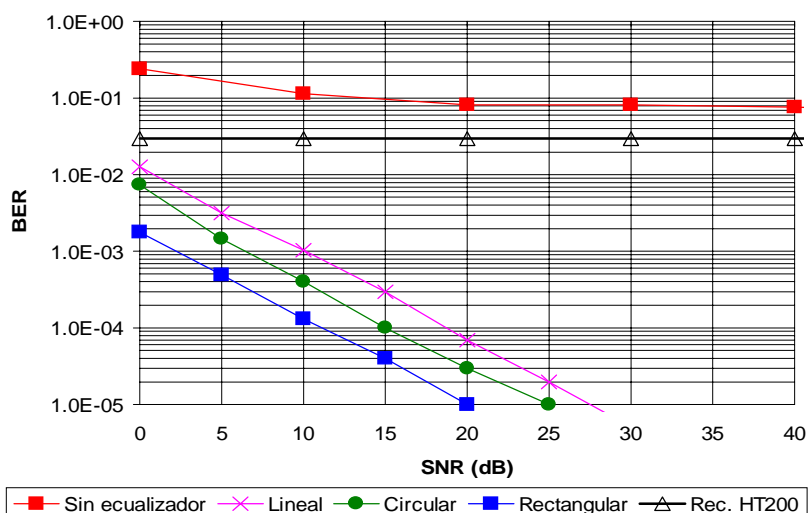


Figura 3.17. BER con antena adaptativa para el canal HT200 (lineal y circular 6 dipolos; rectangular 3x3; RLS)

### 3.9. Conclusiones

De las numerosas pruebas y estudios realizados se desprende que la utilización de antenas adaptativas proporciona un comportamiento deseable para la mayoría de entornos de nivel físico en el marco de los sistemas de comunicaciones móviles de segunda generación. Particularmente, las prestaciones alcanzadas con las antenas adaptativas obtenidas con los modelos GSM permiten aventurar su extrapolación al sistema UMTS en su especificación UTRA/TDD [28] [29]. También, es factible la implementación de ecualizadores bidireccionales en GSM que reduzcan la complejidad de la mayoría de las actuales implementaciones basadas en MLSE.

El segundo sistema de exteriores evaluado, TETRA, alcanza también unos resultados satisfactorios con el empleo de ecualizadores, pero las antenas adaptativas reducen en dos órdenes de magnitud la BER eliminando, además, el efecto de saturación para valores altos de SNR. Esto es así debido principalmente al hecho de que la velocidad binaria y la frecuencia portadora son menores que en el caso de GSM, lo que ayuda a reducir de manera notable los efectos de la ISI y del Doppler.

Por último, el estándar DECT representa un sistema de interiores en el que sus características más sobresalientes respecto a los otros dos sistemas son la banda de operación de 2 GHz, la velocidad binaria por encima del megabit por segundo y el hecho de que se trata de un esquema TDD. Aunque, esta última peculiaridad lo hace un buen candidato a la utilización de antenas adaptativas, las buenas prestaciones logradas con un ecualizador del tipo DFE bidireccional con relativamente pocos coeficientes, han hecho desestimado su uso. Sin embargo, otros sistemas de interiores mencionados a lo largo del capítulo como HIPERLAN [104] o WIND-FLEX [81] poseen requerimientos más exigentes, lo que les convierte en serios candidatos para utilizar antenas adaptativas.

Debido al buen comportamiento de las antenas adaptativas en todos los escenarios evaluados, se va a elegir esta solución a la hora de realizar el diseño del protocolo de acceso en el Capítulo 5. Por supuesto, esta elección acarrea una serie de consecuencias, siendo una de las más importantes el hecho de tener que utilizar un esquema bidireccional TDD para trabajar sobre un medio de propagación recíproco en ambos enlaces.



# CAPÍTULO 4

## INTRODUCCIÓN A LOS PROTOCOLOS DE ACCESO

---

### 4.1. Introducción

En este capítulo se tratan los diferentes aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar un protocolo de acceso múltiple en entornos de comunicaciones móviles inalámbricas. Con ello, se da un paso más respecto a los capítulos anteriores, intentando engarzar las conclusiones expuestas en el Capítulo 3 derivadas del estudio del medio físico con las condiciones impuestas a la hora de diseñar un sistema que controle y organice eficazmente el acceso a un medio radio compartido por terminales de diferente naturaleza, con tráficos heterogéneos y requerimientos variados.

En primer lugar, se realiza una exposición del estado del arte en el campo de los protocolos de acceso para redes de comunicaciones móviles con el fin de tener una perspectiva más clara de la posición en la que se encuentra esta tesis. A continuación, se presentan los parámetros de evaluación de un protocolo, finalizando con los modelos de fuentes de tráfico para cada tipo de servicio definidos en el Capítulo 1. Con todo ello, se intenta ofrecer una descripción del escenario en el que se llevarán a cabo las simulaciones de los protocolos propuestos y del modo en que se evaluarán sus prestaciones.

### 4.2. Estado del arte

Un protocolo MAC es un conjunto de reglas definidas para controlar el acceso a un medio de

comunicación compartido por varios usuarios. En este caso particular este medio de comunicación es el entorno inalámbrico. Dentro de la red inalámbrica, existen diferentes tipos de usuarios a tener en cuenta: usuarios activos dentro de la zona de cobertura o célula (los llamados usuarios locales); usuarios procedentes de células vecinas; y nuevos usuarios que solicitan acceso dentro de la célula.

En un entorno Wireless ATM como el que se presenta en esta tesis, el protocolo MAC ha de proporcionar soporte para los servicios definidos en los estándares existentes (ver Capítulo 1), lo cual incluye las distintas clases de tráfico: CBR, VBR y ABR. Por lo tanto, el protocolo de acceso inalámbrico debe extender la multiplexación estadística de la red cableada al escenario radio de una manera más eficiente que los rígidos protocolos de acceso diseñados en los sistemas celulares digitales de conmutación de circuitos de segunda generación. Por supuesto, ha de soportar la movilidad y flexibilidad requeridas así como garantizar la QoS demandada por ATM.

Fundamentalmente, como se vio en el Capítulo 1, la técnica de compartición del medio puede ser: FDMA, CDMA o TDMA, aunque generalmente se utilizan combinaciones de ellas. En redes Wireless ATM, la escasez de frecuencias disponibles y los requerimientos de asignación dinámica del ancho de banda, especialmente para conexiones VBR, hacen que el uso de FDMA sea ineficiente. Por otra parte, CDMA si bien tiene ventajas tales como eficiente reuso de frecuencia, excelente multiplexación estadística, etcétera, sin embargo, sufre de inconvenientes como la limitación en la velocidad de transmisión, complejos mecanismos en el control de potencia y en el diseño de la EB. Estos problemas, especialmente la limitación en la velocidad de transmisión, han hecho inapropiado el uso de CDMA en redes Wireless ATM. Es por ello que se propone el uso de un esquema TDMA adaptativo que aporte la flexibilidad requerida para acomodar conexiones de diferentes tasas binarias mediante la asignación de un número variable de ranuras temporales, dependiendo de las condiciones particulares de la carga de tráfico, y por otra parte sea suficientemente simple en su implementación.

Una vez especificada la técnica de compartición del medio a utilizar, es necesario definir el esquema que se encargará de distribuir los recursos entre los terminales que lo demanden. Esta política de asignación de recursos se puede clasificar en tres tipos:

- Asignación fija
- Asignación aleatoria
- Asignación dinámica

#### **4.2.1. Asignación fija**

Las técnicas de asignación fija reservan permanentemente un canal para cada conexión durante toda su duración, comportándose muy bien con conexiones de tasa binaria constante en términos de calidad de servicio y eficiencia de los recursos. Sin embargo, sus prestaciones disminuyen dramáticamente cuando es necesario soportar varios usuarios con conexiones de tasa variable o tráfico a

ráfagas, siendo en este caso mucho más eficaces las técnicas de asignación aleatoria o dinámica.

#### 4.2.2. Asignación aleatoria

Con la asignación aleatoria se hace uso de la capacidad total del canal durante cortos períodos de tiempo. Es decir, si dos o más usuarios deciden transmitir su información simultáneamente se produce una colisión, siendo necesario retransmitir los paquetes que han colisionado tras un retardo aleatorio, diferente para cada usuario. Son ejemplos típicos de esta técnica los esquemas Aloha y CSMA. Como es sabido, aunque los protocolos tipo Aloha son fáciles de implementar y presentan retardos mínimos para cargas de tráfico ligeras, sufren grandes retardos e inestabilidad cuando la carga de tráfico es elevada.

#### 4.2.3. Asignación dinámica

En este caso, se exige a los usuarios que proporcionen información explícita o implícita respecto a sus necesidades de ancho de banda a priori, el cual será asignado según su demanda. Por lo tanto, para usuarios VBR el ancho de banda será asignado de acuerdo a la longitud de la ráfaga o paquete. Cada vez que un usuario VBR conmuta al período de inactividad, el ancho de banda es liberado y asignado a otro usuario. A diferencia de la asignación fija, los esquemas de asignación dinámica minimizan el desperdicio de ancho de banda asignándolo de acuerdo a la demanda solicitada. Además, respecto a la asignación aleatoria, los protocolos de asignación dinámica evitan el desaprovechamiento de los recursos derivados de las colisiones, proporcionando un medio exento de contención durante los períodos de actividad. Estas son algunas de las razones por las que los protocolos MAC basados en asignación dinámica son los más adecuados para cubrir los requerimientos de Wireless ATM.

El funcionamiento de la técnica de asignación dinámica se divide en dos fases: reserva y transmisión. En la fase de reserva, los usuarios solicitan al sistema los recursos necesarios en forma de ancho de banda o de número de ranuras y el sistema responde informando al usuario si es posible atender sus requerimientos. En la segunda fase se realiza la transmisión de la información propiamente dicha. Los protocolos de asignación dinámica son generalmente complejos, pero se comportan correctamente sobre un amplio rango de condiciones, aunque la fase de reserva implique un retardo y ancho de banda añadidos. Según cómo se controlen las fases de reserva y transmisión, los protocolos de asignación dinámica se dividen en dos tipos: control centralizado y control distribuido.

Un ejemplo común de asignación dinámica con control centralizado es el de sondeo o *polling*, en el que la EB indica a cada usuario, de forma secuencial, acerca de sus privilegios de transmisión. Sin embargo, la correcta operación de un sistema centralizado depende de la fiabilidad del controlador. La asignación dinámica con control distribuido evita este problema, ya que en este caso los usuarios basan sus acciones en función de la información disponible para todos los terminales simultáneamente mediante el empleo de canales de difusión o *broadcast*<sup>10</sup>, proporcionando completa conectividad entre ellos.

---

<sup>10</sup> Transmisión simultánea a todos los receptores pertenecientes a la misma célula.

#### 4.2.4. Principales protocolos MAC existentes

Durante los últimos años, se ha desarrollado un gran número de protocolos de acceso para redes inalámbricas, ya sea para integrar exclusivamente voz y datos o para una red Wireless ATM que transporte tráfico multimedia. Aunque, a primera vista puedan parecer todos ellos muy dispares, una vez que se analizan más detalladamente se comprueba como encajan con la clasificación mostrada en apartados anteriores. Todos disponen de alguna clase de mecanismo para que los terminales soliciten acceso al medio, para que la EB les confirme dicho acceso y para la transmisión de información en ambos sentidos. Existen protocolos MAC implementados tanto sobre esquemas FDD como sobre TDD. A continuación, se comentan algunos de ellos.

##### Protocolos MAC sobre FDD

En un esquema FDD, debido a la simultaneidad temporal de los dos enlaces, es posible tener una respuesta casi inmediata procedente de la EB (dependiendo de la distancia y de la tasa binaria) informando al terminal móvil de si la solicitud para transmitir tuvo éxito o no. Los protocolos de acceso más representativos que utilizan la técnica FDD son:

- ❑ Distributed Queuing Request Update Multiple Access (DQ-RUMA) [83]
- ❑ Packet Reservation Multiple Access with Dynamic Allocation (PRMA/DA) [84]
- ❑ Dynamic TDMA with Piggybacked Reservation (DTDMA/PR) [85]

##### Protocolos MAC sobre TDD

En el caso de los protocolos MAC implementados sobre un esquema TDD tanto el transmisor como el receptor operan a la misma frecuencia, por lo que permiten ahorrar hardware en los terminales, aunque se introduce un pequeño retardo extra debido a la conmutación entre ambos enlaces. Algunos de los protocolos MAC más representativos que utilizan la técnica TDD son:

- ❑ Mobile Access Scheme based on Contention And Reservation for ATM (MASCARA) [86]
- ❑ Packet Reservation Multiple Access with Adaptive Time-Division Duplex (PRMA/ATDD) [87]
- ❑ Dynamic TDMA with Time-Division Duplex Protocol (DTDMA/TDD) [88]

##### Comparación entre FDD y TDD

Tradicionalmente, los sistemas inalámbricos de comunicaciones de voz han utilizado la separación de frecuencias para multiplexar el enlace ascendente y el descendente, es decir, han seguido un esquema FDD. Estas dos bandas son generalmente de la misma anchura, hecho condicionado por la simetría intrínseca de las comunicaciones de voz. Ambas están separadas por una banda de guarda suficiente para que el sistema FDD opere correctamente y sin interferencias. A veces, esta banda de guarda es intencionadamente grande como para asignarla a otra aplicación totalmente independiente de la

primera. Sin embargo, para que esto sea posible debe existir una separación espacial entre los dos sistemas para que no se produzcan interferencias entre las bandas debido a la proximidad de los equipos. Otras veces, la asignación de las bandas se adjudica en un bloque de frecuencias que hay que dividir en dos, uno para cada sentido, insertando entre ellos una banda de guarda que, generalmente, no se utiliza.

Las aplicaciones inalámbricas tradicionales para comunicaciones de voz punto a punto ya sea vía satélite o en entornos móviles celulares, encuentran una buena solución en la técnica FDD a la hora de separar los sentidos de la comunicación. Sin embargo, la demanda actual de servicios heterogéneos que agrupan voz, vídeo y datos provocan que la cantidad de información transmitida en un sentido sea muy diferente a la enviada en la otra dirección, llevando a lo que se denomina una comunicación asimétrica. La utilización de un esquema FDD en un sistema con aplicaciones asimétricas, como por ejemplo el tráfico IP, provoca la utilización ineficiente del ancho de banda disponible. La solución sería asignar mayor ancho de banda en una dirección que en otra en función del tráfico esperado, lo que lleva a tener un sistema optimizado únicamente para una situación de diseño muy puntual y poco realista, pues el comportamiento del tráfico, especialmente el perteneciente a aplicaciones en tiempo real, puede desviarse significativamente del punto de diseño.

La alternativa a la separación de frecuencias es el esquema TDD, alternando los sentidos de la comunicación en el tiempo utilizando una misma banda de frecuencias para ambos. La combinación de un esquema TDD en el que la duración de cada enlace pueda adaptarse dinámicamente junto con un protocolo de acceso al medio adecuado hace que la utilización de los recursos sea mucho más eficiente, sobre todo cuando el tráfico es asimétrico y sus características varían fuertemente. Además, se pueden incorporar sofisticadas técnicas de compensación de canal como las antenas adaptativas ya que se dispone de un medio de propagación que se comporta de la misma manera en el enlace ascendente que en el descendente. Por último, a la hora de reconfigurar un sistema, los costes de I+D en un esquema FDD son mucho más elevados que en uno TDD, ya que en este último la actualización puede realizarse en la mayoría de los casos actualizando el *firmware* de los equipos.

### 4.3. Bases para el diseño del protocolo MAC propuesto

El protocolo de control de acceso que se diseña en el capítulo siguiente, tiene como punto de partida un esquema TDMA con asignación dinámica de los recursos. Así, todo el ancho de banda es utilizado de manera alternada dividiendo el tiempo en ranuras o *slots* agrupados formando tramas que se repiten periódicamente. La multiplexación del enlace ascendente y descendente se puede efectuar en la frecuencia (FDD) o en el tiempo (TDD). En el caso FDD, el tráfico ascendente y descendente se transmiten en portadoras diferentes, transportando una trama TDMA en cada sentido del enlace. En el caso TDD se utiliza una única frecuencia portadora sobre la que se transmite una única trama dividida en dos períodos, uno para cada enlace. Este último proporciona mayor flexibilidad a la hora de controlar los recursos disponibles, pudiendo variar dinámicamente la duración de cada período. La Figura 4.1 muestra

la estructura básica de trama TDMA/TDD que servirá como base para el desarrollo del protocolo propuesto. La primera parte de la trama es la fase en la que se realizan las peticiones, seguida por la transmisión en sentido ascendente (terminales→EB) y del descendente (EB→terminales).

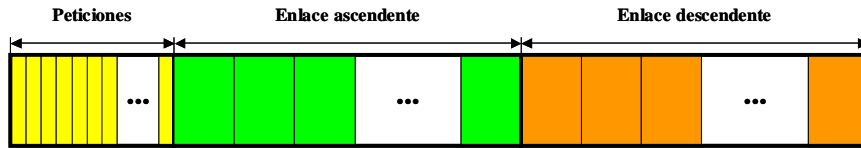


Figura 4.1. Estructura de trama TDD básica con asignación por demanda

Un formato de trama TDD más detallado sería la que se muestra en la Figura 4.2. La primera mitad, el enlace descendente, comienza con una cabecera que sirve para que los terminales detecten el final de la trama anterior y el principio de la actual, recuperando el sincronismo a nivel de trama. A continuación, se reciben las confirmaciones (ACK) que indican a los terminales si pueden o no transmitir y en qué posición del enlace ascendente, además de indicar para qué terminal es cada ranura de datos que transmitirá la EB inmediatamente después en el enlace descendente. El tamaño de cada ranura dedicada a las confirmaciones depende de la cantidad de información de señalización y control que se requiera enviar.

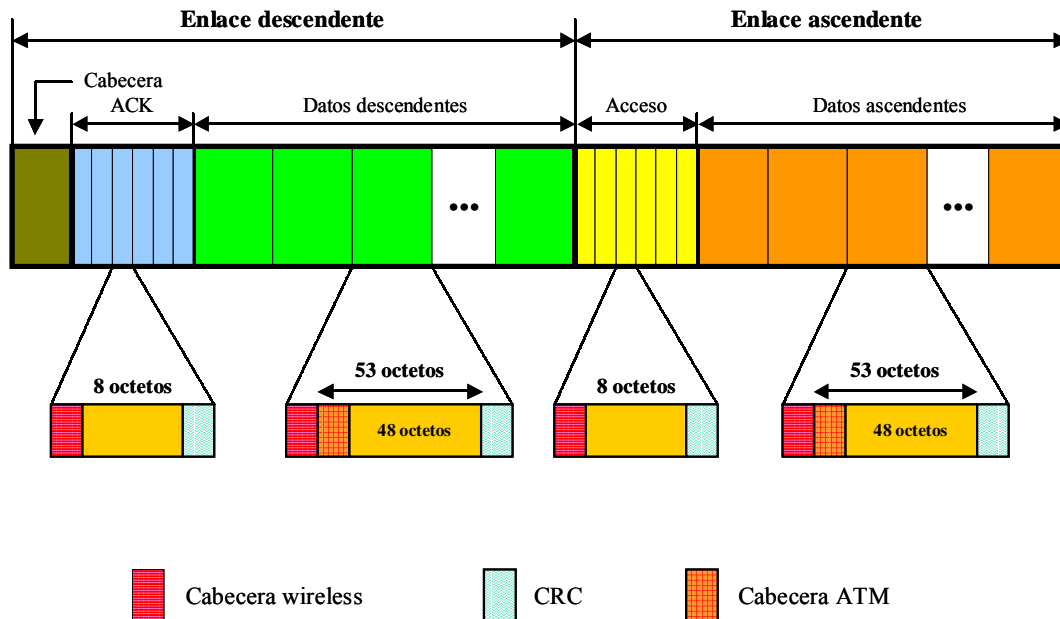


Figura 4.2. Estructura de trama TDD con confirmación de peticiones

Las ranuras de datos tienen, en esta propuesta de trama, un tamaño adaptado al de las celdas ATM, cuya longitud es de 53 octetos. Todas las ranuras, ya sean de control o de datos, comienzan con una cabecera wireless utilizada por los equipos de transmisión, tanto de la EB como de los terminales, para recuperación de sincronismo a nivel de ranura, así como para adaptar sus algoritmos (de ecualizadores o antenas adaptativas) al canal de transmisión, que en un entorno radio puede ser muy

desfavorable. Por esta razón, al final de cada ranura se transmite un control de errores (CRC) para comprobar si la información ha llegado correctamente. Las transmisiones descendentes son gobernadas por la EB estando exentas de contención. Debido a que un canal con multiplexación temporal puede ser explotado con una alta eficiencia (a veces superior al 80%) y bajo retardo, el enlace descendente no es un punto crítico en el comportamiento del sistema.

El período ascendente comienza con un período de acceso, en el que los terminales indican a la EB su deseo de transmitir. Los esquemas empleados para gestionar estas peticiones pueden ser fundamentalmente de dos tipos, por contienda o por sondeo. Como ya se mencionó antes, el sondeo requiere la interrogación por parte de la EB de todos los terminales para que éstos indiquen si desean transmitir o no. Por otra parte, la contienda significa que cada terminal elige aleatoriamente una ranura de acceso (p.e. Aloha ranurado) y en ella transmite su petición, pudiéndose dar el caso de que más de una petición coincida en el tiempo colisionando entre sí, es decir, solapándose en la misma ranura, siendo necesario volver a transmitir dicha petición en una trama posterior. Las ranuras en las que se transmiten las peticiones de acceso y las dedicadas a las confirmaciones de éstas son de menor tamaño que las ranuras de datos, por lo que se las suele denominar *minislots* (aunque los minislots de acceso y los de confirmación no tienen por qué tener el mismo tamaño). Por último, los terminales autorizados transmiten sus paquetes en las ranuras de datos asignadas dentro del enlace ascendente sin contención.

Aunque, lógicamente, el número de terminales cubiertos por la EB es mucho mayor que la cantidad de canales disponibles, no todos los terminales están activos simultáneamente, por lo que es de vital importancia dimensionar la estructura de la trama de manera acorde con la carga de tráfico y con la tasa de peticiones esperada.

#### **4.4. Parámetros de evaluación de un protocolo MAC**

A la hora de cuantificar las prestaciones de un protocolo MAC, es necesario definir una serie de parámetros que, ya sea mediante simulaciones o a través de medidas empíricas, ayuden a discernir si un protocolo es mejor que otro y desde qué puntos de vista. Puesto que en la red inalámbrica conviven diferentes tipos de tráficos, no es posible evaluar el comportamiento de todos ellos con los mismos parámetros, aunque muchas veces coincidan algunos. Por eso, los servicios se han dividido en dos grupos: por una parte los servicios orientados a la conexión que demandan una asignación de recursos constante desde que se establece hasta que se libera la comunicación (similar al modo de conmutación de circuitos) como son los servicios CBR; y por otro lado los servicios que no establecen una conexión (modo conmutación de paquetes), como son VBR y ABR. A continuación, se exponen los parámetros más importantes así como la forma de interpretarlos.

#### 4.4.1. Parámetros para tráfico CBR

Las conexiones CBR monopolizan, al igual que una conmutación de circuitos, el medio de transmisión durante todo el tiempo que dure la comunicación. Por esta razón, en la trama TDMA se suele reservar un número máximo de slots para tráfico CBR, asemejándose así a la asignación de circuitos dentro de una matriz de conmutación de las empleadas en las centrales telefónicas. Es decir, si todos los slots CBR están siendo utilizados, la siguiente petición de conexión que se genere será bloqueada, dando lugar al parámetro probabilidad de bloqueo. Normalmente, el número de slots CBR de la trama se dimensiona de manera que la probabilidad de bloqueo no supere un valor típico del 1%.

Otro parámetro importante, dependiente de la técnica de acceso utilizada, es el retardo de acceso al canal. Este tiempo se calcula como el intervalo entre que el terminal genera la petición de conexión, hasta que la EB le asigna recurso. Para un servicio CBR, este tiempo está limitado, con lo cual, si un terminal no consigue acceso en dicho tiempo, un temporizador expira y la conexión será bloqueada. Este bloqueo puede producirse por dos razones diferentes: porque la EB ni siquiera haya recibido la solicitud de conexión, o porque durante el tiempo que el terminal ha esperado obtener conexión, no ha habido ningún slot CBR disponible. La segunda causa ya se ha comentado anteriormente. Sin embargo, la primera está íntimamente relacionada con el método de acceso para solicitar recurso, pues si éste es por contención y la tasa de peticiones es alta, puede suceder que múltiples colisiones consecutivas agoten el tiempo de espera del terminal, resultando en una llamada perdida. Menor es la probabilidad de que esto ocurra cuando se implementan técnicas de sondeo, ya que no hay contención en este caso.

La visión global del rendimiento del sistema viene dada por el grado de servicio (GoS) calculado como la razón entre la carga cursada y la carga generada. Intuitivamente, la carga es el porcentaje de tiempo que un terminal (o un conjunto de ellos) genera información. Formalmente, la carga que genera una población de  $N_V$  terminales se expresa como:

$$Carga\_generada = N_V * \frac{\lambda_V}{\mu_V} = N_V * \frac{Duración\_de\_la\_llamada}{Tiempo\_entre\_llamadas} \quad [Ec.4.1]$$

donde  $\lambda_V$  y  $\mu_V$  son las tasas de nacimiento y muerte, respectivamente. A la relación  $\lambda_V/\mu_V$  se la denomina también factor de utilización, en este caso referido a un único terminal. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la velocidad binaria de un terminal de voz es mucho menor que la velocidad agregada. Además, si el esquema de multiplexación es TDD, hay que considerar que aproximadamente la mitad del tiempo de transmisión se utiliza para el enlace ascendente y la otra mitad para el descendente (de ahí el factor 2 en el cálculo de la carga generada). Por lo tanto, la carga CBR ofrecida desde el punto de vista del sistema TDMA será:

$$Carga\_generada = N_V \cdot \frac{V_V}{V_C} \cdot \frac{\lambda_V}{\mu_V} \quad (sistema\ FDD) \quad [Ec.4.2]$$

$$Carga\_generada = \begin{cases} N_V \cdot \frac{V_V}{V_C} \cdot \frac{\lambda_V}{\mu_V} \cdot \frac{T_F}{T_U} \approx N_V \cdot \frac{V_V}{V_C} \cdot \frac{\lambda_V}{\mu_V} \cdot 2 & (ascendente) \\ N_V \cdot \frac{V_V}{V_C} \cdot \frac{\lambda_V}{\mu_V} \cdot \frac{T_F}{T_D} \approx N_V \cdot \frac{V_V}{V_C} \cdot \frac{\lambda_V}{\mu_V} \cdot 2 & (descendente) \end{cases} \quad (sistema\ TDD) \quad [Ec.4.3]$$



donde  $V_C$  es la velocidad agregada,  $T_F$  es la duración de la trama y  $T_U$  y  $T_D$  son las duraciones de los enlaces ascendente y descendente del sistema TDD, respectivamente.

De la misma manera, la carga cursada se calcula respecto a las conexiones CBR que han sido aceptadas. Como se puede deducir, el GoS será en el mejor caso igual a la unidad, disminuyendo a medida que la carga generada aumenta.

#### 4.4.2. Parámetros para tráfico VBR y ABR

En general, los protocolos de asignación por demanda proporcionan una mayor utilización del canal para este tipo de servicios que los esquemas de asignación fija o aleatoria. Sin embargo, debido a la frecuente asignación de slots de la trama a diferentes terminales, se requiere un *overhead* que en algunos casos puede ser excesivo, es decir, el intercambio de señales de control puede reducir notablemente la eficiencia del protocolo. Este hecho repercute directamente en parámetros como el retardo medio de acceso y el porcentaje de pérdida de paquetes que son explicados a continuación.

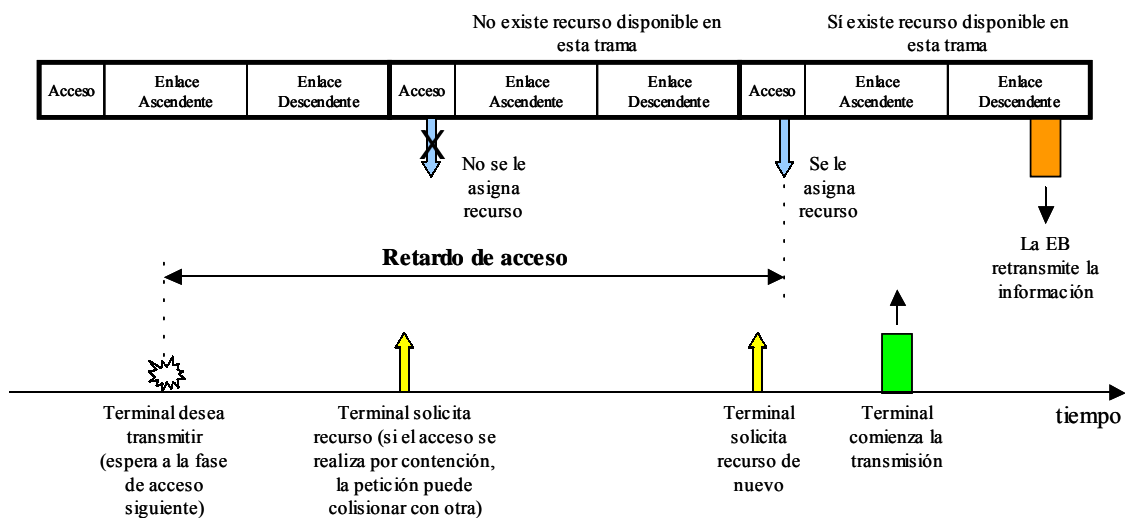


Figura 4.3. Estimación del retardo de acceso en un esquema TDD

El retardo medio de acceso se define como el intervalo temporal desde que un terminal desea transmitir hasta que recibe de la EB el permiso para hacerlo (ver Figura 4.3). Es necesario destacar que no se contabiliza el retardo de acceso hasta que comienza el terminal a transmitir, pues si se hiciera de esta manera se perderían paquetes que hubieran conseguido el permiso antes de que su tiempo de espera expirase comenzando a transmitir ligeramente después. En el instante en que un terminal desea transmitir un paquete de datos, éste es almacenado en la cola de salida esperando la autorización de la EB. En ese momento pueden suceder dos cosas: que la tasa de generación de paquetes del terminal sea mayor que la tasa de aceptación de la EB, con lo cual se perderían paquetes; o bien que el terminal no reciba el permiso de transmisión antes de la expiración del tiempo de espera del paquete en la cola, derivando igualmente en la pérdida de paquetes. La primera situación afecta de la misma manera a paquetes VBR o ABR

mientras que la segunda perjudica en mayor medida a paquetes con menor TOE, es decir, a los paquetes VBR.

Otro serio problema que afecta a las comunicaciones con requerimientos de tiempo real es la variación del retardo de acceso del paquete o *jitter*. En el caso de servicios de tipo CBR orientados a la conexión en los que se dispone de recursos durante toda la comunicación el retardo suele encontrarse dentro de unos márgenes lo suficientemente acotados para que el efecto del *jitter* se pueda considerar despreciable. Sin embargo, en el caso de los servicios de datos tipo VBR que dependen de la disponibilidad de recursos para la transmisión de cada paquete individualmente, asociados éstos además a aplicaciones en tiempo real, la variación del retardo de acceso puede suponer la degradación de la QoS llegando a la imposibilidad de mantener una comunicación aceptable. Por eso, cualquier protocolo MAC diseñado sobre una red inalámbrica ATM debe proporcionar la capacidad suficiente para superar estos inconvenientes.

Como ya se ha adelantado, un parámetro importante a la hora de evaluar las prestaciones de un sistema de este tipo es el porcentaje de pérdida de paquetes, definido como la relación entre el total de paquetes generados por el terminal y los que se han perdido. Fundamentalmente, existen dos razones por las que un paquete se puede perder. La primera es que el tráfico generado por otros terminales sea lo suficientemente elevado como para que el paquete espere en la cola de salida del terminal sin conseguir recurso durante el tiempo de espera, agotando éste con la consecuente pérdida del paquete. La segunda razón depende de la técnica de acceso utilizada. En el caso de acceso por contención, si la tasa de colisiones a la hora de solicitar permiso para transmitir es suficientemente alta el paquete se pierde por expirar el tiempo de espera sin haber podido informar a la EB de su deseo de obtener recurso.

En cuanto al GoS, en este caso se estima de la misma forma que se ha explicado para el tráfico CBR, teniendo en cuenta que ahora, en lugar de considerarse conexiones o llamadas cursadas, serán paquetes VBR o ABR. La carga generada será:

$$Carga\_generada = N_D \cdot \lambda_D \cdot \sigma_D = N_D \cdot \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (\text{sistema FDD}) \quad [\text{Ec.4.4}]$$

$$Carga\_generada = \begin{cases} N_D \cdot \lambda_D \cdot \sigma_D \cdot \frac{T_F}{T_U} \approx N_D \cdot \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \cdot 2 & (\text{ascendente}) \\ N_D \cdot \lambda_D \cdot \sigma_D \cdot \frac{T_F}{T_D} \approx N_D \cdot \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \cdot 2 & (\text{descendente}) \end{cases} \quad (\text{sistema TDD}) \quad [\text{Ec.4.5}]$$

donde  $N_D$  es el número de terminales de datos,  $\lambda_D$  es la tasa de llegada de paquetes,  $\sigma_D = L/V_D$  es la relación entre la longitud media de un paquete en bits y la velocidad binaria a la que se transmite (siempre que coincida con la velocidad agregada del canal),  $T_{ON}$  es la duración media de un paquete y  $(T_{ON} + T_{OFF})$  el tiempo entre paquetes.

## 4.5. Modelado de fuentes de tráfico

Durante las dos primeras décadas del siglo XX nació una de las ramas más antiguas de la ingeniería, el *teletráfico*, de mano del ingeniero danés A. K. Erlang y sus sistemas de colas. Esto permitió caracterizar las llamadas telefónicas desde el punto de vista de su duración y aparición en el tiempo mediante distribuciones estadísticas, definiendo parámetros como tasa de llegadas, duración media, hora cargada, etcétera. El estudio estadístico de las llamadas telefónicas como una secuencia de eventos aleatorios fue motivado por la necesidad de proporcionar suficientes recursos para obtener una cierta calidad de servicio telefónico, el cual, aparte de la calidad de la voz, afectaba principalmente a la probabilidad de bloqueo y al retardo en el establecimiento de la llamada. Debido a que la llegada de llamadas seguía un comportamiento similar al de un proceso de Poisson, se utilizaron modelos de colas relativamente simples para explotar su característica de sistema sin memoria. Así, la ingeniería de teletráfico se estableció como una herramienta cotidiana a través de las conocidas tablas de Erlang y las formulas Engset [94].

Sin embargo, con la aparición de los ordenadores en los años 60, así como de los equipos de comunicaciones basados en éstos, surgió una nueva clase de problema en un campo que en ese momento no estaba directamente relacionado con las telecomunicaciones. Los estudios realizados sobre los tradicionales sistemas cliente-servidor acerca de aspectos como los tiempos de espera en los sistemas de tiempo compartido, el almacenamiento de la información en un nodo antes de su transferencia al siguiente nodo, el desarrollo de protocolos de acceso múltiple, etcétera, iniciaron una segunda era en la ingeniería del teletráfico. Esta rápida evolución de las comunicaciones de datos llegó a desembocar en los años 80 en redes de banda ancha con servicios integrados, es decir, transportando tráfico multimedia (voz, datos, vídeo, etc). Actualmente, la ingeniería de teletráfico está omnipresente en el campo de las redes de comunicaciones, siendo soportada por investigadores matemáticos en muchos centros académicos.

En la era telefónica, una llamada requería una cantidad fija de ancho de banda, y consecuentemente, conocer el número y la duración de las llamadas fue suficiente para determinar los recursos necesarios. Por el contrario, el tráfico multimedia se caracteriza por tener gran variabilidad en sus necesidades de ancho de banda. Por ejemplo, durante la transmisión de una película de vídeo codificado, las necesidades de ancho de banda pueden fácilmente fluctuar en un factor de 10; las comunicaciones de datos entre terminales usualmente resultan en cortos períodos de alta actividad seguidos por largos períodos de silencio. Así, en la era multimedia no sólo interesa el número y la duración de las llamadas sino también las propiedades estadísticas del flujo de la información durante la llamada, para hacer un uso eficiente de los recursos mientras se garantiza una alta calidad de servicio.

Partiendo de resultados empíricos acerca del comportamiento del tráfico multimedia, un número de modelos han tratado de imitar sus principales rasgos. Los *modelos de fuente* se encargan de simular el comportamiento del tráfico generado por un terminal (un ordenador transfiriendo archivos, un servidor de vídeo bajo demanda, etc), mientras que modelos más generales deben representar el tráfico multiplexado

de múltiples fuentes, no necesariamente idénticas, denominando al conjunto total *tráfico agregado*. Estos modelos basados en procesos estocásticos, deben satisfacer dos criterios:

- ❑ proporcionar las propiedades estadísticas relevantes del tráfico real y
- ❑ permitir el estudio del comportamiento dentro de una red.

La segunda condición significa esencialmente que uno debería ser capaz de estudiar el rendimiento, por ejemplo, de un multiplexor, modelado como un sistema de colas cuando es alimentado por dicho modelo de tráfico. Por esta razón, la teoría de colas es otro ingrediente importante en la caja de herramientas del ingeniero de tráfico.

Las técnicas de modelado incluyen: técnicas analíticas, simulación por ordenador, y experimentación para capturar las características estadísticas del tráfico real [95]. Si los modelos de tráfico no representan exactamente el tráfico real, se puede sobrestimar o subestimar el comportamiento de la red. Los modelos de tráfico pueden ser *estacionarios* o *no estacionarios*. Los modelos de tráfico estacionarios pueden ser clasificados en general en dos clases: dependientes a corto o a largo plazo.

Si se desea profundizar sobre las técnicas de caracterización y modelado de tráfico se debe acudir a la bibliografía [99], [100]. En esta tesis se han implementado los modelos de tráfico considerados más adecuados y que se ajustan mejor al tráfico real generado por las distintas variedades de fuentes, según los últimos estudios indicados en las referencias.

#### 4.5.1. Modelado de fuentes CBR

Las conexiones del tipo CBR se consideran asociadas cada una de ellas a una llamada telefónica en modo circuito conmutado, por lo que dicha conexión se mantiene mientras dure la llamada. Durante todo ese tiempo se genera información a una tasa binaria constante según las características del servicio CBR especificadas en el Capítulo 1. Por lo tanto, para modelar una fuente CBR se utilizan los modelos de tráfico telefónico ampliamente conocidos. Se consideran los eventos de inicio y finalización de las llamadas telefónicas como un proceso de Poisson en el que tanto el intervalo entre llamadas como la duración de éstas son variables aleatorias con distribución exponencial negativa [101].

De la función de densidad acumulada de la distribución exponencial negativa [Ec.4.6] se obtienen las expresiones para calcular el valor de las variables aleatorias que representan la duración [Ec.4.8] y el tiempo entre llamadas [Ec.4.9], respectivamente.

$$P(x) = 1 - e^{-\lambda_V x} \quad [\text{Ec.4.6}]$$

$$x = -\frac{1}{\lambda_V} \ln(1 - P(x)) \quad [\text{Ec.4.7}]$$

$$\text{Duración\_de\_la\_llamada} = -\mu_V \ln[1 - U(0,1)] \quad [\text{Ec.4.8}]$$

$$\text{Tiempo\_entre\_llamadas} = -\frac{1}{\lambda_V} \ln[1 - U(0,1)] \quad [\text{Ec.4.9}]$$

Donde  $U(0,1)$  es la función generadora de números aleatorios entre 0 y 1 con distribución uniforme;  $\mu_V$  es el valor medio de la duración de una llamada, en segundos; y  $\lambda_V$  es la tasa de llegada de llamadas expresada en llamadas por segundo.

En el caso de utilizar fuentes con detector de actividad de voz con objeto de aprovechar los silencios para transmitir tráfico de datos, es necesario modelar éstos de la misma manera que se ha hecho antes con la duración de las llamadas [102], [103]. Así, el modelo de aparición de silencios sigue un proceso de Poisson en el que tanto la duración de un período de actividad de voz como de un intervalo de silencio siguen una distribución exponencial negativa. Ahora, la media estadística de cada distribución será la duración media del intervalo de voz ( $\sigma_v$ ) [Ec.4.10] y la del intervalo de silencio ( $\sigma_s$ ) [Ec.4.11], respectivamente. Las expresiones para realizar la inserción de silencios a lo largo de una llamada son las siguientes:

$$\text{Duración\_de\_actividad} = -\sigma_v \ln[1 - U(0,1)] \quad [\text{Ec.4.10}]$$

$$\text{Duración\_de\_silencio} = -\sigma_s \ln[1 - U(0,1)] \quad [\text{Ec.4.11}]$$

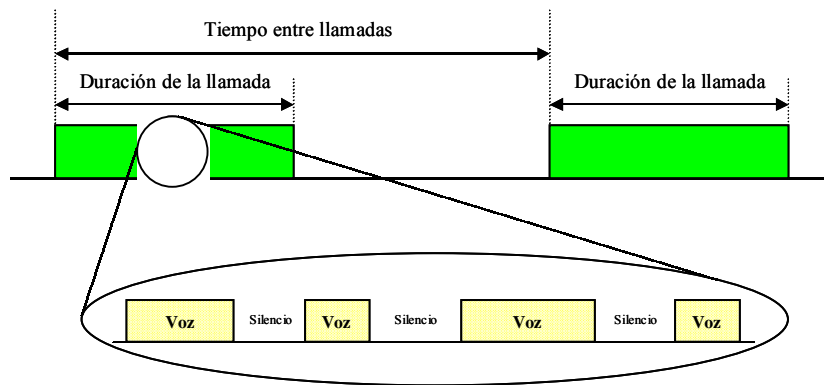


Figura 4.4. Modelo de fuente CBR con detección de actividad de voz

#### 4.5.2. Modelado de fuentes VBR y ABR

Como se ha mencionado en el Capítulo 1, para los servicios VBR y ABR se propone un modelado de fuentes que generan información con tasas binarias variables en el tiempo. Para ello se ha elegido el modelo de fuentes ON-OFF, el cual conmuta entre dos estados: un período activo (estado ON) cuando genera paquetes a una tasa constante y un período de inactividad (estado OFF) cuando la fuente no genera información. Tradicionalmente, los períodos ON y OFF son generados mediante variables aleatorias con distribución exponencial negativa con duraciones medias  $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$  respectivamente. Esto era así porque el tráfico de datos se suponía modelado de la misma manera que el tráfico de voz, es decir, seguían procesos de Poisson conmutados (tales como Batch Poisson, MMPP, etc).

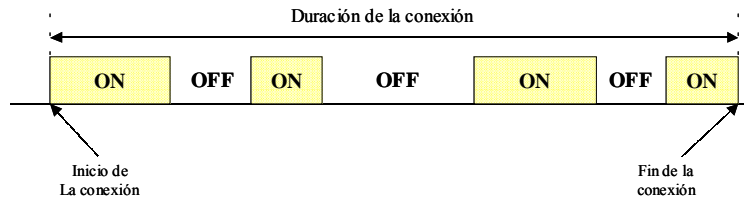


Figura 4.5. Modelo de fuente VBR o ABR

Sin embargo, recientes estudios sobre tráfico en redes de área local [96] [97] [98] han contribuido a mejorar más aún los modelos tradicionales sobre las características del tráfico, revelando su naturaleza *auto-similar* (o característica fractal) y su dependencia a largo plazo. Medidas realizadas de tráfico de datos indican que la distribución de la longitud del mensaje es bimodal. Puesto que cada mensaje se compone de una ráfaga de paquetes, ello sugiere que la ráfaga de los paquetes pueda estar bimodalmente distribuida. Es decir, una fuente es capaz de generar largas ráfagas de datos, como por ejemplo una transferencia de archivos, alternándolas con ráfagas cortas correspondientes a comandos. Esto ha venido a definirse como *rafagueo* (o *burstiness* en inglés) a través de un amplio rango de escalas de tiempo que abarcan desde los milisegundos hasta los minutos u horas. Las características de este tráfico son marcadamente diferentes de aquellos modelos usados tradicionalmente. Por ejemplo, estudios realizados en fuentes individuales de tráfico de datos RDSI han concluido que los tiempos de mantenimiento entre ambos estados de la distribución bimodal sigue una tendencia llamada *heavy tailed* (o distribución con cola extendida). Dichas fuentes de datos pueden ser caracterizadas adecuadamente mediante distribuciones *heavy tailed*, como la de Pareto [97], cuya función de densidad acumulada es la siguiente:

$$P(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha \quad [\text{Ec.4.12}]$$

Despejando se obtiene la formula para el calculo de la variable aleatoria  $x$  con distribución de Pareto, en función de una variable aleatoria con distribución uniforme  $U(0,1)$  que representa a  $P(x)$ .

$$x = \frac{k}{[1 - U(0,1)]^{1/\alpha}} \quad [\text{Ec.4.13}]$$

La media de la distribución de Pareto es:

$$\mu = k \frac{a}{a-1} \quad [\text{Ec.4.14}]$$

donde el parámetro  $k$  se calcula como:

$$k = \frac{\mu}{\left(\frac{a}{a-1}\right)} \quad [\text{Ec.4.15}]$$

La cola de la distribución de Pareto decae más lentamente (sigue una ley de potencia) que una distribución exponencial. Una variable aleatoria con distribución de Pareto puede tomar un valor mayor con una probabilidad más alta que una variable aleatoria distribuida exponencialmente. Cuanto mayor sea

el parámetro  $a$  (*parámetro de forma*), más gruesa es la cola de la distribución. Además, si se cumple que  $1 < a < 2$ , la distribución tiene varianza infinita.

Las características anteriores permiten comprender mejor el comportamiento de las fuentes individuales dando lugar a un flujo de tráfico autosimilar. La autosimilitud es cuantificada mediante el parámetro de *Hurst*:

$$H = \frac{3-a}{2} \quad [\text{Ec.4.16}]$$

Los procesos autosimilares con  $0.5 < H < 1$  son también dependientes a largo plazo. Los procesos cuyo parámetro Hurst ronda la unidad ( $a \approx 1$ ) se comportan principalmente a ráfagas, mientras que aquellos con un valor cercano a 0.5 ( $a \approx 2$ ) presentan características más continuas. Por lo tanto, si se desea caracterizar una fuente de tráfico de datos con alta tasa de ráfagas se podría tomar, por ejemplo, un valor de  $H=0.9$ , lo que correspondería a un valor de  $a=1.2$ . Con esto, el valor del parámetro  $k$  de la distribución de Pareto sería  $k=\mu/6$ , y la expresión generadora de la variable aleatoria  $x$  con distribución de Pareto tendría la siguiente forma:

$$x = \frac{\mu/6}{[1-U(0,1)]^{1/1.2}} \quad [\text{Ec.4.17}]$$

La distribución bimodal planteada será modelada mediante una fuente ON-OFF con tiempos de actividad (ON) e inactividad (OFF) igual a variables aleatorias con distribución de Pareto. De esta forma, durante los períodos de actividad se tienen longitudes de paquetes de varianza infinita, es decir, ráfagas pequeñas y grandes, e intervalos de inactividad también con varianza infinita, produciendo conjuntamente una alta variabilidad en la tasa de llegada de paquetes total.

#### 4.6. Árbol de conexiones virtuales

Debido a la limitación del espectro radioeléctrico, los futuros sistemas inalámbricos deberán tener arquitecturas pico/microcelulares para poder proporcionar la capacidad necesaria para soportar servicios de banda ancha [89]. Debido a la pequeña zona de cobertura de las pico/microcélulas y a las características de multicamino y de desvanecimientos por áreas de sombra, los cambios de EB debidos al movimiento del terminal en futuros sistemas ocurrirán mucho más frecuentemente en comparación con los actuales sistemas macrocelulares, introduciendo un nuevo conjunto de desafíos tecnológicos.

Las conexiones entre terminales móviles se pueden contemplar como caminos o rutas a través de la red central (*backbone*) de banda ancha cuyo origen y destino son los radioenlaces entre los terminales móviles y la EB. Estos radioenlaces actúan de interfaces entre los usuarios móviles y la red central fija. Cuando la calidad de un radioenlace entre un terminal y la EB a la que está asociado se degrada, se debe encontrar una nueva EB que asegure una calidad aceptable. El cambio de una EB a otra es lo que se denomina *traspaso* (*handoff* en inglés). Para ello, funciones específicas de control de la red fija y de la inalámbrica han de ser invocadas. En la red central, el traspaso requiere el establecimiento de una nueva

ruta, transportando los paquetes destinados al terminal móvil hacia la nueva EB. Además, la nueva ruta establecida ha de asegurar una calidad de servicio aceptable para la conexión inalámbrica y para las llamadas preexistentes que comparten el enlace de la nueva ruta. Para ejecutar el traspaso el controlador de llamadas de red debe asegurar previamente que la nueva conexión inalámbrica no sobrecargue la EB y a continuación crear un radioenlace entre el terminal móvil y la nueva EB.

Con todo esto, es obvio que para gestionar un evento de traspaso se han de poner en marcha múltiples procesos y funciones de control de red, tanto en la parte fija como en la inalámbrica. Si tales funciones se realizan de un modo centralizado, el procesamiento de los eventos de traspaso impondría un cuello de botella importante en la capacidad de las futuras redes microcelulares. Por estas razones, se estudian métodos de control distribuido de alta velocidad basados en el agrupamiento jerárquico de los recursos de las redes fija e inalámbrica.

#### **4.6.1. Control distribuido en la red fija central**

El concepto de *árbol de conexiones virtuales* como se describe en [90] y [91] reduce la carga en el procesador de llamadas producida al establecer y encaminar una conexión, de manera que pueden soportarse gran número de conexiones móviles. Como se puede comprobar en la Figura 4.6, un árbol de conexiones virtuales es una colección de EBs, nodos de conmutación de la red fija y enlaces entre ellos. La raíz del árbol es un nodo de conmutación fijo y las hojas del árbol son las EBs. Para cada conexión, el árbol proporciona un conjunto de conexiones virtuales en cada sentido, cada uno proporcionando un camino desde la raíz hacia una hoja. Para completar una conexión en la red central, se establece una conexión virtual fija desde el nodo raíz hacia un puerto de la red fija si la conexión es a un puerto fijo, o a la raíz de algún otro árbol de conexiones si la conexión es a otro usuario móvil.

En el momento que una conexión móvil es admitida por un árbol virtual, el procedimiento de establecimiento de llamada es ejecutado en dos pasos. Primero, la porción fija de la conexión virtual es establecida entre la raíz del árbol y el punto fijo de la red fija más adecuado, que puede ser un terminal de usuario fijo o la raíz del árbol destino. Esta porción fija es mantenida tanto tiempo como el móvil permanezca dentro del árbol. El segundo paso consiste en asignar a esa conexión, dentro del árbol, dos conjuntos de números correspondientes al VCN (*Virtual Circuit Number*) uno en cada sentido. Las tablas de enrutamiento de los conmutadores dentro del árbol de conexiones son actualizadas para incluir los nuevos VCNs. En cualquier momento, únicamente dos conexiones virtuales, una en cada sentido entre la EB elegida por el terminal móvil y la raíz del árbol, están actualmente en uso.



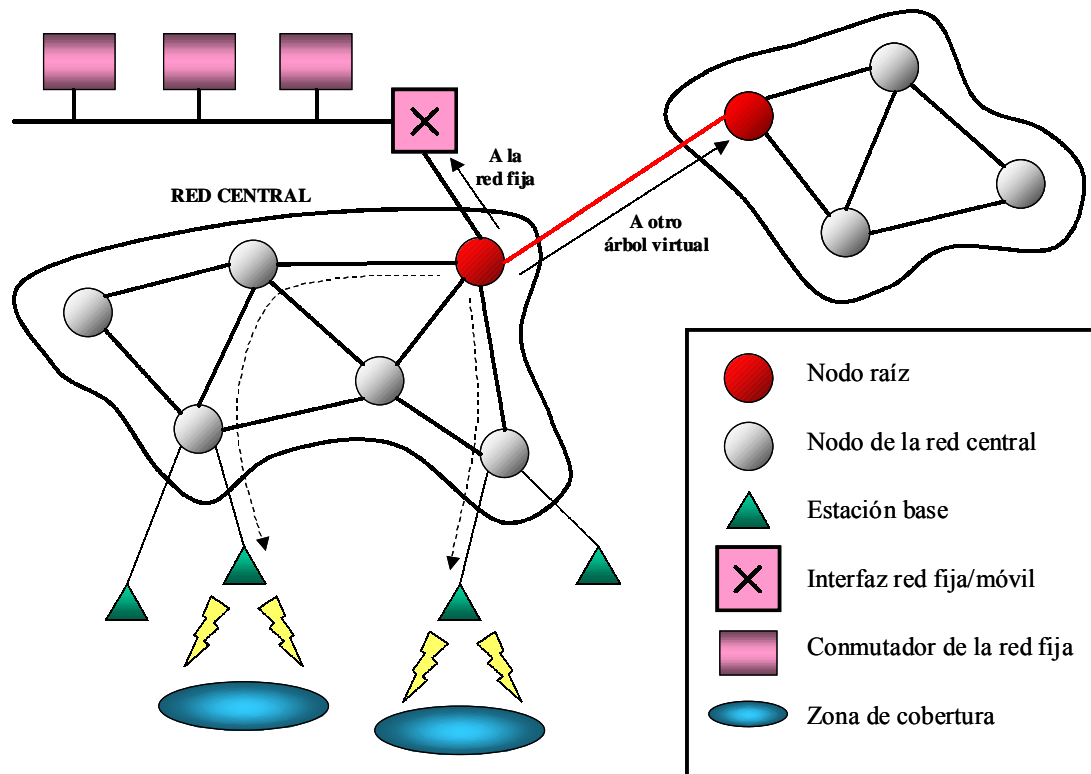


Figura 4.6. Árbol de conexiones virtuales

Cuando un terminal móvil ya admitido en un árbol virtual desea hacer un traspaso a otra EB dentro del mismo árbol, simplemente empieza a transmitir paquetes con el número de conexión asignado para usarlo entre sí mismo y la nueva EB. Usando el camino preestablecido entre la nueva EB y la raíz del árbol, los paquetes de dicho terminal móvil fluirán a la raíz y, a través de la porción fija de la red, a su destino final. De esta forma, el procesador de llamadas no es invocado en el traspaso. En dirección contraria, el primer paquete que llegue a la raíz desde una conexión móvil determinada que muestre un nuevo número de conexión es interpretado como evidencia de un traspaso. Conociendo el número de conexión asignado para esa conexión móvil desde la raíz del árbol a la nueva EB, la tabla de enrutamiento en el conmutador raíz es actualizada para que los paquetes que fluyan desde la raíz a dicho terminal móvil reciban el número de conexión apropiado para enviar esos paquetes a la nueva EB.

En el momento que una conexión móvil alcanza los límites geográficos del árbol virtual, se solicita admisión a un nuevo árbol. En este caso, es necesario invocar al procesador de llamadas de la red. Sin embargo, como la zona de cobertura de un árbol es grande comparado con el tamaño de las células que constituyen el árbol, la tasa de traspasos a nivel de árbol virtual se asume que sea aceptablemente bajo desde el punto de vista del procesador de llamadas. Para prevenir que la conexión de un terminal móvil situado entre los límites de dos árboles oscile de uno a otro, los árboles deben solaparse en el espacio, es decir, algunas EBs deben pertenecer a dos árboles, de manera que cuando un terminal móvil se aproxime a los límites geográficos de su árbol actual, se traspase y aparezca dentro del control del nuevo árbol sin ningún tipo de incertidumbre.

#### **4.6.2. Implementación**

En una red ATM, las celdas que viajan por ella transportando información poseen un campo de conexión virtual utilizado en las tablas de búsqueda de rutas contenidas dentro de los nodos de conmutación o multiplexación. Una ruta consiste de una secuencia de enlaces, cada uno de los cuales conecta dos nodos. Durante el tiempo de establecimiento de la llamada, se suministra a las tablas de búsqueda información acerca del enlace y número de conexión con el fin de que cada celda ATM asociada con la nueva conexión virtual sea encaminada a lo largo del conjunto de enlaces que se encuentran en la ruta elegida. Aunque la ruta o camino de un punto de conexión fijo es el mismo durante todo el tiempo de vida de la conexión, el número real de conexión que viaja dentro de la cabecera de las celdas ATM puede cambiar según atraviesa los diferentes enlaces de la ruta. Así, una conexión virtual particular se define mediante una secuencia de números de conexión y enlaces.

Puesto que la EB de una conexión móvil puede cambiar varias veces a lo largo de una comunicación, se requiere que el establecimiento de nuevas rutas contribuya lo menos posible al aumento de la carga computacional del centro de control de admisión de conexiones. El proceso de localizar la EB actual de una conexión y seleccionar la ruta más adecuada para que las celdas puedan viajar desde la raíz del árbol a esa EB se realiza en tiempo real por un elemento especial denominado Controlador/Traductor VCN. Este equipo sólo es necesario en el conmutador situado en la raíz del árbol. Una vez que la actual EB ha sido identificada, es decir, una vez que una ruta particular de las  $N$  rutas posibles durante el tiempo de establecimiento de la llamada conduce a la EB seleccionada, las celdas fluyen a lo largo de esa ruta por medio de tablas de búsqueda convencionales contenidas en los nodos intermedios. Mientras los terminales móviles se desplazan dentro del área cubierta por un árbol virtual, todas las celdas ATM que se originen o lleguen a un terminal móvil viajan a través del mismo puerto de salida o de entrada del conmutador localizado en la raíz del árbol virtual.

#### **4.6.3. Control de admisión**

La función de admisión de llamadas se utiliza cuando se requiere manejar dos conjuntos de recursos de red. En primer lugar, la llamada debe ser admitida dentro de la porción fija de su ruta, esto es, desde la raíz del árbol de conexiones virtuales hasta el punto fijo de la red de cable o de la raíz del árbol virtual correspondiente al otro extremo de la conexión. Esto puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos [92], [93], todos ellos evitando degradar de manera inaceptable la calidad de servicio que disfrutan el resto de conexiones que comparten cualquier enlace de la ruta fija. Si esto no se cumple, el permiso para establecer la conexión debe ser denegado. Por otro lado, la conexión móvil debe ser admitida dentro del árbol virtual adecuado, cada uno de los cuales se ve como un único recurso colectivo dentro de la red móvil. El control de admisión de las conexiones móviles a un árbol virtual debe realizarse siempre, pues en caso contrario, una vez realizada la admisión, los usuarios podrían traspasarse libremente a cualquier EB dentro del mismo árbol, y como resultado podrían aparecer casos de sobrecarga o congestión en cualquier EB si un gran número de usuarios móviles solicitan

simultáneamente acceso a través de la capacidad limitada de dicha EB. Puesto que la sobrecarga de la EB puede causar pérdidas y retardos en la celdas ATM, el propósito del control de admisión es limitar el número de conexiones establecidas concurrentemente a través del árbol de manera que se cumplan los objetivos adecuados de calidad de servicio a nivel de celda ATM.



# CAPÍTULO 5

## DISEÑO DEL PROTOCOLO MAC PROPUESTO

---

### 5.1. Introducción

En este capítulo se presenta una propuesta de protocolo MAC que, ajustándose a las condiciones estudiadas en los Capítulos 2, 3 y 4, tanto desde el punto de vista físico como de control de acceso al medio, consiga mostrar unas prestaciones que justifiquen su implementación real en un futuro próximo.

Partiendo de las limitaciones impuestas por el medio de transmisión inalámbrico, como son el ruido blanco, los desvanecimientos y dispersión del canal, el efecto Doppler, etcétera, se realiza un diseño del formato de trama TDMA, cuya estructura interna detallada se deriva de los diferentes requisitos de los servicios ATM a los que hay que dar soporte. Para ello, es necesario obtener unos modelos de fuente que se ajusten correctamente al comportamiento de los terminales de voz y datos, con objeto de generar una carga de tráfico que se asemeje a una situación real. Además, se ha de definir un esquema de acceso al medio que, ya sea mediante contención o por sondeo, permita a los terminales realizar las solicitudes de transmisión con las máximas garantías de tener éxito.

### 5.2. Condicionantes físicos

Existen ciertos parámetros del sistema que son básicos y constituyen el punto de partida del

diseño del protocolo. Estos son los siguientes:

- Frecuencia portadora
- Velocidad binaria de transmisión del canal
- Velocidad binaria de los terminales
- Modulación
- Separación entre canales
- Velocidad máxima de desplazamiento de los terminales móviles

Además, es necesario tener en cuenta si es:

- Un sistema para exteriores o interiores
- Un sistema bidireccional basado en FDD o en TDD

Puesto que, desde el punto de vista del nivel físico, lo que se pretende en esta tesis es evaluar el comportamiento de una serie de algoritmos, se ha elegido un sistema de comunicaciones móviles en entornos exteriores, ya que es en estas situaciones en las que los canales presentan mayor dispersión temporal, especialmente en entornos rurales, consiguiendo así las peores condiciones de propagación posibles. Además, se pretende que sea factible ampliar el ámbito de aplicación de estos algoritmos a futuras generaciones de comunicaciones móviles, como es el caso de UMTS dentro de la tercera generación.

Por otro lado, debido a la utilización de antenas adaptativas, éstas alcanzan sus mejores prestaciones cuando la transmisión y la recepción se efectúan sobre una única frecuencia portadora, pues en este caso el canal de transmisión se supone que es recíproco, es decir, el modelo de canal en un determinado instante es el mismo para el enlace ascendente que para el descendente. Así, los valores de los coeficientes de la antena en un sentido son los mismos<sup>11</sup> que los valores en el sentido opuesto. Esto, añadido al hecho de que la versión TD/CDMA de UMTS [29] utiliza un esquema bidireccional TDD, hace que el diseño se decante por un sistema de este tipo.

### 5.2.1. Frecuencia portadora

De la lista de parámetros anterior, la elección de la frecuencia portadora, implica alguna que otra consecuencia a tener en cuenta. Si se supone que un terminal se puede desplazar a una velocidad máxima de  $v$  Km/h, según la [Ec.2.5] la frecuencia Doppler asociada sería:

$$f_d(\text{Hz}) = \frac{v(\text{km/h})}{1.08} f_c(\text{GHz}) \quad [\text{Ec.5.1}]$$

En la Tabla 5.1 se muestran los valores de  $f_d$  (Hz) para las bandas de frecuencias más comunes.

---

<sup>11</sup> En realidad, los coeficientes de un extremo son los complejos conjugados del otro.

Velocidad del terminal (Km/h)	Frecuencia portadora (GHz)			
	0.450	0.900	2.4	5.8
50	20.83	41.66	111.11	268.52
100	41.66	83.33	222.22	537.04
200	83.33	166.66	444.44	1074.07

Tabla 5.1. Valores típicos de frecuencia Doppler

La frecuencia portadora condiciona, además, el período de ecualización que se definió en el Capítulo 2. Generalmente, se acepta que las condiciones de propagación se mantienen constantes durante el tiempo que se tarda en recorrer un 10% de la longitud de onda [90], por lo que se ha de fijar el tamaño del período de ecualización a un valor inferior. Mediante la siguiente expresión se pueden calcular los tiempos durante los cuales un terminal móvil recorre un 10% de la longitud de onda de la frecuencia portadora:

$$T_{ec\_max}(ms) = \frac{\lambda (cm)}{v (Km / h)} * 3.6 \quad [Ec.5.2]$$

En la Tabla 5.2 se muestran los tiempos (ms) para diferentes casos de frecuencia portadora y velocidad de desplazamiento.

Velocidad del terminal (Km/h)	Frecuencia portadora (GHz) / Longitud de onda (cm)			
	0.450/66.6	0.900/33.3	2.4/12.5	5.8/5.17
50	4.800	2.400	0.900	0.372
100	2.400	1.200	0.450	0.186
200	1.200	0.600	0.225	0.093

Tabla 5.2. Tiempo (ms) en el que el terminal móvil recorre un 10% de la longitud de onda

Estos valores de tiempos limitan la duración del período de ecualización. Si cada slot de datos dentro de la trama posee una secuencia de entrenamiento para ecualización, estos tiempos definen la duración de dicho slot en ambos sentidos de transmisión. Además, para frecuencias portadoras altas, si el tamaño del slot se reduce se ha de incrementar la velocidad binaria para que la cantidad de información transmitida por slot siga siendo la misma.

Por lo que parece, la elección de la frecuencia portadora es más adecuada cuanto menor sea ésta. Sin embargo, para poder proporcionar una buena calidad de servicio a una amplia población de terminales son necesarios cumplir dos requisitos importantes: disponer de un número de canales adecuado para gestionar eficazmente el reuso de frecuencias evitando interferencias indeseadas, y ofrecer una elevada velocidad binaria que minimice los retardos de acceso y transmisión a la vez que asegure un ancho de

banda por usuario aceptable. Ambas premisas hacen que la elección de la banda de frecuencias sea un compromiso entre las condiciones de diseño impuestas por el medio físico y por la planificación celular del sistema, además de tener en cuenta la calidad de servicio final. Por supuesto, en un sistema real, la elección de la banda de frecuencias depende del organismo regulador que se encargue de su asignación, así como de la disponibilidad de dichas frecuencias. En este estudio, se ha elegido la banda de frecuencias de 2.4 GHz, por otra parte próxima a la de 1.8 GHz utilizada por UMTS, ya que posee un compromiso entre la duración máxima de un slot de la trama TDMA, la velocidad binaria requerida y la degradación que el medio de transmisión inalámbrico puede producir en esta frecuencia.

### 5.2.2. Modulación digital

Otro parámetro que afecta directamente al ancho de banda es la modulación digital que se utilice. Es importante que la modulación elegida posea una alta eficiencia espectral. Según el Capítulo 2, la eficiencia espectral de las tres modulaciones que fueron evaluadas en el Capítulo 3 son:

- ❑ GMSK (BT=0.3)  $\rightarrow v= 1.35$  bits/seg/Hz
- ❑ GFSK (BT=0.5)  $\rightarrow v= 0.67$  bits/seg/Hz
- ❑  $\pi/4$ -DQPSK (roll-off=0.35)  $\rightarrow v= 1.44$  bits/seg/Hz

Las tres son modulaciones con envolvente constante, lo que beneficia al comportamiento del amplificador de potencia del transmisor, aunque en el caso particular de  $\pi/4$ -DQPSK es necesario un amplificador lineal. Sin embargo, al ser ésta la modulación con mayor eficiencia espectral, será la que menor ancho de banda requiera. Por eso, la modulación que se ha elegido es  $\pi/4$ -DQPSK con un filtro de coseno alzado de roll-off 0.35.

### 5.2.3. Velocidad binaria

En el apartado 5.2.1 se ha visto la relación que tiene la elección de la frecuencia portadora con la velocidad binaria de transmisión del sistema. Ésta posee, además, una estrecha dependencia de las características del canal y del tamaño de la trama TDMA. Cuando la velocidad binaria es baja, la duración de los símbolos de la secuencia digital modulada es mayor que la respuesta al impulso del canal, con lo que los efectos sobre la señal transmitida serán leves. Sin embargo, la duración de la trama será lo suficientemente elevada como para que se produzcan desvanecimientos profundos con una frecuencia relativamente alta de tramas. Por el contrario, si la velocidad binaria es excesiva, la respuesta del canal abarca varios símbolos de la señal transmitida, la ISI producida es grande y la distorsión de la señal será difícilmente contrarrestada por los ecualizadores y antenas adaptativas. Sin embargo, con una duración menor de las tramas, los episodios de desvanecimientos afectarán a un menor porcentaje de tramas.

Esta claro que hay que establecer un nuevo compromiso. Esta vez hay que elegir entre dos tipos de degradaciones producidas por el medio de transmisión. Por un lado, está la ISI que en grandes dosis



hace que los efectos de los ecualizadores sean incluso nocivos sobre la recepción de la señal digital; y por otro el efecto Doppler, cuyas rotaciones inducidas en la constelación de la modulación recibida unidas a los desvanecimientos, hacen de las antenas adaptativas el elemento más eficaz del receptor para compensar estos males.

La elección de la velocidad binaria dependerá, finalmente, de la cantidad de información que se desee transmitir en cada trama, junto con la velocidad binaria de las fuentes CBR como se verá en el apartado 5.3.6.

### 5.3. Diseño de la trama

En este apartado se especifican los valores de las diferentes partes que componen la trama. Además, se presentan las interacciones y dependencias que existen entre los parámetros definidos, pues la elección de un, en ocasiones, está supeditado a uno o más parámetros del nivel físico o MAC.

#### 5.3.1. Señalización

La implementación de un protocolo compatible con la utilización de antenas adaptativas y la arquitectura del árbol de conexiones virtuales está basada en la disponibilidad de ciertos mensajes de señalización, control y temporización de los que se encarga el nivel físico. La Figura 5.1 muestra una estructura capaz de soportar estas operaciones. Asumiendo que el árbol virtual incluye  $K$  EBs, entonces la supertrama contiene  $K$  tramas. Cada una está encabezada por un *intervalo de señalización* y un *intervalo de comunicación*. El primero es utilizado secuencialmente por cada una de las EB, es decir, existe un único intervalo de señalización por cada EB dentro de cada supertrama, mientras que todas las EBs están operando durante los intervalos de comunicación de cada trama. El intervalo de señalización soporta los mensajes necesarios por el terminal móvil para adquirir sincronización, generar solicitudes de conexión virtual, aceptar llamadas, elegir una EB, ejecutar un traspaso, declarar su localización, etcétera. Los mensajes de señalización, puesto que van destinados a todos los terminales en modo *broadcast*, no pueden ser tratados de manera individualizada por los algoritmos de nivel físico, por lo que han de ser protegidos mediante técnicas como, por ejemplo, espectro ensanchado con secuencia directa (DS/SS), ya que es una técnica robusta frente a interferencias y desvanecimientos multicamino.

Cada intervalo de señalización se divide en siete campos. Durante el campo 1, la EB transmite una señal denominada *marcador (frame marker)*. Dicha señal contiene una palabra única asociada con el número de identificación de la EB que la emite (equivalente al Base Station Colour Code de GSM) y el árbol virtual al cual pertenece. Inicialmente, cada terminal escucha el marcador, transmitido dentro de la supertrama, procedente de todas las EB pertenecientes al mismo árbol. A continuación, elige la señal recibida con mayor potencia y utiliza una de las  $K$  tramas para posteriores propósitos de señalización.

Cuando un terminal desea solicitar una conexión virtual, envía dicha petición en el campo 2 de señalización de la trama a la cual esté actualmente sincronizado<sup>12</sup>. Puesto que la señalización en este campo está compartida por todos los móviles dentro de una misma EB, los mensajes de solicitud pueden sufrir colisiones si dos o más terminales de la misma célula solicitan servicio simultáneamente. La ausencia de un acuse de recibo enviado por la EB en el campo 3 indica que dicha solicitud ha sufrido una colisión. Después de esperar un número aleatorio de supertramas, el terminal solicitará de nuevo servicio. La confirmación enviada por la EB puede ser de dos tipos: si el control de admisiones decide que la solicitud de admisión no puede ser aceptada dentro del árbol de conexiones virtuales sin una inaceptable degradación de la calidad de servicio, el acuse de recibo será un mensaje denegando el servicio. Por el contrario, si la solicitud de conexión puede ser acogida, el control de admisiones inicializa el árbol, establece la porción fija de la ruta desde el nodo raíz y asigna los VCNs de entrada y salida para ser usados por la comunicación, los cuales son enviados al terminal como parte del acuse de recibo.

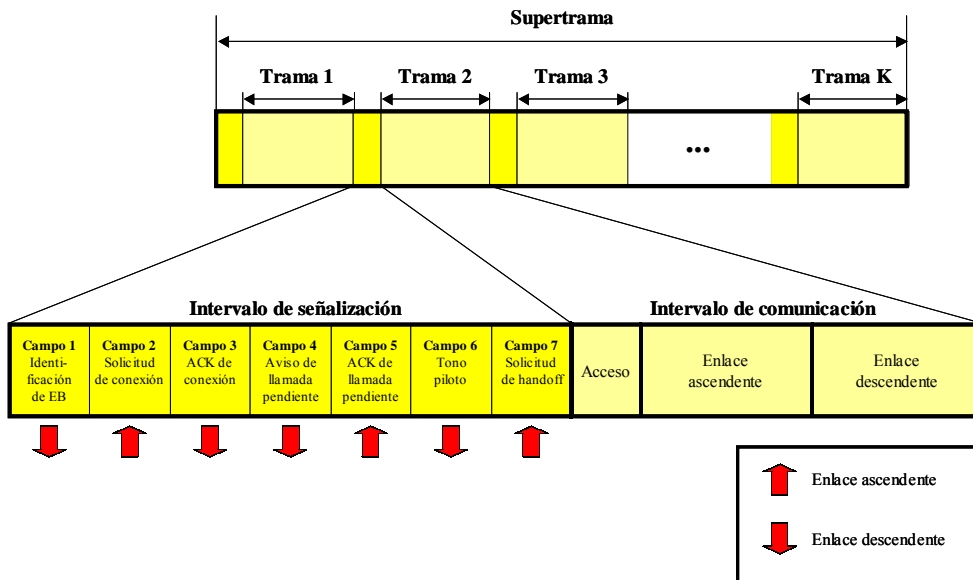


Figura 5.1. Estructura de la parte de señalización de la trama

El campo 4 es utilizado por la EB para enviar un aviso a un terminal inactivo indicándole que tiene una llamada pendiente. El mensaje consiste en un identificador del terminal seguido por un conjunto de VCNs asignados por el controlador de admisión, el cual primero asegura que se reúnen las garantías de calidad de servicio necesarias. El aviso es transmitido secuencialmente por cada EB en el árbol utilizando cada una su respectiva trama, pues no se conoce con antelación la célula en la que se encuentra el terminal destino de la conexión. El mensaje puede extenderse sobre varias supertramas, por lo que el terminal lo escuchará en una de las  $K$  tramas a la que esté sincronizado. En respuesta a dicho mensaje de aviso, un terminal confirma su recepción durante la señalización del campo 5 de la trama a la que esté sincronizado, indicando de este modo localización actual. A partir de este momento, la EB correspondiente incluye dicho terminal en su ciclo de sondeo dentro de los intervalos de comunicación de

<sup>12</sup> Este mensaje de solicitud puede requerir varias supertramas.

todas sus tramas.

La señalización del campo 6 es empleada por la EB para enviar secuencialmente tonos pilotos desde cada uno de los elementos de su array de antenas. Este campo es escuchado en cada trama por cada terminal. Éste, mediante el mismo algoritmo utilizado por la EB en la elección de los pesos de la antena, deduce la calidad del canal que podría ofrecer cada EB, con lo que, si la ocasión lo requiere, puede decidir cuándo iniciar un proceso de traspaso y a qué célula unirse. Cuando esto sucede, la solicitud de traspaso es enviada en el campo 7 de señalización, dentro de la trama correspondiente a la célula al cual el terminal móvil desea unirse. Puesto que la señalización de dicho campo se comparte por todos los terminales, pueden ocurrir colisiones. Después de transmitir una solicitud de traspaso, el terminal escucha para comprobar si ha sido incluido dentro del ciclo de sondeo de la nueva EB. Si el móvil es sondeado, el traspaso ha sido completado. Si no es así, ha ocurrido una colisión, con lo que el terminal espera un número aleatorio de supertramas para volver a transmitir su solicitud de traspaso.

### 5.3.2. Ranuras de datos

Otro parámetro directamente relacionado con la duración de la trama es el número de ranuras de datos. Suponiendo constante la velocidad binaria del canal, si existe un número excesivo de ranuras, la eficiencia del protocolo  $\eta$  aumenta, ya que el porcentaje de información transmitida es mayor, pero aumenta la separación entre los intervalos de señalización a nivel de supertrama, con lo que los retardos derivados de operaciones como el traspaso o la admisión de un nuevo terminal al árbol de conexiones virtuales puede ser excesivamente alto, degradando la calidad de servicio. Por el contrario, si el número de ranuras es bajo la eficiencia se ve afectada significativamente, mientras que la señalización se ve beneficiada.

$$\eta = \frac{\text{Número de bits de información}}{\text{Número total de bits en la trama}} \quad [\text{Ec.5.3}]$$

La duración de las ranuras, como se ha visto en el apartado 5.2.1, depende de condicionantes impuestos por el nivel físico, luego se da por hecho que antes de fijar el número de ranuras por trama se ha estimado la duración de la cada una. En este estudio, como resultado del compromiso entre la eficiencia del protocolo y la disponibilidad de la señalización en la supertrama, se han definido 60 ranuras de datos para cada enlace.

En cuanto al tamaño de cada ranura, con objeto de incrementar la eficiencia de la trama, se ha decidido transportar 2 celdas ATM (848 bits) en cada ranura, con lo cual el tamaño de información contenida en cada ranura es  $B_p=768$  bits

### 5.3.3. Duración de la trama

Cuando se ofrecen servicios de tipo CBR, en el que los recursos se utilizan en modo circuito conmutado, es necesario asignar una ranura de la trama de forma permanente durante todo el tiempo que

dure la conexión. El tipo de comunicación asociada a esta modalidad suele ser una llamada de voz. De esta forma, si la velocidad de la fuente de voz es  $V_V$ , y el tamaño de la ranura de datos sin overhead es  $B_P$ , se ha de cumplir necesariamente que:

$$V_V = \frac{B_P}{T_F} \quad [\text{Ec.5.4}]$$

donde  $T_F$  es la duración total de la trama. Esto acarrea importantes consecuencias en el diseño de la trama, pues si la voz se comprime hasta reducir en gran medida su velocidad binaria, puede provocar bien que el tamaño de un slot de datos sea muy pequeño, o bien que la duración de la trama sea excesivamente grande.

Una vez fijado el tamaño de las ranuras de datos, en la siguiente tabla se muestra la duración de la trama para diferentes velocidades de fuentes de voz, en función de su codificación y compresión.

Tipo de fuente de voz	Velocidad binaria (Kbps)	Duración de la trama (ms)
PCM	64	12
ADPCM	32	24
VCELP	9.6	80

Tabla 5.3. Duración de la trama en función de la velocidad de la fuente de voz

El servicio CBR más usual es el de las llamadas de voz. Sin embargo, se desea proporcionar al sistema la posibilidad de realizar conexiones CBR que sean de datos generados por aplicaciones que así lo requieran. Por eso, se ha elegido la velocidad de 64 Kbps para las conexiones CBR, lo cual, además de asegurar una calidad de voz óptima, provee al usuario con la opción de utilizar un canal CBR para transmitir datos.

La elección de la velocidad de fuente CBR, junto con la decisión de transportar 2 celdas ATM en cada ranura de datos, conduce a una duración de trama de 12 milisegundos. La velocidad de fuente de los terminales de tipo VBR o ABR no influye en este valor, ya que estos trabajan en modo conmutación de paquetes y no requieren la asignación permanente de recursos.

#### 5.3.4. Overhead

Al comienzo de cada slot del enlace ascendente, el terminal móvil envía un breve *tono piloto* que permite a la EB calcular los pesos adecuados de la antena adaptativa (ver Figura 5.2). De esta forma, la EB puede mejorar significativamente la recepción de las celdas ATM enviadas a continuación por dicho terminal.

Análogamente, cada slot del enlace descendente comienza con un estímulo que la EB envía al

terminal móvil, consistente en una secuencia de espectro ensanchado que lleva el código de identificación del terminal móvil en particular. Este estímulo se denomina *tono de sondeo*. El terminal responde a este estímulo enviando un breve tono piloto de RF para que la EB calcule los pesos correctos del array de antenas, y finalmente la EB transmite la información al terminal móvil.

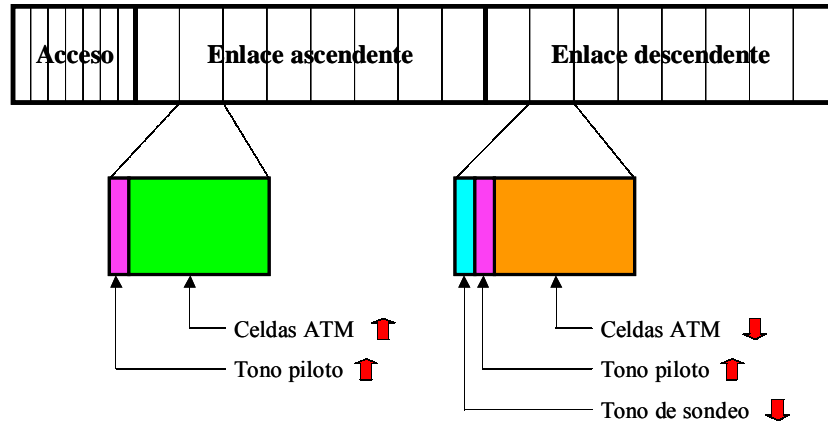


Figura 5.2. Overhead introducido en las ranuras de datos

Como se puede observar, con este esquema cada bloque de información, en cualquier dirección, va siempre precedido de un tono utilizado para adquirir los pesos correctos de la antena. Esto contribuye a que sea posible transportar más de una celda ATM en cada slot de datos. El tamaño, tanto del tono piloto como del tono de sondeo, se ha fijado en 8 octetos, valor más que suficiente (ver Capítulo 4) para suministrar a la antena adaptativa información sobre el estado del medio de transmisión y para que la EB avise al terminal móvil de que éste es el destinatario del siguiente slot descendente.

### 5.3.5. Formato de la parte de acceso

El método que empleen los terminales en la solicitud de permiso para transmitir no va a influir significativamente en el tamaño de los minislots que se destinan al comienzo de cada trama. Aunque, más adelante se trata el tema de la técnica de acceso múltiple elegida, lo que sí se puede definir en este punto es el número de minislots que formarán esta parte de la trama. Este valor está directamente relacionado con el número de slots de datos que se hayan definido en la parte ascendente y descendente de la trama. Puesto que existen 60 slots de datos para cada enlace, habrá igualmente 60 minislots de acceso en la cabecera de la trama. El tamaño de cada uno depende, como otras veces, de los requerimientos de la técnica de acceso. Se ha estimado un valor de 60 octetos para cada minislot, considerándose suficientemente dimensionado para la mayoría de las técnicas de acceso existentes.

El hecho de que el acceso se realice mediante contienda o por sondeo, afectará directamente a las prestaciones del protocolo, pero no va a modificar, al menos desde el punto de vista de las simulaciones, el tamaño y la duración de los minislots ni, consecuentemente, el tamaño ni la duración de la trama.

### 5.3.6. Formato final de la trama

Una vez que se han especificado los valores de los diferentes campos que forman la trama, el formato que ésta tiene se muestra en la Figura 5.3.

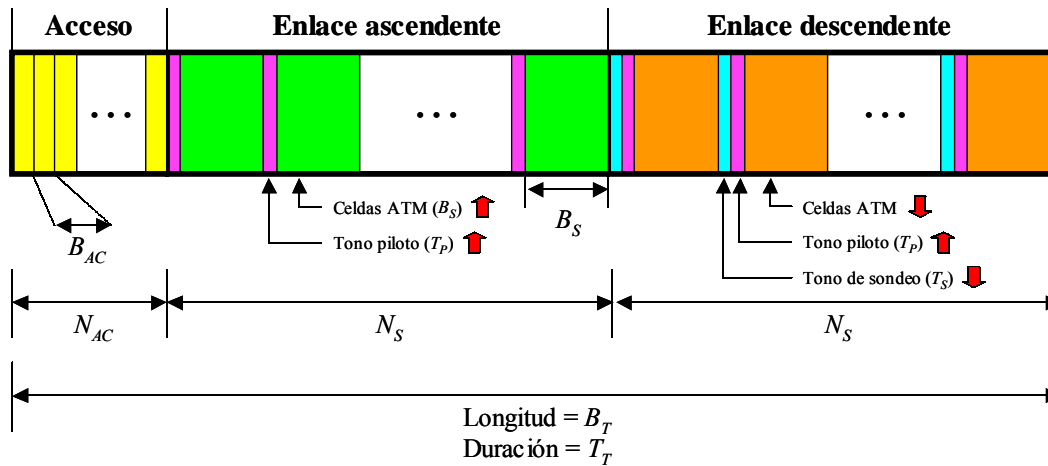


Figura 5.3. Formato final de la trama MAC propuesta

Además de los campos definidos, existen unos tiempos de guarda ( $B_G$ ) necesarios siempre en todo sistema TDMA que, distribuidos a lo largo de ella, ayudan a los equipos transmisores y receptores a mantener la sincronización temporal. Dado que se conoce el tamaño total de la trama, en bits, así como su duración, el cálculo de la velocidad binaria de transmisión es inmediato:

$$\text{Tamaño acceso} = N_{AC} * B_{AC} \quad [\text{Ec.5.5}]$$

$$\text{Tamaño enlace ascendente} = N_S * (T_P + B_S) \quad [\text{Ec.5.6}]$$

$$\text{Tamaño enlace descendente} = N_S * (T_S + T_P + B_S) \quad [\text{Ec.5.7}]$$

$$\begin{aligned} B_T &= \text{Tamaño acceso} + \text{Tamaño enlace ascendente} + \text{Tamaño enlace descendente} + \text{Guarda} = \\ &= N_{AC} * B_{AC} + N_S * (T_P + B_S) + N_S * (T_S + T_P + B_S) + B_G = 142500 \text{ bits} \end{aligned} \quad [\text{Ec.5.8}]$$

$$V_C = \frac{B_T}{T_F} = 11.875 \text{ Mbps} \quad [\text{Ec.5.9}]$$

$$W_C = \frac{V_C}{v} = 8.246 \text{ MHz} \quad [\text{Ec.5.10}]$$

Si se comparan estos valores con las especificaciones de la versión CDMA de UMTS denominada WCDMA (las de la versión cdma2000 son similares) [109], se comprueba que la máxima velocidad binaria que se puede alcanzar es de 2 Mbps, que tras el ensanchamiento resulta una velocidad total de 16.384 Mchips/seg ocupando una banda de 20 MHz.

Los principales parámetros de la trama se resumen en la Tabla 5.4.

Parámetro	Símbolo	Valor
Capacidad del canal (Mbps)	$V_C$	11.875
Ancho de banda (MHz)	$W_C$	8.246
Duración de la trama (ms)	$T_F$	12
Tamaño total de la trama (Kbits)	$B_T$	142.5
Tamaño de los campos de guarda (bits)	$B_G$	420
Tamaño del minislot (bits)	$B_{AC}$	480
Número de minislots de acceso	$N_{AC}$	60
Número de slots por enlace	$N_S$	60
Número de celdas por slot de datos	$C_S$	2
Tamaño del slot de datos (bits)	$B_S$	848
Tamaño útil del slot de datos (bits)	$B_P$	768
Tamaño del tono piloto (bits)	$T_P$	64
Tamaño del tono de sondeo piloto (bits)	$T_S$	64

Tabla 5.4. Parámetros principales de la trama MAC propuesta

La eficiencia del protocolo se calcula según:

$$\eta = \frac{N_S * B_S * 2}{B_T} = \frac{101760}{142500} = 0.7141 \quad [\text{Ec.5.11}]$$

Es decir, el 71.41% de la trama está dedicada a transmitir información, mientras que el 28.59% pertenece al overhead: parte de acceso, tonos piloto, tonos de sondeo y tiempos de guarda temporales.

## 5.4. Protocolo de acceso

Las múltiples posibilidades de elección de la técnica de acceso de los terminales a la hora de solicitar recursos al sistema, se resumen fundamentalmente en dos: acceso por sondeo o por contención. A continuación, se explican cada uno de estas técnicas.

### 5.4.1. Acceso mediante sondeo (polling)

En el acceso por sondeo [111], la primera parte de la trama destinada a tal efecto se divide en dos: la primera parte es una transmisión ascendente y la utilizan los terminales para solicitar recursos a la EB cuando tienen información en cola para enviar; la segunda parte es descendente y corresponde a las respuestas enviadas por la EB sobre los recursos que les han sido asignados a cada terminal (ver Figura 5.4). Para ello, se utilizan  $N_{AC}$  minislots para las peticiones y  $N_{AC}$  minislots para la asignación de la EB,

con un tamaño de  $B_{AC}/2$  bits por minislots. Como se puede comprobar, esta porción de la trama no está protegida por la antena adaptativa, por lo que nuevamente se propone transmitir esta información empleando DS/SS.

En la primera parte, el terminal móvil envía su petición utilizando su propio código de ensanchamiento<sup>13</sup> ocupando completamente el ancho de banda del canal. Notar que, durante las ranuras de datos, la información es enviada a una tasa binaria que consume todo el espectro asignado, por lo que la velocidad binaria de la señal ensanchada (*chip rate*<sup>14</sup>) es igual a la utilizada en la parte de datos. Por tanto, se debe elegir un código de ensanchamiento con un tamaño adecuado que permita distinguir los identificadores de cada terminal, mitigar las interferencias y reducir el efecto del multicamino.

En la segunda parte, una vez que la EB conoce todas las peticiones de los terminales, determina los recursos que debe asignar en función del tipo de tráfico generado, informando a los terminales acerca de la posición de los slots adjudicados, empleando igualmente DS/SS.

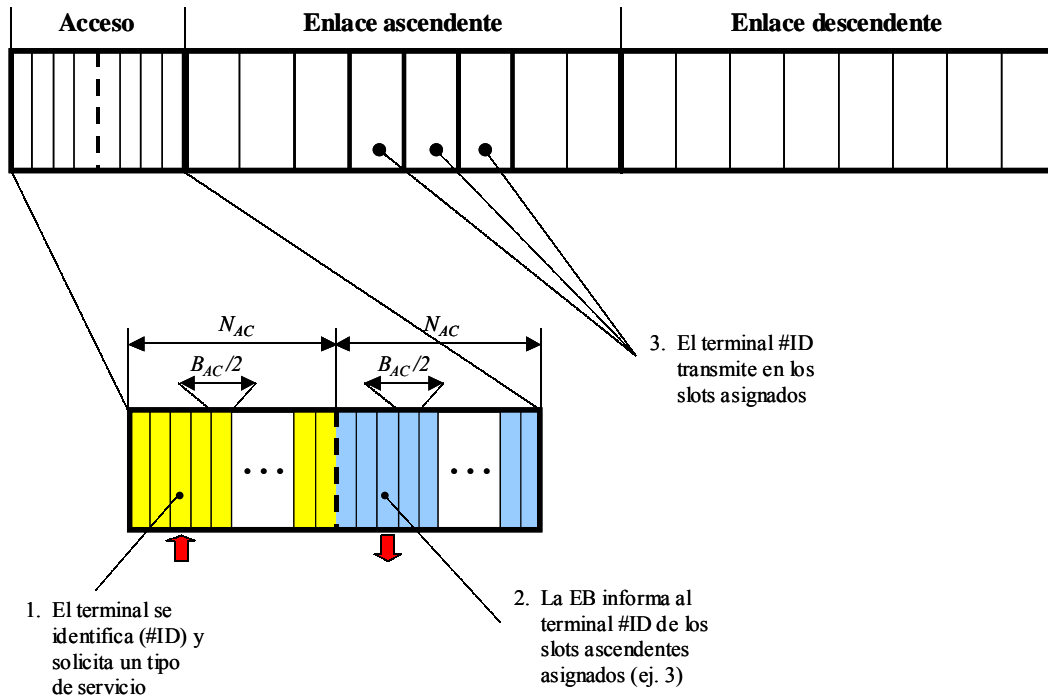


Figura 5.4. Solicitud de acceso mediante sondeo

#### 5.4.2. Acceso mediante contención (Aloha ranurado)

Cuando el acceso se realiza mediante técnicas de contienda, caso del Aloha ranurado, la porción de la trama dedicada a las peticiones de los terminales también se divide en dos partes con la misma

<sup>13</sup> Denominado *spreading sequence*, es una secuencia pseudoaleatoria de bits que se utiliza para generar la señal de espectro ensanchado.

<sup>14</sup> Tasa binaria de transmisión resultante del producto de las velocidades binarias de la información y de la secuencia pseudoaleatoria.



finalidad que en el caso de utilizar la técnica de sondeo. Igualmente, existen  $N_{AC}$  minislots en cada parte con un tamaño de  $B_{AC}/2$  bits cada uno.

Sin embargo, la diferencia es que en el acceso por contienda, los terminales realizan sus peticiones en uno de los minislots ascendentes elegido aleatoriamente, recibiendo la respuesta de la EB informando de los recursos asignados en uno de los minislots descendentes (ver Figura 5.5). El terminal puede recibir la asignación del recurso en esa misma trama o tener que esperar, encolado, a que haya recursos disponibles en tramas posteriores, con lo que, en caso de tratarse de algún tipo de servicio con exigencias de temporales, es posible que su tiempo de espera expire y el paquete que tenía intención de transmitir se pierda.

Además, debido al propio funcionamiento del método, puede ocurrir que más de un terminal elija el mismo minislot para transmitir su solicitud y se produzca una colisión. Si esto sucede, el terminal no recibirá noticia alguna sobre su solicitud, con lo que éste intentará enviar dicha petición en la siguiente o posteriores tramas.

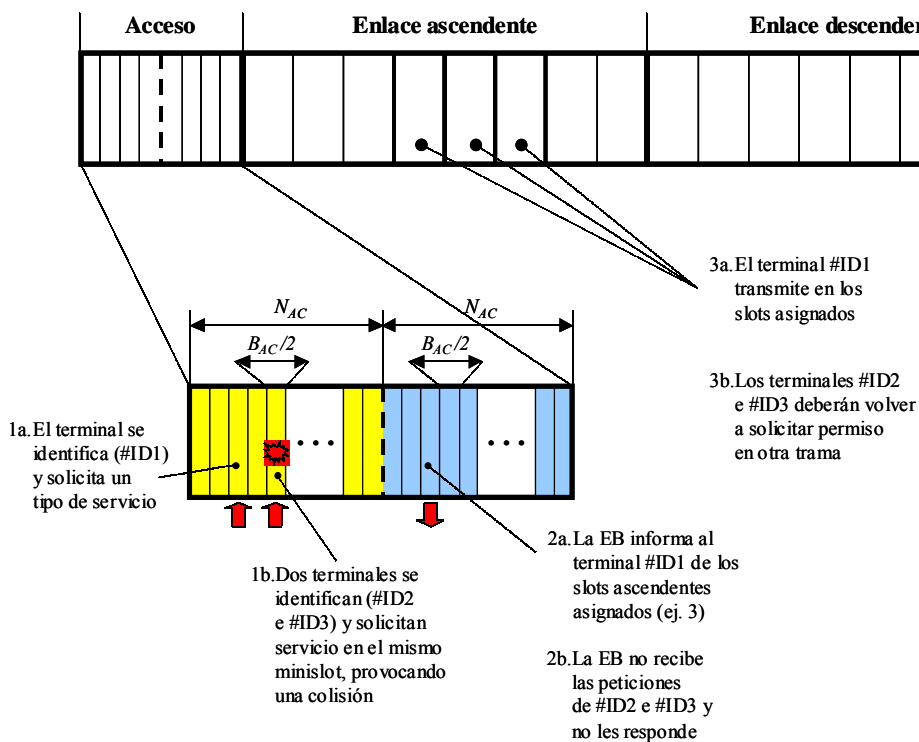


Figura 5.5. Solicitud de acceso mediante contención. a) Sin colisiones b) Con colisiones

### 5.4.3. Acceso híbrido sondeo/contención (polling/Aloha, PA)

Una tercera solución combina las dos anteriores, de manera que los servicios CBR acceden mediante sondeo y los servicios VBR y ABR lo hacen mediante contención, en un intento de aumentar la eficiencia del sistema. En lo sucesivo, esta técnica de acceso será denominada PA (polling/Aloha). En la

Figura 5.6 se muestra cómo, además de dividir la porción de acceso de la trama en una parte dedicada para las peticiones de los terminales y otra para las confirmaciones de la EB, la primera se subdivide nuevamente en dos grupos de minislots, el primero dedicado a las peticiones de servicios CBR realizado mediante sondeo, y el segundo grupo destinado a las peticiones de servicios VBR y ABR cuyo acceso se realiza mediante contención.

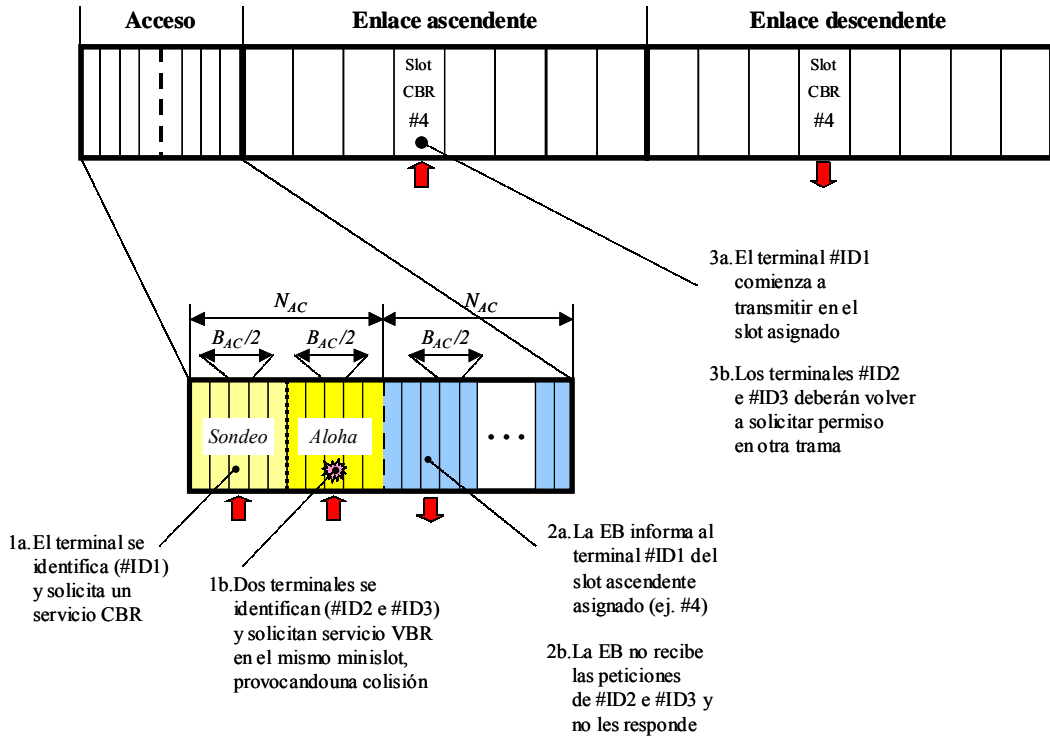


Figura 5.6. Solicitud de acceso mediante la técnica combinada de sondeo/contención (PA)

## 5.5. Características del tráfico

La evaluación del rendimiento de un protocolo de acceso múltiple depende en gran medida del modelo de tráfico de fuente utilizado. En los últimos años se ha realizado un enorme esfuerzo de investigación para caracterizar el tráfico en entornos LAN y WAN, [107], [114], [115]. De hecho, muchos han sido los estudios experimentales que, basándose en medidas de tráfico reales, han conducido a modelos más realistas como los modelos de tráfico autosimilar. De acuerdo con estos resultados parece necesario analizar el comportamiento de los protocolos de acceso caracterizando el tráfico con estos nuevos modelos. Existen ya estudios en los que se analiza el efecto de la autosimilitud en el rendimiento de la red y se encuentran diferencias importantes respecto de los resultados obtenidos considerando modelos markovianos como los procesos de Poisson, [116], [118].

A continuación se detallan los modelos de caracterización del tráfico considerados en este trabajo, tanto para el tráfico de voz como para el tráfico de paquetes de datos.

### 5.5.1. Tráfico de voz

Para la caracterización del tráfico de voz se ha considerado el modelo de fuente CBR presentado en el capítulo anterior. Un terminal de voz genera una media de  $\lambda_V$  nuevas llamadas por segundo, con una duración media de  $T_V$  segundos a una tasa binaria constante de  $V_V$ . Un terminal con una llamada pendiente se considera ocupado hasta que finaliza la transmisión o expira el tiempo máximo de acceso y el terminal vuelve a estar inactivo. La Tabla 5.5 muestra los valores utilizados en el modelo de fuente de voz.

Parámetro	Símbolo	Valor
Tasa de llegada (llamadas/seg)	$\lambda_V$	$5 \cdot 10^{-4}$
Duración media (seg)	$\mu_V$	180
Velocidad binaria (Kbps)	$V_V$	64
Factor de utilización	$U_V$	0.09
Duración media de actividad de voz (seg)	$\sigma_V$	1.0
Duración media de un silencio (seg)	$\sigma_S$	1.35
Tiempo máximo de acceso (seg)	$T_C$	5.0

Tabla 5.5. Parámetros del modelo de fuente de voz

De acuerdo con la literatura existente sobre el modelo estadístico de la voz, estos valores elegidos son ampliamente utilizados por cualquier estudio realizado sobre evaluación de prestaciones de un sistema en el que se transmita tráfico de voz. La caracterización de las ráfagas de actividad de voz dentro de una conversación [105], [106] ha sido también estudiada desde hace años cuando se comenzó a contemplar la posibilidad de aprovechar los silencios en sistemas de telefonía sobre satélite y cable submarino. El factor de utilización da una idea del porcentaje de tiempo que el canal es utilizado, en este caso un 9% por cada terminal de voz. Por último, el tiempo máximo de acceso limita la espera del terminal a obtener recurso del sistema, ya que si no se consigue realizar la conexión en este tiempo, la llamada es bloqueada y se pierde.

### 5.5.2. Tráfico de datos

Se han considerado dos modelos diferentes para la caracterización del tráfico de datos. Como se ha visto en el Capítulo 4, por un lado está el modelo tradicional de Poisson, en el que se suponen valores de tasa de llegada y de duración de los paquetes distribuidos exponencialmente [101]; y por otro los modelos basados en la autosimilitud del tráfico de datos en LANs [107] [108] [110]. La Tabla 5.6 muestra los valores estadísticos del modelo de fuente de datos para los diferentes servicios ofrecidos [111].

Parámetro	Símbolo	Valor
Tasa de llegada (paquetes/seg)	$\lambda_D$	0.232
Tamaño medio de un paquete (bits)	$L$	5120
Velocidad binaria (Mbps)	$V_D$	11.875
Factor de utilización	$U_D$	$10^{-4}$
Duración media OFF (seg)	$T_{OFF}$	4.31
Duración media ON (seg)	$T_{ON}$	$4.31 \cdot 10^{-4}$
Valor del parámetro de forma OFF (sólo Pareto)	$a_{OFF}$	1.2
Valor del parámetro de forma ON (sólo Pareto)	$a_{ON}$	1.2
Tiempo máximo de acceso VBR (ms)	$T_V$	50
Tiempo máximo de acceso ABR (seg)	$T_A$	1.0
Razón entre paquetes VBR y ABR	$\alpha$	0.25

Tabla 5.6. Parámetros del modelo de fuente de datos

Aunque, en [101] se evalúa un protocolo MAC basado en un esquema FDD, se han adoptado algunos parámetros similares de esta referencia, pues son aceptados en gran parte de la literatura existente. Por otro lado, valores como los de los parámetros de forma  $a_{ON}$  y  $a_{OFF}$  se basan en estudios de tráfico real [111], [112], [113] obtenidos de trazas correspondientes a transferencias de ficheros mediante la aplicación FTP.

Aunque todo el tráfico de datos comparta las estadísticas de tasa media de llegada de paquetes y la duración de los mismos, existen dos diferencias fundamentales entre el tráfico VBR y ABR. En primer lugar, el primero es mucho más sensible al retardo, por lo que este tipo de tráfico estará asociado a paquetes de datos procedentes de aplicaciones en tiempo real (videoconferencia, voz sobre IP, etc.). La segunda, relativa a que el volumen de tráfico VBR representa una cuarta parte del tráfico de datos total generado como refleja el parámetro  $\alpha$ .

## 5.6. Política de asignación de recursos

La administración de los recursos se realiza mediante asignación bajo demanda. Así, los slots disponibles en la trama se estructuran en función del tipo de servicio a transportar, como se muestra en la Figura 5.7. En este orden, se cursa el tráfico CBR, después los paquetes VBR y, si hay slots libres, se cursa tráfico ABR. A continuación, se explica detalladamente la asignación para cada tipo.

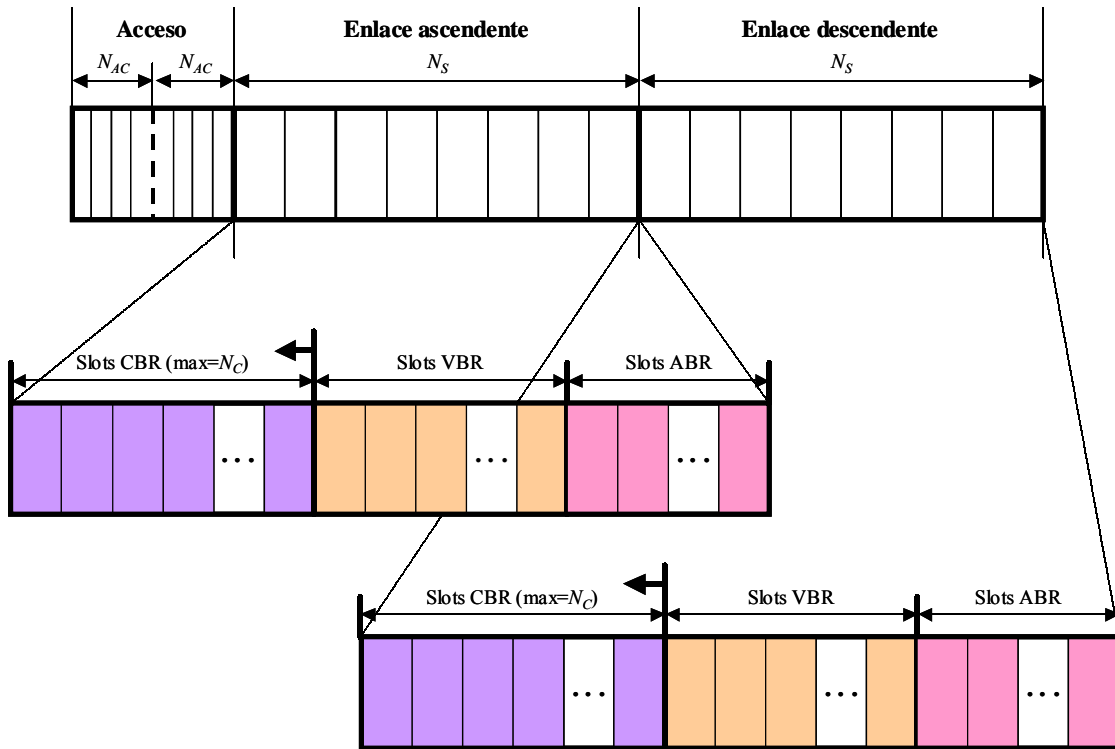


Figura 5.7. Asignación de recursos en función del tipo de servicio

### 5.6.1. Asignación de tráfico CBR

Cuando un terminal CBR solicita permiso para transmitir y lo obtiene, se le asigna un slot CBR en cada trama durante todo el tiempo que dure la comunicación, independientemente de lo que suceda en los demás slots CBR o incluso de otro tipo. El terminal disfruta de una conexión en modo circuito conmutado. Además, durante la comunicación, se puede reasignar esa conexión a otro slot CBR diferente con el fin de no malgastar slots VBR o ABR. Por ejemplo, si a un terminal se le asigna el slot 5 porque están ocupados del 1 al 4, y en un determinado momento el slot 3 queda libre, las conexiones 4 y 5 serán reubicadas en los slots 3 y 4 respectivamente. De esta forma, se asegura que no existan huecos en la trama inutilizables. Por supuesto, en la trama existe un número máximo de slots CBR ( $N_C$ ), denominado ventana CBR, por lo que si se están cursando simultáneamente  $N_C$  comunicaciones, la próxima que lo intente será bloqueada y se perderá.

### 5.6.2. Asignación de tráfico VBR

En principio, la filosofía del tráfico VBR es aprovechar todos los slots que se requieran desde el último slot CBR ocupado. Los paquetes VBR que estén esperando para ser cursados utilizarán todos los slots necesarios en tantas tramas como haga falta, siempre teniendo en cuenta la prioridad de las conexiones CBR. Como mínimo, se garantizan  $N_S - N_C$  slots para tráfico VBR en cada trama. Sin embargo, como se verá más adelante, la política de colas implementada para cursar el tráfico de datos puede modificar sustancialmente esta política de asignación bajo demanda.

### **5.6.3. Asignación de tráfico ABR**

El tráfico ABR es el que menor prioridad tiene de todos. Por eso, los paquetes de este tipo disponen del espacio de trama que hayan dejado sin utilizar las conexiones CBR y los paquetes VBR. Así, se puede dar el caso de que un paquete ABR se transmita de manera discontinua, cursando segmentos del mismo en diferentes tramas, haciendo que el retardo de transmisión sea el más alto de todos los tráficos. Para mitigar este hecho, la política de colas empleada juega un papel muy importante en el rendimiento final del protocolo.

### **5.6.4. Aprovechamiento de silencios en los slots CBR**

Debido a la naturaleza de las conversaciones de voz, la ocupación del medio con actividad vocal es aproximadamente del 50%, mientras que la otra mitad del tiempo está compuesta de silencios entre frases, palabras e incluso sílabas. Si se dispone de un equipo que realice *detección de actividad de voz* (SAD), se pueden aprovechar estos silencios para transportar slots de datos. El tamaño del slot CBR utilizado para datos es de menor tamaño que un slot de datos normal, ya que es necesario incluir algún tipo de señalización al comienzo del slot que indique que se trata de un silencio y que puede ser aprovechado por cualquier terminal de datos dentro de la célula de cobertura. Más adelante se verá si el paquete es de tipo VBR, ABR o ambos, ya que dependerá de las prestaciones que obtenga cada tráfico sin aprovechar silencios, tratando de beneficiar al que peores resultados presente.

## **5.7. Política de servicio y sistemas de colas**

El formato de la trama y la política de asignación bajo demanda condicionan en gran medida la forma de utilización de los recursos por parte de los diferentes tipos de servicios. Sin embargo, la política de servicio y el esquema de gestión de colas que se implemente a la hora de realizar la asignación de recursos puede alterar significativamente las prestaciones globales. Por ello, se han evaluado varias políticas de servicio, de más sencilla a más compleja, que son comentadas a continuación.

### **5.7.1. Tráfico CBR**

Dadas las características de este tipo de tráfico, la única distinción viene del tipo de protocolo de acceso utilizado para solicitar recurso, que puede ser sondeo o Aloha. Como se muestra en la Figura 5.8, una vez que se consigue el permiso para transmitir, la asignación de un slot CBR es inmediata, mientras que, si transcurrido el tiempo de espera, no se obtiene recurso, la llamada se bloquea y se pierde. El tiempo máximo de espera definido en este trabajo para las conexiones CBR es de 5 segundos.

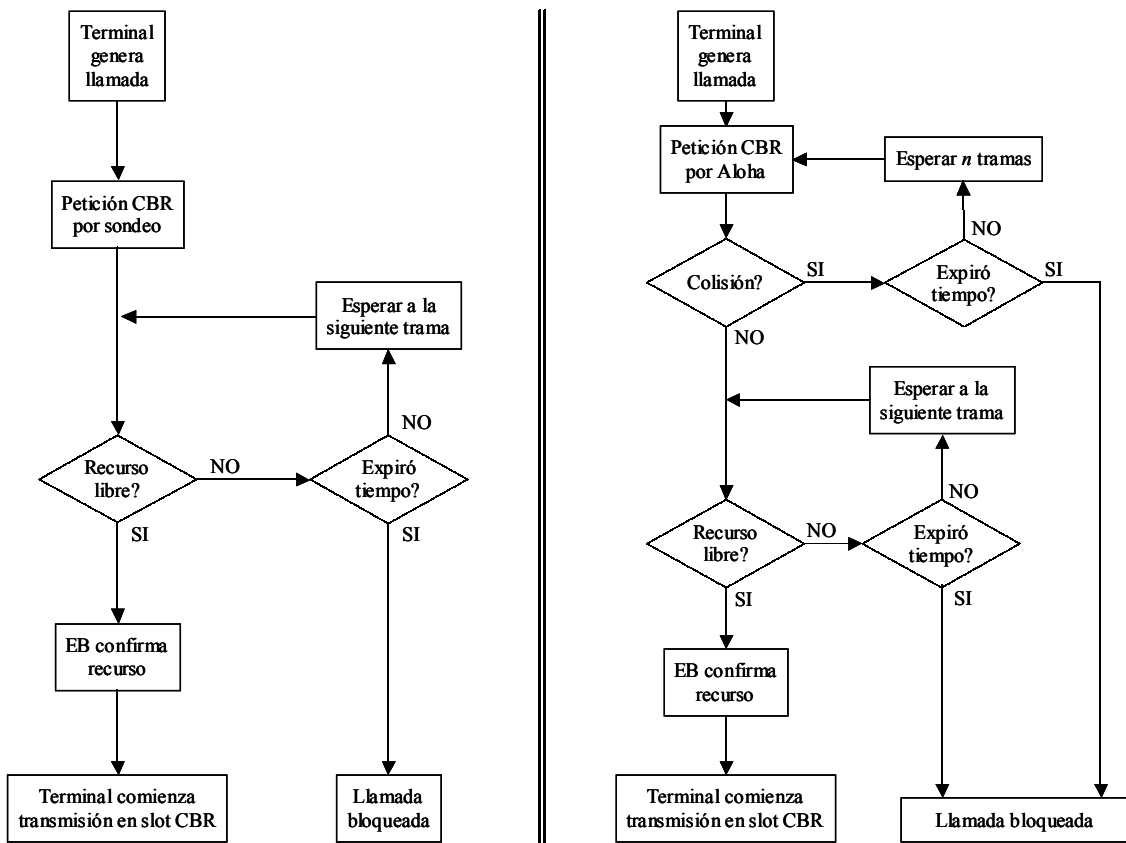


Figura 5.8. Política de servicio del tráfico CBR (izq. por sondeo, dcha. por Aloha)

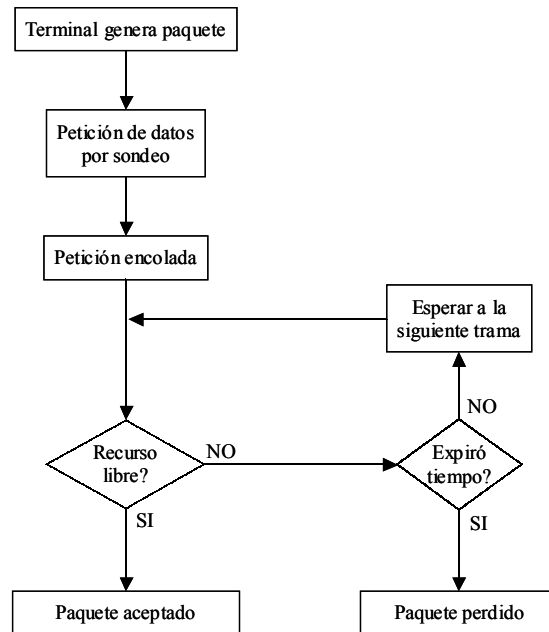


Figura 5.9. Política de servicio FCFS con acceso por sondeo

### 5.7.2. Tráfico de datos con FCFS

El sistema de colas basado en FCFS dispone de una sola cola en la que se almacenan los paquetes de datos que desean ser cursados sin tener en cuenta el tipo de tráfico ni los requerimientos de tiempo real que presenten. Los paquetes se van cursando por orden de llegada, con lo que los paquetes con un menor tiempo de espera admitido serán los que más sufran las consecuencias de esta política. Así, en la Figura 5.9 se ve cómo una vez que el paquete ha sido admitido en el sistema, si no existe recurso en una trama, espera a las siguientes, hasta que haya recurso libre o su tiempo de espera expire. Este es el método más sencillo de implementar, pero el hecho de no distinguir entre diferentes tipos de tráfico hace que los más sensibles al retardo sean los más perjudicados y sufran una mayor tasa de pérdida.

### 5.7.3. Tráfico de datos con TOE

La política de servicio TOE surge como mejora del método FCFS al tener en cuenta los diferentes tiempos de espera (TOE) de cada tipo de tráfico. En este caso, existen dos colas: una para los paquetes con menor TOE (VBR) y otra para los de mayor TOE (ABR). A medida que llegan los paquetes se les encola en una u otra cola en función de su tipo. Debido a la prioridad del tráfico VBR, hasta que la cola de éste no esté vacía no se cursará ningún paquete ABR. En el momento en que llegue un nuevo paquete VBR, se espera a que el paquete ABR que esté siendo transmitido finalice y se procederá al cursado de los nuevos paquetes VBR.

La Figura 5.10 muestra la política de servicio TOE con método de acceso por sondeo. En ella se ve cómo el tráfico ABR no se cursa hasta que no quede ningún paquete VBR por cursar, por lo que si la carga de tráfico VBR es mayor el tráfico ABR se resentirá significativamente. Los valores de tiempos de espera definidos en este trabajo son 50 milisegundos para VBR y 1 segundo para ABR.

### 5.7.4. Tráfico de datos con SAD

El aprovechamiento de los silencios de voz obliga, como sucede en la técnica anterior, a separar la cola inicial en dos, una para cada tipo de tráfico. Esto se debe a que, dependiendo de qué tipo de tráfico utilice los silencios, es necesario independizar la cola que contenga los paquetes que pueden ser cursados tanto en slots de datos normales como en slots CBR con silencio.

Como se muestra en la Figura 5.11, es el tráfico ABR el que aprovecha los silencios. Esto se justifica más adelante en el apartado de resultados, en el que se comprueba que el tráfico VBR presenta por sí un buen comportamiento, mientras que el tráfico ABR necesita aprovechar los silencios para que arroje buenas prestaciones. De esta forma, en la parte de la trama del enlace ascendente existen dos tipos de slots ABR: los normales después de los slots VBR, y los *reducidos* en la parte CBR de la trama. El tamaño del slot ABR reducido ( $B_d$ ) es de 744 bits, reservando 3 octetos para señalización descendente dentro del slot.



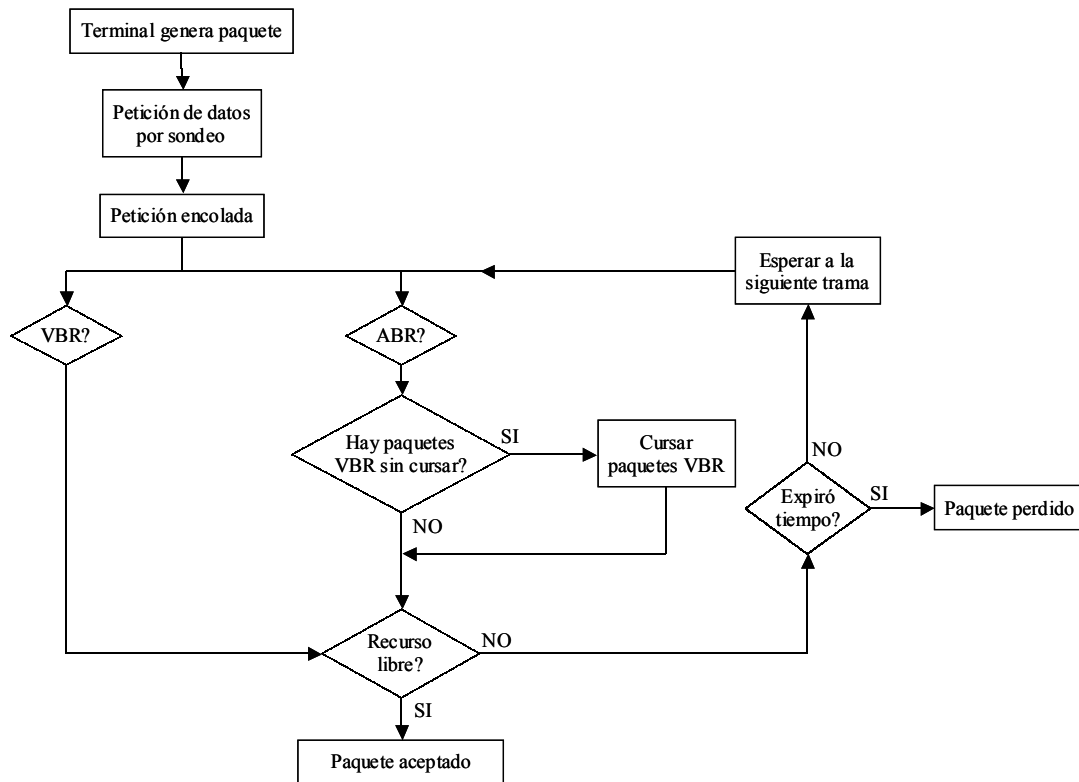


Figura 5.10. Política de servicio TOE con acceso por sondeo

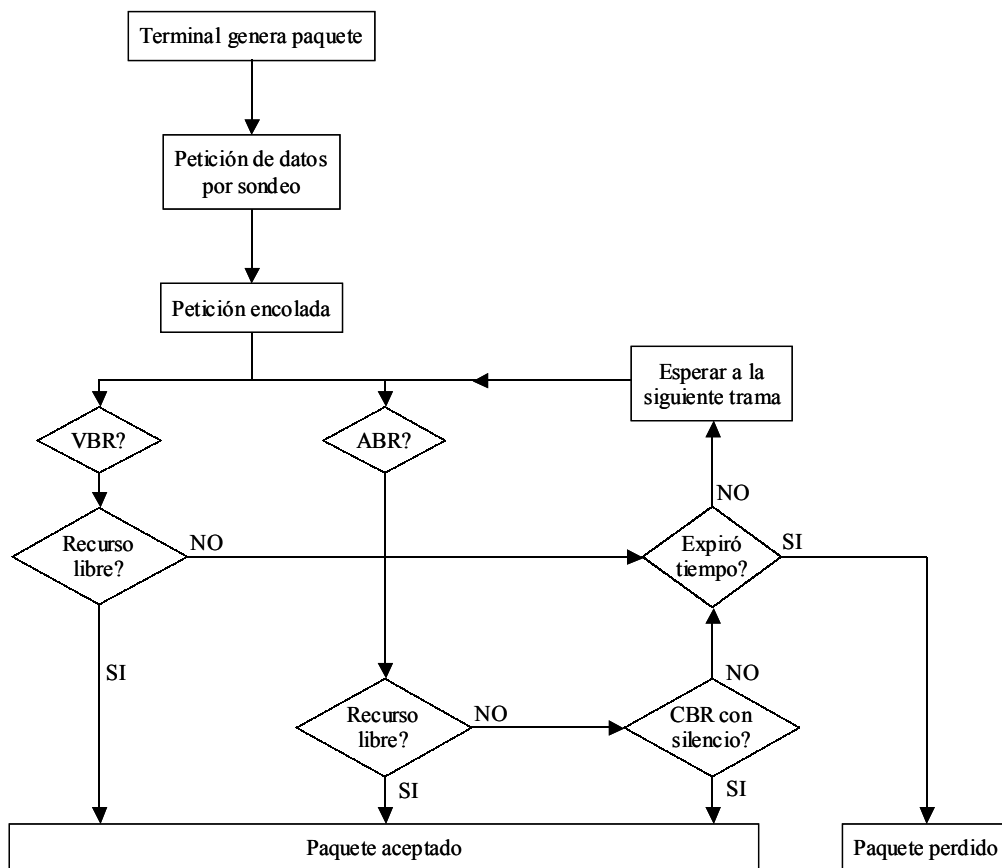


Figura 5.11. Política de servicio SAD con acceso por sondeo

## 5.8. Entorno de simulación

En la Tabla 5.7 se resumen todos los parámetros que definen el protocolo MAC propuesto en este trabajo. Se han realizado simulaciones en las que, fundamentalmente, se ha jugado con los siguientes aspectos:

- ❑ Políticas de servicio (FCFS, TOE, SAD).
- ❑ Métodos de acceso múltiple (sondeo y Aloha).
- ❑ Modelado de fuentes de datos como procesos de Poisson o como tráfico auto-similar.

El entorno de simulación elegido está formado, igual que en el estudio del nivel físico, por el interfaz gráfico y la comodidad de tratamiento de información que proporciona la herramienta MatLab, junto con la flexibilidad y rapidez computacional de la programación en C. Así, todas las funciones y subrutinas que modelan el funcionamiento del protocolo están programadas en C e invocadas desde MatLab como subrutinas MEX.

Parámetro		Símbolo	Valor
Capacidad del canal (Mbps)		$V_C$	11.875
Ancho de banda (MHz)		$W_C$	8.246
Eficiencia espectral de $\pi/4$ -DQPSK (bits/seg/Hz)		$\nu$	1.44
Duración de la trama (ms)		$T_F$	12
Tamaño total de la trama (Kbits)		$B_T$	142.5
Eficiencia de la trama (%)		$\eta$	71.41
Tamaño de los campos de guarda (bits)		$B_G$	420
Tamaño del minislot (bits)		$B_{AC}$	480
Número de minislots de acceso		$N_{AC}$	60
Número de slots por enlace		$N_S$	60
Número de celdas por slot de datos		$C_S$	2
Tamaño del slot de datos (bits)		$B_S$	848
Tamaño útil del slot de datos (bits)		$B_P$	768
Tamaño del tono piloto (bits)		$T_P$	64
Tamaño del tono de sondeo piloto (bits)		$T_S$	64
<b>C</b>	Tasa de llegada (llamadas/seg)	$\lambda_V$	$5 \cdot 10^{-4}$
<b>B</b>	Duración media (seg)	$\mu_V$	180
<b>R</b>	Velocidad binaria (Kbps)	$V_V$	64

Parámetro		Símbolo	Valor
	Factor de utilización	$U_V$	0.09
	Duración media de actividad de voz (seg)	$\sigma_V$	1.0
	Duración media de un silencio (seg)	$\sigma_S$	1.35
	Tiempo máximo de acceso (seg)	$T_C$	5.0
	Tamaño máximo de la ventana (slots)	$N_C$	30
V B R / A B R	Tasa de llegada (paquetes/seg)	$\lambda_D$	0.232
	Tamaño medio de un paquete (bits)	$L$	5120
	Velocidad binaria (Mbps)	$V_D$	11.875
	Factor de utilización	$U_D$	$10^{-4}$
	Duración media OFF (seg)	$T_{OFF}$	4.31
	Duración media ON (seg)	$T_{ON}$	$4.31 \cdot 10^{-4}$
	Valor del parámetro de forma OFF (sólo Pareto)	$a_{OFF}$	1.2
	Valor del parámetro de forma ON (sólo Pareto)	$a_{ON}$	1.2
	Tiempo máximo de acceso VBR (ms)	$T_V$	50
	Tiempo máximo de acceso ABR (seg)	$T_A$	1.0
	Tamaño de slot ABR reducido (bits)	$B_A$	824
	Razón entre paquetes VBR y ABR	$\alpha$	0.25

Tabla 5.7. Resumen de todos los parámetros de diseño del protocolo propuesto

Carga generada total	Carga generada de voz	Número de terminales de voz	Carga generada de datos	Número de terminales de datos
0.1	0.05	52	0.05	250
0.2	0.10	103	0.10	500
0.3	0.15	155	0.15	750
0.4	0.20	206	0.20	1000
0.5	0.25	258	0.25	1250
0.6	0.30	309	0.30	1500
0.7	0.35	361	0.35	1750

Tabla 5.8. Número de terminales de voz y datos en función de la carga generada

Todas las simulaciones se han realizado partiendo de un valor de carga generada por todos los terminales, de voz y de datos. Se ha repartido al 50% la carga de voz y la de datos, con lo que se puede despejar el número de terminales de voz y datos de [Ec.4.3] y [Ec.4.5], respectivamente, para cada punto de operación. En la Tabla 5.8 se muestra el número de terminales correspondiente a cada valor de carga generada.

Del total de paquetes generados por los terminales de datos, una cuarta parte pertenecen a tráfico VBR con requerimientos de tiempo real, mientras que el resto corresponde a otro tipo de aplicaciones más comunes como páginas web o correo electrónico, cuyas condiciones temporales no son tan estrictas.

## 5.9. Evaluación analítica de prestaciones del protocolo propuesto

A continuación, se realiza una aproximación analítica del comportamiento del sistema. En primer lugar, se analiza la eficiencia obtenida para cuatro tipos diferentes de asignación de recursos para pasar después al análisis de prestaciones de las conexiones de voz y de datos [117].

### 5.9.1. Eficiencia del sistema

Uno de los parámetros más importantes a la hora de evaluar un sistema TDMA, desde el punto de vista del aprovechamiento de los recursos disponibles, es la eficiencia del sistema o *throughput*. Dependiendo de cómo se administren los slots de información dentro de la estructura de la trama, la capacidad máxima que se puede alcanzar varía en gran medida de una configuración a otra. Por ello, a continuación se muestra el cálculo de la eficiencia máxima de un sistema TDD, contemplando cuatro posibles políticas:

- ❑ Tipo I: Sistema TDMA estático con una parte de la trama dedicada a voz y otra a datos. La cantidad de slots reservados tanto para voz como para datos es fija.
- ❑ Tipo II: Sistema TDMA dinámico (D-TDMA) con ventana CBR variable proporcional al número de conversaciones activas.
- ❑ Tipo III: Sistema D-TDMA con aprovechamiento de silencios (SAD) con ventana CBR. El tráfico de datos, de cualquier tipo, puede viajar tanto en los slots CBR con silencios de voz como en los que están sin ocupar por una conversación.
- ❑ Tipo IV: Sistema D-TDMA con aprovechamiento de silencios, con ventanas para cada tipo de tráfico. Los paquetes VBR viajan a continuación de los slots CBR, mientras que el tráfico ABR es transportado tanto en silencios como en los slots que haya dejado libres el tráfico VBR.

El cálculo de la eficiencia del sistema varía ligeramente según existan ventanas de transmisión y/o aprovechamiento de silencios. La probabilidad de que un slot CBR activo transporte voz es:

$$p_v = \frac{\sigma_v}{\sigma_v + \sigma_s} \quad [\text{Ec.5.12}]$$

Mientras que la probabilidad de que sea un silencio es:

$$p_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_v + \sigma_s} \quad [\text{Ec.5.13}]$$

En general, la expresión para calcular la eficiencia máxima de un sistema TDMA se expresa como:

$$\eta = \alpha \frac{N_{oc}}{N_s} \quad [\text{Ec.5.14}]$$

Donde  $N_{oc}$  es el número total de slots de la trama ocupados y  $\alpha$  viene dada por:

$$\alpha = \frac{\text{Duración de la trama dedicada a información}}{\text{Duración total de la trama}} = \frac{T_I}{T_F} \quad [\text{Ec.5.15}]$$

Si  $N_v$  es el número de conversaciones activas, el número total de slots ocupados por cada tipo de tráfico, así como la eficiencia del sistema, se resumen en la Tabla 5.9.

	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Slots CBR ocupados	$N_v \cdot p_v$	$N_v \cdot p_v$	$N_v \cdot p_v$	$N_v \cdot p_v$
Slots VBR ocupados	$N_s - N_c$	$N_s - N_v$	$N_s - N_v p_v$	$N_s - N_v$
Slots ABR ocupados	(*)	(*)	(*)	$N_v \cdot p_s$
$\eta$	$\frac{\alpha}{N_s} (N_v p_v + N_s - N_c)$	$\frac{\alpha}{N_s} (N_v p_v + N_s - N_v)$	$\frac{\alpha}{N_s} (N_v p_v + \beta(N_s - N_v p_v))$	$\frac{\alpha}{N_s} (N_v p_v + N_s - N_v + \beta N_v p_s)$

(\*) En estos casos, el tráfico ABR se cursa en los mismos slots que el VBR, por lo que para el cálculo de la capacidad se supone todo el tráfico de datos incluido en VBR.

Tabla 5.9. Cálculo de la eficiencia del sistema para cuatro casos diferentes

Donde,

$$\beta = \frac{\text{Número de bits en un slot de datos que aprovecha un silencio}}{\text{Número de bits en un slot normal}} = \frac{B_A}{B_S} \quad [\text{Ec.5.16}]$$

Los valores de los parámetros que se han propuesto en este trabajo para el formato de la trama aparecen en la Tabla 5.10, y la eficiencia máxima para cada tipo de configuración se muestra en la Figura 5.12.

Parámetro	Símbolo	Valor
Duración de la parte de información de la trama (ms)	$T_I$	8.5692624
Probabilidad de actividad de voz	$p_v$	0.42553192
Probabilidad de silencio de voz	$p_s$	0.57446809
Relación entre duración de información y duración total	$\alpha$	0.7141052
Relación entre un slot de datos de silencio y un slot normal	$\beta$	0.9716981

Tabla 5.10. Parámetros para el cálculo de la eficiencia del sistema

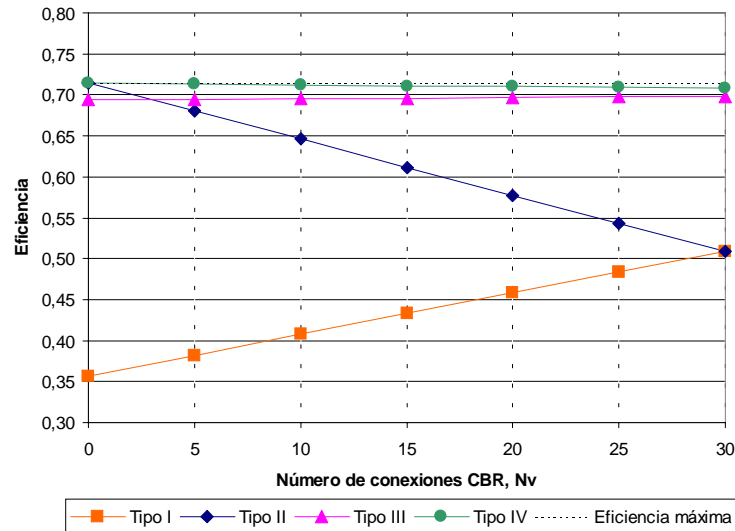


Figura 5.12. Eficiencia del sistema para diferentes esquemas TDMA

A la vista de la Figura 5.12, hay dos clases de comportamientos claramente diferenciados. Por una parte, las configuraciones I y II, en las que no se aprovechan los silencios, la eficiencia depende directamente del número de conexiones CBR activas. En el tipo I el incremento de conversaciones le es favorable al sistema, ya que la ventana CBR es fija, mientras que en el tipo II es inversamente proporcional, debido a que la ventana CBR es variable y no se aprovechan los silencios. Por otro lado, están los tipos III y IV, en los cuales, al aprovecharse los silencios de voz, la eficiencia máxima que se puede conseguir está, en cualquier caso, muy cerca del valor máximo  $\alpha$ . Puesto que el valor de  $N_v$  no influye significativamente en la eficiencia, este tipo de configuraciones son mucho más rentables que las dos anteriores.

### 5.9.2. Modelo de prestaciones del tráfico CBR

El comportamiento del tráfico CBR puede caracterizarse mediante un proceso de nacimiento y muerte modelado por una cadena de Markov de estados discretos y continua en el tiempo, en la que sus parámetros principales serían los siguientes:

- ❑ Llegada de las llamadas: proceso de Poisson (M) con tasa  $\lambda_v$ .
- ❑ Servicio de las llamadas: proceso de Poisson (M) con tasa  $\mu_v$ .
- ❑ Número de servidores:  $N_C$ .
- ❑ Número de fuentes:  $N_{TV}$ .
- ❑ Tamaño de la cola:  $N_{TV} - N_C$ .
- ❑ Tiempo máximo de espera en la cola:  $T_C$ .

De acuerdo con la notación de Kendall, el modelo resulta del tipo  $M/M/N_C/N_{TV}/N_{TV}$ . Si no existiera un tiempo máximo de espera en la cola, se trataría de un sistema de espera pura, sin pérdida. Sin embargo, al introducir  $T_C$  el modelo se convierte en una combinación de espera-pérdida [119], [121]. En

la Figura 5.13 se muestra el diagrama de estados de la cadena de Markov, en la que las tasas de nacimiento y muerte corresponden a la siguiente expresión:

$$\lambda_j = (N_{TV} - j)\lambda_V \quad j = 0, 1, \dots, N_{TV}$$

$$\mu_j = \begin{cases} j\mu_V & j = 1, 2, \dots, N_C - 1 \\ N_C\mu_V + (j - N_C)/T_C' & j = N_C, N_C + 1, \dots, N_{TV} \end{cases} \quad [\text{Ec.5.17}]$$

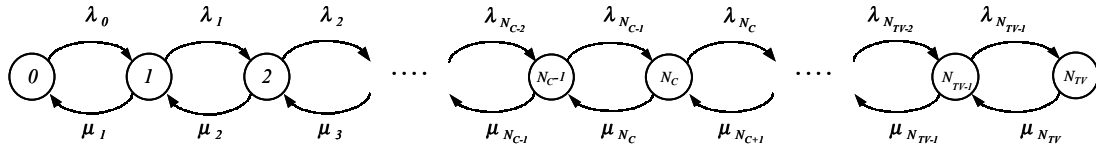


Figura 5.13. Diagrama de estados de la cadena de Markov del modelo de tráfico CBR

En la expresión de la tasa de servicio  $\mu_j$  se supone que el tiempo de espera está distribuido según una exponencial negativa de media  $T_C$ . Sin embargo, al limitar el tiempo máximo de espera, resulta que la función de distribución de probabilidad se trunca en  $T_C$ , con lo que la media real se ve reducida:

$$P\{t < T\} = 1 - e^{-T/\lambda} \quad t \leq T_C$$

$$P\{t > T\} = 0 \quad t > T_C \quad [\text{Ec.5.18}]$$

Por lo tanto, hay que utilizar la media equivalente, que para  $T_C=5$  seg, es de  $T_C'=3$  seg aproximadamente. Los parámetros que caracterizan este modelo son los siguientes:

Parámetro	Expresión
Probabilidad de encontrar el sistema vacío	$p_o = \frac{\prod_{i=0}^{N_{TV}-1} \lambda_i}{\prod_{i=1}^{N_{TV}} \mu_i}$
Probabilidad de encontrarse en el estado $n$ ( $0 < n \leq N_{TV}$ )	$p_n = p_o \frac{\prod_{i=0}^{n-1} \lambda_i}{\prod_{i=1}^n \mu_i}$
Tasa de llegada media	$\bar{\lambda} = \sum_{i=0}^{N_{TV}} p_i \lambda_i$
Número medio de terminales en la cola	$\bar{u} = \sum_{i=1}^{N_{TV}-N_C} i p_{N_C+i}$
Tráfico ofrecido	$a = p_o N_{TV} \frac{\lambda}{\mu} \sum_{i=0}^{N_C-1} \binom{N_{TV}-1}{i} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i$
Tráfico cursado	$a_c = \sum_{i=1}^{N_C} i p_i$
Tiempo medio de espera	$\bar{t}_w = \frac{\bar{u}}{\bar{\lambda}}$
Probabilidad de bloqueo	$p_l = \frac{a - a_c}{a}$

Tabla 5.11. Parámetros para el modelo del tráfico CBR

Así, el tiempo medio de acceso y la probabilidad de bloqueo teóricos se muestran en la Figura 5.14.

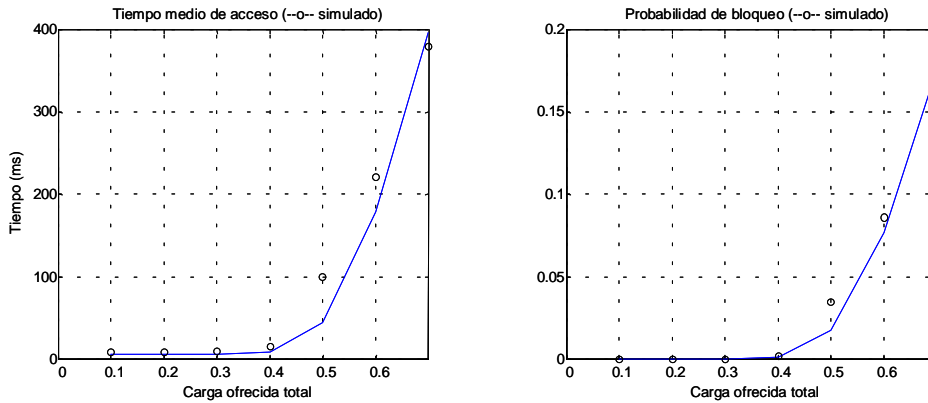


Figura 5.14. Resultados analíticos frente a los simulados para CBR

### 5.9.3. Modelo de prestaciones del tráfico VBR y ABR

El modelado del tráfico de datos depende de la técnica utilizada: FCFS, TOE o SAD. Las tres técnicas tienen en común, entre otras cosas, los requerimientos temporales de cada tipo de tráfico, es decir, el tiempo máximo que un paquete VBR o ABR puede esperar en la cola. En la Tabla 5.12 se recogen las características principales de las tres políticas de servicio desde el punto de vista de tasas de nacimiento y muerte. A diferencia del modelo CBR, en este caso, al tratarse de una conmutación de paquetes, únicamente existe un servidor asociado a la trama. En la técnica FCFS se dispone de una cola en la que entran los dos tipos de paquetes, mientras que TOE y SAD disponen de dos, una para cada tipo de tráfico. La tasa de llegada de paquetes es la misma en los tres casos, cosa que no ocurre con la tasa de servicio, ya que se ve modificada en SAD, en la que los paquetes ABR pueden utilizar los slots CBR con silencios.

Puesto que el servicio de un paquete de datos no es continuo en el tiempo sino que es interrumpido por las diferentes partes de la trama TDD, es necesario calcular la tasa de servicio equivalente demultiplexada ( $\mu_{eq}$ ) en función del número de paquetes que se pueden transportar de media en una trama y de la duración de la misma. Dependiendo de la carga ofrecida, existirá un número variable de slots de voz ocupados ( $N_V$ ) y, consecuentemente, un número de slots disponibles para datos ( $N_D$ ). Además, en el caso de aprovechar los silencios, el número de slots de datos para ABR se incrementa debido a los silencios en slots CBR, distinguiendo entre  $N_D^{VBR}$  y  $N_D^{ABR}$ .

#### FCFS

El diagrama de estados del modelo para el caso FCFS se puede aproximar inicialmente por un sistema  $M/M/1/N_{TD}/N_{TD}$  como se muestra en la Figura 5.15, siendo  $N_{TD}$  el número total de terminales de datos en el sistema. La tasa de llegadas del modelo es la tasa total de paquetes VBR y ABR. La tasa de servicio se supone que es la tasa equivalente de la Tabla 5.12,  $\mu_{eq}$ , sin tener en cuenta el tiempo máximo



de espera en la cola. De otra forma, habría que separar los dos tráficos y pasar a una cadena de Markov bidimensional.

FCFS	TOE	SAD
	$\lambda_j^{VBR} = \lambda_D (N_{VBR} - j) \quad 0 \leq j \leq N_{VBR}$ $\lambda_i^{ABR} = \lambda_D (N_{ABR} - i) \quad 0 \leq i \leq N_{ABR}$	
<p>En FCFS y TOE la tasa media de servicio es la misma para VBR y ABR.</p> $\mu_D = \frac{N_D \cdot B_P}{L \cdot T_F} \quad N_D = N_S - N_V$		$\mu_j^{VBR} = \mu_{eq}^{VBR} \quad 1 \leq j \leq N_{VBR}$ $\mu_{eq}^{VBR} = \frac{N_D^{VBR} \cdot B_P}{L \cdot T_F} \quad N_D^{VBR} = N_S - N_V$ $\mu_i^{ABR} = \mu_{eq}^{ABR} \quad 1 \leq i \leq N_{ABR}$ $\mu_{eq}^{ABR} = \frac{N_D^{ABR} \cdot B_P}{L \cdot T_F} \quad N_D^{ABR} = N_S - N_V \cdot p_V$

Tabla 5.12. Caracterización de los modelos de tráfico de datos

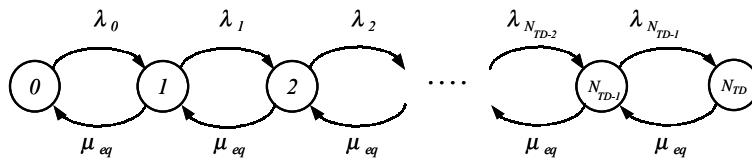


Figura 5.15. Diagrama de estados del modelo de cola FCFS

Las ecuaciones de estado correspondientes a un modelo  $M/M/1/N_{TD}/N_{TD}$  son las siguientes:

- Probabilidad de encontrar el sistema vacío,  $p_0$ :

$$p_0 = \left[ \sum_{n=0}^{N_m} a^n \frac{N_{TD}!}{(N_{TD} - n)!} \right]^{-1} \quad [\text{Ec.5.19}]$$

siendo  $a = \frac{\lambda_D}{\mu_{eq}}$ .

- Probabilidad de encontrar el sistema en el estado  $n$ ,  $p_n$ :

$$p_n = p_0 \binom{N_{TD}}{n} \left( \frac{\lambda_D}{\mu_{eq}} \right)^n \quad [\text{Ec.5.20}]$$

- Probabilidad de encontrar el servidor ocupado, es decir, probabilidad de esperar en la cola,  $p_w$ :

$$p_w = 1 - p_o \quad [\text{Ec.5.21}]$$

- Tiempo medio de espera en la cola:

$$t_w = \frac{1}{\mu_{eq}} \left( \frac{N_{TD}}{p_w} - \frac{1}{a} - 1 \right) \quad [\text{Ec.5.22}]$$

- Probabilidad de esperar más de un tiempo  $t$  en la cola o probabilidad de pérdida<sup>15</sup>:

$$p_t = p_w e^{-(1-aN_{TD})t\mu} \quad [\text{Ec.5.23}]$$

- Número medio de paquetes en la cola,  $\bar{u}$  :

$$\bar{u} = N_{TD} - p_w \frac{a+1}{a} \quad [\text{Ec.5.24}]$$

Aunque esta aproximación sea de espera pura y no exista pérdida, en el protocolo propuesto los paquetes se pierden si esperan más de cierto tiempo en la cola. Por eso, la probabilidad de pérdida se estimará como la probabilidad de esperar más de cierto tiempo en la cola. Esta suposición no es del todo exacta, puesto que un paquete que expire su tiempo se va de la cola beneficiando a los que estén esperando por detrás de él.

Con objeto de comparar los resultados analíticos con los de las simulaciones que se presentan en el apartado siguiente, en la Figura 5.16 se muestran los valores de las ecuaciones anteriores. La primera gráfica corresponde con el retardo medio de acceso. Hay que tener en cuenta que una petición se puede generar en cualquier instante temporal, pero sólo será consciente el sistema cuando esté en la parte de acceso al comienzo de la trama. Por ello, el tiempo de acceso mínimo es de unos 9 ms, intervalo entre que se genera la petición y que es aceptado por el sistema. Puesto que el modelo no distingue entre tipos de tráfico, se ve cómo la curva analítica se asemeja mucho más al resultado simulado para ABR, pues es el que mayor tiempo de espera posee. Además, si se observa en la gráfica inferior izquierda, la pérdida de paquetes ABR es prácticamente nula, por lo que el modelo se ajusta mejor al tráfico ABR. En cualquier caso la curva de la pérdida para VBR se ve cómo también se ajusta bastante a la simulación, debido a que la pérdida, prácticamente nula, de paquetes ABR no le afecta. Por último, mencionar que la ocupación de la cola aumenta considerablemente para cargas altas (0.6 y 0.7), puntos en los que el tráfico con menor tiempo de espera como VBR se comienza a resentir reflejándose en un incremento de la pérdida de paquetes.

## TOE

En el caso de la política de servicio TOE, se tienen dos colas independientes, una para cada tráfico. Esto hace que la cadena de Markov del sistema sea bidimensional, como muestra la Figura 5.17. Como es sabido, los paquetes VBR tienen prioridad sobre los ABR, es decir, mientras la cola VBR no

<sup>15</sup> Se supone que el tiempo de espera sigue una distribución exponencial negativa.

esté vacía no se cursa ningún paquete ABR. Esto significa que sólo es posible realizar la transición del estado  $(i, j)$  al  $(i-1, j)$  cuando  $j=0$ .

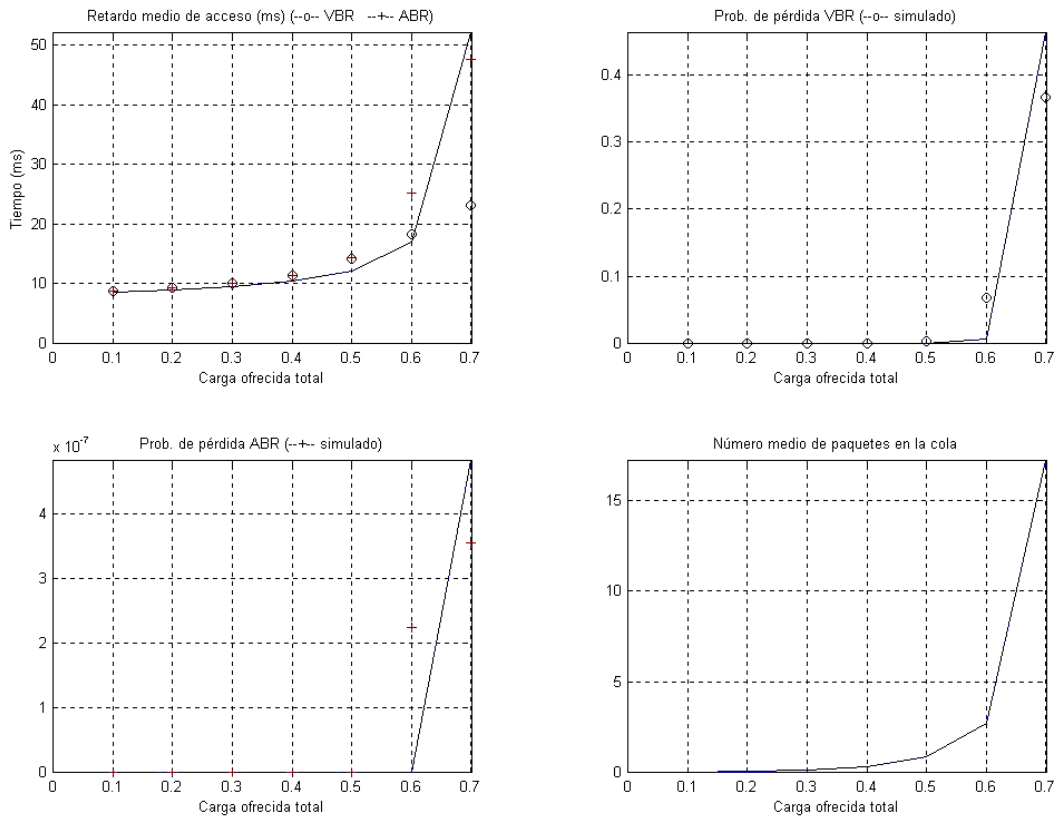


Figura 5.16. Resultados analíticos frente a los simulados para FCFS

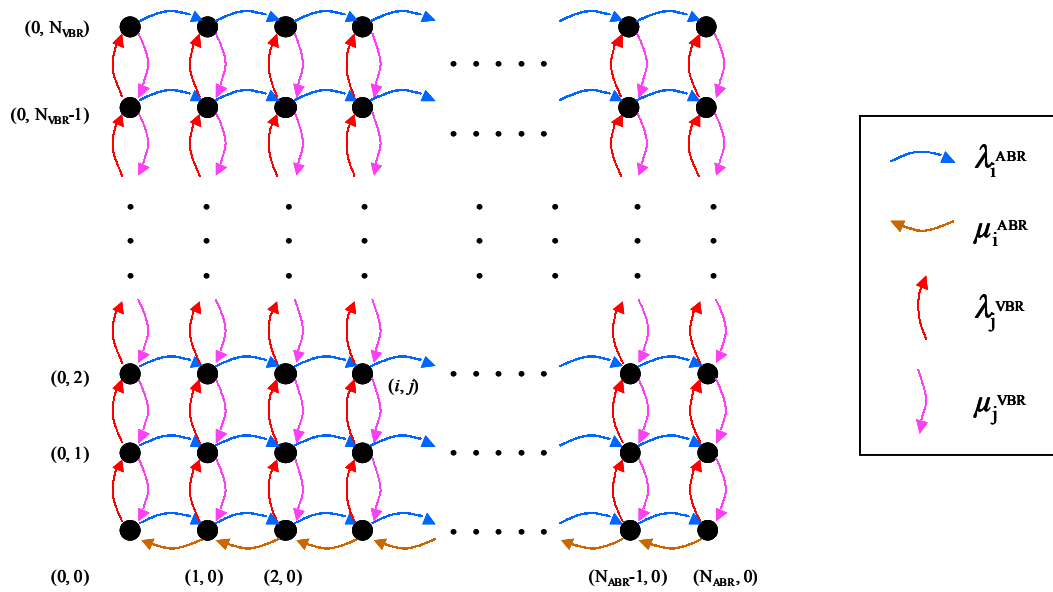


Figura 5.17. Diagrama de estados del modelo de datos con TOE

Debido a la prioridad del tráfico VBR, éste se puede aproximar a un modelo independiente, sin tener en cuenta el tráfico ABR, ajustándose a un modelo  $M/M/1/N_{VBR}/N_{VBR}$ . Lo único que no se considera es el tiempo que debe esperar un paquete VBR a ser cursado cuando uno ABR está siendo servido, ya que es un sistema sin interrupciones (*non-preemptive*), en el que un paquete cuando comienza a cursarse no libera el servidor hasta que se termina de servir completamente, aunque llegue otro de prioridad superior. Por lo tanto, las ecuaciones utilizadas serán las mismas que las del modelo FCFS.

El caso del tráfico ABR es diferente. El tiempo medio de espera se compone de los siguientes tres términos [119]:

- ❑ Tiempo medio hasta que un paquete VBR o ABR que se encuentra en servicio finaliza la ocupación del servidor.
- ❑ Tiempo medio hasta que se cursan todos los paquetes de VBR y los ABR que estén por delante.
- ❑ Tiempo medio debido a los paquetes VBR que llegan mientras el paquete ABR está esperando.

Con todo ello, el tiempo medio de espera en la cola de un paquete ABR resulta:

$$t_w^{ABR} = \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\rho_{VBR} + \rho_{ABR}}{(1 - \rho_{VBR})(1 - \rho_{VBR} - \rho_{ABR})} \right] \quad [\text{Ec.5.25}]$$

donde  $\rho_{VBR}$  y  $\rho_{ABR}$  es el tráfico ofrecido de cada tipo, calculados como:

$$\rho_{VBR} = p_o^{VBR} N_{VBR} \frac{\lambda_D}{\mu_{eq}} (\mu_{eq} + N_{VBR} \lambda_D - \lambda_D) \quad [\text{Ec.5.26}]$$

$$\rho_{ABR} = \frac{\lambda_D}{\mu_{eq}} (N_{ABR} - \bar{n}_{ABR}) \quad [\text{Ec.5.27}]$$

$$\bar{n}_{ABR} = N_{ABR} - \frac{p_w^{ABR}}{a} \quad [\text{Ec.5.28}]$$

$$p_w^{ABR} = 1 - p_{0,0} \quad [\text{Ec.5.29}]$$

siendo  $\bar{n}_{ABR}$  el número medio de paquetes ABR en el sistema;  $p_w^{ABR}$  la probabilidad de espera; y  $a$  la relación  $\lambda_D/\mu_{eq}$ .

El cálculo de  $p_w^{ABR}$  conlleva la estimación de la probabilidad  $p_{0,0}$ . Ésta no es trivial, ya que es necesario resolver las ecuaciones de estado que rigen el modelo bidimensional anterior. Sin embargo, si se examina el número medio de paquetes VBR en el sistema, se observa que en ningún caso llega a 1 (ver Tabla 5.13), con lo que el modelo ABR se puede aproximar, nuevamente, por un sistema  $M/M/1/N_{ABR}/N_{ABR}$  y estimar  $p_{0,0}$  como  $p_o^{ABR}$  recurriendo a las expresiones planteadas en el caso FCFS. Los resultados analíticos obtenidos se muestran en la Figura 5.18.

Carga ofrecida	Número medio de paquetes VBR en el sistema
Total	en el sistema
0.1	0.0214
0.2	0.0472
0.3	0.0799
0.4	0.1213
0.5	0.1759
0.6	0.2423
0.7	0.3181

Tabla 5.13. Número medio de paquetes VBR en el sistema (política de servicio TOE)

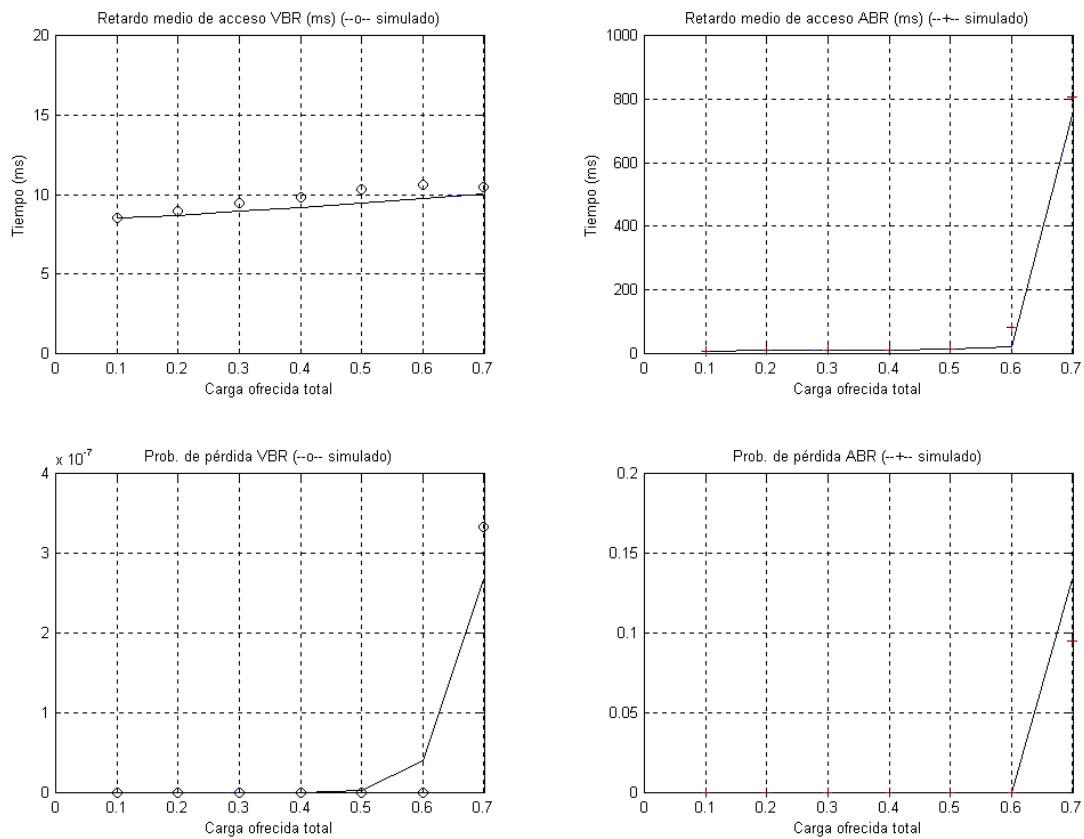


Figura 5.18. Resultados analíticos frente a los simulados para TOE

El bajo retardo y la casi nula pérdida del tráfico VBR ratifican el hecho de aproximar el modelo ABR por un modelo independiente del VBR. La diferencia entre las curvas analítica y simulada para ABR se debe al hecho de despreciar el tráfico VBR en el cálculo de  $p_i^{ABR}$  lo que hace que  $p_o^{ABR}$  estimada sea ligeramente mayor de lo que realmente es. Por eso, se obtiene un retardo medio esperado menor y una

probabilidad de pérdida mayor. En cualquier caso, las aproximaciones de los modelos han reflejado claramente su validez.

### SAD

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, la política de asignación de recursos SAD es similar a TOE con la salvedad de que los paquetes ABR, si no hay recurso libre en la parte de datos “normal”, pueden utilizar los slots CBR que transporten silencios de voz. El hecho de que se dediquen los silencios a paquetes exclusivamente ABR se debe al intento de mejorar las prestaciones de este tráfico frente al VBR. Por eso, los resultados VBR que se han obtenido con TOE van a seguir siendo válidos en SAD, pues no se ven afectados con este cambio. Lo que sí varía es la tasa de servicio pues, según la Tabla 5.12, hay que definir una para cada tipo de tráfico en función del número de slots de datos de los que puede disponer cada uno. El resultado será que la tasa de servicio para ABR,  $\mu_{eq}^{ABR}$ , será mayor.

En la Figura 5.19 se muestran los resultados analíticos para la política de asignación de recursos SAD. Se ve que, mientras el tráfico VBR se comporta de la misma manera que con TOE, las prestaciones de ABR han mejorado sustancialmente. El retardo se ha reducido en más de un orden de magnitud (de 800 a 20 ms) y la pérdida es prácticamente nula para cualquier valor de carga ofrecida.

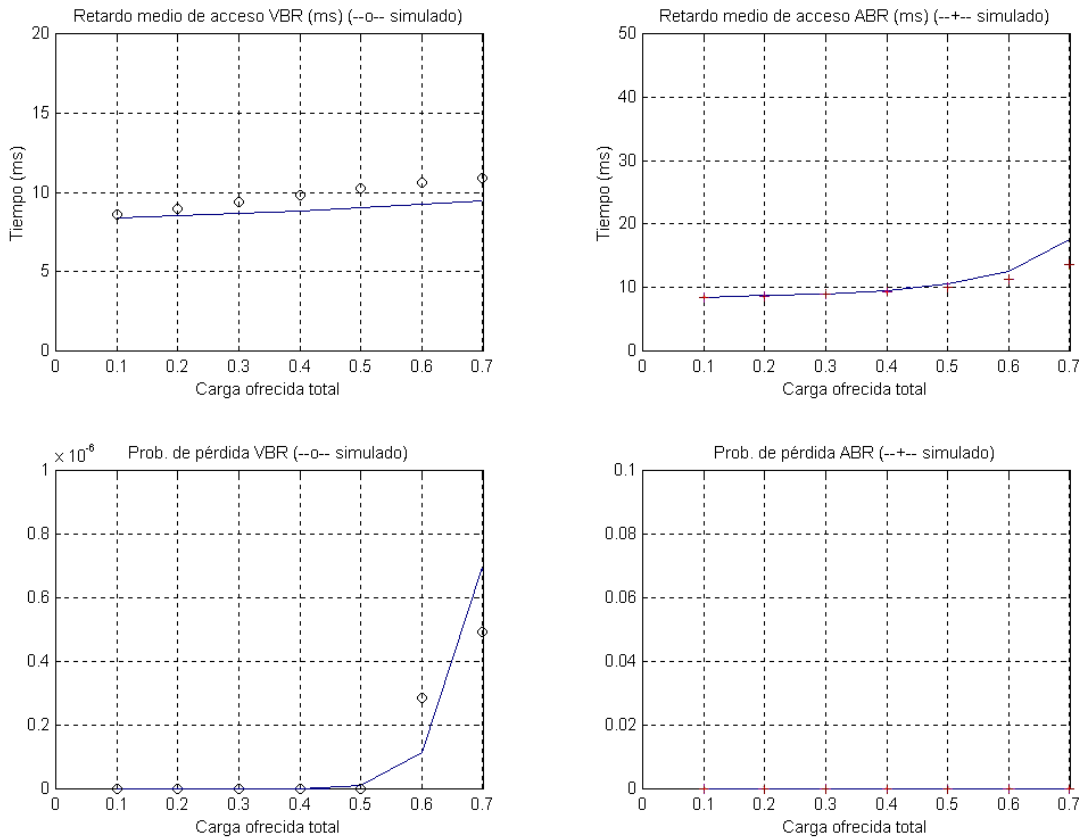


Figura 5.19. Resultados analíticos frente a los simulados para SAD

### 5.10. Evaluación del protocolo propuesto mediante simulación

Los resultados que se presentan en este apartado siguen el orden de la evolución natural que ha llevado este trabajo. Partiendo de un sistema TDD con acceso múltiple por división en el tiempo y asignación dinámica bajo demanda (DTDMA/TDD), en primer lugar se evalúa el protocolo utilizando acceso por sondeo y un sistema de colas FCFS. Con el fin de mejorarlo, se sustituye éste por una política TOE que tenga en cuenta la prioridad de cada paquete de datos. Después, en un intento por aumentar la eficacia del protocolo se introduce la detección de silencios de la voz (SAD), con lo que el tráfico ABR puede aprovechar ese tipo de slots CBR. Finalmente, el método de acceso de los terminales de datos, que hasta ahora había sido por sondeo, es sustituido por acceso por contención mediante Aloha ranurado, obteniendo la solución combinada PA+SAD.

#### 5.10.1. Tráfico CBR

Debido a la política de asignación de recursos para el tráfico CBR, y teniendo en cuenta que las diferentes versiones del protocolo propuesto no afectan a éste, sino exclusivamente al de datos, los resultados obtenidos para CBR serán los mismos independientemente de la política aplicada al tráfico de datos. En la Figura 5.20 se muestran las curvas de tiempo medio de acceso y probabilidad de bloqueo para el tráfico CBR. Se ve cómo el codo se produce para una carga ofrecida de 0.4, a partir de la cual ambas curvas crecen exponencialmente. Admitiendo una probabilidad máxima del 1%, la carga ofrecida puede llegar a 0.42, arrojando un tiempo de acceso de 30 ms aproximadamente. Las curvas correspondientes al cálculo analítico representan una estimación bastante buena de los valores reales. La diferencia existente procede de la aproximación realizada en la media equivalente de la distribución exponencial negativa truncada perteneciente al tiempo medio de espera en la cola ( $T'_C$ ) como se ha explicado en el apartado anterior.

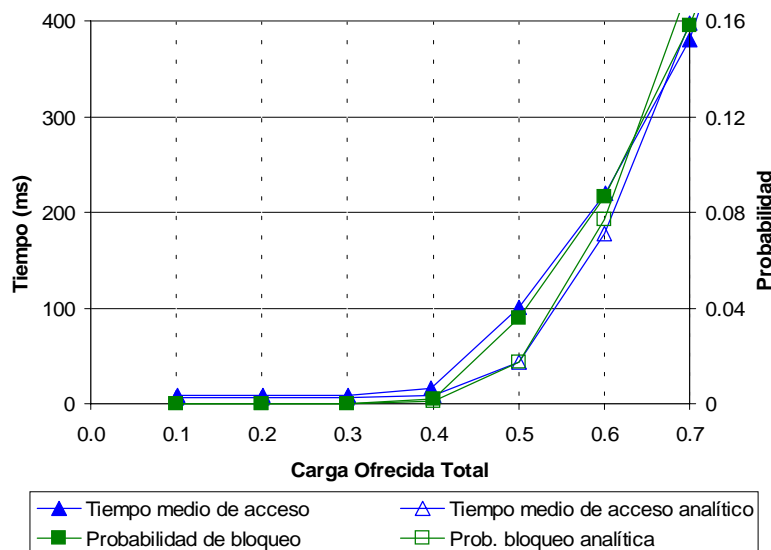


Figura 5.20. Tiempo medio de acceso y probabilidad de bloqueo de las conexiones CBR

Puesto que el valor del retardo de acceso para una probabilidad del 1% es bajo, se debería actuar sobre algún parámetro del sistema que afectase directamente sobre ésta. El principal es el tamaño de la ventana CBR. Aumentando esta cantidad disminuye la probabilidad de bloqueo, como se muestra en la Figura 5.21. Sin embargo, las consecuencias de este aumento van en detrimento directo de las prestaciones del tráfico de datos, ya que, si se mantiene constante el número total de slots en la trama, son menos los que quedan para cursar paquetes de datos.

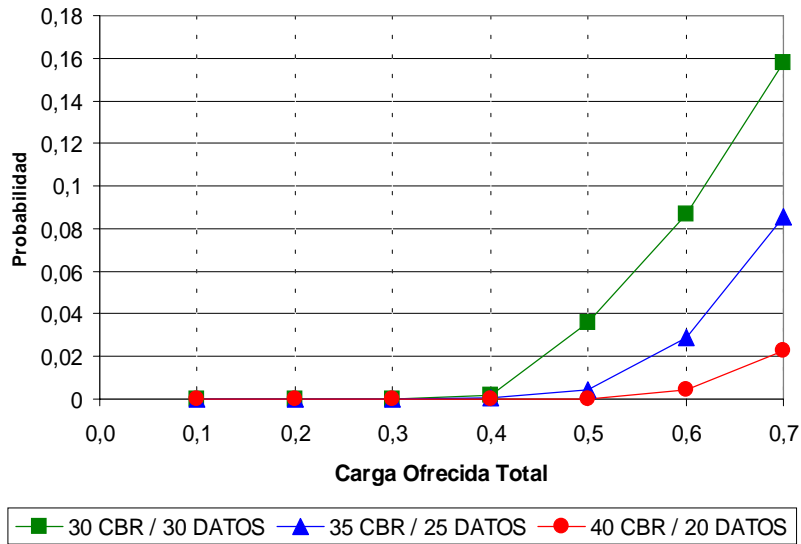


Figura 5.21. Probabilidad de bloqueo para diferentes tamaños de la ventana CBR

### 5.10.2. Política de servicio FCFS

La política de servicio FCFS no distingue entre prioridades a la hora de cursar los paquetes de datos, lo que repercute en el porcentaje de pérdida de paquetes (Figura 5.22) y en el retardo de acceso (Figura 5.23), perjudicando principalmente a los de mayor prioridad (o menor tiempo de expiración). Además, se realiza una comparación de los resultados obtenidos modelando el tráfico de datos mediante Poisson y mediante Pareto.

Se comprueba cómo los paquetes VBR sufren mayor pérdida que los ABR, pues éstos poseen mayor tolerancia al retardo. El hecho de que los paquetes VBR tengan retardos tan bajos se comprende si tenemos en cuenta que el tiempo máximo de espera es de 50 ms, alcanzando un valor de 40 ms en el caso de Pareto, lo cual representa un 80% del máximo. Por otro lado, se observa que en el caso de modelar el tráfico según Poisson, en el que se han tomado los mismos valores estadísticos de fuente que para Pareto, los resultados son más optimistas que con éste. Si el modelo auto-similar se ajusta de una manera más fiel a la realidad que el de Poisson, el hecho de utilizar éste implicaría llegar a conclusiones ligeramente desviadas de la realidad. Por eso, el resto de las políticas de servicio evaluadas, lo han sido modelando el tráfico de datos mediante la distribución de Pareto.



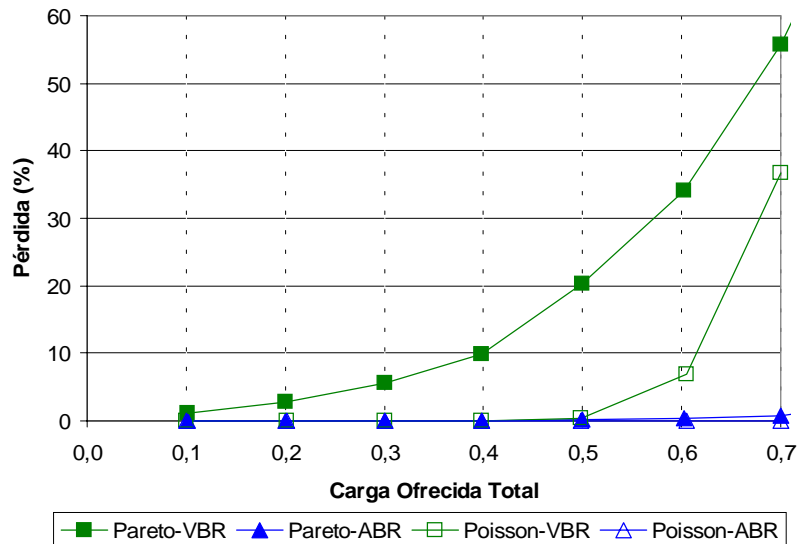


Figura 5.22. Porcentaje de pérdida de paquetes de datos (FCFS, tráfico de Pareto y de Poisson)

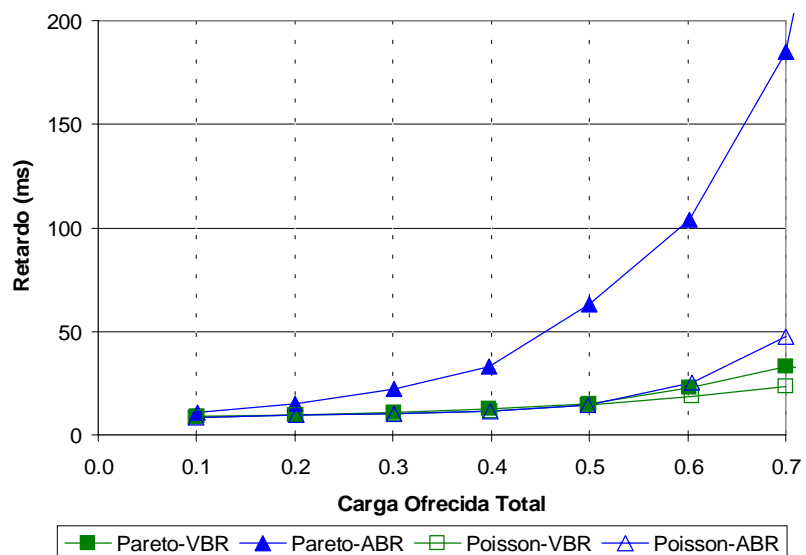


Figura 5.23. Retardo medio de acceso de paquetes de datos (FCFS, tráfico de Pareto y de Poisson)

### 5.10.3. Política de servicio TOE

La principal desventaja de la política FCFS es que no discrimina a los paquetes en función de su prioridad temporal, por lo que el porcentaje de paquetes VBR perdidos es muy alto. Para mitigar este hecho, intentando no perjudicar los resultados del tráfico ABR, se incorpora una nueva regla en la cola de servicio, que estipula que los paquetes se ordenen, en primer lugar, según su tiempo de espera o TOE, y posteriormente de manera FIFO. Aplicando TOE al sistema, se aprecia una notable reducción en la pérdida de paquetes VBR (ver Figura 5.24) disminuyendo, para una carga de 0.7, del 56% con FCFS al 4% con TOE. Sin embargo, la pérdida de ABR ha aumentado del 1% al 12% para el mismo punto de operación.

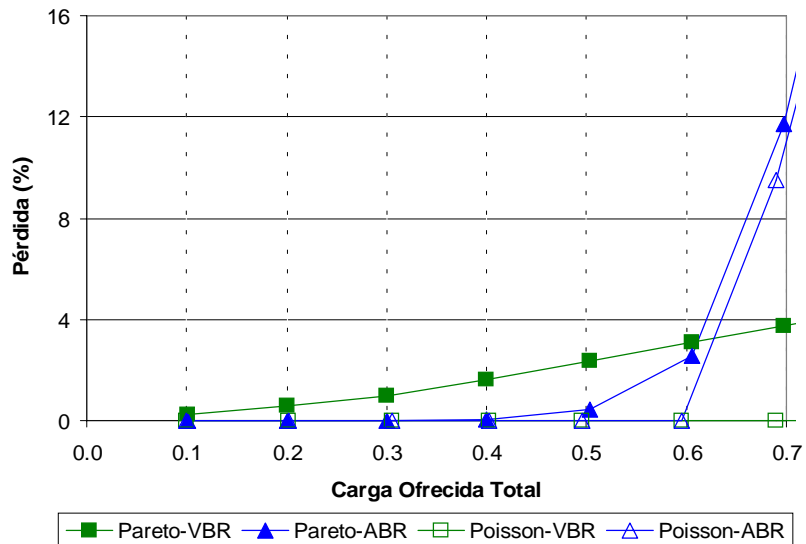


Figura 5.24. Porcentaje de pérdida de paquetes de datos (TOE, tráfico de Pareto y de Poisson)

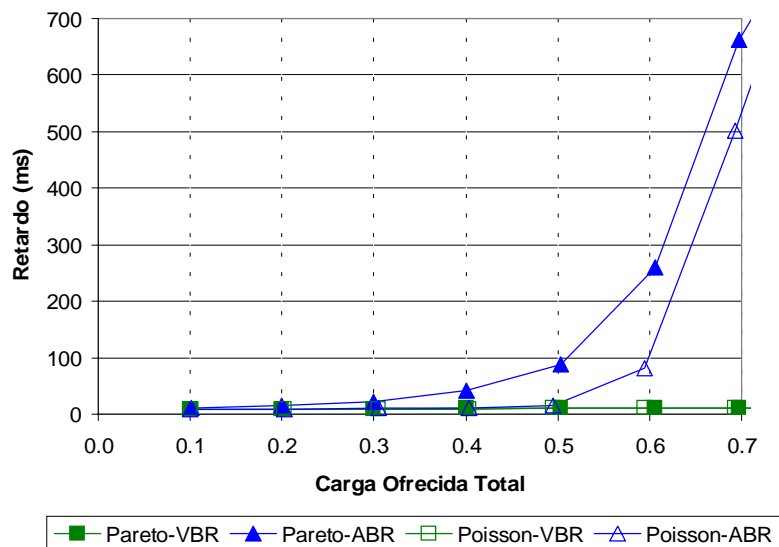


Figura 5.25. Retardo medio de acceso de paquetes de datos (TOE, tráfico de Pareto y de Poisson)

En el caso del tiempo medio de acceso sucede algo parecido, como muestra la Figura 5.25. El tráfico VBR ve reducido su retardo ligeramente, mientras que el del ABR se incrementa en un factor entre 1.5 y 2.5, pasando de 180 ms a 680 ms para una carga de 0.7.

#### 5.10.4. SAD

Partiendo de la situación establecida por la política de servicio TOE, la siguiente actuación debe mejorar los resultados obtenidos para los paquetes ABR. Puesto que, necesariamente, los paquetes VBR han de tener mayor prioridad, hay que encontrar algún tipo de recurso que se encargue de los paquetes ABR que se pierden. Estos son los slots CBR que transportan silencios de voz. Desbordando el tráfico

ABR hacia este tipo de slots se consigue reducir enormemente la pérdida de paquetes (ver Figura 5.26), bajando del 12% al 0.25% para una carga de 0.7. La ventaja de esta política es que el tráfico VBR no se ve afectado en modo alguno, ya que se sigue cursando de la misma manera.

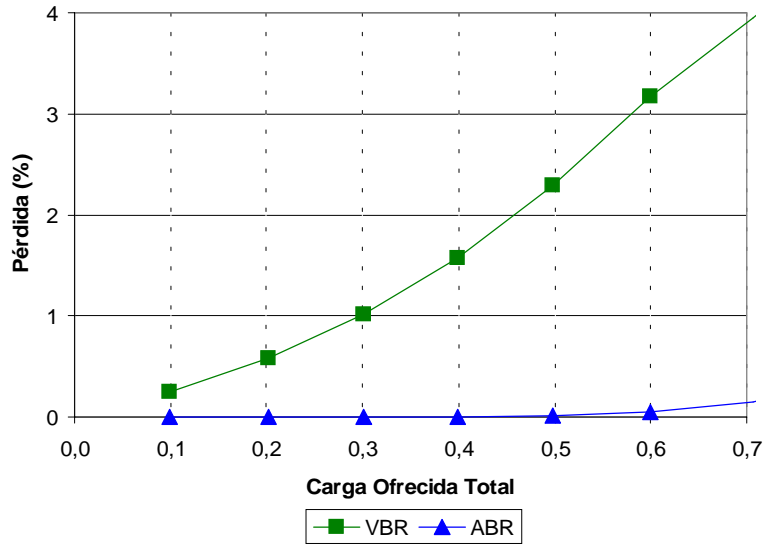


Figura 5.26. Porcentaje de pérdida de paquetes de datos (SAD, tráfico de Pareto)

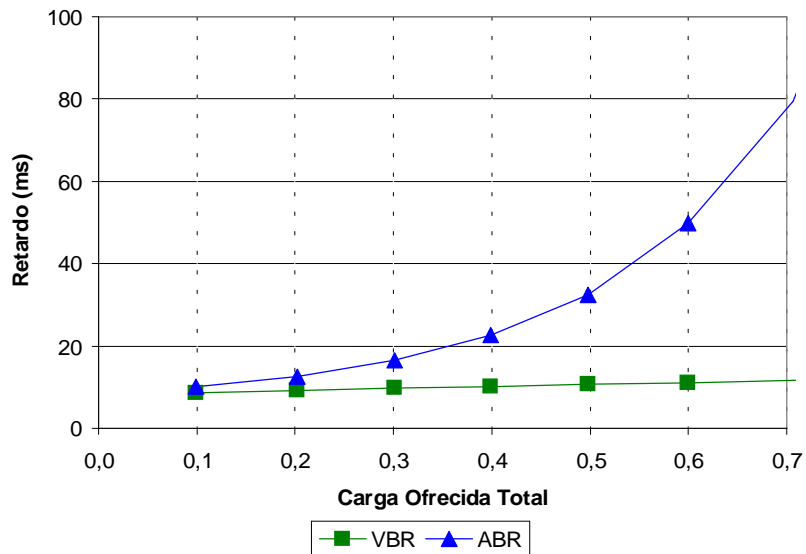


Figura 5.27. Retardo medio de acceso de paquetes de datos (SAD, tráfico de Pareto)

Por otro lado, el tiempo de acceso también se reduce (ver Figura 5.27), pues pasa de 260 ms a 50 ms y de 680 ms a 80 ms para cargas de 0.6 y 0.7, respectivamente. Por lo tanto, el sistema, en este punto, se encuentra en un estado en el que las prestaciones logradas son más que aceptables.

### 5.10.5. PA+SAD

El último intento de mejorar el sistema afecta a la técnica de acceso utilizada por los datos. Con objeto de aumentar la eficiencia del protocolo, se sustituye el acceso por sondeo o polling, que se realizaba sobre todos los tipos de terminales, por el protocolo de acceso Aloha [120]. De esta forma, las peticiones de datos, tanto VBR como ABR, estarán sujetas a contención y podrán sufrir las consecuencias de las colisiones. En la Figura 5.28 se comprueba que la pérdida de paquetes es prácticamente igual que la obtenida en el caso SAD del apartado anterior.

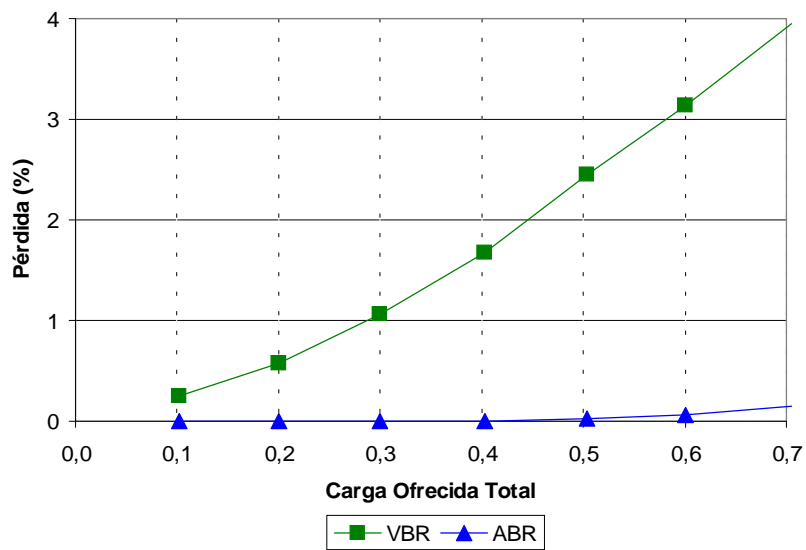


Figura 5.28. Porcentaje de pérdida de paquetes de datos (PA+SAD, tráfico de Pareto)

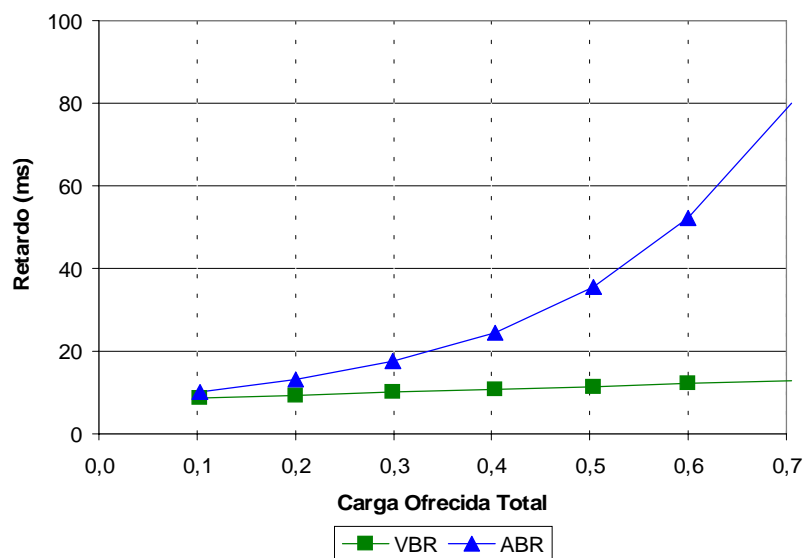


Figura 5.29. Retardo medio de acceso de paquetes de datos (PA+SAD, tráfico de Pareto)

El retardo medio de acceso se comporta también de manera similar en la Figura 5.29. Esto es debido a que si el número de minislots destinados al acceso Aloha está suficientemente dimensionado para la tasa de peticiones recibidas, las colisiones son tan escasas que no tienen una influencia significativa sobre el comportamiento del sistema.

### 5.10.6. Carga cursada

Finalmente, en la Figura 5.30 se recogen las prestaciones correspondientes a todas las políticas de servicio evaluadas en forma de porcentaje de carga cursada frente a carga ofrecida. Se ha elegido la zona de la gráfica a partir de 0.4 para apreciar mejor la diferencia entre ellas. La que peor rendimiento reporta, como ya se ha comentado anteriormente, es el caso FCFS, seguido del TOE. La mejor es la política con aprovechamiento de silencios, tanto SAD como PA+SAD, cursando el 91% de una carga ofrecida de 0.7.

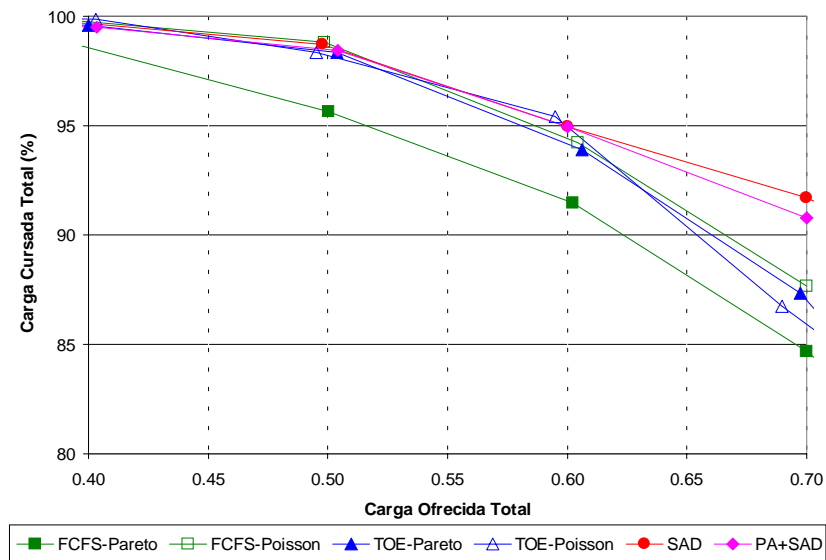


Figura 5.30. Comparación de la carga cursada total frente a la carga ofrecida total (detalle de la zona de interés)

## 5.11. Conclusiones

Una vez evaluado el protocolo de acceso propuesto con las diferentes políticas de servicio presentadas junto con la comparación de los dos modelos de tráfico de datos, Poisson y Pareto, se pueden extraer algunas conclusiones.

En cuanto a los modelos de tráfico de datos, está claro que el hecho de que la caracterización de éste siga un comportamiento autosimilar conlleva peores prestaciones respecto al modelo de Poisson. Sin embargo, las múltiples publicaciones citadas en esta tesis corroboran que el tráfico en este tipo de redes y de aplicaciones se ajusta de manera más fiable al modelo de Pareto, desembocando en un diseño y

planificación de la red más conservadores.

Por otro lado, las políticas de asignación de recursos evolucionan siempre con el objetivo de que la relación entre la carga ofrecida y la cursada sea lo más lineal posible sin menoscabo de la calidad de servicio reflejada en parámetros como el retardo de acceso al medio o la probabilidad de pérdida. De la misma manera se han ido presentando los distintos esquemas en este trabajo. Primero, la política más sencilla de todas es la FCFS en la que no se tiene en cuenta la naturaleza de cada tipo de tráfico, lo que provoca que el tráfico de tiempo real (VBR) sufra una pérdida de paquetes alta. Este hecho se mitigó con el esquema TOE en el que se prioriza el tráfico VBR a cambio de incrementar el retardo de los paquetes ABR. Esta última consecuencia derivó en la necesidad de aprovechar los silencios de voz de los slots CBR por parte de los paquetes ABR, lo que originó la política de servicio SAD que es la técnica que mejores prestaciones logra.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

---

### 6.1. Sumario de aportaciones

Esta tesis se divide en dos partes, una primera en la que se abordan distintas propuestas de ecualización sobre sistemas de comunicaciones móviles, y una segunda correspondiente a los protocolos de acceso. Es decir, una primera parte dedicada al nivel físico y otra al subnivel de enlace. La imbricación de un nivel con el otro es lo que se ha tratado de conseguir a la hora de diseñar el protocolo de acceso que se ha propuesto en este trabajo.

El estudio del nivel físico consiste en un análisis de prestaciones de algoritmos de ecualización junto con el uso de antenas adaptativas sobre tres de los sistemas de comunicaciones móviles más conocidos: GSM y TETRA en entornos celulares, y DECT como sistema de comunicaciones personal. Utilizando modelos de canal extraídos de las recomendaciones de cada sistema, se han evaluado sus comportamientos desde el punto de vista de la probabilidad de error. Además, en los dos sistemas celulares se han comprobado las consecuencias que tiene el efecto Doppler en situaciones de extremo perjuicio y los buenos resultados que arrojan el uso de las antenas adaptativas en este tipo de casos.

Posteriormente, se han definido algunos términos que hacen referencia a la relación existente entre parámetros de diseño físico y de acceso al medio (período de ecualización, tasa de desvanecimiento, etcétera) para, de esta forma, poder plantear una estructura de trama TDMA que sufra, de la manera más

mitigada posible, los efectos de un medio de transmisión nocivo.

Se ha apostado por un esquema TDD para que, de este modo, al existir una única frecuencia portadora para ambos sentidos de transmisión, fuera posible el uso de antenas adaptativas en su forma más simple. A su vez, se ha dividido internamente la trama en función de las características del tráfico ofrecido: una parte para las conexiones en modo circuito conmutado (CBR) y otra para los paquetes de datos (VBR y ABR) con límites variables entre ambos. La asignación de recursos se ha realizado mediante diferentes políticas: FCFS, TOE y SAD. En esta última es en donde se aprecia una clara optimización frente a las dos primeras, ya que aprovechando los silencios de las conexiones CBR el tráfico ABR puede cursarse con mucha menor pérdida.

Por otro lado, se han llevado a cabo el modelado de las fuentes de tráfico de voz y de datos. Para el tráfico de voz se ha implementado el modelo tradicional basado en un proceso de Poisson en el que la duración de las llamadas y el tiempo entre llegadas es exponencial. Sin embargo, para los datos se han utilizado dos modelos diferentes. En principio, se eligió el mismo modelo de Poisson que se utiliza en la voz, pero estudios recientes citados en la bibliografía demuestran el comportamiento auto-similar del tráfico de datos en redes de área local, en el que las distribuciones del tamaño de los paquetes y de la llegada entre ellos siguen una distribución de Pareto.

Para poder contrastar las simulaciones del protocolo de acceso propuesto con resultados analíticos, se han realizado sendos modelos teóricos basados en cadenas de Markov y sistemas de colas para cada una de las políticas de asignación de recursos. Algunos modelos eran demasiado complejos para encontrar una solución exacta por lo que se han realizado determinadas aproximaciones para obtener los resultados. Las simulaciones realizadas demuestran la bondad de dichas aproximaciones.

Finalmente, con objeto de incrementar la eficiencia del sistema, se ha sustituido el método de acceso de los terminales de datos de sondeo por el de Aloha (PA+SAD). Sin embargo, al trabajar en regiones donde la probabilidad de colisión es muy baja, el método de acceso no influye significativamente, por lo que las prestaciones de éste son prácticamente las mismas que las del SAD.

### **6.1.1. Publicaciones**

A lo largo de esta tesis se han generado diferentes publicaciones en revistas internacionales y en congresos tanto nacionales como internacionales, garantizando en cierta medida el trabajo de investigación desarrollado. Aunque las referencias en detalle aparecen al final del documento, a continuación se resumen dichas publicaciones:

- ❑ Un artículo en IEE Electronics Letters
- ❑ Dos artículos en el congreso International Conference on Telecommunications, ICT'99
- ❑ Dos artículos en las II Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL'99



- Un artículo en World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI 2000.
- Un artículo enviado para publicación a la revista IEEE Network.

## 6.2. Futuras líneas de investigación

A la vista de los resultados obtenidos así como de muchas de las conjeturas planteadas a lo largo del documento, existen varios puntos en los que se debe seguir investigando y desarrollando propuestas. A continuación, se enumeran las más importantes:

- *Ampliación de los estudios de nivel físico incorporando técnicas de codificación espacio-tiempo.* Con objeto de evaluar las prestaciones de estas técnicas aprovechando el uso de las antenas adaptativas no sólo en la EB sino también en el terminal móvil.
- *Evaluación de prestaciones de antenas adaptativas en sistemas de interiores de alta capacidad.* En esta tesis, el empleo de antenas adaptativas sobre el sistema de interiores evaluado, DECT, ha sido desestimado debido a los buenos resultados alcanzados con un ecualizador DFE bidireccional. Sin embargo, es necesario evaluar el rendimiento que se obtendría introduciendo antenas adaptativas en sistemas como el que se está desarrollando en el seno del proyecto WIND-FLEX, donde las tasas binarias son del orden de 140 Mbps.
- *Validación del modelo de tráfico de datos.* En esta tesis se han presentado dos formas diferentes de modelar el tráfico de datos: bien como un proceso de Poisson o bien como tráfico con comportamiento auto-similar. La razón de contemplar el modelado desde dos puntos de vista diferentes se debe a las publicaciones recientes sobre la caracterización de tráfico en entornos como las redes de área local, las cuales defienden el segundo enfoque citado. Es necesario, por lo tanto, profundizar en la caracterización del tráfico de datos con objeto de establecer un modelo fiable y ajustado al tráfico real, distinguiendo entre diferentes tipos de tráficos con requerimientos de naturaleza heterogénea (VBR, ABR).
- *Evaluación de nuevas políticas de servicio.* Además de las políticas de servicio que se han incluido en este trabajo, existen otras que se están investigando actualmente en el campo de las redes inalámbricas, como es el caso del proyecto europeo WINE [122]. En este caso particular, algunas de las políticas propuestas y que son susceptibles de ser aplicadas en esta tesis son: WFQ (Weighted Fair Queuing) o CBQ (Class Based Queuing).



## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] C. Sinner, R. Sigle, "Toward Wireless Multimedia Communications. Current Standards and Future Directions", *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 5, No. 1, 1998.
- [2] L. M. Correia, R. Prasad, "An Overview of Wireless Broadband Communications", *IEEE Communications Magazine*, January 1997.
- [3] U. Black, "ATM: Foundation for Broadband Networks", Prentice Hall 1998, ISBN: 0-13-297178X.
- [4] R. Handel, M. N. Huber, S. Schroder, "ATM Networks: Concepts, Protocols, Applications", Eddison Wesley 1998, ISBN: 0-201-17817-6.
- [5] P. Agrawal, "SWAN: A Mobile Multimedia Wireless Network", *IEEE Personal Communication*, April 1996, pp. 18-33.
- [6] K. Y. Eng, "BAHAMA: A Broadband Ad-hoc Wireless ATM Local Area Network" *Proc. IEEE ICC'95*, 1995, pp. 1216-1223.
- [7] D. Raychaudhuri, "WATMNet: A Prototype Wireless ATM System for Multimedia Personal Communication", *IEEE JSAC*, vol. 15, no. 1, Jan. 1997, pp. 83-95.
- [8] Wireless ATM Network Demonstration, <http://www.tik.ee.ethz.ch/~wand/>
- [9] "Personal Communications. A viewpoint", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 8-20, Nov. 1990.
- [10] D.J. Goodman, "Cellular packet communications", *IEEE Trans. Commun.*, pp. 1272-1280, Aug. 1991.
- [11] R. Steele, "The cellular environment of lightweight hand-held portables", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 20-29, July 1989.
- [12] CCITT Recommendation I.212, "Broadband aspects of ISDN", CCITT IXth Plenary Assembly, Melbourne, Australia, vol. 3, fasc. III.7, 1988.
- [13] Fore Systems, "ASX-110 and ASX-120 self-contained ATM switches", *Product Literature*, 1992.
- [14] H. Armbuster and B. Marchent, "Advanced terminal and personal mobility: A challenge for ATM concepts and switching", *Proc. ISS'92*, vol. 1, pp. B.1.1.
- [15] D. Raychaudhuri and N. Wilson, "Multimedia personal communication networks: System design issues", *Proc. 3<sup>rd</sup> Workshop Third Generation Wireless Information Networks*, Rutgers University, pp. 259-288, April 1992.
- [16] P. Mermelstein et al., "Integrated services on wireless multiple access networks", *Proc. ICC'93*, pp. 863-867.
- [17] D.J. Goodman, "Trend in Cellular and Cordless Communications", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 31-40, June 1991.
- [18] W.R. Young, "Advanced Mobile Phone Service: Introduction background and objectives", *Bell Sys. Tech. J.*, vol. 58, no. 1, part 3, pp. 1-14, Jan. 1979.

- [19] "Guidelines for UMTS Radio Access Network Design", European Institute for Research and Strategic Studies in Telecommunications (Eurescom), Project P921-D2, 1999.
- [20] Special Issue on Mobile Communications, British Telecom Tech. J., vol. 8, no. 1, Jan. 1990.
- [21] ETSI GSM Specifications, Series 01-12.
- [22] S. Nanda, D.J. Goodman and U. Timor, "Performance of PRMA: A packet voice protocol for cellular systems", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 40, pp. 584-598, Aug. 1991.
- [23] L. Kleinrock and F.A. Tobagi, "Packet switching in radio channels: Part 1: CSMA modes and their throughput delay characteristics", IEEE Trans. Commun., vol. 23, pp. 1400-1416, 1975.
- [24] K.S. Gilhousen et al., "On the capacity of a cellular CDMA system", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. VT-40, May 1991.
- [25] K. Joseph and D. Raychaudhuri, "Stability analysis of asynchronous random access CDMA systems", Proc. GLOBECOM 1986, pp. 1740-1746.
- [26] "Analysis of asynchronous random access spread spectrum with block forward error correction", Proc. ICC'89, pp. 1269-1277.
- [27] A. Polydoros and J. Silvester, "Slotted random access spread-spectrum networks: An analytical framework", IEEE J. Select. Areas Commun., pp. 989-1002, July 1987.
- [28] UMTS-Forum Web site, <http://www.umts-forum.org>.
- [29] "Universal Mobile Telecommunications Services (UMTS); Future direction of standards work on UMTS/IMT-2000", TR 101-458, v.1.0.3, 1999-12, ETSI.
- [30] Protocols.com Web site, <http://www.protocols.com>.
- [31] J.E. Padgett, C.G. Gunther and T. Hattori, "Overview of wireless personal communications", IEEE Commun. Mag., pp. 28-42, Jan. 1995.
- [32] "Framework of IMT-2000 networks", Recommendation Q.1701, ITU-T.
- [33] ATM Forum Web site, <http://www.atmforum.com>.
- [34] S. Haykin, "An introduction to analog and digital communications", Ed. John Wiley and Sons Inc., Ch. 7, pp. 368-371, 1989.
- [35] "Wireless network access for personal communications", IEEE Comm.Mag., pp.96-115, Dec.1992.
- [36] D.J. Goodman, G.P. Pollini and K.S. Meier-Hellstern, "Network control for wireless communications", IEEE Commun. Mag., pp. 116-125, Dec. 1992.
- [37] G.R. Cooper and R.W. Nettleton, "Cellular mobile technology: The great multiplier", IEEE Spectrum, vol. 20, no.6, pp. 30-37, June 1983.
- [38] A.J. Viterbi, "Wireless digital communications: A view based on three lessons learned", IEEE Commun. Mag., vol. 29, no. 9, pp. 33-36, Sept. 1991.
- [39] N. Wilson, R. Ganesh, K. Joseph and D. Raychaudhuri, "CDMA vs. dynamic TDMA for access control in an integrated voice/data PCN", Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Universal Personal Commun., pp. 267-272, Sept. 1992.

- [40] N. Wilson, R. Ganesh, K. Joseph and D. Raychaudhuri, "Packet CDMA versus dynamic TDMA for multiple access in an integrated voice/data PCN", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 870-884, Aug. 1993.
- [41] R. Wyrwas, M.J. Miller, R. Anjaria and W. Zhang, "Multiple access options for multimedia wireless systems", *Proc. 3<sup>rd</sup> Workshop Third Generation Wireless Information Networks*, Rutgers University, pp. 289-294, April 1992.
- [42] B. Baccetti et al., "Full digital adaptive equalization in 64-QAM radio systems", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-5, no. 3, pp. 466-475, April 1987.
- [43] R. Valenzuela, "Performance of quadrature amplitude modulation for indoor radio communications", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-35, no. 11, pp.1236-38, Nov. 1987.
- [44] L. Greenstein et al., "Microcells in personal communication systems", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 76-88, Dec. 1992.
- [45] W.T. Webb, "QAM: The modulation scheme for future mobile radio communications?", *Electron. and Commun. Eng. J.*, pp. 167-176, Aug. 1992.
- [46] W.T. Webb, "Modulation methods for PCNs", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 90-95, Dec. 1992.
- [47] Thibault-L; Minh-Thien-Le, "Performance evaluation of COFDM for digital audio broadcasting", *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 43, no.1, pp. 64-75, March 1997.
- [48] S.B. Weinstein and P.M. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using discrete Fourier transform", *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. COM-10, no. 5, pp. 628-634, Oct. 1971.
- [49] Electronic Industries Association, "Dual mode subscriber equipment – Network equipment compatibility specification", *Interim Standard 54*, Dec. 1989.
- [50] G. Falk et al., "Integration of voice and data in the wideband packet satellite network", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-1, no. 6, pp. 1076-1083, Dec. 1983.
- [51] J.G. Gruber and N. Le, "Performance requirements for integrated voice/data networks", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-1, no. 6, pp. 981-1005, Dec. 1983.
- [52] S. Panwar, D. Towsley and J. Wolf, "Optimal scheduling policies for a class of queues with customer deadlines to the beginning of service", *J. ACM*, pp. 832-844, Oct. 1988.
- [53] "Multimedia transport in next-generation personal communication networks", *Proc. Int. Conf. Commun.*, pp. 858-862, May 1993.
- [54] M.J. Karol, Liu Zhao, K.Y. Eng, "Distributed-queueing request update multiple access (DQRUMA) for wireless packet (ATM) networks", *IEEE International Conference on Communications (ICC '95)*, Seattle, USA, vol. 2 pp.1224-1231.
- [55] "GSM approaches half a billion customers", *GSM Association*, (GSM World web site, [www.gsmworld.com](http://www.gsmworld.com)), 25 April, 2000.
- [56] A.K. Mehrotra, "GSM System Engineering", Ch. 3, Ed. Artech House, 1997.

- [57] “Radio Equipment and Systems (RES); Trans-European Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI)”, European Telecommunications Standard, ETS 300 392-2, ETSI, Mar. 1996.
- [58] **R. Sanz, L. Muñoz, “Voice and data services in power utilities using a TETRA system”, IEE Electronics Letters, vol. 32, no. 13, pp. 1176-1178, Jun. 1996.**
- [59] T. Eng, N. Kong, L. B. Milstein, “Comparison of Diversity Combining Techniques for Rayleigh-Fading Channels”, IEEE Trans. on Comm., Sep. 1996, vol. 44, no. 9, pp. 1117-1128.
- [60] R.B. Ertel, P. Cardieri, K.W. Sowerby, T.S. Rappaport, J.H. Reed, “Overview of Spatial Channel Models for Antenna Array Communication Systems”, IEEE Pers. Comm., Feb. 1998, vol. 5, no. 1, pp. 10-22.
- [61] B. Sklar, “Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems. Part I: Characterization”, IEEE Comm. Mag., pp. 136-146, Sep. 1997.
- [62] R.H. Clarke, “A statistical theory of mobile radio reception”, Bell Sys. Tech. J., vol. 47, no. 6, pp. 957-1000, July-Aug. 1968.
- [63] W.C. Jakes, “Microwave Mobile Communications”, Ed. Wiley, New York, 1974.
- [64] D. Greenwood and L. Hanzo, “Characterization of Mobile Radio Channels”, Mobile Radio Communications, by R. Steele, Ch.2, Pentech Press, London 1994.
- [65] Y.J. Liu, M. Wallace and J.W. Ketchum, “A soft-output bidirectional decision feedback equalization technique for TDMA cellular radio”, IEEE J. on S. Areas on Comm., vol. 11, no. 7, Sep. 1993.
- [66] Lal C. Godara, “Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility and System Considerations”, Proc. IEEE, Aug. 1997, vol. 85, no. 7, pp.1031-1060.
- [67] Lal C. Godara, “Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations”, Proc. IEEE, Aug. 1997, vol. 85, no. 8, pp.1195-1234.
- [68] T.S. Rappaport, “Wireless Communications, Principles & Practice”, Ed. Prentice Hall, Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 1996.
- [69] J.G. Proakis, “Adaptive Equalization for TDMA Digital Mobile Radio”, IEEE Trans. on Veh. Technol., vol. 40, no. 2, pp. 333-341, May 1991.
- [70] C.A. Belfiori and J.H. Park Jr., “Decision-feedback equalization”, Proc. IEEE, vol. 67, pp. 1143-1156, Aug. 1979.
- [71] K. Abend and B.D. Fritchman, “Statistical detection for communication channels with intersymbol interference”, Proc. IEEE, pp. 779-785, May 1970.
- [72] G.D. Forney Jr., “Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interferences”, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-18, pp. 363-378, May 1972.
- [73] D.N. Godard, “Self recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data

- communication systems”, IEEE Trans. Commun., COM-28, pp. 1867-1875, Nov. 1980.
- [74] A. Benveniste and M. Goursat, “Blind equalizers”, IEEE Trans. Commun., COM-32, no. 8, pp. 871-883, Aug. 1984.
- [75] Y.J. Liu, M. Wallace and J.W. Ketchum, “A soft-output bidirectional decision feedback equalization technique for TDMA cellular radio”, IEEE Journal on Sel. Areas in Commun., vol. 11, no. 7, pp. 1034-1045, Sep. 1993.
- [76] Y.J. Liu, “Bidirectional equalization technique for TDMA communication systems over land mobile radio channels”, IEEE, Proc. GLOBECOM, pp. 1458-1462, 1991.
- [77] Y. Kamio and S. Sampei, “Performance of reduced complexity DFE using bidirectional equalizing in land mobile communications”, IEEE Proceedings, pp. 372-375, 1992.
- [78] “Mobile Station Conformity Specifications v.3.22.0”, ETSI Technical Specification GSM 11.10, Dec. 1995.
- [79] B.A. Bjerke, J.G. Proakis, M.K. Lee and Z. Zvonar, “A comparison of Decision Feedback Equalization and data directed estimation techniques for the GSM system”, ICUPC 97.
- [80] “Radio Equipment and Systems (RES); Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); Common Interface (CI); Part 2: Physical Layer (PHL)”, European Telecommunication Standard, ETS 300 175-2, ETSI, 2<sup>nd</sup> edition, June 1996.
- [81] “Wireless Indoor Flexible High Bitrate Modem Architecture (WIND-FLEX)”, proyecto IST 1999-10025, <http://www.vtt.fi>.
- [82] **R. Sanz, C. Alonso, L. Muñoz, “Impact of adaptive antennae in second generation mobile communications system: TETRA”, Proc. International Conference on Telecommunications, ICT’99, Cheju, Korea, Jun. 1999.**
- [83] M.J. Karol, Z. Liu, and K.Y. Eng, “Distributed Queuing Request Update Multiple Access (DQRUMA) for Wireless Packet (ATM) Networks”, Proc. ICC’95, Seattle, WA, pp.1224-1231, Jun. 1995.
- [84] J.G. Kim and I. Widjaja, “PRMA/DA: A New Media Access Control Protocol for Wireless ATM”, Proc. ICC’96, Dallas, TX, pp. 1-19, Jun. 1996.
- [85] X. Qiu, V.O.K. Li, J.H. Ju, “A Multiple Access Scheme for Multimedia Traffic in Wireless ATM”, J. Special Topics in Mobile Networks and Appls. (MONET), vol. 1, no. 3, pp. 259-272, Dec. 1996.
- [86] F. Bauchot et al., “MASCARA, a MAC Protocol for Wireless ATM”, Proc. ACTS Mobile Summit’96, pp. 17-22, Granada, Spain, Nov. 1996.
- [87] F.D. Priscoli, “Medium Access Control for the MEDIAN System”, Proc. ACTS Mobile Summit’96, pp. 1-8, Granada, Spain, Nov. 1996.
- [88] H. Xie et al., “Data Link Control Protocols for Wireless ATM Access Channels”, Proc. of ICUPC’95, pp. 1-5, Tokyo, Japan, Nov. 1995.
- [89] J. Sarnecki, “Microcell Design Principles”, IEEE Commn. Mag., vol. 31, no. 4, Apr. 1993.

- [90] A.S. Acampora, M. Naghshineh, "Control and Quality-of-Service Provisioning in High-Speed Microcellular Networks", IEEE Personal Communications, Second Quarter 1994.
- [91] A.S. Acampora, M. Naghshineh, "An Architecture and Methodology for Mobile-Executed Handoff in Cellular ATM Networks", IEEE JSAC, vol. 12, no. 8, Oct. 1994.
- [92] G. Gallasi, G. Rigolio, and L. Verri, "Resource management and dimensioning in ATM networks", IEEE Network Magazine, May 1990.
- [93] D. Hong, and T. Suda, "Congestion control and prevention in ATM networks", IEEE Network Magazine, Jul. 1991.
- [94] H. Michiel and K. Laevens, "Teletraffic Engineering in a Broad-band Era", Proceeding of the IEEE, vol. 85, No. 12, pp. 2007-2033, Dec. 1997.
- [95] V. Frost and B. Melamed, "Traffic Modeling for Telecommunications Networks", IEEE Communications Magazine, Mar. 1994
- [96] W. Leland, "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)", IEEE/ACM Trans. Networking, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [97] **R. Sanz, M. García, L. Muñoz, "Performance of a Dynamic TDMA Access Protocol under Self-Similar Traffic Input", Proc. of the International Conference on Telecommunications, ICT'99, Cheju, Korea, pp. 526-530, Jun. 1999.**
- [98] J. Aracil, "Características del Tráfico de la Internet e Implicaciones para el Análisis y Dimensionamiento de Redes de Comunicaciones" (Internet Traffic Characterization and Implications for Computer Networks Dimensioning), Novática, Journal of the Spanish Computer Science Association, special issue on Advanced Internet Topics, December 1996.
- [99] A. Rueda and W. Kinsner, "A survey of traffic characterization techniques in telecommunication networks" in Proc. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'96), Calgary, Alta., pp. 830-833, Canada 1996.
- [100] Abdelnaser Adas, "Traffic Models in Broadband Networks" IEEE Communications Magazine, pp. 82-89, Jul. 1997.
- [101] D. Raychaudhuri, N.D. Wilson, "ATM-Based Transport Architecture for Multiservices Wireless Personal Communications Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, No. 8, pp. 1401-14, Oct. 1994.
- [102] E.A. Harrington, "Voice /Data Integration Using Circuit Switched Networks", IEEE Trans. Comm., pp. 781-793, Jun. 1980.
- [103] H. Stern, "Design Issues Relevant to Develop an Integrating Voice/Data Mobile Radio System", IEEE Trans. Veh. Tech., Nov. 1990.
- [104] "ETSI HIPERLAN standard", <http://www.etsi.org>.
- [105] G. Wu, K. Mukumoto and A. Fukuda, "Integration of voice and data in wireless information networks with data steal into voice multiple access", IEICE Trans. Commun., vol. E77-B, no. 7, pp. 939-947, July 1994.



- [106] D. Raychaudhuri, N.D. Wilson, "ATM-Based Transport Architecture for Multiservices Wireless Personal Communications Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, No. 8, pp. 1401-14, Oct. 1994.
- [107] W.E Leland , M. S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson, "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 2, No. 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [108] M.E. Crovella and A. Bestavros, "Self-Similarity in World Wide Web Traffic Evidence and Possible Causes", Proc. ACM SIGMETRICS, Philadelphia, May 1996.
- [109] Ojanperä, Prasad, "Wideband CDMA for third generation mobile communications", Artech House Publishers, Ch. 6, 1998.
- [110] M.E. Crovella and A. Bestavros, "Explaining World Wide Web Traffic Self-Similarity", Computer Science Department, Boston University, Revised Technical Report TR-95-015, 12<sup>th</sup> Oct. 1995.
- [111] L. Muñoz, J. Choque, M. García, "Proposal of a P-DTDMA access scheme for multimedia wireless networks", Proceedings of the Broadband Access Conference BAC'99, Krakow, Poland, pp. 63-74, Oct. 1999.
- [112] **R. Sanz, M. García, A. Ferrándiz, L. Muñoz, "Evaluación del rendimiento de un protocolo de acceso múltiple basado en un TDMA dinámico bajo tráfico de naturaleza autosimilar", II Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL '99, 15-17 de septiembre de 1999, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, pp. 407-412.**
- [113] **R. Sanz, L. Muñoz, J. Choque, M. García, "Propuesta de un protocolo de acceso P-DTDMA para redes inalámbricas de banda ancha", II Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL '99, 15-17 de septiembre de 1999, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, pp. 413-418.**
- [114] V. Paxson, S.Floyd , "Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 3, No. 3, June 1995, pp. 226-43.
- [115] R.G. Addie, M.Zukerman, T.D. Neame, "Broadband Traffic Modeling: Simple Solutions to Hard Problems", IEEE Communications Magazine, August 1998, pp. 88-95.
- [116] J. Aracil, L. Muñoz "Performance of Aloha Channels under Self-similar Input", Electronics Letters, vol. 33, No. 8, April 1997, pp. 659-60.
- [117] **R. Sanz, L. Muñoz, P. Mahonen, "Analytical evaluation of a TDMA mobile communications system", presentado para publicación en IEEE Network, Nov. 2000.**
- [118] I. Rombogiannakis, M. Paterakis, "Voice/Data integrated wireless channel access in third generation digital cellular networks: the performance of bursty data generated by interactive applications", International Journal of Wireless Information Networks, vol. 5, N° 1, 1998, pp. 1-12.
- [119] H. Akimaru, K. Kawashima, "Teletraffic. Theory and applications", Ed. Springer, 2<sup>nd</sup> edition, 1999.

- [120] **R. Sanz, M. García, L. Muñoz, “Proposal of a PA-DTDMA access scheme for multimedia wireless networks”, Proc. World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI 2000, Orlando, USA, Jul. 2000.**
- [121] John N. Daigle, “Queueing theory for telecommunications”, Ed. Addison Welsey, 1992.
- [122] Wireless Internet Networks (WINE), proyecto europeo IST 1999-10028, <http://www.vtt.fi>.

## GLOSARIO

---

AAL	ATM Adaptation Layer
ABR	Available Bit Rate
ACCH	Associated Control Channel
ACELP	Algebraic CELP
ACR	Allowed Cell Rate
ACTS	Advanced Communications Technologies and Services
ADPCM	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AOA	Angles of Arrival
ARQ	Automatic Repeat Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWGN	Additive White Gaussian Noise
B-ISDN	Broadband ISDN
BER	Bit Error Rate
BT	Burst Tolerance
CBQ	Class Based Queuing
CBR	Constant Bit Rate
CIR	Committed Information Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CDVT	Cell Delay Variation Tolerance
CELP	Code-Excited Linear Predictive
CLR	Cell Loss Ratio
CMA	Constant Modulus Algorithm
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CRC	Cyclic Redundancy Code
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CTD	Cell Transfer Delay
CW	Continuous Wave
DAB	Digital Audio Broadcast
DECT	Digital Enhanced/European Cordless Telephone
DFE	Decision Feedback Equalization
DQRUMA	Distributed Queuing Request Update Multiple Access
DS/SS	Direct Sequence / Spread Spectrum
EB	Estación Base
EDF	Earliest Deadline First
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EFCI	Explicit Forward Congestion Indicator

ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EY-NPMA	Elimination Yield - Non-Pre-emptive priority Multiple Access
FBF	Feed-Back Filter
FACCH	Fast ACCH
FCFS	First Come First Served
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDP	Función Densidad de Probabilidad
FEC	Forward Error Control
FFF	Feed-Forward Filter
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
GAA	Gaussian Angle of Arrival
GoS	Grade of Service
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Groupe Spécial Mobile / Global System for Mobile communications
GWSSUS	Gaussian Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering
HDTV	High Definition TV
HIPERLAN	High Performance Radio Local Area Networks
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
I+D	Investigación y Desarrollo
IMT-2000	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LMS	Least Mean Square
LOS	Line Of Sight
LSE	Least Square Error
MAC	Medium Access Control
MAP	Maximum A-posteriori Probability
MCR	Minimum Cell Rate
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation
MSK	Minimum Shift Keying
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCN	Personal Communications Network
PCR	Peak Cell Rate

---

PDV	Packet Delay Variation
PRMA	Packet Reservation Multiple Access
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RCPC	Rate-Compatible Punctured Convolutional
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados
RDSI-BA	RDSI de Banda Ancha
RF	Radio Frequency/Radio Frecuencia
RLS	Recursive Least Square
RPE-LTP	Regular Pulse Excitation-Long Term Prediction
SAD	Speech Activity Detection
SCR	Sustainable Cell Rate
SNR	Signal to Noise Ratio
SS7	Signaling System N°7
TCH	Traffic Channel
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TETRA	Trans-European/Terrestrial Trunked Radio
TOE	Time Of Expire
UBR	Undefined Bit Rate
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNI	User Network Interface
UPC	Utilization Parameter Control
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access System
VBR	Variable Bit Rate
VCN	Virtual Circuit Number
VLSI	Very Large Scale Integration
WAND	Wireless ATM Network Demonstrator
WCDMA	Wideband CDMA
WFQ	Weighted Fair Queuing
WIND-FLEX	Wireless Indoor Flexible High Bitrate Modem Architecture
WINE	Wireless Internet Networks