

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y**  
**ELECTRÓNICA**



**SISTEMAS MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN**  
**EMPLEANDO CDMA COMO TÉCNICA DE ACCESO**  
**MÚLTIPLE**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:**

**ARTURO MARTIN ALVAREZ ESPINOZA**

**PROMOCIÓN**  
**1993 – I**  
**LIMA – PERÚ**

**2002**

**A mi Hija que es el motivo  
de mi superación, a mi amada  
Esposa por su constante  
apoyo y comprensión.**

**SISTEMAS MÓVILES DE TERCERA GENERACIÓN EMPLEANDO CDMA  
COMO TÉCNICA DE ACCESO MÚLTIPLE**

## SUMARIO

El área de las comunicaciones móviles, junto con Internet y las aplicaciones multimedia, son las de crecimiento más rápido dentro del sector de las telecomunicaciones. Este crecimiento tan espectacular lleva aparejado el desarrollo e implantación de diferentes tecnologías analógicas y digitales tales como TDMA, CDMA y estándares AMPS, NMT, TACS, D-AMPS, GSM, DECT, PHS, etc. muchas veces coexistiendo en el mismo territorio como es el caso del PERU, y todos siguiendo la línea de cómo optimizar la velocidad y asegurar la calidad de la información transmitida. Siguiendo esta línea, los servicios y aplicaciones para las comunicaciones inalámbricas de Tercera Generación que además de la transmisión de voz están orientados principalmente a la transmisión de datos y aplicaciones multimedia a grandes velocidades, posee como aspecto clave a dilucidar la técnica de conmutación a emplear y en base a este contexto, el presente informe de suficiencia tiene como objetivo fundamental el estudio de las técnicas de transmisión orientadas a la conmutación de paquetes por resultar más apropiado desde el punto de vista de un mejor aprovechamiento de los recursos de radio y un menor tiempo de establecimiento de los enlaces, garantizando niveles de calidad de servicio especificados, empleando la técnica de acceso múltiple CDMA con los modos de duplexado FDD y TDD.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	<b>11</b>
<b>EXPOSICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA</b>	
1.1 Comunicaciones móviles de Tercera Generación.	11
1.2 Proceso de estandarización de los sistemas de Tercera Generación.	14
1.3 Nuevos Servicios y aplicaciones.	19
1.4 Exposición de la problemática detectada.	22
<b>CAPITULO II</b>	<b>23</b>
<b>PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN A EMPLEAR</b>	
2.1 Planteamiento de la solución.	23
2.2 Referencia de opciones alternativas.	26
<b>CAPITULO III</b>	<b>30</b>
<b>TÉCNICA DE ACCESO MÚLTIPLE CDMA EN 3G.</b>	
3.1 Técnicas de Acceso Múltiple.	30

3.2	Principios Básicos de CDMA.	37
3.3	Características Fundamentales de un Sistema DS/CDMA.	44
3.3.1	Secuencias código.	44
3.3.2	Control de Potencia.	46
3.3.3	Sincronismo en DS/CDMA.	50
3.3.4	DS/CDMA en sistemas celulares. Reuso frecuencial.	52
3.3.5	Codificación de canal.	54
3.4	DS/CDMA en la propuesta UTRA FDD para UMTS.	55
3.4.1	Arquitectura de protocolos para la interfaz radio UMTS.	55
3.4.2	Estructura de trama básica.	
3.5	Necesidad de un protocolo de acceso múltiple.	66
3.6	El protocolo ISMA-DS/CDMA.	73
3.6.1	ISMA de banda estrecha.	73
3.6.2	ISMA es un esquema de acceso DS/CDMA.	73
3.7	Análisis de prestaciones del protocolo ISMA-DS/CDMA.	78
3.8	Influencia de la probabilidad de reaccionar a un código $p_r$ .	83
3.9	Influencia de la probabilidad de retransmisión $p_b$ .	87
<b>CAPITULO IV</b>		<b>91</b>
<b>ASIGNACIÓN DE CANALES</b>		
4.1	Estrategias de asignación de canales en un esquema TDD-TD/CDMA.	91
4.2	Descripción general de la estructura de canales físicos definida en UTRA TDD.	93
4.2.1	Organización de la estructura de tramas y de ranuras temporales.	94
4.2.2	Códigos de ensanchado.	96
4.2.3	Transmisión multicódigo y transmisión con múltiples ganancias de procesado.	98

4.2.4	Estructura de las ráfagas en UTRA TDD.	100
4.2.5	Campo de datos.	101
4.2.6	Midámbulo.	102
4.2.7	Periodo de guarda.	105
4.2.8	Ráfaga de acceso	105
4.2.9	Ráfaga de sincronización.	105
4.3	Peculiaridades del duplexado TDD en un entorno TD/CDMA.	110
4.3.1	Control de potencia.	109
4.3.2	Estrategia de diversidad	111
4.3.2.1	Combinación pre-rake.	111
4.3.2.2	Diversidad por preselección de antena.	112
4.4	Problemática de la diferente asimetría en un entorno celular.	117

## **CAPÍTULO V** **122**

### **CALIDAD DE SERVICIO EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR PAQUETES**

5.1	Calidad de servicio en sistemas de transmisión por paquetes basados en ISMA-DS/CDMA FDD.	122
5.1.1	Algoritmo de gestión de recursos.	126
5.1.2	Control de admisión.	131
5.2	El protocolo ISMA-DS/CDMA en un contexto FDD con garantías de calidad de servicio.	137
5.2.1	El protocolo ISMA-DS/CDMA FDD con mecanismo de sondeo.	138
5.3	Calidad de servicio en un esquema por paquetes TDD-TD/CDMA.	147
5.4	Protocolos de acceso múltiple para TDD-TD/CDMA	148
5.4.1	El protocolo ISMA-TD/CDMA.	148

5.4.2	Reglas de funcionamiento del protocolo ISMA-TD/CDMA para TDD.	151
5.5	Calidad de servicio en TDD-TD/CDMA.	161
5.5.1	Algoritmo de gestión de recursos.	157
5.5.2	Descripción de las peticiones de transmisión.	160
<b>CONCLUSIONES.</b>		<b>170</b>
<b>ANEXO A:</b>		<b>171</b>
<b>TERCERA GENERACIÓN EN EL PERÚ.</b>		
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>		<b>179</b>

## PRÓLOGO

Desde que los servicios de telefonía móvil automática fueron introducidos allá por la década de los 70, han constituido uno de los segmentos que ha experimentado un mayor y más rápido crecimiento dentro del sector de las telecomunicaciones, hasta el punto de que el teléfono móvil se ha convertido hoy en día en uno de los elementos más habituales de la vida cotidiana. Este crecimiento ha sido posible en primer lugar gracias a los acuerdos en materia de estandarización llevados a cabo por organismos intergubernamentales como la ITU (International Telecommunication Union) o la ETSI (European Telecommunications Standards Institute) que han posibilitado la existencia de economías de escala en el ámbito de un mercado común, resultando en una reducción del precio de los terminales y la consiguiente extensión del mercado a un mayor número de clientes potenciales. En segundo lugar, gracias a la propia evolución tecnológica, que ha permitido mejorar las prestaciones ofrecidas por los servicios ofertados no sólo desde el punto de vista del usuario final, reflejadas en una mayor velocidad de transmisión, una mejor calidad de recepción y una mayor confidencialidad de las comunicaciones, sino también desde la perspectiva de los operadores, en términos de una mayor capacidad y un uso más eficiente de los recursos radioeléctricos.

La evolución de los sistemas de comunicaciones móviles, desde su introducción hasta la actualidad, ha transcurrido en las diferentes fases que se especifican a continuación:

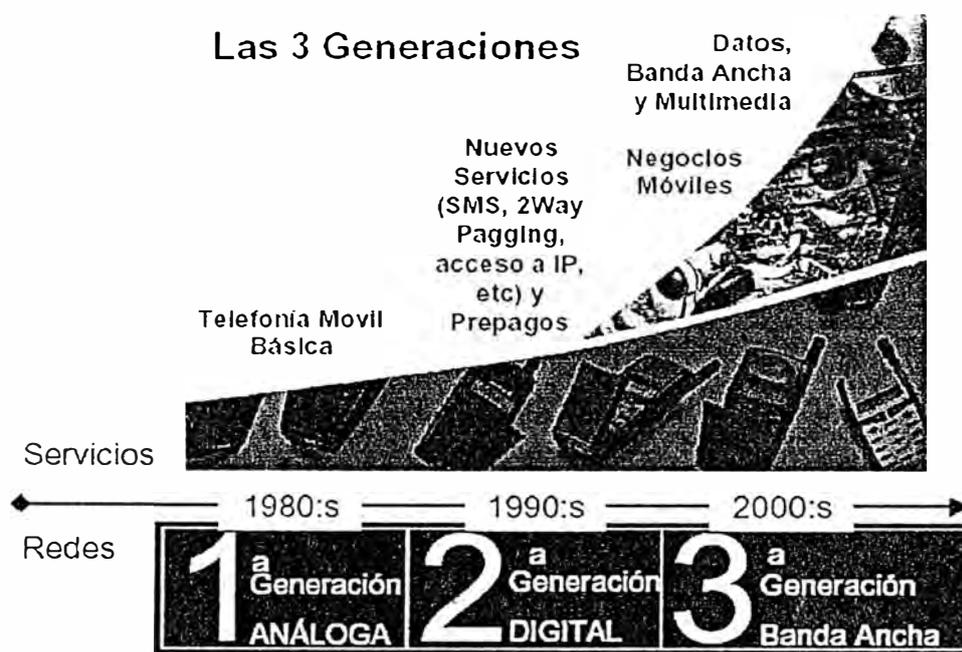


Figura I.1: Las tres Generaciones de la Telefonía Celular.

#### i.- Comunicaciones Móviles de Primera Generación

La principal característica de los primeros sistemas de comunicaciones móviles es la utilización de modulaciones analógicas para la transmisión de la información. Si bien ya existía entonces un cierto abanico de servicios diferenciados, tales como la radiomensajería o incluso las aplicaciones de transmisión de datos, era el servicio básico de voz el principal objetivo de estos sistemas, aunque con diferentes modalidades según se tratara de telefonía pública, privada o simplemente del empleo de extensiones inalámbricas de la red fija.

#### ii.- Comunicaciones Móviles de Segunda Generación.

Con la irrupción de la tecnología digital en el ámbito de las comunicaciones móviles surgieron los sistemas denominados de segunda generación que permitían mejorar las prestaciones ofrecidas por los de primera generación aprovechando las características de dicha tecnología. Como ventajas principales se distinguen:

- La capacidad para incrementar la calidad de recepción gracias a la posibilidad de incorporar técnicas de ecualización y códigos correctores de errores.
- La mayor privacidad en las comunicaciones fruto del empleo de técnicas de criptografía sobre las secuencias de bits transmitidas.
- La posibilidad de emplear nuevas técnicas de acceso múltiple como las basadas en división en tiempo TDMA o en código CDMA, que permiten mejorar la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico.
- La mayor capacidad para la transmisión de datos con diferentes velocidades binarias.
- Tecnología GSM, cuyas siglas provienen de la palabra en inglés "Global System for Mobile Communications" (Sistema Global para Comunicaciones Móviles), es la red digital celular más utilizada en el mundo, cubriendo toda Europa, con crecimiento en las Américas, Asia, y otras zonas del mundo. Una de las características más resaltantes de la red GSM es la capacidad de transmisión de datos. Porque GSM es digital, cualquier cliente GSM puede conectarse a través de su teléfono con su computador (una PC o una PC portátil) y puede hacer, enviar y recibir e-mails, faxes, navegar por Internet, acceso seguro a la red informática de su compañía (LAN/Intranet), así como utilizar otras funciones digitales de transmisión de datos, incluyendo el Servicio de Mensajes Cortos.

### **iii.- Comunicaciones Móviles de Tercera Generación..**

Básicamente, los servicios de tercera generación combinan el acceso móvil de alta velocidad con los servicios basados en el Protocolo Internet (IP). Pero esto no sólo conlleva una conexión rápida con Internet, sino también realizar transacciones bancarias a través del teléfono, hacer compras o consultar todo tipo

de información. Mientras que el sistema actual (de Segunda Generación), basado en GSM y los terminales móviles están preparados para la transmisión rápida de datos de voz y texto, la red de 3G que se identifica como UMTS (Universal Mobile Telecommunication System => Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles), considerado como el futuro de la telefonía, permitirá el trasvase de información multimedia a una velocidad de 2 Megabits por segundo. Actualmente, transmitir 2 MB de vídeo a través de la red GSM toma aproximadamente media hora, mientras que con el sistema UMTS serán necesarios tan sólo 8 segundos. Permitirá estar conectado a la red de forma permanente sin pagar más que cuando se utilice el terminal para realizar una operación. UMTS permitirá, por ejemplo, desde el coche y encendiendo el teléfono móvil navegar por Internet para acceder a nuestra cuenta bancaria, comprobar el estado de nuestras cuentas corrientes, pagar un par de facturas, ver una videoconferencia del presidente del banco o hablar con algún empleado del mismo. Hay tres aspectos esenciales que caracterizan el UMTS:

- Una nueva tecnología de acceso radio que ofrezca tasas pico de información a usuario bastante superior a las disponibles con GSM y otros sistemas de segunda generación.
- La convergencia de redes fijas y móviles, públicas y privadas, y la convergencia correspondiente de telecomunicaciones y comunicaciones de datos eliminarán la distinción entre estos tipos de redes y servicios, promoviendo así la emergencia de nuevos proveedores de servicio.
- Una arquitectura de servicio flexible que permita a los operadores aprovechar las capacidades del servicio ofrecidas por las normativas del UMTS para desarrollar servicios innovadores dirigidos a usuarios finales. Un componente importante de éste será el VHE (Entorno de Hogar Virtual).



Figura 1.2: Aspectos que caracterizan a UMTS

La tecnología de los Sistemas Móviles de Tercera Generación surge debido a las siguientes motivaciones:

a) En primer lugar, fruto del espectacular crecimiento del grado de penetración que han venido presentando los sistemas de comunicaciones celulares de Segunda generación, superando ya en ciertos países al de los sistemas fijos. En relación a este aspecto, téngase en cuenta que si bien un teléfono fijo tiene un ámbito de uso familiar, el teléfono móvil presenta un uso unipersonal, lo que le permitirá un grado de penetración superior.

Este crecimiento tenderá a llevar a la saturación los actuales sistemas de segunda generación, por lo que se hace patente la búsqueda de nuevas bandas de frecuencias y de nuevos sistemas que permitan hacer frente a la demanda con un uso de los recursos más eficiente.

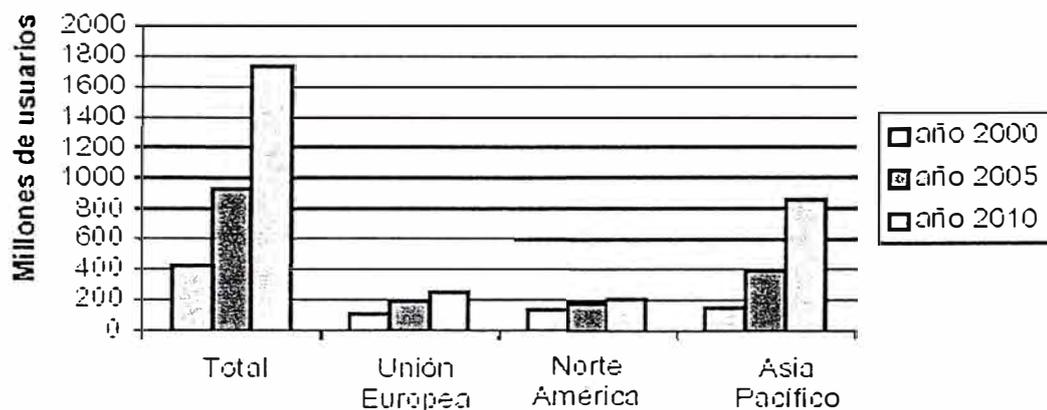


Figura I.3: Previsión de crecimiento de usuarios de telefonía celular.

En la Figura I.3 se muestran, a modo de ilustración, las previsiones de crecimiento en los usuarios de telefonía móvil para la próxima década, donde se observa como prácticamente se prevé doblar el número de usuarios cada 5 años, especialmente en lo que a la región asiática del Pacífico se refiere, motivo por el que, de hecho, es Japón uno de los países que lidera el camino hacia la implantación de los sistemas de tercera generación.

b) No hay que olvidar que, paralelamente a la evolución de las comunicaciones móviles, otro de los segmentos del sector de las telecomunicaciones que en la última década está experimentando un mayor grado de crecimiento es el del acceso a Internet. Obsérvese a modo de ejemplo en la Figura I.4, la evolución experimentada en el número de HOSTS conectados a Internet, conjuntamente con la previsión esperada para el año 2005.

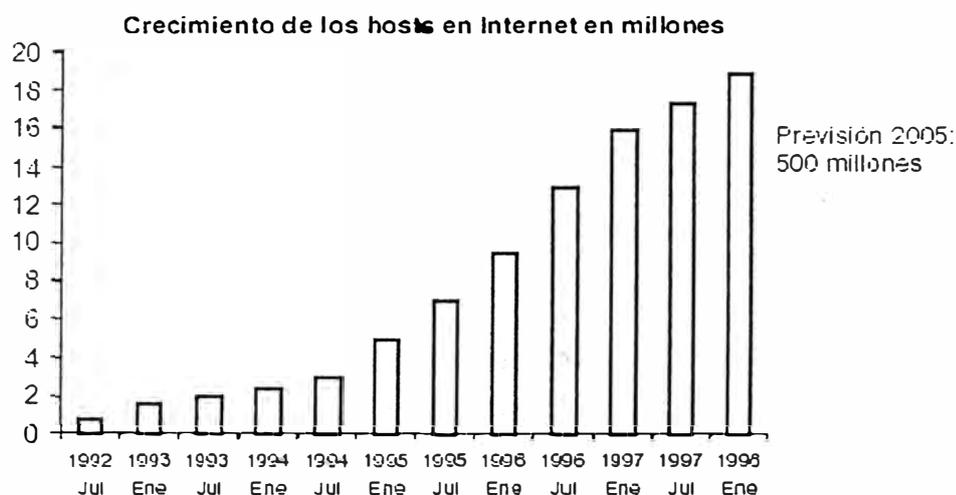


Figura 1.4: Evolución del número de HOSTS conectados a internet.

A la vista del crecimiento del acceso a Internet y de la evolución del mercado de las comunicaciones móviles es de esperar que la combinación de ambos en un acceso a Internet desde redes móviles pueda suponer un enorme mercado potencial de cara a los próximos años.

Si bien los sistemas celulares de segunda generación como GSM son capaces de ofrecer acceso a Internet, lo hacen en modo circuito, lo que presenta enormes limitaciones no sólo en términos de la velocidad de transmisión empleada sino también de la eficiencia en el uso de los recursos, pues este tipo de aplicaciones se caracterizan por generar la información a ráfagas con lo que durante buena parte del tiempo el circuito no es utilizado. Estas limitaciones redundan por un lado en una reducida capacidad para ofrecer este tipo de servicios, y por el otro en un precio de conexión para los usuarios mucho más elevado del que se puede llegar a ofrecer en una red fija.

En consecuencia, es deseable el diseño de nuevos sistemas que sean capaces de hacer frente a estas limitaciones con un uso más efectivo de los recursos, capaces de adaptarse a las nuevas características del tráfico mediante

técnicas de transmisión orientadas a paquetes, constituyendo éste uno de los retos al que los sistemas de tercera generación deberán hacer frente.

c) También hay que tener presente la creciente demanda en servicios multimedia de alta velocidad, tales como vídeo, audio, videoconferencia, juegos interactivos, acceso a bases de datos, transferencia de ficheros, ... que se ha venido experimentando en los últimos años, en parte motivada por las mayores facilidades del acceso a Internet a través de las redes fijas de banda ancha ADSL. La integración de todos estos servicios dentro del marco de una red móvil, a la vez que suponer un mercado de enorme atractivo para compañías operadoras y proveedores de servicio, plantea también una serie de retos en los sistemas de tercera generación, pues se deben gestionar los escasos recursos radioeléctricos adecuadamente para poder ofrecer dichos servicios bajo unos parámetros de calidad de servicio (retardo, velocidad de transmisión, ...) similares a los de la red fija pero haciendo frente a las peculiaridades de la transmisión por radio en entornos móviles.

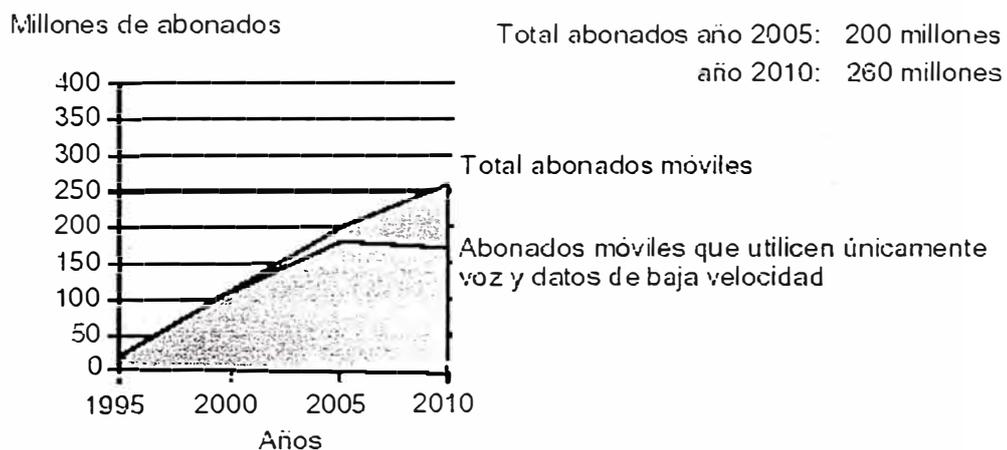


Figura I.5: Proyección de abonados móviles.

La Figura I.5, pone de manifiesto el mercado potencial que este tipo de servicios supone en el ámbito de las comunicaciones móviles, presentando las perspectivas de crecimiento del número de abonados totales a sistemas móviles en la Unión Europea y diferenciando aquellos que únicamente emplearán servicios de voz o de datos de baja velocidad. Como se observa, es a partir del año 2000 cuando empieza a existir un cierto porcentaje de usuarios con servicios de alta velocidad, con previsiones del 16 % para el año 2005 y del 30 % para el año 2010. Se prevé incluso que el número de abonados móviles con requerimientos únicamente de voz o baja velocidad llegue a decrecer en tanto que los usuarios abonados tenderán a aprovechar al completo las facilidades que puedan ofrecer los nuevos sistemas.

d) Por último, reseñar también el interés en lograr un sistema de comunicaciones móviles verdaderamente global que permita una movilidad universal con operación entre redes pertenecientes a países diferentes, llegando incluso a reunir bajo un sistema común las tres zonas geográficas de mayor influencia que son Europa, Estados Unidos y Japón. El ámbito de actuación de los sistemas de tercera generación se pretende mostrar gráficamente en la Figura I.6, como una forma de englobar bajo un único sistema los diferentes entornos existentes, en función de la cobertura ofrecida, desde los sistemas vía satélite hasta los más reducidos entornos de interiores, con objeto de permitir una movilidad universal de terminales capaces de soportar aplicaciones personalizadas de muy variada naturaleza.

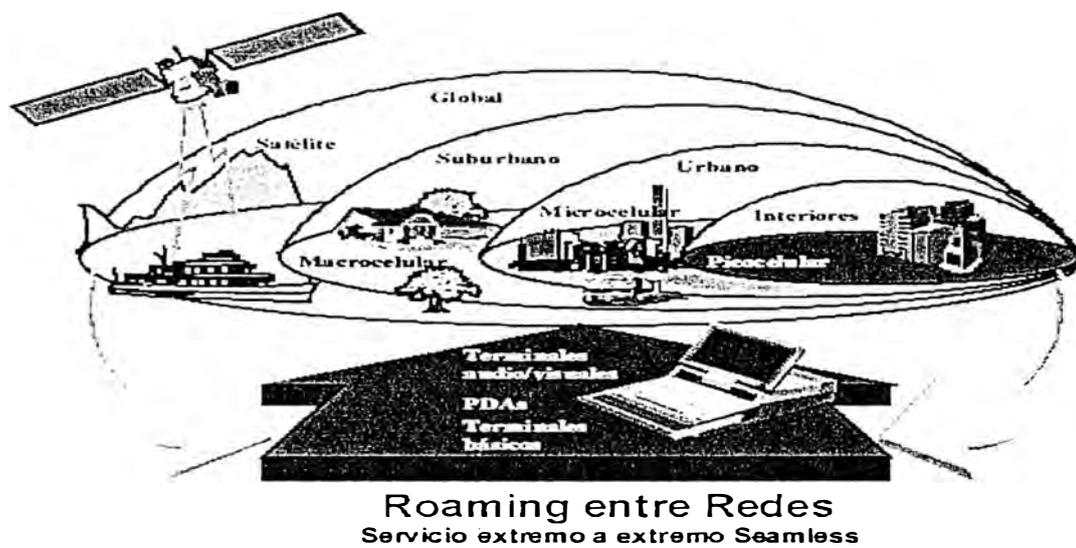


Figura I.6: Ámbito de actuación de los sistemas de Tercera Generación.

# CAPITULO I

## EXPOSICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

### 1.1 Comunicaciones Móviles de Tercera Generación (El escenario del servicio móvil multimedia).

El mercado móvil multimedia es inherente a los sistemas móviles de Tercera Generación y esto se manifiesta por los siguientes aspectos:

- Incremento de la movilidad de los individuos, tanto en los negocios como en su vida familiar, tratando siempre de hacer productivos los periodos de tiempos muertos.
- Utilización del terminal móvil con el mismo nivel de servicio y prestación que el fijo, propiciando el declive de la telefonía fija.
- Demanda de flexibilidad en la jornada laboral y la movilidad del puesto de trabajo.
- Creación de una demanda creciente de las soluciones móviles para las oficinas, cubriendo todo el abanico de las aplicaciones corporativas.



- Para las aplicaciones Internas (EMPLEADOS) de Procesos de Negocios Movilizados: Despacho de servicios en campo, Automatización de fuerza de venta, Gestión de relación con los clientes , Seguimiento de pedidos, panel ejecutivo, Autorización de compras, Automatización tiendas; y de Aplicación para la Productividad: Correo, Agenda, Intranet, Mensajería Instantánea, Aplicaciones de Oficina.

### La cadena de valor de los servicios multimedia

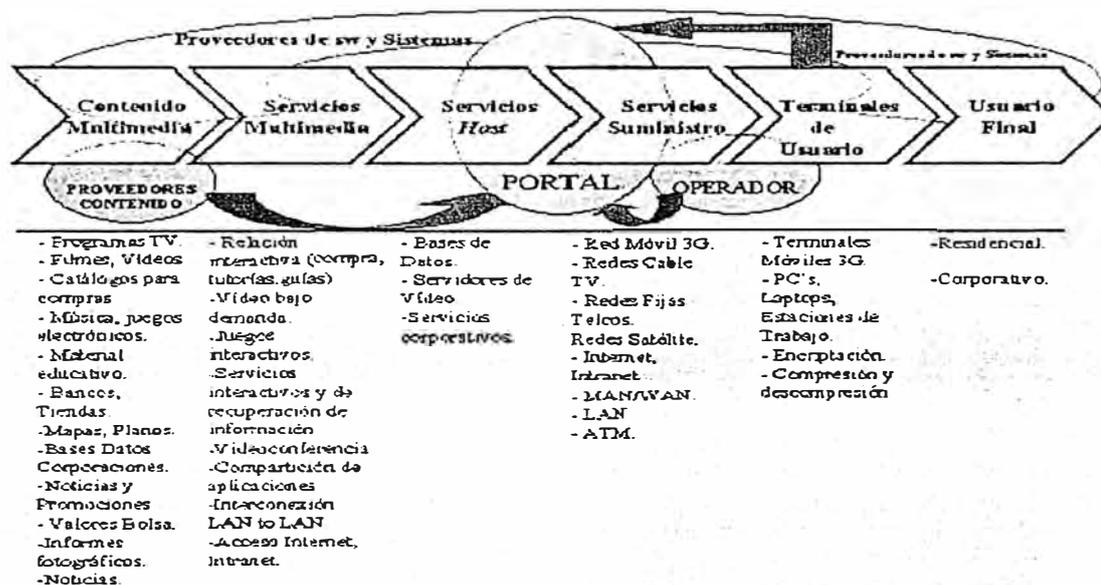


Figura 1.2: La cadena de valor de los servicios multimedia.

En la figura 1.2, se muestra la cadena de valor de los servicios multimedia en relación a los proveedores de software y sistemas y su llegada al usuario, indicando en la parte inferior sus diversas representaciones. Podemos resumir que el objetivo de los sistemas móviles de Tercera Generación se basa en los siguientes aspectos:

- Voz y servicios suplementarios.
- SMS (Servicio de mensajería).
- Soporte para multimedia.

- Acceso a redes IP y sus aplicaciones.
- Uso simultáneo de servicios.
- Velocidad de transmisión de datos hasta 2 Mbps.
- VHE: Virtual Home Environment.
  - Creación de servicios con operadores de redes y por terceros.
  - Independencia de los servicios frente al lugar y la red desde la que accede el móvil (movilidad de servicios).
- Eficiencia de operación y despliegue
  - Interfaces abiertas.
  - Reducción de costes.
  - Herramientas mejoradas de gestión de red y subscriptores.

## **1.2 Procesos de Estandarización de los Sistemas de Tercera Generación.**

Como resultado del conjunto de demandas planteadas, el diseño de los sistemas de tercera generación se aborda desde la perspectiva de los siguientes requerimientos:

- Velocidades de transmisión de hasta 2 Mb/s.
- Velocidades variables bajo demanda en función de las características de cada servicio.
- Capacidad de multiplexado de servicios con diferentes requerimientos de calidad dentro de una misma conexión, como por ejemplo voz, vídeo o transferencia de datos en modo paquete (correo electrónico, transferencia de ficheros, etc.).
- Capacidad de soportar un amplio abanico de requerimientos de retardo, para acomodar desde servicios en tiempo real hasta servicios de datos de tipo best effort (sin calidad de servicio garantizada).

- Capacidad de soportar requerimientos de calidad desde un 10% de tasa de error de trama hasta un  $10^{-6}$  de tasa de error de bit.
- Coexistencia de sistemas de segunda y tercera generación y posibilidad de efectuar Handover entre sistemas diferentes.
- Soporte de tráfico asimétrico entre los enlaces ascendente y descendente, como sería el caso habitual de la navegación por Internet.
- Alta eficiencia espectral
- Coexistencia de los modos de operación FDD y TDD.

El concepto de universalidad en los sistemas de tercera generación no puede ser entendido sin la existencia de una banda de frecuencias radio común a nivel mundial. Para ello, la WARC (World Administrative Radio Conference) dispuso de 230 MHz en la banda de los 2 GHz (1885-2025 MHz y 2110-2200 MHz) para uso mundial en el interfaz aire de IMT-2000 (International Mobile telecommunications-2000), incluyendo tanto la componente terrestre como las comunicaciones móviles por satélite (MSS, Mobile Satellite Service), tal y como se presenta en la Figura 1.3. Si bien esta banda es común tanto para Europa como para los países asiáticos como China o Japón, no ocurre lo mismo en Estados Unidos, donde dicha banda ya había sido asignada a algunos operadores de sistemas de segunda generación PCS (Personal Communications Systems), y no se ha dispuesto de más espectro para los sistemas de tercera generación, por lo que la solución planteada por el momento ha sido la de reutilizar la banda de PCS para IMT-2000, de donde surge la cuestión de cómo armonizar los servicios IMT-2000 entre Estados Unidos y el resto de regiones. Análogamente, otro aspecto diferencial en la asignación ocurre en Europa y Japón donde la totalidad de la banda no será empleada por IMT-2000 sino que la parte de las frecuencias más bajas se mantiene ocupada por los

sistemas DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) y PHS , respectivamente.

ERICSSON ≡

## Frecuencias para IMT-2000

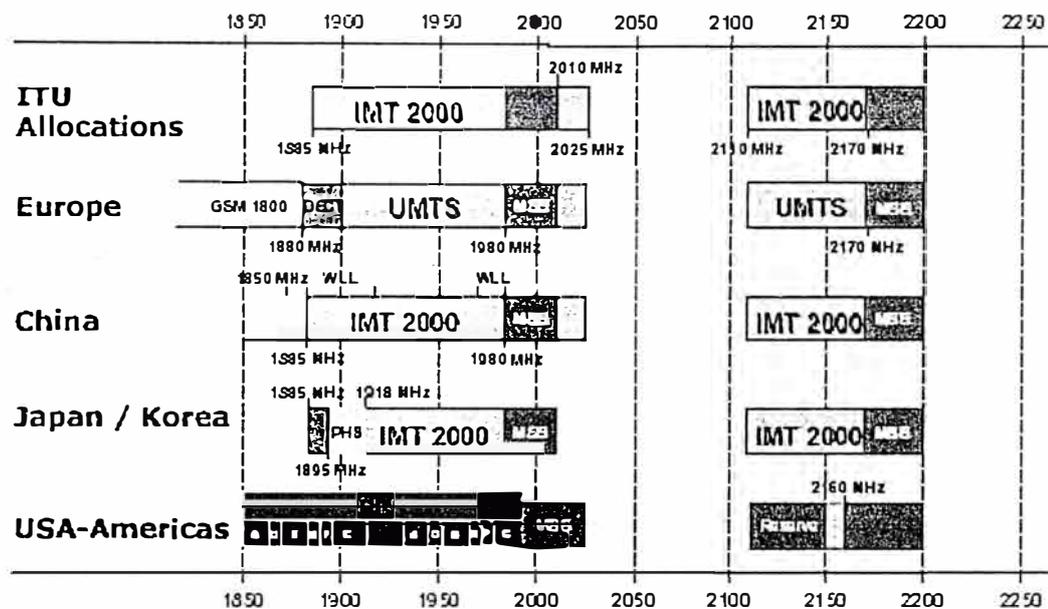


Figura 1.3: Frecuencias para IMT-2000.

En relación a Europa, la banda total asignada a UMTS se subdivide en dos bandas pareadas, 1920 a 1980 MHz y 2110 a 2170 MHz, destinadas al modo de operación FDD para los enlaces ascendente y descendente, respectivamente, y dos bandas no pareadas, 1900 a 1920 MHz y 2020 a 2025 MHz, destinadas al modo de operación TDD.

Al margen de la banda de frecuencias, otro de los aspectos importantes a armonizar en el desarrollo de los sistemas de tercera generación fue la decisión sobre la tecnología de acceso radio más apropiada para ser utilizada. Bajo este

prisma, el proceso de selección de dicha tecnología se realizó en una fase inicial por separado en las diferentes regiones durante los años 1997 y 1998.

ERICSSON ≡

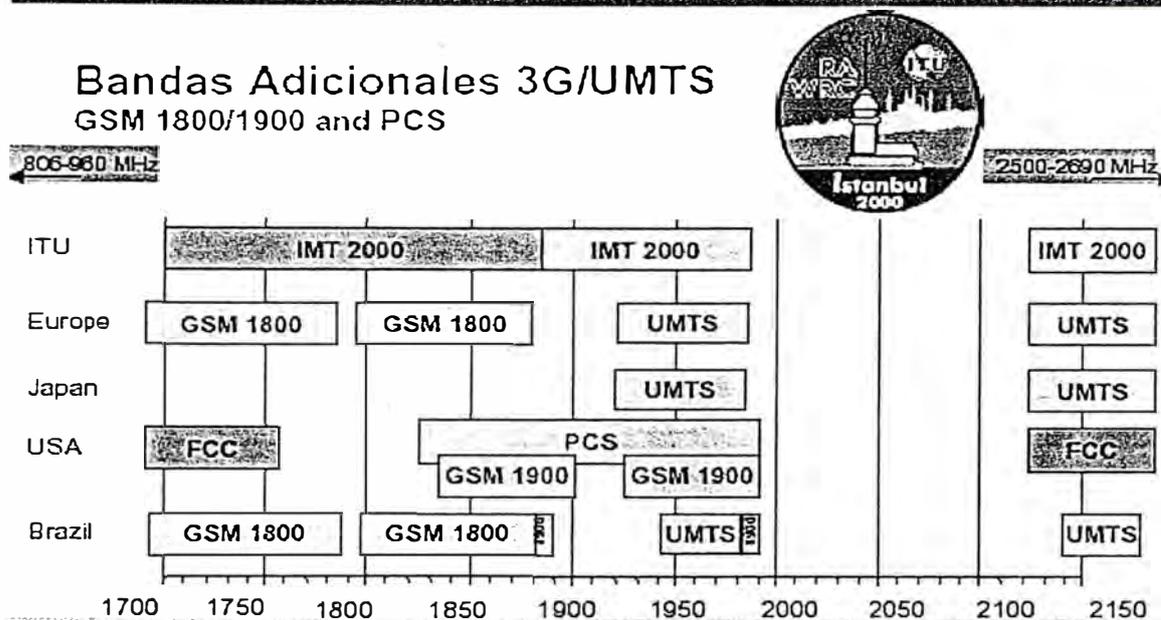


Figura 1.4: Bandas Adicionales 3G/UMTS

Por estas fechas, en Europa ya había existido un largo período de investigación iniciado en 1988 con programas como RACE I (Research of Advanced Communication Technologies in Europe), seguido de RACE II, donde se desarrollaron los interfaces aire CODIT (Code División Testbed) basado en la técnica de acceso múltiple CDMA y ATDMA (Advanced TDMA Mobile Access), basado en TDMA. A finales de 1995, se inició el programa ACTS (Advanced Communication Technologies) dentro del cual el proyecto FRAMES (Future Radio Wideband Múltiple Access System), con participación de las principales compañías del sector de las comunicaciones móviles, perseguía ya la definición de una propuesta de interfaz para UMTS. Como resultado, se plantearon a ETSI las propuestas Wideband CDMA (WCDMA) y Wideband TDMA (WTDMA).

Por último, también es necesario tener presente el proceso de desarrollo de la parte fija de la red (core network). En este sentido, aparecen tres soluciones para la interconexión de los interfaces radio desarrollados. Las dos primeras se basan en una evolución de las redes ya existentes de los sistemas de segunda generación, como sería el caso de GSM o de las redes IS-41 para Estados Unidos, lo que sin duda puede facilitar enormemente a los operadores la implantación de los sistemas de tercera generación. La tercera alternativa se plantea para los operadores como algo más a largo plazo y consistiría en una arquitectura de red nueva basada totalmente en el protocolo IP (Internet Protocol), orientada a tráfico de paquetes.

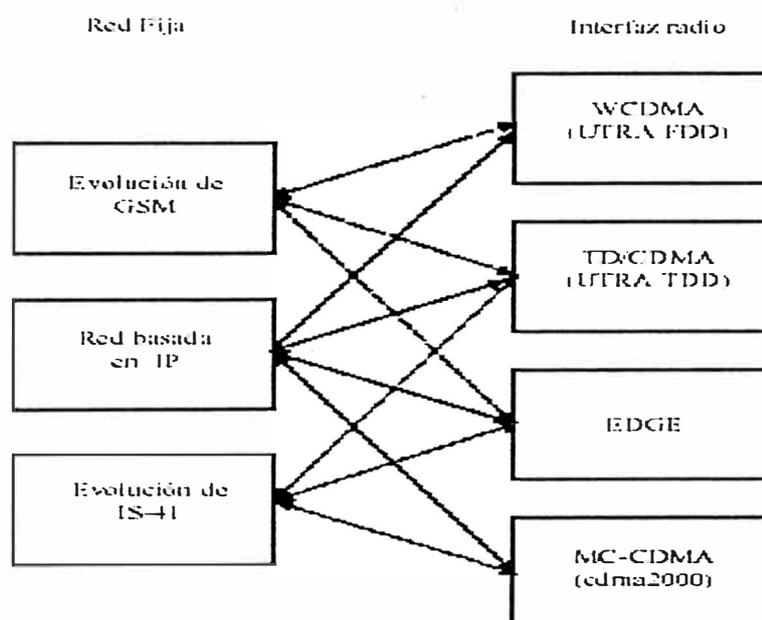


Figura 1.5: Posibilidades de combinación de redes entre operadoras.

Así, teniendo en cuenta las alternativas citadas para el interfaz radio y para la red fija en los sistemas de tercera generación, la figura 1.5, muestra los posibles combinaciones de redes que serán empleadas por los operadores. Con objeto de mantener la movilidad global entre redes con el uso de terminales multimodo capaces de trabajar con diferentes interfaces radio, se hace precisa la definición de

funciones de interconexión (IWF, Interworking Function) entre las diferentes redes existentes.

### **1.3 Nuevos servicios y aplicaciones**

Sin lugar a dudas no podría entenderse el desarrollo de los sistemas de tercera generación sin la inclusión de toda una nueva gama de servicios asociados a las mayores velocidades de transmisión que pueden lograrse gracias a la mayor flexibilidad del nuevo interfaz radio. Así, aunque posiblemente serán en los primeros años de UMTS las aplicaciones de voz las que todavía predominen como servicio mayoritario, se prevé en el futuro la progresiva introducción de nuevos servicios orientados a la transmisión de datos y a las aplicaciones multimedia, cuyos requerimientos de calidad serán en general muy diferentes de los asociados a la voz, y para los que deberán ser definidos mecanismos de gestión de recursos eficientes que tengan en cuenta las peculiaridades del tráfico.

Bajo esta perspectiva, en UMTS se consideran cuatro clases de servicios diferentes, en función del grado de tolerancia al retardo de cada una:

a.- Servicios conversacionales:

Requieren del envío de información en tiempo real extremo a extremo con tráfico de características bastante simétricas, por lo que suponen requerimientos muy estrictos de retardo, en general impuestos por las propias limitaciones de la percepción humana.

Dentro de este tipo de servicios destacarían las aplicaciones siguientes:

- voz: para este servicio se prevé emplear una técnica AMR (Adaptive Multi-rate) para la codificación de la señal vocal con múltiples velocidades entre 4.75 kb/s y 12.2 kb/s. Se pretenden explotar las posibilidades de reducción de interferencias en

CDMA proporcionadas por la transmisión discontinua, evitando la transmisión durante los períodos de silencio mediante el uso de detectores de actividad.

- videotelefonía: corresponde a la transmisión simultánea de voz e imágenes a lo largo de una conversación, precisando de unos requerimientos de tasa de error más reducida, debido a la compresión de la señal de vídeo, que en el caso del servicio básico de voz. Para ofrecer este servicio en modo circuito se ha definido la utilización de la recomendación ITU-T Rec. H.324M, mientras que en modo paquete se están barajando dos alternativas como son ITU-T Rec. H.323 e IETF SIP.

- videojuegos: intercambio de información de vídeo, datos e incluso audio entre dos extremos asociada a juegos de ordenador, con estrictos requerimientos de retardo y de tasa de error.

#### b.- Servicios de flujo (Streaming):

A diferencia de los conversacionales, este tipo de servicios plantea típicamente la descarga de flujos de información en dirección hacia el usuario, existiendo por lo tanto un grado de asimetría muy elevado. Si bien en este caso las restricciones de retardo extremo a, extremo son relajadas, sí que es preciso preservar las variaciones en el retardo de la información recibida para que el usuario la perciba como un flujo continuo idéntico al generado en el extremo emisor.

Dentro de este tipo de servicio se englobarían las aplicaciones de descarga de tráfico multimedia a través de Internet, tales como el vídeo bajo demanda, los vídeo-clips, las videoconferencias,

#### c.- Servicios interactivos:

En este tipo de servicios se requiere de un grado de interacción entre el usuario y el equipo situado al otro extremo de la conexión para la obtención de información ubicada en este extremo, aunque sin llegar a una situación de tipo conversacional. Por consiguiente, existirá un cierto límite en el máximo retardo

tolerado para la información, que dependerá de cada aplicación en concreto, y además se requerirá de un elevado grado de integridad en la información recibida.

Son servicios que en general presentan una fuerte asimetría pues mientras que el usuario de un extremo únicamente suele enviar pequeños comandos, éstos desencadenan en el extremo remoto la descarga de informaciones de mucho mayor volumen.

Entre este tipo de servicios destacan, por ejemplo, el acceso a bases de datos, la navegación WWW, la toma de medidas a distancia o los juegos interactivos de ordenador a través de la red. Mención aparte merecen también los llamados servicios dependientes de la localización (Location-based services) a través de los cuales un terminal, en función de la posición que ocupa en la red tiene acceso a una serie de informaciones u otra, como por ejemplo disponibilidad de hoteles y restaurantes en una zona, mapas, ...

d.- Servicios en background:

Corresponden a aquellas aplicaciones en las que el destino no espera la información con un cierto retardo específico limitado, pues no se requiere de interactividad entre los dos extremos de la comunicación. En cualquier caso, sí que es preciso garantizar la integridad de la información transmitida.

En este tipo de servicios se englobarían la entrega de correos electrónicos, el envío de mensajes cortos SMS y también el acceso a bases de datos o la descarga de ficheros que no requieran de interactividad.

#### **1.4 Exposición de la problemática detectada.**

Dentro del marco planteado para los servicios y sistemas de tercera generación, uno de los aspectos clave a dilucidar es la técnica de conmutación a emplear. Si bien en algunos casos, estrategias basadas en conmutación de

circuitos pueden ser apropiadas, especialmente cuando la transferencia de información es continua, como ocurriría con los servicios conversacionales o los servicios de tipo streaming (fluidos), en muchos otros, donde la generación de tráfico presenta una naturaleza de por sí discontinua, que requiere del envío de ráfagas de información más o menos grandes separadas por períodos de inactividad, se tiene como consecuencia la necesidad de estrategias adecuadas de conmutación que resulten más apropiadas desde el punto de vista de un mejor aprovechamiento de los recursos de radio y de un menor tiempo de establecimiento de los enlaces teniendo en cuenta que ahora el mayor uso de los sistemas celulares de Tercera Generación no serían los servicios conversacionales sino los servicios multimedia que aseguren asimismo la calidad de la información transmitida.

## CAPITULO II

### PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCION A EMPLEAR

#### 2.1 Planteamiento de la solución.

El presente informe de suficiencia se propone solucionar la problemática detectada, con el estudio y desarrollo de nuevas técnicas de transmisión orientadas a paquetes, capaces de garantizar ciertos niveles de calidad de servicio sobre una técnica de acceso múltiple CDMA con los modos de duplexado FDD y TDD. Para abordar este objetivo, se partirá de la estructura en capas de la arquitectura de referencia OSI (Open System Interconnection) que subdivide un sistema de comunicaciones en un conjunto de funcionalidades asociadas a 7 niveles diferentes denominados como físico, enlace, red, transporte, sesión, presentación y aplicación. Si bien los 7 niveles están presentes en los dos extremos de la comunicación, es habitual que los elementos intermedios únicamente contengan desde el nivel físico hasta el nivel de red. En entornos de transmisión por radio en los que existen medios de transmisión compartidos, se suele plantear una subdivisión adicional del nivel de enlace en dos sub-capas denominadas como MAC (Medium Access Control) y LLC (Logical Link Control), siendo la primera la responsable de gestionar el acceso al medio de transmisión mientras que sobre la segunda recaen funcionalidades relacionadas con garantizar la integridad de la información transmitida mediante mecanismos de retransmisión. Así pues, partiendo de un nivel físico específico, como es el fijado por la técnica de acceso

empleada CDMA, si se desean gestionar los recursos en modo paquete para ofrecer unas ciertas garantías de calidad de servicio, es preciso desarrollar mecanismos asociados con el nivel MAC que deberán tener presentes las características del nivel LLC a efectos de las posibles retransmisiones que deban efectuarse. En concreto, para llevar a cabo este objetivo, el punto de partida ha sido la identificación de las funcionalidades específicas de gestión de la calidad de servicio que aparecen en el nivel MAC cuando se tiene en cuenta un entorno de transmisión por paquetes, en el que los usuarios únicamente dispondrán de recursos cuando lo requieran según sus requerimientos de tráfico, y que difieren de las habitualmente consideradas en un entorno basado en circuitos. Dichas funcionalidades son:

- **protocolo de acceso múltiple:** especifica el conjunto de reglas a seguir por parte de los terminales para lograr el acceso al sistema.

- **algoritmo de gestión de recursos:** a partir del conjunto de usuarios que han logrado el acceso a través del protocolo, es preciso efectuar una ordenación de las transmisiones en base a los recursos disponibles según los requerimientos de calidad a cumplir. Como resultado de este proceso se deberán determinar parámetros de la transmisión tales como la ganancia de procesado o el nivel de potencia a utilizar por cada usuario al cual se permita transmitir. En un contexto de tipo TDMA/FDMA este tipo de mecanismos se suelen limitar a repartir un cierto recurso temporalmente entre los usuarios, motivo por el que son denominados algoritmos de scheduling. Sin embargo, al considerarse un entorno CDMA, no basta con dicha distribución temporal sino que es preciso ir un poco más allá y arbitrar mecanismos para el control de la interferencia propia de la técnica de acceso empleada.

- **estrategias de asignación dinámica de canales (DCA, del inglés Dynamic Channel Allocation):** permiten dilucidar cual es el recurso más apropiado para efectuar las transmisiones. Estas estrategias únicamente aplican en entornos como TDD TD/CDMA en los que las condiciones de interferencia de cada ranura temporal pueden ser diferentes, pero no en un esquema puramente FDD CDMA, donde todos los códigos son indiferentes en términos de interferencia
- **control de admisión:** en base a la evaluación conjunta de las alternativas para cubrir cada una de las tres funcionalidades anteriores se definiría la capacidad máxima en lo que a número de usuarios que pueden aceptarse en el sistema se refiere, de donde surge esta nueva funcionalidad puramente de control responsable de garantizar que el número de usuarios no supere el máximo determinado.

Asimismo, en el ámbito de la estandarización, hasta el momento las diferentes propuestas realizadas han concentrado todos sus esfuerzos en lo que a la transmisión orientada a circuitos se refiere, sin explotar suficientemente toda la funcionalidad asociada a la transmisión orientada a paquetes, quizá en parte motivado por la presencia de redes fijas evolución de las existentes en los sistemas de segunda generación como GSM, basadas en transmisión de circuitos y por la mayor predominancia que los servicios en modo circuito pueden tener en las primeras fases de implantación de UMTS. Sin embargo, es de esperar que, a medida que se produzca la transición hacia los servicios orientados a la transmisión de datos y hacia redes fijas totalmente basadas en IP, las técnicas de transmisión por paquetes en el interfaz aire cobren una mayor fuerza por su mayor flexibilidad siempre que sean capaces de mantener los niveles de calidad de servicio establecidos para las diferentes aplicaciones.

## 2.2 Referencia de opciones alternativas.

ETSI (European Telecommunications Standards Institute), bajo el marco de IMT-2000, como se citaba anteriormente definió otros grupos para el estudio y evaluación de las propuestas planteadas, siendo estas las siguientes:

a) **Wideband TDMA:** Planteaba un esquema puramente TDMA con portadoras espaciadas 1.6 MHz para poder ofrecer servicios de alta velocidad, con el empleo de salto en frecuencia, aceptando duplexado FDD y TDD y con dos longitudes diferentes de ráfaga destinadas a cubrir servicios de alta y baja velocidad. La principal problemática de esta propuesta era precisamente la menor longitud de la ráfaga en el caso de baja velocidad, pues se podía traducir en una muy elevada potencia de pico o de lo contrario en una muy baja potencia media, lo que planteaba problemas de cobertura en servicios básicos como por ejemplo la voz.

b) **Wideband TDMA/CDMA:** Basada en una técnica híbrida TDMA/CDMA con espaciado entre portadoras de 1.6 MHz, haciendo uso de técnicas de reducción de la interferencia a través de la detección multiusuario entre ráfagas transmitidas simultáneamente en una misma ranura temporal (time slot) y aceptando duplexado FDD y TDD. El principal inconveniente radicaba en la complejidad asociada al receptor.

c) **OFDMA (Orthogonal Frequency División Múltiple Access):** Basada en tecnología OFDM consistente en distribuir la información entre diferentes portadoras ortogonales. El principal problema de esta propuesta era la transmisión en el enlace ascendente, con variaciones muy grandes de envolvente que daban lugar a problemas en el diseño de los amplificadores de potencia.

Tras un proceso de evaluación de las diferentes propuestas, ETSI decidió en Enero de 1998 seleccionar WCDMA como estándar para el modo de operación FDD en la banda pareada y WTDMA/CDMA para operación TDD en la banda no

pareada. Con respecto al Japón, ARIB (Association for Radio Industries and Businesses) evaluó tres tecnologías diferentes basadas en WCDMA, WTDMA y OFDMA, decidiendo en 1997 el uso de WCDMA tanto para los modos de operación FDD como TDD, lo que tuvo una cierta influencia en la elección posterior de ETSI.

El panorama se presentaba más complejo en Estados Unidos debido a la existencia de diferentes tecnologías de acceso entre los sistemas de segunda generación como TDMA en DAMPS o CDMA en IS-95, de modo que se intentó definir para cada uno de los sistemas existentes, un camino para la evolución hacia la tercera generación, traducándose en las siguientes propuestas a la ITU:

- a) **W-CDMA N/A** : Propuesta muy similar al WCDMA de ETSI y de ARIB.
- b) **UWC-136 (Universal Wireless Communication-136)**: Correspondiente a la evolución de D-AMPS hacia la tercera generación con una combinación de TDMA de banda estrecha y de banda ancha, esta última destinada a los servicios de 2 Mb/s.
- c) **cdma2000**: Resultado de la evolución de IS-95, manteniendo sus principios básicos de funcionamiento aunque con un ancho de banda superior. Para el enlace descendente se añade la opción de trabajo en modo multiportadora (Multi-carrier).
- d) **WIMS W-CDMA (Wireless multimedia and Messaging Services W-CDMA)**: Propuesta no derivada de ningún sistema de segunda generación previo, basada en un acceso CDMA con ganancia de procesamiento constante y empleando multicódigo para conseguir múltiples velocidades de transmisión.
- e) **WP-CDMA (Wideband Packet CDMA)**: Surge de la convergencia entre W-CDMA N/A y WIMS W-CDMA, añadiendo como característica fundamental la presencia de un canal común específico para la transmisión de paquetes en el enlace ascendente.

Dado que el panorama planteado estaba conduciendo hacia el desarrollo de diferentes tecnologías estandarizadas simultáneamente a nivel mundial, y con objeto de garantizar la compatibilidad de los equipos de unas regiones a otras, se decidió en 1998 la creación del denominado 3GPP (3rd Generation Partnership Project) a fin de unir esfuerzos a nivel global en la estandarización de los sistemas de tercera generación. Formaban parte de este consorcio, conjuntamente con fabricantes y operadores, los organismos encargados de la estandarización en las diferentes regiones, a saber, el ETSI de Europa, ARIB y TTC (Telecommunication Technology Committee) de Japón, TTA (Telecommunications Technology Association) de Corea y T1P1 de Estados Unidos, añadiéndose en 1999 CWTS (China Wireless Telecommunication Standard Group) de China. Dentro de 3GPP el trabajo quedó subdividido en cuatro grandes grupos (TSG: Technical Specification Group) responsables de la elaboración de las diferentes especificaciones técnicas:

- Radio Access Network TSG
- Core Network TSG
- Service and System Aspects TSG
- Terminals TSG

Fruto del trabajo de armonización llevado a cabo en el 3GPP durante el año 2000 se ha desarrollado la Release 99 de las especificaciones técnicas del interfaz radio UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access y rebautizado como Universal Terrestrial Radio Access) en sus modalidades FDD y TDD a partir de las diferentes propuestas de WCDMA y de TDMA/CDMA. En este sentido, uno de los aspectos más significativos a los que 3GPP ha tenido que hacer frente ha sido por ejemplo el cambio de la tasa de chips de los 4.096 Mc/s de la propuesta inicial para UTRA realizada por ETSI a una nueva tasa fijada en 3.84 Mc/s.

En tanto que 3GPP se ha preocupado hasta el momento de la especificación de los interfaces basados en WCDMA, la evolución de IS-95 hacia cdma2000 se ha mantenido en el denominado 3GPP2, con especial interés en el modo multiportadora.

Por otra parte, no hay que olvidar tampoco la evolución del sistema GSM hacia la tercera generación a través de su extensión (General Packet Radio System) para tráfico orientado a paquetes o EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) para llegar a soportar velocidades mayores de transmisión de hasta 500 kb/s empleando esquemas de modulación más sofisticados, aspectos que serán progresivamente añadidos a las líneas de trabajo del 3GPP.

## CAPITULO III

### TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE CDMA EN 3G

#### 3.1 Técnicas de acceso múltiple.

Las denominadas técnicas de acceso múltiple surgen de la necesidad de poder permitir a usuarios diferentes compartir un mismo medio físico de transmisión como el interfaz aire dentro del ámbito de las comunicaciones móviles. La idea básica que aparece en la definición de estas estrategias radica en la capacidad de separación que debe existir en el extremo receptor entre las señales provenientes de cada uno de los usuarios, para que puedan ser recuperadas de forma independiente y sin verse afectadas por las señales del resto. Dicho de otro modo, y matemáticamente hablando, es preciso que las señales transmitidas por los diferentes usuarios que comparten el mismo medio físico sean ortogonales entre sí, lo que garantiza su capacidad de separación.

La condición para que dos señales  $v(t)$  y  $w(t)$  sean ortogonales viene dada, en los dominios temporal y frecuencial, por:

$$\int v(t) w(t) dt = \int V(f) W^*(f) df = 0$$

De esta definición se desprende que siempre que no exista solapamiento a nivel frecuencial o a nivel temporal entre dos señales, éstas serán ortogonales entre sí, pues esto implicaría que el integrando constituido por el producto de las dos señales en el dominio frecuencial o temporal sería nulo.

A partir del concepto de ortogonalidad surgen tres técnicas básicas de acceso múltiple sobre las que se sustentan los diferentes sistemas de comunicaciones, y que son las que a continuación se detallan:

#### **A.- Acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA, del inglés Frequency División Múltiple Access)**

El principio de esta técnica de acceso múltiple consiste en ortogonalizar las señales en banda base por medio de su traslación a bandas frecuenciales diferentes del espectro radioeléctrico, permitiéndose que los diferentes usuarios transmitan simultáneamente. En recepción, para separar la señal de un usuario de las del resto, basta con sintonizarse con la frecuencia empleada por el transmisor deseado y filtrar la señal recibida teniendo en cuenta su ancho de banda ocupado.

En la Figura 3.1 se muestra una representación gráfica de cómo diferentes usuarios comparten el medio de transmisión haciendo uso de la técnica de acceso FDMA. Como puede apreciarse, en un sistema de comunicaciones que disponga de un ancho de banda total de  $B_T$  Hz, y para un ancho de banda de la señal de cada usuario de  $B_C$  Hz, se puede dar cabida a un total de  $K=B_T/B_C$  usuarios que transmiten simultáneamente. Cabe destacar la necesidad de que la separación entre las portadoras o frecuencias centrales de cada banda sea como mínimo igual al ancho de banda  $B_C$  de cada usuario, lo que garantiza la ortogonalidad entre todas las señales transmitidas.

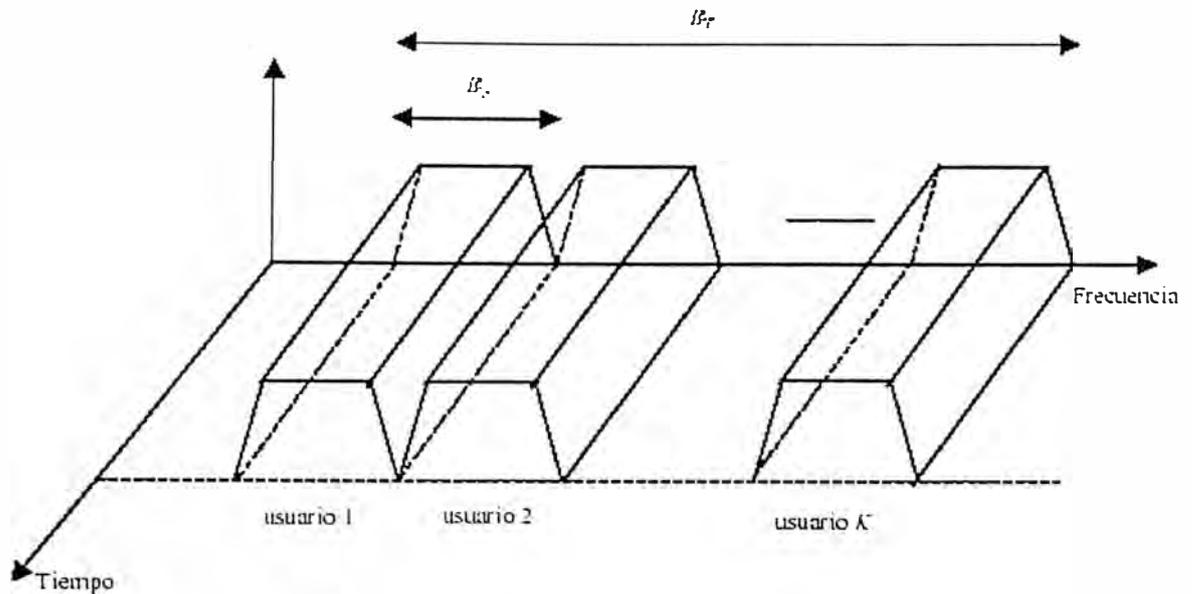


Figura 3.1: Técnica de acceso múltiple FDMA.

Esta técnica de acceso ha sido ampliamente utilizada por los diferentes sistemas de radiocomunicaciones y, de hecho, todavía hoy cualquier sistema que emplee el espectro radioeléctrico conserva una cierta componente FDMA como mínimo a través de la asignación de bandas diferentes de dicho espectro para diferentes sistemas. Respecto de su relación con los sistemas de comunicaciones móviles, esta técnica fue la empleada por los sistemas denominados de primera generación, tales como NMT o AMPS, basados en modulaciones analógicas.

#### **B.- Acceso múltiple por división en tiempo (TDMA, del inglés Time Division Multiple Access).**

A diferencia de la técnica FDMA, el acceso TDMA permite a diferentes usuarios compartir una misma banda frecuencial a través de restringir la transmisión de cada uno a un cierto intervalo temporal denominado ranura (en

inglés time slot). En consecuencia, en este caso la capacidad de separación entre señales en el receptor viene propiciada por la no existencia de solapamiento temporal. Esta técnica de acceso aparece ligada habitualmente a una estructura de tramas repetidas periódicamente y cada una formada por un número de ranuras temporales, con lo que a cada usuario se le permitiría transmitir una vez cada trama. En cualquier caso, nótese que esta estrategia obliga a disponer de mecanismos apropiados de sincronización para que cualquier usuario conozca sin ambigüedad posible cual es el intervalo en el que puede transmitir. Igualmente, debe evitarse la posibilidad de que las señales de usuarios diferentes pudieran llegar a solaparse en un mismo intervalo temporal por ejemplo debido a los diferentes tiempos de propagación de cada uno, lo que se puede conseguir mediante mecanismos como el avance temporal definido en GSM. La Figura 3.2 ilustra gráficamente cómo diferentes usuarios comparten el medio de transmisión según TDMA. Como puede observarse, para una trama de duración  $T_F$  s subdividida en ranuras temporales de duración  $T_S$  s, el número de usuarios a los que se podrá dar cabida en el sistema en este caso es de  $K=T_F/T_S$ , y cada vez que uno de ellos transmita hará uso de todo el ancho de banda asignado,  $B_T$ .

Tradicionalmente, los esquemas de multiplexación basados en TDMA se han empleado para comunicaciones alámbricas, tales como la estructura de tramas MIC 30 + 2 (Modulación por Impulsos Codificados) utilizada por ejemplo para el transporte de señales vocales entre centrales de conmutación. Dentro del ámbito de las comunicaciones móviles, este esquema se utiliza por ejemplo dentro de los sistemas de segunda generación como GSM, en combinación con el esquema FDMA. En particular, en el sistema GSM se emplea un acceso FDMA con la existencia de 125 bandas frecuenciales de 200 kHz cada una y un acceso TDMA en tanto que cada una de estas bandas presenta una estructura de tramas de 4.615

ms subdivididas en 8 ranuras temporales, lo que permite disponer de hasta 8 comunicaciones en cada portadora.

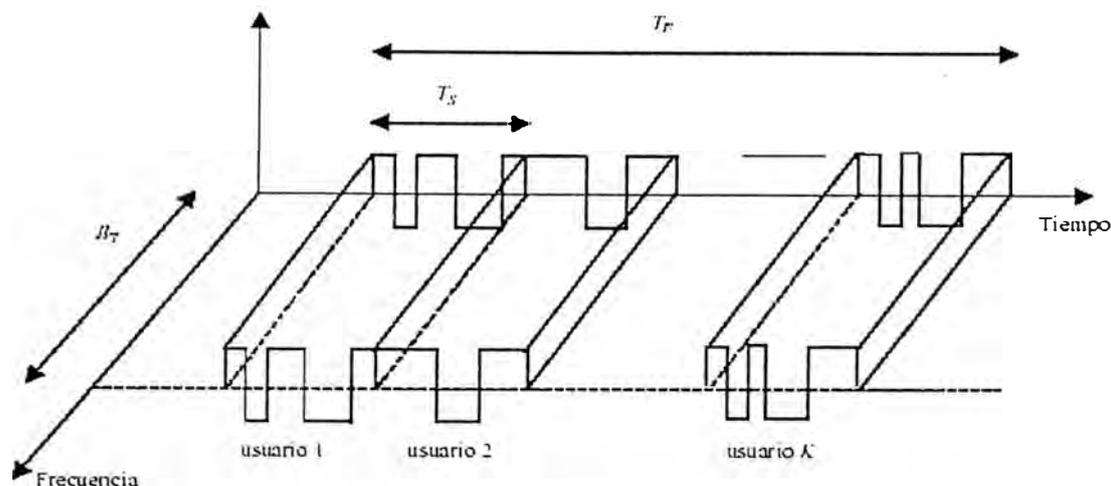


Figura 3.2: Técnica de acceso múltiple TDMA.

### C.- Acceso múltiple por división en código (CDMA, del inglés Code Division Multiple Access).

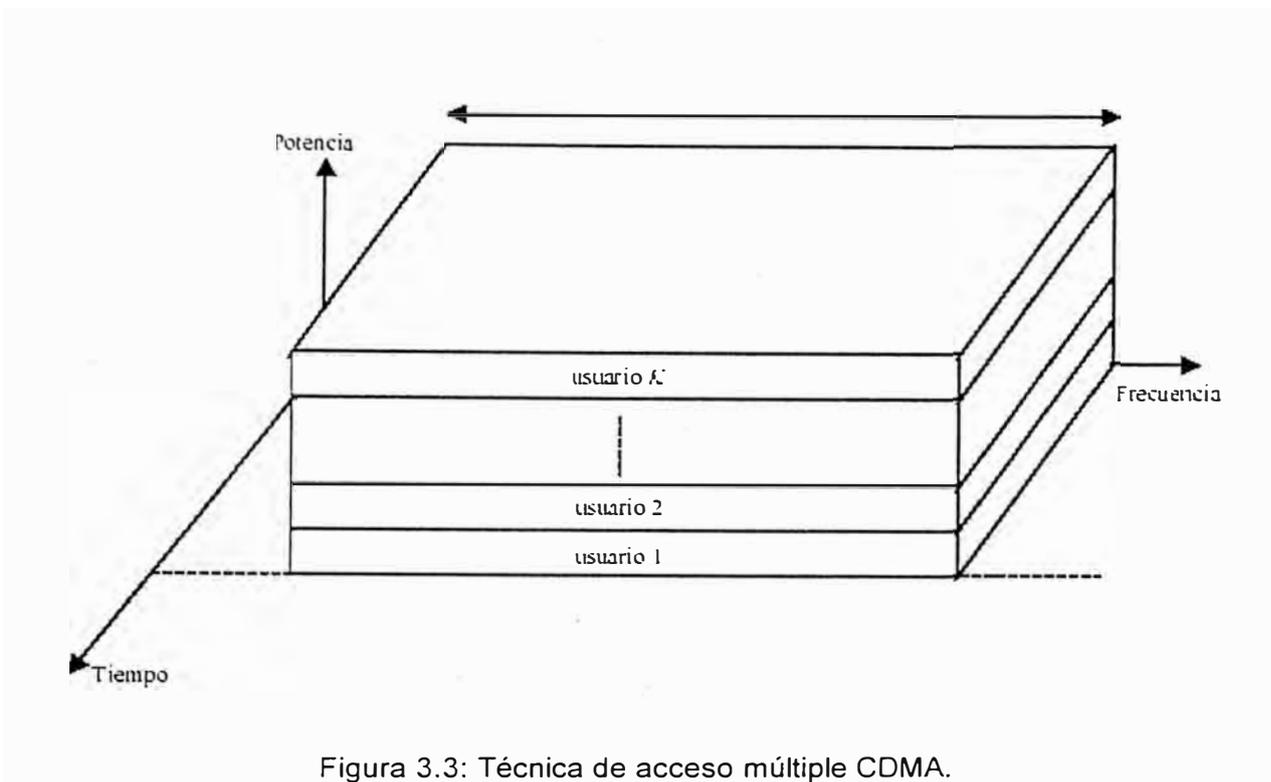
El modo de funcionamiento de este esquema de acceso consiste en ortogonalizar las señales de los diferentes usuarios mediante el empleo de secuencias código ortogonales entre sí, lo que permite a dichos usuarios el transmitir simultáneamente y emplear a su vez la misma banda frecuencial. En recepción, basta con conocer la secuencia código de cada usuario para conseguir separar cada una de las señales.

En la Figura 3.3 se muestra gráficamente cómo diferentes usuarios comparten el medio de transmisión según la técnica CDMA, y como puede apreciarse los usuarios emplean al mismo tiempo todo el ancho de banda disponible. En este caso, la limitación respecto del número máximo de usuarios que pueden tolerarse en el sistema no es tan clara como en los casos TDMA y FDMA, para los que existe un número fijo de canales disponible dado por el ancho de

banda de cada canal, el ancho de banda total o la duración de la trama y de la ranura temporal. Por el contrario, en CDMA, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cuando se hace uso para separar las señales de los diferentes usuarios de códigos totalmente ortogonales entre sí, se dispone en general de familias de códigos bastante reducidas. De esta forma, puede existir una limitación en el número de usuarios motivada por el número total de códigos disponible.
- Sin embargo, muy habitualmente, y con objeto de disponer de un número de secuencias código mayor, no se emplean códigos que sean totalmente ortogonales sino que es suficiente con que tengan unas buenas propiedades de correlación. En este caso, las señales de los diferentes usuarios se pueden separar pero se mantiene un cierto nivel de interferencia residual tanto mayor como mayor sea el número de usuarios transmitiendo simultáneamente. Esto se traduce en una cierta tasa de error en la señal recuperada dependiente de los usuarios existentes en el sistema, por lo que el límite máximo de usuarios que pueden tolerarse dependerá directamente de la tasa de error que cada uno pueda tolerar. Así, no puede hablarse de un límite de capacidad rígido como en los casos TDMA y FDMA sino que existe una capacidad soft en tanto que se podrán aceptar más usuarios si sus requerimientos de tasa de error son más relajados.

En cualquier caso, esta última limitación no impide que, en ciertas circunstancias, especialmente dentro de la transmisión por paquetes, la limitación en cuanto a número de códigos, directamente traducida en número de receptores del sistema, también deba ser tomada en consideración, como se discutirá más adelante.



La técnica de acceso CDMA presenta su origen en las técnicas de espectro ensanchado que fueron desarrolladas en el ámbito militar como estrategia para proporcionar robustez frente a interferencias de banda estrecha y para llevar a cabo comunicaciones secretas gracias a la apariencia de ruido de las señales transmitidas. En los sistemas de comunicaciones móviles, ha sido utilizada ya en algunos sistemas de segunda generación, como IS-95 en Estados Unidos impulsado por la empresa Qualcomm Inc., pero son los sistemas de tercera generación los que harán un uso extensivo de este mecanismo, tal y como se plantea en las diferentes propuestas para UMTS. Por este motivo el presente informe de suficiencia tiene como objeto el presentar las principales características de esta técnica que será la asumida a lo largo de todo el trabajo.

### 3.2 Principios básicos de CDMA.

La técnica de acceso múltiple CDMA se engloba dentro de las denominadas técnicas de espectro ensanchado , basadas en distribuir la potencia de la señal a transmitir a lo largo de una banda frecuencial mucho más grande de la estrictamente necesaria, lo que se traduce en una densidad espectral de potencia que puede tomar valores inferiores incluso al ruido térmico. Esta característica propicia que las comunicaciones CDMA sean capaces de coexistir con otras transmisiones de banda estrecha sin verse afectadas por éstas.

Fundamentalmente existen dos técnicas para proporcionar el ensanchamiento espectral en CDMA, a saber:

- CDMA por Salto en Frecuencia (FH/CDMA, del inglés Frequency Hopping CDMA): consiste en efectuar la transmisión de la señal de información alternando la frecuencia portadora según una secuencia pseudoaleatoria de frecuencias diferentes conocida por el receptor. Esta característica dota a la transmisión de una diversidad inherente que permite que aun cuando la transmisión a una frecuencia pueda verse degradada por el canal no ocurra así para el resto de frecuencias. Uno de los inconvenientes que dificulta la puesta en práctica de esta estrategia radica en la necesidad de disponer de sintetizadores de frecuencias capaces de efectuar los cambios de frecuencia en tiempos muy inferiores al período de bit.
- CDMA por Secuencia Directa (DS/CDMA, del inglés Direct Sequence CDMA): en este caso el ensanchamiento espectral se produce por medio de la multiplicación de cada bit de información por una secuencia código diferente para cada usuario que presenta una variación mucho más rápida que la de la señal de información. En recepción basta con multiplicar nuevamente por la misma secuencia para devolver el espectro recibido a su forma original.

Dentro de las dos técnicas CDMA comentadas, es DS/CDMA la que constituye la base de funcionamiento de los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, y por lo tanto es la que se analizará en detalle a continuación.

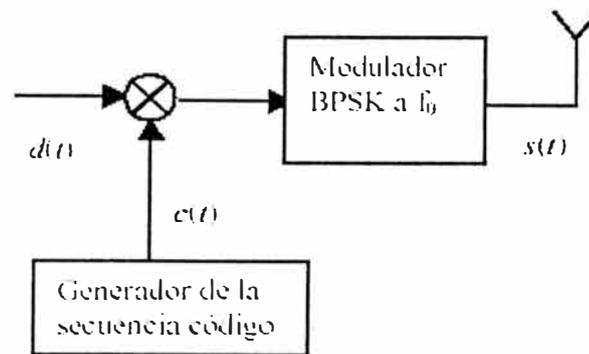


Figura 3.4: Transmisor DS/CDMA.

Considérese el esquema correspondiente a un transmisor DS/CDMA con modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying) como el que se muestra en la Figura 3.4. En la Figura 3.5 se muestra, igualmente, un ejemplo de evolución temporal de las diferentes señales involucradas. La señal de información a transmitir,  $d(t)$ , presenta un período de bit de duración  $T_b$ , esto es:

$$d(t) = A \sum_k b_k p(t - kT_b)$$

,donde los bits  $b_k$  se suponen codificados según  $+1, -1$ ,  $A$  es la amplitud que determinará la potencia transmitida y  $p(t)$  corresponde al pulso conformador.

De este modo, suponiendo la existencia de un pulso conformador rectangular, la densidad espectral de potencia es:

$$S_d(f) = A^2 T_b \frac{\text{sen}^2(\pi T_b f)}{(\pi T_b f)^2}$$

, que presenta un ancho de banda entre ceros de valor  $BW_d=2/T_b$

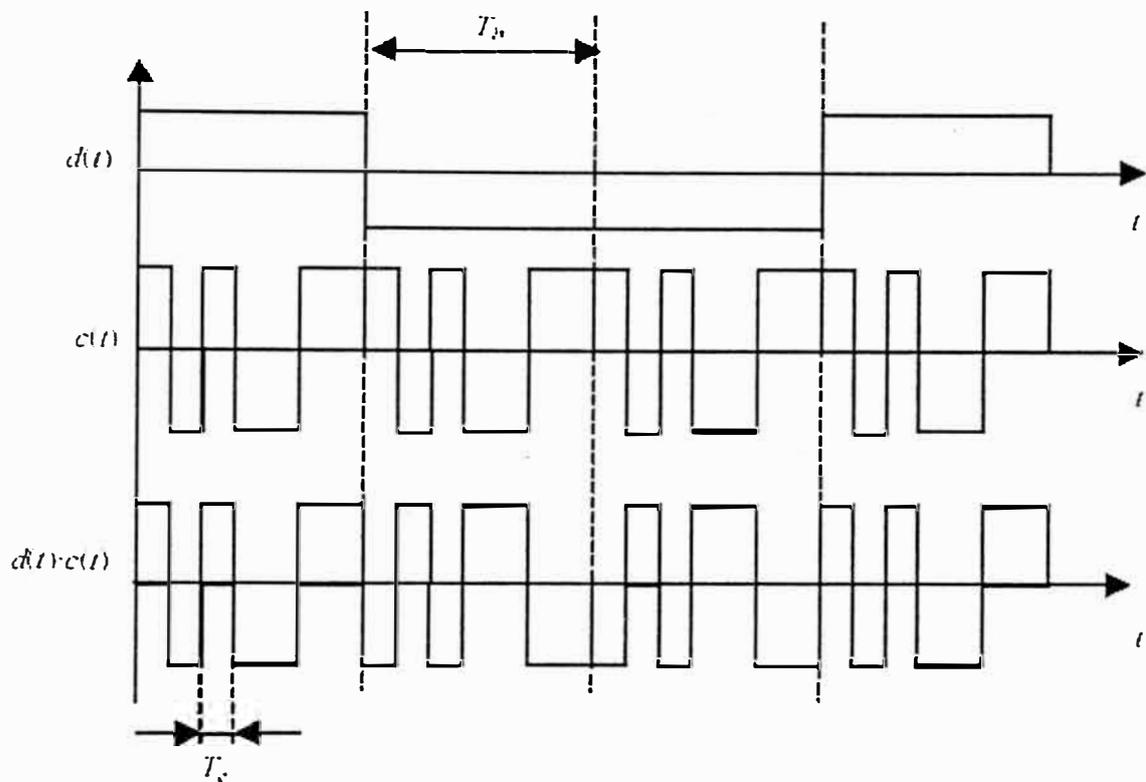


Figura 3.5: Evolución Temporal de una señal DS/CDMA.

La secuencia código utilizada  $c(t)$  está formada por  $N$  valores pseudoaleatorios denominados chips, cada uno de ellos de duración  $T_c$  (a modo de ejemplo, en la Figura 3.5 se muestra un caso con  $N=7$ ). Esta secuencia se repite periódicamente cada  $T_b$ , de modo que se cumple la relación  $N=T_b/T_c$ . La variación temporal de  $c(t)$  viene en consecuencia dada por:

$$c(t) = \sum_k \sum_{i=0}^{N-1} c_i p_c(t - iT_c - kT_b)$$

donde  $c_i$  son los valores +1 ó -1 de los chips y  $p_c(t)$  es un pulso conformador rectangular de duración  $T_c$ .

Así pues, la señal que finalmente se estará transmitiendo,  $s(t)$ , vendrá dada por:

$$s(t) = d(t)c(t) \cos(2\pi f_0 t) = A \sum_k b_k \sum_{i=0}^{N-1} c_i p_c(t - iT_c - kT_b) \cos(2\pi f_0 t)$$

Como se puede apreciar, presenta una variación temporal que viene fundamentalmente gobernada por el período de chip  $p_c(t)$ , tal y como se observa en el ejemplo de la Figura 3.5.

Teniendo en cuenta la naturaleza pseudoaleatoria de la secuencia de chips, la densidad espectral de potencia de la señal paso bajo  $d(t) \cdot c(t)$  será:

$$S_{d \cdot c}(f) = A^2 T_c \frac{\text{sen}^2(\pi T_c f)}{(\pi T_c f)^2} = \frac{A^2 T_b}{N} \frac{\text{sen}^2\left(\pi \frac{T_b}{N} f\right)}{\left(\pi \frac{T_b}{N} f\right)^2}$$

,que presenta un ancho de banda entre ceros de valor  $BW_s = 2/T_c = 2N/T_b$

En consecuencia, la banda ocupada por la señal  $s(t)$  se ha ensanchado en un factor  $N = T_b/T_c$ , respecto de la banda ocupada por la señal de información  $d(t)$  a la vez que la densidad espectral de potencia se ha reducido en un factor  $N$ , manteniéndose igual la potencia total transmitida, tal y como se representa en la Figura 3.6 para un caso con  $N=7$ . Esto deja entrever que la relación  $N$ , esto es, el número de chips existentes en cada bit transmitido, es uno de los parámetros más importantes de un sistema DS/CDMA y se conoce con el nombre de ganancia de procesamiento, en tanto que, cuanto mayor sea esta relación, mayor es la robustez del sistema frente a la existencia de interferencias.

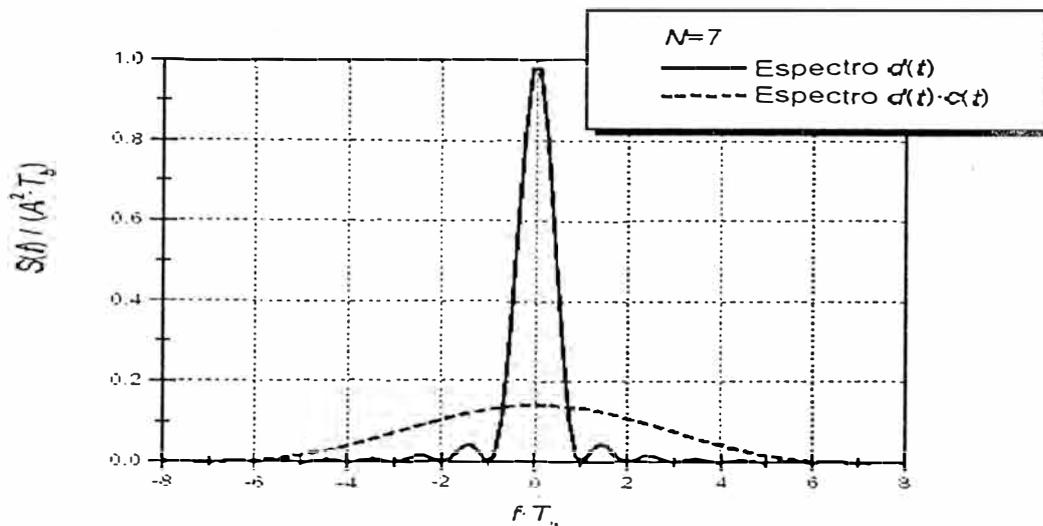


Figura 3.6: Ensanchamiento espectral en DS/CDMA.

En la figura 3.7 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al receptor DS/CDMA. Esencialmente está constituido por un generador local de la secuencia código  $c(t)$  que debe ser idéntica a la empleada en transmisión, y por un desmodulador BPSK.

De acuerdo con el proceso de recepción, asumiendo que se recibiera una señal  $s(t)$  idéntica a la transmitida, si la secuencia código  $c(t)$  generada localmente en recepción y la secuencia código recibida en la señal  $s(t)$  estuvieran perfectamente sincronizadas a nivel de chip, la señal a la salida del primer multiplicador sería:

$$r(t) = s(t) \cdot c(t) = d(t)c(t)c(t)\cos(2\pi f_0 t) = d(t)\cos(2\pi f_0 t)$$

puesto que el producto de la secuencia código  $c(t)$  consigo misma es 1. Nótese como la señal  $r(t)$  presentará una densidad espectral con ancho de banda entre ceros  $2/T_b$  igual al de la señal original  $d(t)$ , con lo que la multiplicación de  $s(t)$  por  $c(t)$  en esencia efectúa el proceso inverso al ensanchado que se llevó a cabo en

emisión. En consecuencia, tras el proceso de desmodulación, integrando la señal en períodos de  $T_b$  se obtendrán los diferentes bits enviados  $b_k$  a partir de:

$$x_k = \frac{1}{2} T_b \cdot b_k$$

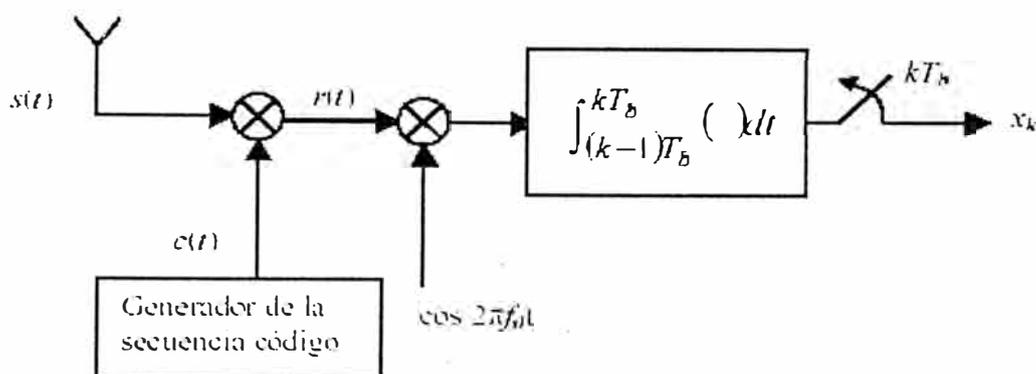


Figura 3.7: Receptor DS/CDMA.

Supóngase ahora que, conjuntamente con la señal de usuario deseada  $s(t)$ , se recibe la señal interferente de otro usuario codificada con otra secuencia  $c_i(t)$  y con igual potencia que la del usuario útil. En caso de que los códigos empleados fueran perfectamente ortogonales, la multiplicación chip a chip de las secuencias  $c(t) \cdot c_i(t)$  valdría 0 lo que supondría la cancelación total de la señal proveniente del usuario interferente. Por el contrario, en el caso, más habitual, de que los códigos no fueran ortogonales sino que simplemente presentaran una baja correlación cruzada, el producto  $c(t) \cdot c_i(t)$  no sería 0 sino que daría lugar a una señal todavía de espectro ensanchado que presentaría una densidad espectral por debajo de la de la señal útil en un factor del orden de la ganancia de procesamiento. Así, igualmente se recuperarían los bits del usuario útil pero con una cierta probabilidad de error tanto menor como mayor sea la ganancia de procesamiento empleada.

Igualmente, supóngase ahora que conjuntamente con la señal del usuario deseada se recibe una cierta señal interferente  $i(t)$  de banda estrecha y de potencia  $P_I$ , con una fase aleatoria  $\varphi_I$  uniformemente distribuida entre 0 y  $2\pi$ :

$$i(t) = \sqrt{2P_I} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_I)$$

Al multiplicar en el receptor la señal interferente  $i(t)$  por la secuencia código y por la portadora local se tendrá, prescindiendo del término a frecuencia  $2f_0$ , que será filtrado por el integrador:

$$i'(t) = i(t) \cdot c(t) \cos(2\pi f_0 t) = \sqrt{\frac{P_I}{2}} \cos \varphi_I \sum_k \sum_{i=0}^{N-1} c_i p_c(t - iT_c - kT_b)$$

,que no es más que una señal de espectro ensanchado. Es fácil demostrar que, tras el proceso de integración en un período  $T_b$ , la señal interferente resultante presenta una potencia igual a:

$$P_{int} = \frac{P_I T_c T_b}{4}$$

De donde la relación  $(E_b/N_0)$  (energía de bit respecto a densidad espectral de la señal interferente) a la salida del desmodulador se relacionará con la relación señal a interferente a la entrada del receptor  $(C/I_i)$  a través de:

$$\left( \frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{\frac{A^2}{2} T_b}{P_I T_c} = \left( \frac{C}{I} \right)_i N$$

Por lo tanto, por el hecho de haber ensanchado la interferencia de banda estrecha en el receptor, se ha logrado una mejora a la salida en un factor igual a la ganancia de procesamiento  $N$  respecto de la relación señal a interferente a la entrada,

lo que pone de manifiesto la importancia de este parámetro como medida de la robustez frente a interferencias del esquema DS/CDMA.

### 3.3 Características fundamentales de un sistema DS/CDMA.

Una vez descritos los principios básicos de funcionamiento asociados a la técnica de acceso múltiple DS/CDMA a continuación se detallan algunos de los aspectos fundamentales que lo diferencian del resto de técnicas de acceso.

#### 3.3.1. Secuencias código.

##### (Caracterización de las secuencias código en CDMA)

Quizá uno de los elementos clave para el buen funcionamiento del esquema DS/CDMA consiste en la elección de las secuencias código pseudoaleatorias que permitirán distinguir las señales provenientes de los diferentes usuarios. En particular, ya se ha comentado que la situación ideal consistiría en emplear secuencias que fueran totalmente ortogonales entre sí, lo que garantizaría la total capacidad de separación de las señales involucradas. A estos efectos, se considera que dos secuencias  $c_1(n)$  y  $c_2(n)$  de duración  $N$  chips son ortogonales entre sí si cumplen la relación:

$$\sum_{i=0}^{N-1} c_1(i) \cdot c_2(i) = 0$$

Si bien existen familias de secuencias totalmente ortogonales entre sí, como los códigos de Walsh o las secuencias de Hadamard, los problemas principales que presentan son dos: por un lado la existencia de un número reducido de secuencias en la familia, y por el otro el hecho de que la ortogonalidad únicamente se garantiza si las secuencias están perfectamente alineadas a nivel de chip, pero no si alguna de ellas está desplazada del resto, lo que puede degradar las prestaciones

enormemente. Nótese, por otro lado, que esta situación será bastante habitual en transmisiones originadas en terminales móviles, debido a los diferentes tiempos de propagación involucrados.

Así pues, dentro de este contexto, surge la necesidad de definir secuencias código que, aun no siendo totalmente ortogonales entre sí, presenten buenas propiedades de capacidad de separación de las señales a la vez que garanticen la existencia de un número elevado de secuencias en cada familia. En particular, a la hora de seleccionar una familia de secuencias código para ser empleadas con DS/CDMA, surgen tres requerimientos importantes a tener en cuenta:

(a) Cada secuencia ha de ser fácilmente distinguible de cualquier versión desplazada temporalmente de sí misma. Esta propiedad permitirá por un lado facilitar la sincronización de la secuencia código recibida con la secuencia generada localmente en el receptor y por el otro reducir la interferencia de las diferentes réplicas de la señal recibidas debido a la propagación multicamino característica del entorno móvil.

(b) Cada secuencia ha de ser fácilmente distinguible del resto de secuencias código de la misma familia, con independencia del desplazamiento temporal entre ellas. Esta propiedad permitirá la capacidad de separación de las señales de usuarios diferentes minimizando su interferencia mutua.

(c) El número de secuencias de la familia que cumplan las dos propiedades anteriores ha de ser suficientemente elevado como para poder dar cabida a un buen número de usuarios en el sistema.

Con objeto de evaluar cuantitativamente las propiedades anteriores citadas de forma cualitativa es preciso recurrir a la definición de una serie de funciones de correlación que permiten cuantificar el grado de similitud que existe entre dos

secuencias de chips, y que servirán para presentar, posteriormente, algunas familias de secuencias código utilizadas en DS/CDMA.

### 3.3.2 Control de potencia.

Una de las consideraciones efectuadas en el apartado anterior para el cálculo de la probabilidad de error de bit ha sido el suponer que la amplitud de las diferentes señales a la entrada del receptor era la misma, siendo el control de potencia el responsable de garantizarlo.

Es precisamente este mecanismo uno de los aspectos fundamentales de todo sistema DS/CDMA pues al ser una técnica de acceso limitada por interferencias en la que las señales comparten tiempo y banda, los desajustes en la potencia recibida por parte de los diferentes usuarios, ubicados a diferentes distancias de su estación base, pueden degradar enormemente las prestaciones ofrecidas. Este es el conocido como efecto cerca-lejos, del inglés near-fart effect, por el que, a pesar del ensanchamiento espectral producido, que reduce la densidad espectral de potencia de cada usuario, un usuario ubicado cerca de la estación base puede enmascarar la señal de usuarios más alejados tal y como se ilustra en la Figura 3.8.

Existen esencialmente dos posibilidades para llevar a cabo el control de potencia:

- Control de potencia en lazo abierto: consiste en que los terminales ajusten por sí mismos el nivel de potencia transmitido en función de la medida de potencia que efectúan de una cierta señal piloto enviada por la base en el enlace descendente con una potencia conocida. La principal ventaja de esta técnica radica en que no es necesario que cada terminal disponga de un canal dedicado en el enlace descendente, sino que basta con un único canal común que transmita la señal

piloto. Por el contrario, el gran problema consiste en que las pérdidas de propagación en los enlaces ascendente y descendente no son iguales cuando trabajan a frecuencias diferentes, debido a la variación rápida del canal originada por la propagación multicamino. Por este motivo, mediante esta técnica únicamente es posible compensar las variaciones lentas del canal, lo que puede originar en un momento dado diferencias sustanciales en la potencia proveniente de cada terminal.

- Control de potencia en lazo cerrado: mediante esta estrategia, cada terminal dispone en el enlace descendente de un canal de control dedicado a través del cual se le notifica si debe incrementar o reducir la potencia en función del nivel con que ha sido recibido en su última transmisión. De este modo, y a diferencia del caso en lazo abierto, ahora el control se efectúa partiendo de las pérdidas realmente observadas en el propio enlace ascendente, lo que permite compensar adecuadamente los desvanecimientos rápidos del canal móvil y por lo tanto garantiza mucho más un nivel similar de potencia para cada terminal. Los aspectos a diseñar apropiadamente para llevar a cabo este tipo de control son, por un lado, la periodicidad con la que se llevan a cabo los cambios de potencia, y que debe ser más rápida que las variaciones del canal, y por otro lado el nivel de incremento que corresponde a cada actualización de potencia, y que deberá tener presente la profundidad de los desvanecimientos.

Así pues, bajo la suposición de un control de potencia ideal en lazo cerrado que garantizara que todos los usuarios fueran recibidos con la misma potencia, las expresiones para la probabilidad de error de bit y de paquete desarrolladas en el apartado anterior serían válidas. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que dentro de un contexto de transmisión por paquetes, la posibilidad de llevar a la práctica un control de potencia en lazo cerrado puede presentar algunos

impedimentos. En particular, se debe notar que en este entorno los terminales no disponen siempre de un canal en el enlace descendente, sino que la situación habitual será que efectúen los accesos según un cierto protocolo para conseguir un canal para transmitir, por lo que, a lo sumo durante este acceso inicial, el control únicamente podrá llevarse a cabo según un mecanismo de lazo abierto y la potencia recibida se verá afectada de un cierto desvanecimiento que en términos de amplitud se puede modelar por una estadística de tipo Rayleigh. Es posteriormente, una vez se haya llegado a adquirir un canal en el enlace ascendente cuando se podrá pensar en la existencia de un canal asociado en el descendente que permita el control en lazo cerrado.

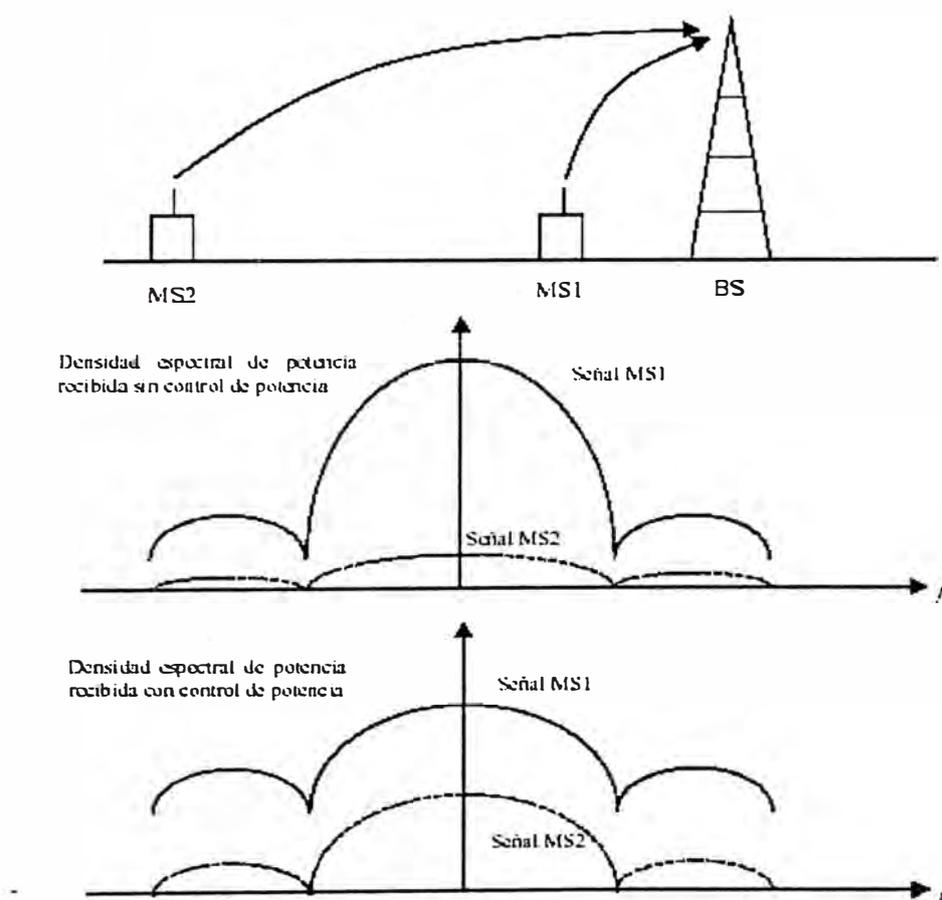


Figura 3.8.: Necesidad del control de potencia en DS/CDMA.

Por consiguiente, en un contexto de transmisión por paquetes será usual la coexistencia de usuarios que trabajen con control de potencia en lazo abierto, esto es, los que acceden inicialmente, con otros usuarios que apliquen un control en lazo cerrado, que serán los que ya hayan logrado con anterioridad el acceso satisfactoriamente.

Si bien en la literatura existen numerosos ejemplos de cálculo de la probabilidad de error de bit en un entorno de desvanecimientos Rayleigh como el considerado para el control de potencia en lazo abierto, no ocurre lo mismo cuando se tiene en cuenta un entorno mixto de usuarios que aplican control de potencia en lazo abierto y lazo cerrado.

### **3.3.3 Sincronismo en DS/CDMA**

Uno de los requerimientos importantes para todo esquema de acceso DS/CDMA consiste en ser capaz en el receptor de sincronizar perfectamente a nivel de chip la secuencia código localmente generada con la secuencia recibida. Este aspecto puede ser especialmente crítico en sistemas de transmisión por paquetes, en los que cabe la posibilidad de que no se mantenga un canal de forma continuada entre el móvil y la estación base.

En general, es habitual plantear la solución al problema del sincronismo en dos etapas: en primer lugar un ajuste grueso o fase de adquisición, a través del cual se debe garantizar que el desplazamiento temporal máximo entre la secuencia recibida y la localmente generada es inferior a la mitad del período de chip  $T_c$ , y un ajuste fino o fase de seguimiento a través del cual se consigue un alineamiento perfecto entre las dos secuencias.

En cualquier caso, para poder llevar a cabo estas fases del sincronismo es preciso que el transmisor envíe durante un tiempo la señal de información sin modular o bien modulada con unos ciertos símbolos conocidos, lo que puede efectuarse al inicio de la transmisión como preámbulo o a través de un canal de control paralelo. Partiendo de esta consideración, existen dos grandes técnicas para la fase de adquisición del sincronismo, como son la búsqueda serie y la búsqueda paralelo.

El esquema de búsqueda paralelo, mostrado en la figura 3.9, se basa en multiplicar la secuencia recibida por diferentes versiones de la secuencia localmente generada retardadas  $T_c/2$  y escoger aquella de las ramas que presente un mayor nivel a la salida. En cada rama se consideran  $p$  chips de la secuencia, de modo que, cuanto mayor sea  $p$ , más ajustado será el sincronismo pero también se requerirá de un tiempo mayor para lograrlo. En cualquier caso para secuencias de longitud  $N$  chips, obsérvese la necesidad de disponer de hasta  $N$  correladores en paralelo, lo que puede conducir a un esquema de sincronismo excesivamente voluminoso cuando las secuencias son largas, como es habitual en la práctica.

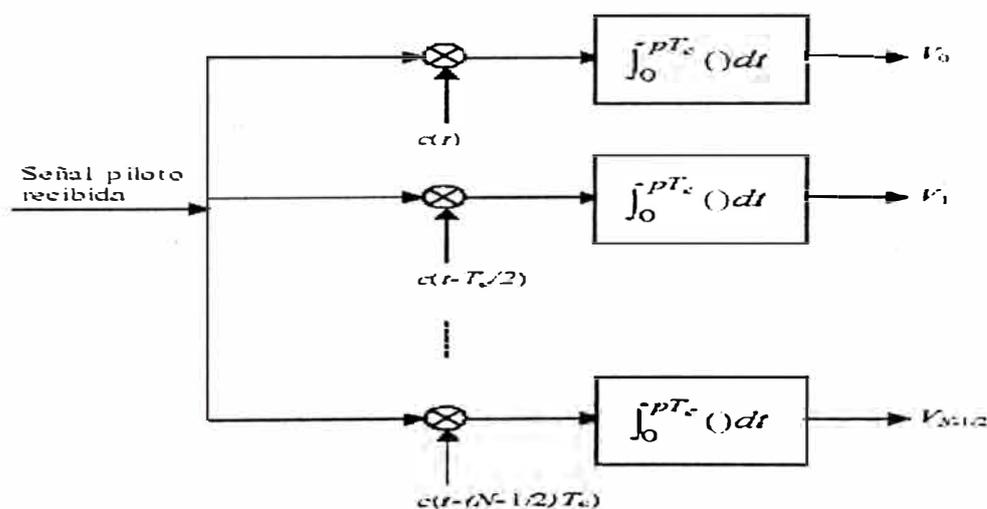


Figura 3.9: Esquema de la adquisición serie.

Es posible reducir la complejidad y el tamaño del receptor si en lugar de la búsqueda paralela se emplea la denominada búsqueda serie, a costa de tolerarse un mayor tiempo de adquisición. El esquema de esta búsqueda se presenta en la Figura de arriba. Esencialmente consiste en tomar valores de la correlación cada  $p$  chips entre la secuencia recibida y la localmente generada y compararlos con un cierto umbral establecido  $V_T$ . Si se supera este umbral, la adquisición se da por concluida. En caso contrario, se retrasa el generador local un total de  $T_C/2$  hasta lograr que las secuencias se encuentren alineadas a lo sumo  $T_C/2$ . Obsérvese como, según el desfase inicial entre las dos secuencias, pueden ser precisos varios períodos de chip hasta lograr dicho alineamiento.

#### **3.3.4 DS/CDMA en sistemas celulares. Reuso frecuencial.**

Históricamente, desde la introducción de los sistemas de acceso DS/CDMA, se han llevado a cabo numerosos estudios comparativos de capacidad con respecto de la técnica de acceso por división en tiempo TDMA. Sin embargo, en el caso de considerar una célula o celda aislada, el gran ancho de banda requerido por DS/CDMA en general no compensa en términos de eficiencia medida en usuarios/Km<sup>2</sup>/Hz a los sistemas TDMA. Por el contrario, es al considerar un entorno celular cuando surgen los verdaderos beneficios de un sistema de acceso DS/CDMA.

En concreto, el aspecto más importante de DS/CDMA frente a TDMA en un entorno constituido por diferentes células radica en la posibilidad de efectuar un reuso frecuencial total, esto es, emplear la misma banda de frecuencias en todas las células existentes en el sistema, gracias a que DS/CDMA permite que usuarios diferentes hagan uso de la misma frecuencia para transmitir. Por el contrario, en los

sistemas TDMA, la existencia de celdas vecinas que trabajaran con la misma frecuencia daría lugar a situaciones de elevada interferencia que degradarían la transmisión, por lo que es preciso definir patrones de reuso del espectro en función del radio de las celdas empleadas, lo que conduce a la definición de conjuntos de células o clusters en los que cada célula emplea frecuencias diferentes.

Consecuentemente, la necesidad de reutilizar el espectro respetando unos ciertos límites de distancia reduce sustancialmente la eficiencia de un esquema TDMA respecto de uno DS/CDMA que es capaz de efectuar un reuso completo.

En cualquier caso, debe puntualizarse que la consideración de un esquema DS/CDMA en un entorno celular implica que deban tenerse en cuenta en el receptor de una cierta estación base dos contribuciones a la interferencia total, como son la interferencia intracelular y la interferencia intercelular. Si bien la primera corresponde a un término para el que mediante el control de potencia se puede garantizar que todos los usuarios contribuyan con el mismo nivel, al considerar la interferencia intercelular esto no es así pues son las celdas vecinas quienes efectúan el control de potencia de las transmisiones que originan esta interferencia.

Por este motivo, la contribución de la interferencia intercelular depende en cada caso de las condiciones de propagación existentes así como del número de usuarios que transmita en cada una de las celdas. A este respecto, se han efectuado también numerosos estudios en los que se modela la contribución de las celdas vecinas sobre la interferencia total como una cierta fracción  $f$  de la interferencia intracelular, donde  $f$  depende de las condiciones de propagación consideradas y presenta valores alrededor de 0.6.

Análogamente, otra de las ventajas de DS/CDMA en un contexto celular se basa en que, gracias al reuso frecuencial total, es posible que terminales que se encuentren en la región fronteriza entre diferentes celdas sean servidos

simultáneamente por dichas celdas. Así, las señales recibidas se combinan dando lugar a una mejora por diversidad en términos de la relación señal a interferente total. Desde el punto de vista de traspasos o handovers, esta característica permite el llamado soft handover por el que un terminal que se aleje de una base y se acerque a otra pueda combinar durante un tiempo la señal transmitida por ambas, dando lugar a una transición progresiva entre las dos celdas. El caso particular en que esta transición se lleve a cabo entre sectores de una misma base se conoce como softer handover.

### 3.3.5 Codificación de canal.

Finalmente, otro aspecto a remarcar del acceso DS/CDMA consiste en la capacidad para incorporar codificación de canal sin una penalización en términos de ancho de banda como ocurre en los sistemas de banda estrecha. De esta forma, es posible mejorar la capacidad del sistema en cuanto a número de usuarios que transmiten simultáneamente gracias al uso de códigos correctores de errores sin modificar el ancho de banda empleado.

En efecto, esto surge de la dependencia de la relación  $E_b/N_0$  con el número de usuarios presente en el sistema. A partir de aquí, fijado un requerimiento de mínimo  $E_b/N_0$  con una ganancia de procesamiento  $G_p$  se obtiene un límite al número de máximo de usuarios simultáneo en el sistema como:

$$K_{\max} = 1 + \frac{\frac{3}{2} G_p}{\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{\min}}$$

Resulta obvio que, cuando se emplea codificación de canal, el requerimiento  $E_b/N_0$  de mínimo para garantizar una cierta tasa de error es menor que cuando no

se hace uso de codificación. En consecuencia, un sistema con codificación será capaz de soportar un mayor número de usuarios que un sistema sin codificación sin modificar el ancho de banda total utilizado.

### 3.4 DS/CDMA en la propuesta UTRA FDD para UMTS.

Si bien algunos sistemas de segunda generación como IS-95 de Qualcomm hacen uso de la técnica de acceso DS/CDMA, es en el sistema de tercera generación UMTS (Universal Mobile Communications System) donde esta técnica adquiere su mayor relevancia dentro de la propuesta de acceso radio WCDMA (Wideband Code División Múltiple Access), denominada en terminología del 3GPP como UTRA (Terrestrial Radio Access) en sus modalidades de duplexado por división en frecuencia FDD y en tiempo TDD, aunque en esta última se emplea un híbrido entre la técnica TDMA y DS/CDMA. Por este motivo, y siguiendo la línea de exponer las características principales de la técnica de acceso DS/CDMA, a continuación se plantea una descripción de la propuesta UTRA FDD como ejemplo de aplicación práctica del esquema DS/CDMA.

#### 3.4.1 Arquitectura de protocolos para el interfaz radio UMTS.

Uno de los conceptos clave para comprender el papel que juega la técnica de acceso DS/CDMA como fuente de canalización dentro de la propuesta UTRA FDD es la arquitectura de protocolos definida para el interfaz radio entre terminal móvil y estación base, que se muestra en la figura 3.10. En ella se distinguen los siguientes niveles:

- **Nivel físico:** Se encarga de transmitir la información a través del interfaz aire teniendo en cuenta la técnica de acceso múltiple DS/CDMA empleada. Entre sus funcionalidades cabe destacar entre otras la modulación y el proceso de

ensanchado (spreading) haciendo uso de las secuencias código apropiadas en cada caso, el procesado de la señal de radiofrecuencia, la sincronización temporal y frecuencial a nivel de chip, bit y estructura de trama, el control de potencia, la codificación y entrelazado, la toma de medidas de potencia y el soft handover.

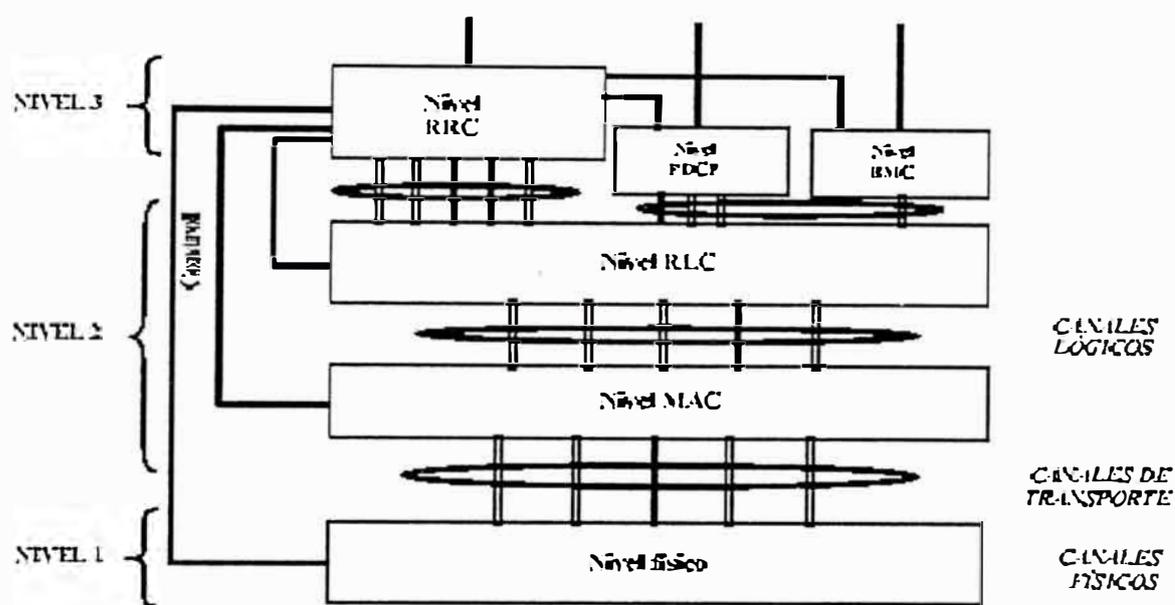


Figura 3.10: Arquitectura de protocolos para UMTS

- **Nivel MAC (Médium Access Control):** Ofrece a los niveles superiores servicios de transferencia de información, que entregan y reciben en forma de las denominadas PDUs (Protocol Data Units), efectuando el multiplexado y demultiplexado de las mismas en bloques de transporte que son entregados al nivel físico. Entre sus funcionalidades se encuentran entre otras la selección de los formatos de transporte adecuados, la gestión de prioridades entre flujos de información diferentes, la identificación de terminales en los canales comunes y en ciertos casos el cifrado (cuando no lo lleva a cabo el nivel RLC).
- **Nivel RLC: (Radio Link Control):** Ofrece a los niveles superiores servicios de control de las PDUs transferidas en el nivel MAC. Entre sus funciones destacan

entre otras la segmentación y el reensamblado de la información de los niveles superiores, el relleno con bits hasta completar el tamaño específico para las unidades de transmisión, la retransmisión de las PDUs erróneas, el control del secuenciamiento, el cifrado y el control de flujo. Puede trabajar en los siguientes tres modos:

- a) Modo transparente: Transfiere la información de los niveles superiores sin efectuar ningún tipo de control más que descartar o marcar PDUs erróneas. En este caso, el cifrado de la información se lleva a cabo en el nivel MAC.
- b) Modo no reconocido: Se efectúa un control de la información a nivel de secuenciamiento y detección de posibles duplicaciones pero no se llevan a cabo retransmisiones de las PDUs erróneas. Si una PDU no puede llegar a transmitirse, se elimina del buffer sin notificación a los niveles superiores.
- c) Modo reconocido: Además de las funciones de secuenciamiento se emplea un mecanismo de retransmisión ARQ (Automatic Repeat reQuest) de las PDUs erróneas.

Si una PDU no puede llegar a entregarse correctamente se notifica a los niveles superiores.

- **Nivel RRC (Radio Resource Control):** Lleva a cabo funciones de control tales como el establecimiento, mantenimiento y liberación de conexiones, medidas reportadas por los terminales, paging o selección inicial y reelección de celda.
- **Nivel PDCP (Packet Data Convergence Protocol):** Existe únicamente en servicios orientados a transmisión de paquetes y su funcionalidad principal es la de efectuar la compresión y descompresión de la información redundante, como por ejemplo la asociada a las cabeceras de los protocolos TCP/IP de Internet.

**Nivel BMC (Broadcast/Multicast Control):** Se encarga de funciones relacionadas con la transmisión de mensajes asociados a servicios de difusión.

De acuerdo con la arquitectura planteada, se contemplan tres tipos genéricos de canales según su ubicación en dicha arquitectura, que se detallan a continuación:

#### **i.- Canales físicos.**

Constituyen el soporte físico para el envío de la información a través del interfaz aire en función de la estructura de trama definida, el formato de las ráfagas de bits empleado y finalmente las secuencias código que permiten diferenciar unos canales físicos del resto.

Los canales físicos existentes en UTRA FDD son:

- DPDCH/DPCCH (Dedicated Physical Channel/ Dedicated Physical Control Channel): Son aquellos canales que se asignan a los terminales en modo dedicado, tanto en el enlace ascendente como en el descendente. El DPDCH se destina al envío de información de capas superiores y el DPCCH a la información de control de nivel físico como los bits piloto o los bits de control de potencia.
- PCCPCH y SCCPCH (Primary Common Control Physical Channel y Secondary Common Control Physical Channel): Son canales comunes existentes únicamente en el enlace descendente. El PCCPCH es único en cada celda, utiliza una ganancia de procesamiento de valor 256 y es el canal físico sobre el que viaja el canal de transporte de difusión o broadcast. Respecto a los canales SCCPCH, pueden existir varios en cada celda y emplear ganancias de procesamiento variables.
- PRACH (Physical Random Access Channel): Es el canal físico utilizado por el canal de transporte de acceso aleatorio RACH. Presenta una estructura de tramas diferente a la de los canales dedicados y adaptada a las características del protocolo de acceso empleado.

- PCPCH (Physical Common Packet Channel): Es el canal físico sobre el que viaja el canal de transporte CPCH, destinado a los servicios de transmisión por paquetes.
- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel): Es un canal en el enlace descendente que presenta una ganancia de procesado variable y que está asociado a un canal dedicado que le proporciona el control de nivel físico.
- SCH (Synchronization Channel): Canal en el enlace descendente constituido por la secuencia código de sincronización primaria, común para todas las bases del sistema, y por un conjunto de secuencias código de sincronización secundarias, diferente para cada base. A través de la detección de estas secuencias los terminales logran conocer la estructura de trama empleada por la base y descubrir la secuencia código utilizada por el canal PCCPCH.
- CPICH (Common Pilot Channel): Canal en el enlace descendente que transporta, con ganancia de procesado fija e igual a 256, una secuencia conocida de símbolos a través de la cual se puede efectuar la estimación de canal y realizar medidas de potencia de las diferentes celdas.
- PICH (Paging Indication Channel): Canal en el enlace descendente que contiene un conjunto de indicadores de paging para informar a terminales sobre cuándo deben decodificar la información del canal de transporte PCH asociado.
- AICH (Acquisition Indication Channel), CSICH (CPCH Status Indication Channel) y CD/CA-ICH (Collision Detection/Channel Assignment Indication Channel): Conjunto de canales que transportan una serie de indicadores empleados en los procedimientos de acceso definidos para el canal PCPCH, y en el caso del AICH también para el canal PRACH.

## ii.- Canales de transporte.

Proporcionan al nivel de acceso al medio MAC un servicio de transporte de información sobre los canales físicos. Vienen definidos por las características a nivel de formato de transmisión (codificación, entrelazado, cantidad de información, ...) con que los datos serán enviados a través del interfaz aire, con independencia del contenido de esta información. Cada canal de transporte viaja sobre uno o varios canales físicos.

En UTRA FDD se definen los siguientes canales de transporte:

- DCH (Dedicated Channel): Es un canal que existe tanto en el enlace ascendente como el descendente y que requiere de un proceso de asignación a un usuario específico para poder ser utilizado. Permite el cambio del formato de transmisión cada 10 ms, pudiéndose adaptar así a diferentes velocidades de transmisión de la información transportada. Dispone de control de potencia en lazo cerrado y soporta la realización de soft handover. Viaja sobre el canal físico DPDCH.
- BCH (Broadcast Channel): Es un canal común en el enlace descendente que transporta información de difusión específica de la red o de una celda. Viaja sobre el canal físico PCCPCH.
- FACH (Forward Acces Channel): Es un canal común en el enlace descendente que transporta información hacia terminales cuya localización en una celda es conocida. Dada su condición de canal común es preciso identificar al terminal al cual va destinada la información. Puede transportar información de control como respuestas a un acceso aleatorio y también paquetes cortos de datos. Viaja sobre canales físicos SCCPCH.
- PCH (Paging Channel): Canal común en el enlace descendente empleado para enviar información hacia un terminal cuya ubicación no se conoce a nivel de celda sino de área de localización. Ejemplos de esta información pueden ser la

notificación de llamadas entrantes dirigidas hacia dicho terminal. Viaja sobre canales físicos SCCPCH.

- RACH (Random Access Channel): Canal común en el enlace ascendente destinado al acceso a la red por parte de terminales y también al envío de paquetes cortos. Viaja sobre el canal físico PRACH.

- CPCH (Common Packet Channel): Canal común en el enlace ascendente destinado al envío de paquetes más largos de los que pueden ser transmitidos a través del canal RACH. Viaja sobre un canal físico PCPCH y en el enlace descendente tiene asociado un canal destinado a efectuar un control de potencia en lazo cerrado.

- DSCH (Downlink Shared Channel): Canal en el enlace descendente, asociado a un canal dedicado, y que se asigna en momentos puntuales de la conexión dedicada con objeto de adaptarse a fluctuaciones esporádicas de la tasa de transmisión, presentando utilidad en un contexto de transmisión por paquetes. Viaja sobre un canal físico PDSCH.

Nótese la existencia de algunos canales físicos sobre los que no viaja ningún canal de transporte, como el CPICH o el SCH. El motivo es que estos canales simplemente envían información del nivel físico pero no de los niveles superiores.

### **iii.- Canales lógicos.**

Son aquellos canales de los que se sirve el nivel MAC para proporcionar servicios de transferencia de datos a las capas superiores. Cada canal lógico viene descrito por el tipo de información que transfiere. Viajan sobre canales de transporte.

Los canales lógicos definidos en UTRA FDD son:

- BCCH (Broadcast Control Channel): Canal en el enlace descendente que transporta información específica del sistema (códigos disponibles, parámetros relacionados con el acceso, celdas vecinas, ...). Viaja sobre canales de transporte de tipo BCH y en algún caso FACH.
- PCCH (Paging Control Channel): Canal en el enlace descendente que transporta información de paging hacia usuarios, como por ejemplo notificación de llamadas entrantes. Viaja sobre un canal de transporte PCH.
- DCCH (Dedicated Control Channel): Canal bidireccional para el envío de información de control dedicada entre el terminal y la red, como por ejemplo mensajes relacionados con el establecimiento y liberación de llamada. Según el caso puede viajar sobre canales de transporte DCH, RACH, CPCH, FACH o DSCH.
- CCCH (Common Control Channel): Canal bidireccional para el intercambio de información de control entre el terminal y la red cuando todavía no se dispone de canales dedicados. Típicamente ocurre con los mensajes relacionados con el acceso a la red y la consiguiente confirmación. Así, viaja sobre canales de transporte RACH y FACH.
- DTCH (Dedicated Control Channel): Canal bidireccional para el intercambio de información de usuario entre el terminal y la red. Según si la información se envía en modo circuito o en modo paquete puede viajar sobre canales de transporte DCH, RACH, CPCH, FACH o DSCH.
- CTCH (Common Traffic Channel): Canal unidireccional punto a multipunto destinado al envío de información de usuario hacia un grupo de terminales específicos. Viaja sobre canales FACH.

### 3.4.2 Estructura de trama básica.

UTRA FDD está previsto que trabaje en las bandas de 1920 a 1980 MHz y de 2110 a 2170 MHz para los enlaces ascendente y descendente, respectivamente, con una separación de portadoras de 5 MHz. Cada portadora trabaja con una tasa de 3.84 Mchips/s, con pulsos conformadores del tipo coseno realzado con factor de roll-off de 0.22. Existe una estructura de trama básica de duración 10 ms empleada por los diferentes canales físicos, que se distinguen entre sí por las secuencias código utilizadas y también por el modo como se distribuyen los diferentes campos de información en dicha trama. A modo de ejemplo de esta estructura, en la Figura 3.11 se presenta la organización de los canales dedicados en el enlace ascendente DPDCH y DPCCH. Las características a destacar son las siguientes:

- Cada trama está subdividida en 15 ranuras temporales, numeradas del 0 al 14. Cada una de ellas se corresponde con un ciclo del control de potencia, por lo que cada terminal utiliza todas las ranuras temporales de la trama sin existir ninguna componente de acceso TDMA.

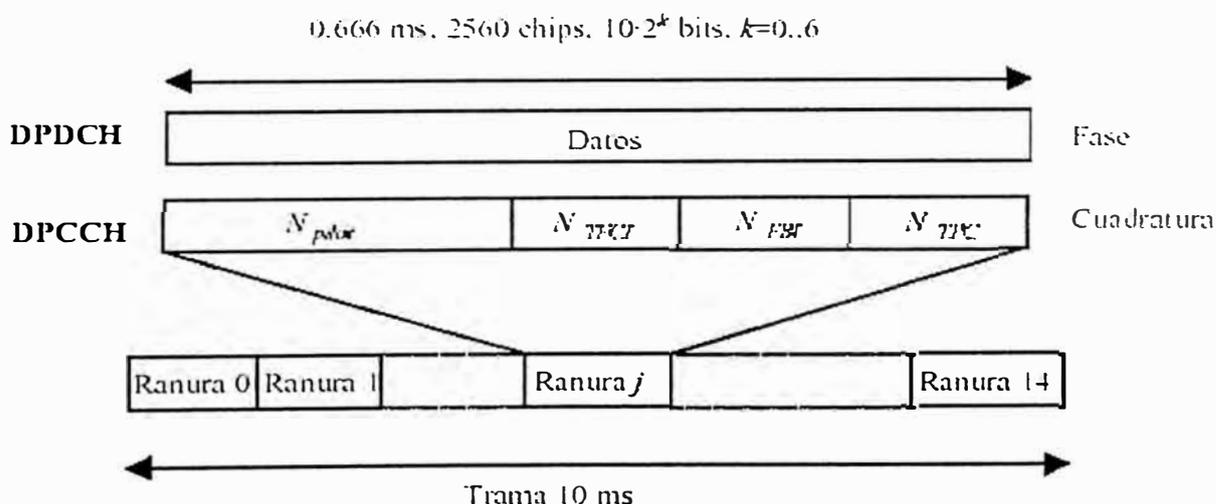


Figura 3.11: Estructura de tramas de los canales DPDCH/DPCCH ascendente.

- En la componente en fase de cada ranura temporal se transmite la información de datos asociada al DPDCH, con un total de 2560 chips. La ganancia de procesamiento empleada toma valores de la forma  $256/2^k$ , con  $k$  entero entre 0 y 6, lo que se corresponde con ganancias entre 4 y 256 en potencias de 2. Así, el número de bits por ranura temporal en la componente en fase es de  $10 \cdot 2^k$ .
- En la componente en cuadratura de cada ranura temporal viaja el canal de control DPCCH, con una ganancia de procesamiento fija de valor 256. Este canal de control transporta un total de  $N_{\text{pilot}}$  bits piloto destinados a la estimación de la respuesta impulsional del canal,  $N_{\text{TFCI}}$  bits que incorporan información sobre el formato de transporte empleado,  $N_{\text{TPC}}$  bits destinados a comunicar incrementos o decrementos del control de potencia y  $N_{\text{FBI}}$  bits de información de realimentación entre móvil y base utilizada en el proceso de soft handover y también para ajustar los coeficientes de ponderación de las antenas transmisoras en caso de emplearse diversidad en transmisión en la base. Según el número de bits de cada campo existen diferentes formatos de ranura temporal definidos
- Empleando ganancias de procesamiento variables, la estructura de trama definida permite transmitir hasta 9600 bits por trama. Sin embargo, es posible incrementar la velocidad de transmisión utilizando hasta 6 canales DPDCH en paralelo con un único canal DPCCH, multiplexados con diferentes secuencias código. En este caso, se establece que los trabajen con ganancia de procesamiento 4 y que tres canales viajen en la componente en fase y los otros tres en la componente en cuadratura conjuntamente con el DPCCH.
- En el caso del canal dedicado en el enlace descendente, las ganancias de procesamiento varían en potencias de 2 entre 4 y 512. En lugar de multiplexarse los canales de control y datos en las componentes en fase y cuadratura, se efectúa una multiplexación temporal que da lugar a un formato de ranura temporal como el de la

Figura 3.12, donde de cada pareja de bits se obtiene un símbolo QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Si en el enlace ascendente se hubiera realizado de la misma manera, en el caso de no disponer de información de datos pero sí de control, como suele ocurrir ante transmisión discontinua, esta transmisión de control podría ocasionar una interferencia audible para otros equipos, motivo por el que se optó por la multiplexación en las componentes en fase y cuadratura, garantizando que, aun en ausencia de señal de datos, la potencia no se transmita en forma discontinua.

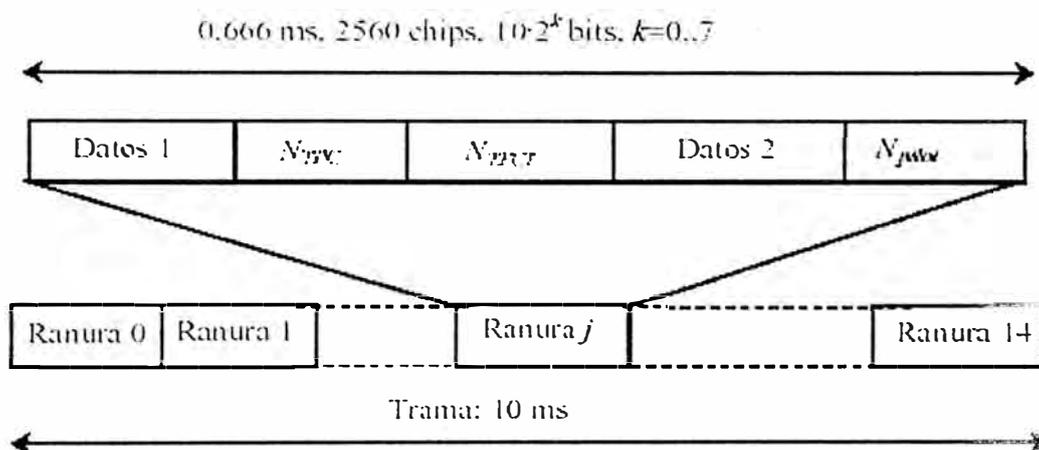


Figura 3.12: Canal físico dedicado en el canal descendente.

Con respecto al resto de canales físicos existentes, el PCCPCH, SCCPCH, PDSCH y CPICH presentan esencialmente la misma estructura de trama que el canal dedicado en el enlace descendente, con pequeñas variaciones según los campos de cada ranura temporal. Por el contrario, los canales PRACH, PCPCH y SCH presentan una estructura con algunas diferencias más significativas relacionadas con los procedimientos de acceso y sincronización.

### 3.5 Necesidad de un protocolo de acceso múltiple.

Dentro del contexto de los mecanismos de transmisión por paquetes para sistemas de tercera generación, destinados a hacer frente a servicios de transmisión de datos o de Internet, cuya generación de información presenta una naturaleza discontinua o a ráfagas, a diferencia de los sistemas de segunda generación, que esencialmente consideraban la transmisión de voz, la asignación de recursos en propiedad a los diferentes usuarios en modo circuito puede resultar poco eficiente en tanto que su utilización vendrá marcada por la propia discontinuidad de la fuente de información, y que esta asignación impedirá la posible utilización de dicho recurso por otros usuarios que realmente sí dispongan de información para transmitir. Por el contrario, las estrategias en modo paquete, en las que los recursos únicamente se asignan a medida que son requeridos, presentan un mayor grado de eficiencia pues son capaces de hacer frente a la variabilidad del tráfico de los servicios considerados gracias a disponer de mecanismos que arbitren eficientemente el acceso de los usuarios a los recursos disponibles, a la vez que no requieren de largos tiempos de establecimiento. De este modo, surge una multiplexación estadística de los usuarios en función de sus fuentes de información que permite que un conjunto de recursos sea compartido por un número de usuarios superior al número de recursos disponible, al contrario de lo que ocurre con los mecanismos en modo circuito, en los que dentro del sistema se puede dar cabida a tantos usuarios como recursos existan. Por otra parte, es de esperar que, con la evolución de las redes fijas hacia redes totalmente basadas en IP, los sistemas de transmisión radio por paquetes cobren importancia no sólo para los servicios puramente de tipo Internet sino también para otros servicios con mayores requerimientos de calidad.

Así pues, dentro de los sistemas de transmisión por paquetes surge la necesidad de disponer de protocolos de acceso múltiple, cuyo objetivo es controlar el acceso de un conjunto de usuarios a una serie de recursos compartidos. Esencialmente definen un conjunto de reglas de funcionamiento para determinar como los usuarios deben lograr el acceso a dichos recursos. Existe en la literatura un gran número de protocolos de acceso múltiple definidos y, fundamentalmente, todos ellos juegan con el grado de aleatoriedad del acceso, de modo que existe una gradación que iría desde el acceso puramente aleatorio de protocolos como SALOHA hasta otras estrategias controladas por la estación base que reducen la aleatoriedad al máximo donde se englobarían, por ejemplo, las técnicas de sondeo o polling. En función de este grado de aleatoriedad, a continuación se detalla una primera clasificación que se podría efectuar de los protocolos de acceso múltiple.

- **Asignación fija:** Se reparte la capacidad del canal (banda de frecuencia, ranura temporal o código) de forma estática entre los diferentes usuarios, que disponen del recurso de forma continua independientemente de si la transmisión de información es continuada o no.

Propiamente aquí no existe ningún tipo de protocolo, puesto que no se establecen reglas específicas para regular el acceso al recurso, por lo que únicamente estaría contemplada la técnica de acceso utilizada (FDMA, TDMA o DS/CDMA).

- **Asignación bajo demanda:** Se reparte la capacidad del canal ordenadamente entre los usuarios que disponen de algún tipo de información para transmitir. Dentro de este tipo de estrategias se englobarían las técnicas de sondeo o polling, en las que de forma centralizada la estación base periódicamente preguntaría a los usuarios si disponen de información para transmitir y en caso afirmativo les asignaría el recurso en cuestión. La gran ventaja de estas técnicas es que

garantizan que cada usuario disponga del recurso en propiedad sin verse afectado por el resto pero, en contrapartida, si hay muchos usuarios involucrados, el retardo consumido para preguntar a usuarios que después no dispondrán de información para transmitir es muy grande y puede originar retrasos en quienes verdaderamente sí necesitan del recurso.

- **Acceso aleatorio repetitivo:** Los usuarios acceden al recurso de forma aleatoria, sin disponer de información sobre lo que va a hacer el resto de usuarios, lo que origina que puedan producirse colisiones en el caso de que dos o más de ellos quieran acceder a un mismo recurso simultáneamente. En este caso, deben habilitarse mecanismos para resolver estas colisiones. El ejemplo más clásico de este tipo de protocolos lo constituye el protocolo ALOHA o su versión ranurada S-ALOHA.

- **Acceso aleatorio con reserva:** Mediante este tipo de protocolos existe únicamente posibilidad de colisionar en el acceso inicial al recurso, puesto que se efectúa sin tener ningún tipo de conocimiento de lo que va a hacer el resto de usuarios. Sin embargo, una vez se ha conseguido el recurso, se dispone de él en propiedad y se evita el acceso por parte de los demás usuarios. Dentro de este conjunto de protocolos se pueden destacar entre otros los siguientes:

a) PRMA (Packet Reservation Multiple Access) y PRMA++, en los que se habilita dentro de una estructura de trama un conjunto de ranuras temporales para enviar peticiones de acceso y otras ranuras temporales para la transmisión de información. En principio este protocolo fue diseñado para ser usado con la técnica de acceso TDMA, aunque también han aparecido versiones que permiten el uso de CDMA.

b) CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detection), que consiste en que los diferentes usuarios escuchan el canal antes de transmitir en él y únicamente en el caso de que se encuentre libre inician su transmisión, existiendo

la posibilidad de colisionar debido a los diferentes retardos de propagación de la señal hacia los puntos donde se encuentran los distintos usuarios. Este protocolo es usado comúnmente en redes de área local alámbricas, pero presenta algunos problemas en entornos radio, como por ejemplo el problema del terminal oculto (hidden terminal problem), consistente en la no transitividad de la comunicación entre terminales. Versiones mejoradas y adaptadas al entorno radio de este protocolo son CSMA/CA (Collision Avoidance) y CSMA/CA con RTS/CTS (Request To Send/ Clear To Send), utilizadas por el estándar para redes de área local inalámbricas IEEE 802.11. La mejora añadida por estas versiones viene dada por la incorporación de tiempos de escucha del canal así como por la transmisión de mensajes iniciales cortos para establecer la comunicación entre terminales (RTS y CTS), que permiten que aunque un terminal no pueda escuchar uno de ellos sí pueda escuchar el otro y por lo tanto pueda detectar la posible ocupación del canal.

c) ISMA (Inhibit Sense Multiple Access): Es una versión de CSMA en la cual existe un grado de centralización por parte de la estación base quien se encarga de indicar a los diferentes móviles que el canal está ocupado en un momento dado, evitando así posibles accesos. Otra versión con los mismos fundamentos que ISMA es el denominado DSMA (Digital Sense Multiple Access), en cuyo funcionamiento se considera que existen dos indicadores en el canal de bajada: uno para comunicar si el canal de subida está ocupado o no (channel status flag) y el otro para indicar si el paquete enviado ha sido recibido o no correctamente (decode status flag).

d) DQRUMA (Distributed Queueing Request Update Multiple Access): En este protocolo existe una estructura organizada en ranuras temporales subdivididas en una parte formada por miniranuras de acceso y otra parte de tráfico. A partir de las peticiones recibidas en las miniranuras de acceso, la estación base realiza el

proceso de gestión de recursos correspondiente indicando a cada usuario cuándo debe transmitir.

e) DQRAP (Distributed Queueing Access Control ): En este protocolo existe, de forma similar a DQRUMA, una estructura de ranuras temporales subdividida en tres miniranuras de acceso y una ranura de tráfico. Existen además dos colas, una para la resolución de colisiones y otra para la transmisión, de modo que los usuarios, o en su defecto la estación base, deben llevar la contabilidad de estas dos colas. En el momento en que algún usuario dispone de información para transmitir, emite una petición de acceso en una de las miniranuras; en caso de producirse una colisión automáticamente se situará en la posición correspondiente de la cola de resolución de colisiones, mientras que si ha habido éxito en la petición se ubicará en la cola de transmisiones a la espera de disponer del canal para transmitir.

En tanto que los protocolos de asignación fija y bajo demanda serán especialmente apropiados para estadísticas de generación de tráfico con menor variabilidad y más próximas, por lo tanto, a las de los servicios en modo circuito, los protocolos de acceso aleatorio podrán ser más adecuados para transmisiones más esporádicas que presenten una mayor variabilidad. De este modo, la selección de un protocolo u otro dependerá fuertemente de las características del tráfico al que se deba hacer frente. Cuando se desea comparar protocolos de acceso múltiple entre sí los aspectos de calidad que deberán ser tenidos en cuenta son los siguientes:

- 1.- Capacidad en cuanto al número máximo de usuarios que el protocolo puede soportar manteniendo unas buenas prestaciones para todos ellos. Numéricamente, la capacidad se puede cuantificar a través del máximo número de transmisiones correctas por unidad de tiempo soportado por el protocolo.

2.- Eficiencia en la gestión de recursos, garantizando que los diferentes recursos existentes en el sistema se aprovechen al máximo de acuerdo a las necesidades de los terminales móviles, y evitando la existencia tanto de exceso de recursos no utilizados como de escasez de recursos.

3.- Flexibilidad para hacer frente a posibles variaciones en las condiciones del sistema, tanto las relacionadas con la carga global del mismo como aquellas relacionadas con la propia naturaleza estadística del canal radio móvil.

4.- Estabilidad, debiéndose evitar que el protocolo pueda dar lugar a situaciones de inestabilidad, en las que el número de paquetes a transmitir pueda crecer indefinidamente debido a una incapacidad del propio sistema para poder hacer frente a las necesidades de transmisión de los diferentes usuarios. Habitualmente, la característica de estabilidad se mantiene en tanto que no se superen unos ciertos niveles máximos de carga total ofrecida al sistema, dependientes de cada protocolo en particular, recayendo en otras funcionalidades del sistema global la labor de evitar que dichos niveles sean sobrepasados, como sería el caso del denominado control de admisión. Otras veces, es el propio protocolo el que define mecanismos para evitar que el sistema pueda ser inestable para cargas elevadas, en general basados en aplicar unas ciertas probabilidades antes de acceder al sistema (denominadas probabilidades de backoff). De todos modos, cuando llegan a darse los niveles de carga que desencadenan el funcionamiento de estos mecanismos, el sistema puede dejar de ser operativo por los elevados retardos que pueden originarse.

5.- Equitatividad en la gestión de recursos, de modo que sean utilizados por los diferentes usuarios sin ningún tipo de discriminación o de predilección entre ellos, a menos que específicamente se defina algún tipo de prioridad.

Hay que hacer notar que los protocolos de acceso múltiple aquí citados no especifican la técnica de acceso a utilizar en el nivel físico ya que están situados en una capa superior de la estructura OSI, aunque algunos puedan ser más apropiados para unas técnicas que para otras. En cualquier caso, este informe se centrará en la consideración de la técnica de acceso múltiple DS/CDMA combinada con los protocolos correspondientes, con especial énfasis en el protocolo ISMA.

### **3.6 El protocolo ISMA-DS/CDMA.**

#### **3.6.1 ISMA de banda estrecha.**

El protocolo ISMA (Inhibit Sense Multiple Access) intenta reducir la aleatoriedad en el acceso por medio de una señalización desde la estación base, a través del enlace descendente, comunicando si un determinado canal del enlace ascendente está ocupado o no por otro usuario. El origen de un protocolo de estas características se encuentra en el denominado CSMA (Carrier Sense Multiple Access), protocolo según el cual cada terminal es capaz de detectar si el canal está libre u ocupado, lo que permite evitar en gran medida las colisiones. Esencialmente, el motivo de la intervención de la estación base consiste en solucionar el problema que surge al utilizar acceso radio, según el cual el terminal móvil no puede escuchar a través del canal de bajada lo que otros terminales envían en el de subida, con lo que no puede detectar cuando este canal está ocupado.

#### **3.6.2 ISMA es un esquema de acceso DS/CDMA**

Los esquemas de acceso basados en TDMA y FDMA presentan como característica el hecho de que un canal (frecuencia - ranura temporal) únicamente puede ser utilizado por un usuario a la vez, de modo que, en el marco de un acceso

aleatorio como por ejemplo SALOHA o el anteriormente analizado ISMA de banda estrecha, el intento de transmitir por parte de dos o más usuarios en un mismo canal producirá la pérdida por colisión de todos los paquetes involucrados en dicha transmisión, siempre considerando que se prescinde del denominado efecto captura por el que en una situación parecida algún paquete sí podría ser recibido correctamente si llegara con un nivel de potencia muy superior al del resto.

Por el contrario, cuando se considera como técnica de acceso un esquema DS/CDMA, donde los usuarios comparten frecuencia y tiempo, y la discriminación entre señales se lleva a cabo mediante el uso de códigos diferentes para cada uno, los protocolos de acceso múltiple como S-ALOHA o ISMA adquieren una nueva dimensión al permitirse el acceso simultáneo de varios usuarios al sistema. En estas circunstancias, el límite de usuarios en el canal deja de ser 1 para pasar a depender directamente de la interferencia entre los diferentes usuarios que acceden así como de otros parámetros inherentes al mecanismo de acceso usado tales como la ganancia de procesamiento y el número de bits enviados y que finalmente se traducen en una cierta probabilidad de que el paquete transmitido sea o no correctamente recuperado.

La adaptación del protocolo ISMA al esquema de acceso DS/CDMA pasa, consecuentemente, por la comunicación, por parte de la estación base, del estado de ocupación de cada una de las secuencias código. Esto se puede lograr mediante la transmisión de una palabra cuyos bits se correspondan con los códigos existentes en el sistema, de modo que existiría un bit por código de valor 0 (código libre) ó 1 (código ocupado). A todos los efectos, y dado el mejor comportamiento que se ha visto en el caso de banda estrecha, se considerará la existencia de un sistema organizado en ranuras temporales, en cada una de las cuales se transmitirá la palabra con los bits de ocupación de códigos.

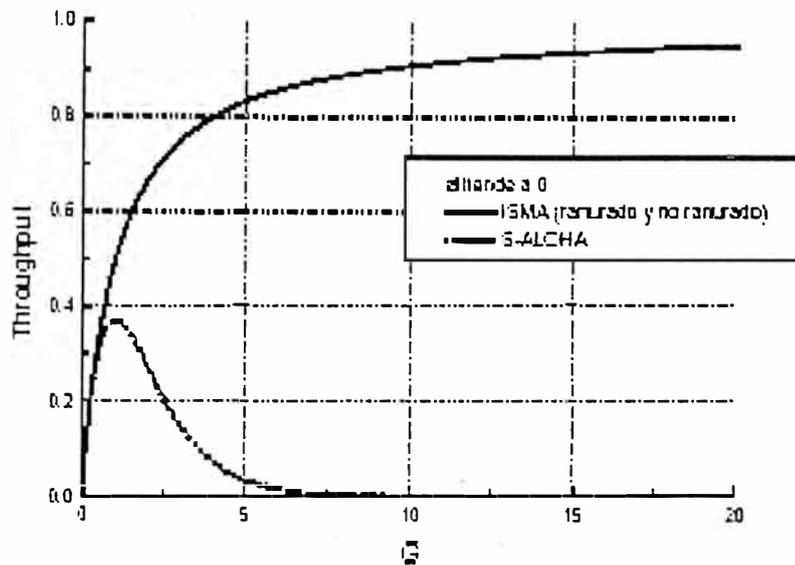


Figura 3.13: Throughput de ISMA para  $d$  tendiendo a 0.

Dentro del contexto de la técnica de acceso DS/CDMA, algunos aspectos de ISMA que deben ser tenidos en consideración son los que se plantean a continuación:

a) ISMA asume que en el sistema no existe una asignación previa entre códigos y usuarios, de modo que los usuarios deben lograr en primer lugar el acceso a los códigos disponibles, pudiendo existir, por lo tanto, un mayor número de usuarios en el sistema que de códigos, siempre que dichos usuarios no estén continuamente activos, como ocurre en los sistemas de transmisión por paquetes. Si bien el número de códigos con buenas propiedades de correlación cruzada que se maneja a nivel de sistema para el enlace ascendente en los sistemas de tercera generación es muy elevado, del orden de millones de códigos, gracias a familias como los códigos de Gold o los pertenecientes al conjunto grande de secuencias de Kasami, lo que podría inducir a pensar en que siempre existirán más códigos que usuarios,

hay que tener en cuenta los siguientes aspectos para reconsiderar este razonamiento:

- Cada estación base dispondrá siempre de un número limitado de receptores, muy inferior al número total de códigos presente en el sistema, lo que en definitiva limita el número de códigos que pueden ser usados en una estación base, y que deben ser gestionados. Aun así, gracias a la capacidad de programación de estos receptores para generar cualquier código de la familia empleada, se podría argumentar el mantenimiento de una asignación previa de usuarios - códigos, regulándose únicamente el número de usuarios simultáneamente activos en el sistema en base al número de receptores. Esta posibilidad, sin embargo, aun pudiendo ser apropiada en un contexto de transmisión de circuitos, no resultaría adecuada al considerarse un contexto de transmisión por paquetes, en el que los usuarios pueden iniciar sus transmisiones esporádicas en cualquier instante a priori no conocido, pues supondría que, ante una de estas transmisiones, cualquier receptor es capaz de detectar el código que se ha empleado en un tiempo suficientemente pequeño, lo que presenta enormes impedimentos al manejarse un conjunto de secuencias código muy elevado sobre los que sincronizarse. Igualmente, sería preciso habilitar procedimientos de gestión de receptores para determinar, ante una transmisión, cual de ellos debe sincronizarse al paquete recibido, lo que finalmente tendería a incrementar la complejidad del sistema. Consecuentemente, para un contexto de transmisión por paquetes, resulta mucho más apropiada la existencia en la estación base de un conjunto de receptores, cada uno sincronizado a un código fijo y predefinido, con lo que resultan fundamentales los protocolos para gestionar el acceso de los usuarios a dichos recursos, que pueden ser entendidos, indiferentemente, como códigos o receptores disponibles.

- El hecho de disponer de un número de códigos pequeño puede resultar beneficioso desde la perspectiva de poder aprovechar conjuntos de códigos con propiedades de correlación especialmente mejoradas, como sería el caso del conjunto pequeño de secuencias de Kasami , o incluso códigos ortogonales, como ocurre en el entorno de UTRA TDD, que permitirían reducir notablemente la interferencia del sistema.

b) El protocolo de acceso múltiple en el contexto DS/CDMA no deberá únicamente limitarse a la gestión del acceso al conjunto determinado de códigos, lo que ISMA logra simplemente comunicando el estado de ocupación de los códigos, sino que deberá también incorporar mecanismos para regular el nivel de interferencia presente en el sistema, que constituye una segunda limitación a añadir a la del número de códigos impuesta por las características de DS/CDMA.

c) La presencia de un conjunto de códigos para ser gestionados en modo paquete con un protocolo como ISMA, no impide, en cualquier caso, la coexistencia con otro conjunto de recursos en el sistema para ser empleados en modo circuito o dedicado, que deberán ser contemplados como un cierto nivel de interferencia adicional más o menos constante presente en el sistema.

d) Para que un protocolo como ISMA resulte eficiente frente a otros protocolos con un mayor grado de aleatoriedad como S-ALOHA, es preciso que cada usuario haga uso del código adquirido durante más de una ranura temporal, esto es, para la transmisión de más de un paquete si se entiende que cada paquete se corresponde con la duración de una ranura. Por el contrario, si se enviaran paquetes únicos los códigos sólo se utilizarían durante una ranura con lo que no tendría sentido marcarlos como ocupados por parte de la estación base. En este caso, un protocolo como S-ALOHA sería suficiente.

Si bien en el caso del protocolo ISMA en un entorno de banda estrecha ha sido fácil la determinación de la medida del throughput, cuando se consideran las características de la técnica de acceso DS/CDMA, en la que se pueden dar varias transmisiones simultáneas correctamente en función del nivel de interferencia global en el sistema y, por lo tanto hay que contemplar todas las posibilidades de acceso aleatorio de los usuarios a los diferentes códigos, así como sus interrelaciones, el análisis resulta más complejo y es preciso recurrir a otras herramientas matemáticas como los procesos de Markov. Por otra parte, este tipo de herramientas permite incorporar de forma simple aspectos que no fueron considerados en el estudio de banda estrecha como el efecto de las retransmisiones debidas a paquetes incorrectos o la posibilidad de transmisión de mensajes de longitud variable.

### **3.7 Análisis de las prestaciones del protocolo ISMA-DS/CDMA.**

Las prestaciones del sistema ISMA-DS/CDMA están fundamentalmente limitadas por dos aspectos: las colisiones en el acceso a códigos por parte de varios usuarios y la influencia de la interferencia multiusuario propia de la técnica de acceso múltiple empleada. Sin embargo, el número de códigos disponible en el sistema para la transmisión por paquetes influye de forma diferente sobre los dos aspectos considerados. Así, desde el punto de vista de las colisiones sería interesante que el número de códigos existente fuese elevado para así reducir al máximo la probabilidad de que dos usuarios seleccionaran el mismo código de entre el conjunto disponible. Por el contrario, desde el punto de vista de las interferencias, la existencia de muchos códigos y por lo tanto de la capacidad de disponer de muchos usuarios simultáneamente en el sistema sería contraproducente por cuanto que la interferencia mutua generada reduciría el

número de paquetes correctamente recibidos. Este razonamiento induce a estudiar el comportamiento del sistema en función del número de códigos disponible, tal y como se planteará en este apartado.

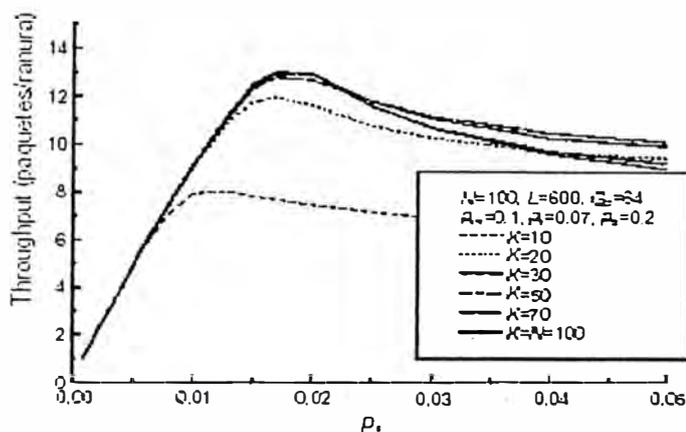


Figura 3.14: Throughput de ISMA-DS/CDMA para diferentes valores de K.

En la Figura 3.14, se muestra el resultado relativo al throughput para una situación con  $N=100$  usuarios,  $G_p=64$  y  $L=600$  bits en la que se ha ido variando el número de códigos disponible en el sistema K. Análogamente, en la Figura 3.15 se presenta la característica throughput respecto al retardo de transmisión de mensaje. A la vista de estas figuras se observa como, para valores de K aproximadamente menores que 30 en el caso analizado, las prestaciones del sistema mejoran al incrementarse el número de códigos, con una variación notable al comparar los casos  $K=10$  y  $K=20$  y todavía una variación significativa al pasar de  $K=20$  a  $K=30$ . El motivo hay que buscarlo en que, bajo estas condiciones, el sistema se encuentra limitado por las colisiones en el acceso a los recursos, con lo que valores de K pequeños suponen un número considerable de dichas colisiones al existir un conjunto pequeño de códigos para escoger. Por el contrario, para un número de códigos aproximadamente superior a 30 en el caso estudiado, las prestaciones no varían de forma significativa ni en cuanto a throughput ni en cuanto a retardo, lo

que significa que, en estas circunstancias, la limitación fundamental del sistema vendrá motivada por las propias interferencias, de modo que incrementar el número de códigos no supone una mejora de las prestaciones del protocolo. Nótese que cuando el sistema llega a esta situación de limitación por interferencias, tiende a existir una cierta autorregulación, pues el nivel de interferencias motivará que cuando se incremente el número de accesos, la probabilidad de lograr un código sea muy pequeña, lo que repercutirá sobre el hecho de que pocos usuarios pasen a modo transmisión y esto tenderá a reducir la interferencia global del sistema, favoreciendo de nuevo la posibilidad de nuevos accesos. Esto justifica el lento decaimiento de la curva de throughput para cargas altas, con la tendencia general a que, cuanto mayor es el número de códigos  $K$ , más rápido es dicho decaimiento, debido a que en el sistema habrá más usuarios que hayan adquirido códigos y se originará un nivel de interferencia superior. De todos modos, respecto a esta autorregulación juegan un papel importante las probabilidades  $p_r$  y  $p_b$ , cuya influencia será analizada posteriormente.

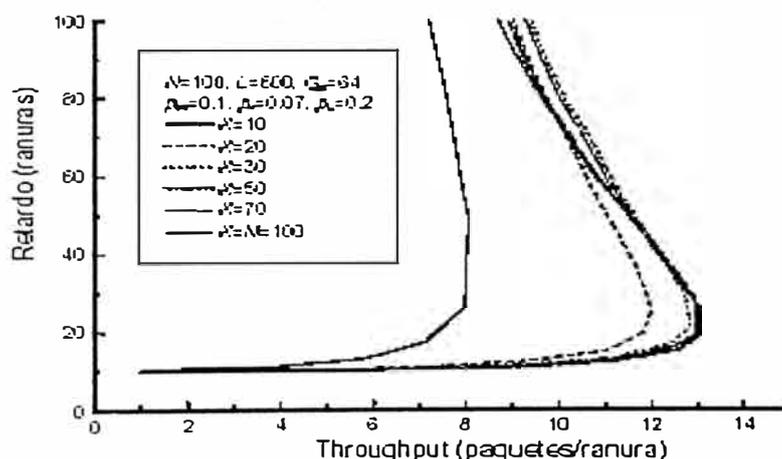


Figura 3.15: Throughput-retardo de ISMA-DS/CDMA para diferentes valores de  $K$ .

La conclusión importante que se extrae de los resultados observados respecto a throughput es la existencia de un valor máximo de dicho throughput que no se supera aun incrementando el número de códigos del sistema. La justificación de este hecho está en la limitación por interferencias inherente a la técnica de acceso DS/CDMA: supóngase que el número de códigos fuera muy superior al número de usuarios del sistema, lo que equivaldría a decir que en el sistema nunca habría colisiones en código; en estas circunstancias, al aumentar el número de usuarios en el sistema se incrementaría el nivel de interferencia, lo que se traduciría en que, a partir de un cierto límite, los paquetes no se transmitirían correctamente, con la consiguiente reducción de throughput. Consecuentemente, existe un número de usuarios activo que maximiza el throughput con un valor únicamente dependiente de la ganancia de procesado y de la longitud de los paquetes enviados. Así, independientemente del número de códigos existente en el sistema, este límite va a constituir una cota superior del throughput alcanzable. Lo que ocurre cuando hay pocos códigos es que el sistema está tan limitado por las colisiones que las prestaciones se alejan bastante de esta cota superior, con lo que se obtiene una ganancia efectiva como resultado de incrementar el número de códigos. Por el contrario, al aumentarse el número de códigos, el sistema deja de estar limitado por las colisiones y empieza a estar limitado por las interferencias, aproximándose a la mencionada cota máxima, por lo que cada vez se percibe menos ganancia como consecuencia de un incremento en el número de códigos.

Para el esquema DS/CDMA considerado, bajo la hipótesis gaussiana para el modelado de las interferencias y en ausencia de codificación, la cota máxima teórica que podría existir para el throughput debido a las interferencias resultaría de la maximización de la siguiente función, que proporciona el número medio de

transmisiones correctas cuando existen "x" transmisiones simultáneas en el sistema:

$$S = x p_{a,k}(x) = x \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3G_p}{2(x-1)}} \right) \right)^L$$

Para el caso de  $G_p=64$  y  $L=600$  bits, resulta un throughput máximo teórico de 14.5 paquetes/ranura, y como puede comprobarse en la Figura 3.14, el máximo throughput obtenido al considerar el protocolo se encuentra alrededor de 13.3 transmisiones correctas/ranura, lo que supone una eficiencia del protocolo ISMA-DS/CDMA de alrededor del 91% respecto del máximo teórico, poniendo de manifiesto el buen comportamiento de dicho protocolo.

Con objeto de delimitar el valor máximo del número de códigos  $K_{\max}$  por encima del cual no se obtienen beneficios al estar el sistema limitado por interferencias, en la Figura 3.16 se presentan las regiones de funcionamiento del protocolo para las que éste se encuentra limitado por interferencias o bien por colisiones, para diferentes niveles de carga ofrecida y para diferentes valores del número de códigos en el sistema  $K$ . Dicha gráfica corresponde al caso  $G_p=64$  y  $L=600$  y se ha obtenido evaluando para cada punto el número medio de accesos al sistema  $n_t$ , el número medio de transmisiones  $K_f$  y el número medio de códigos no ocupados  $.l$ . A partir de dichos valores se ha estimado la probabilidad de colisión  $p_{\text{colisión}}$  y la probabilidad de transmisión incorrecta debido a las interferencias  $p_{\text{interf.}}$ , de acuerdo a las expresiones siguientes:

$$P_{colisión} = 1 - \left( 1 - \frac{1}{K_f} \right)^{n_{max}-1}$$

$$P_{interf} = 1 - \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3G_p}{2(n_{max} + n_f - 1)}} \right) \right)^L$$

De la comparación de ambos valores se determina directamente si el sistema se encuentra limitado por colisiones o bien por interferencia multiusuario. El resultado mostrado en la Figura 3.16 se ratifica los aspectos ya comentados, es decir, que para un número bajo de códigos el sistema se encuentra limitado por colisiones prácticamente para todos los niveles de carga considerados, mientras que al incrementarse el número de códigos decrece el margen de niveles de carga para los que el sistema se encuentra limitado por colisiones. Finalmente, se llega a un punto en el que prácticamente para todos los niveles de carga el sistema se encuentra limitado por interferencias y no por colisiones, que determina el máximo número de códigos  $K_{max}$  por encima del cual el sistema no obtiene beneficios, estando este valor alrededor de 28 códigos, lo que constituye una refinación del valor aproximado de 30 que se había observado en las anteriores curvas de throughput. Nótese en cualquier caso que, al mirar la gráfica siguiente, únicamente interesa el margen de cargas que va de 0 a la máxima carga teórica que puede soportar el sistema, y que en base a la ecuación (dos anteriores) resulta ser de 14.5 paquetes/ranura=8700 bits/ranura.

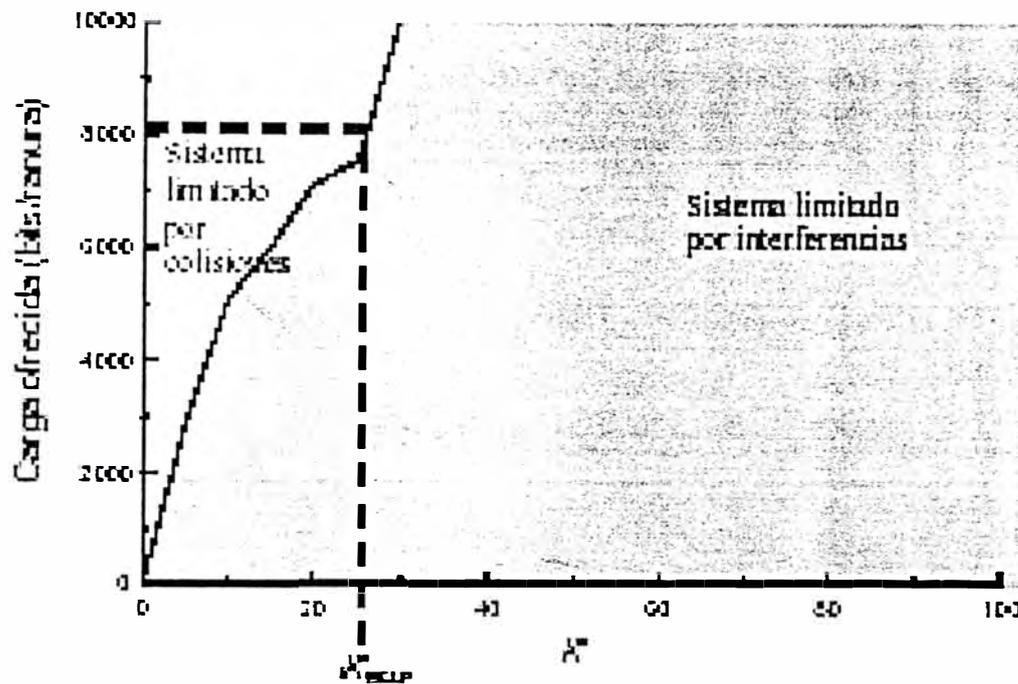


Figura 3.16: Influencia del número de códigos.

De forma análoga, con el procedimiento descrito se pueden obtener los valores del número máximo de códigos a emplear para otras ganancias de procesamiento y longitudes de paquete. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla siguiente, y la conclusión a remarcar es que, tal y como puede apreciarse en los tres casos considerados, se cumple que aproximadamente el número máximo de códigos  $K_{max}$  está alrededor del doble del máximo throughput teórico  $S_{max}$  que puede lograrse para cada caso, como resultado de la maximización de (3.119). Cabe destacar, por último, que a nivel del número de códigos  $K_{max}$  no se han apreciado diferencias significativas al estudiarse el sistema para diferentes valores de las probabilidades  $p_r$  y  $p_b$ , que en cualquier caso influyen sobre otros aspectos que se analizarán en las secciones siguientes.

$G_p$	$L$ (bits)	$S_{max}$ (paquetes/ranura)	$K_{max}$
128	300	31.4	60
64	600	14.5	28
32	1200	7.0	15

### 3.8 Influencia de la probabilidad de reaccionar a un código $p_r$

La probabilidad de reintentar el acceso a un código  $p_r$  tras producirse una colisión o un error en la transmisión basa su importancia en la capacidad para regular el número de accesos al sistema y en consecuencia para limitar tanto el número de colisiones como la interferencia generada sobre los usuarios que ya hayan adquirido su código. Desde este punto de vista, puede interesar reducir esta probabilidad puesto que así se reducirá la interferencia debida a los accesos, pero también se traducirá en un retardo superior para los usuarios que hayan sufrido colisiones. Por el contrario, valores elevados de la probabilidad de reintento tenderán a incrementar el número de colisiones pues muchos de los usuarios que no hayan logrado el acceso en una cierta ranura volverán a reintentarlo en la siguiente, con el consiguiente riesgo de sufrir nuevas colisiones.

Así pues, con objeto de analizar el efecto de esta probabilidad, en la Figura 3.17 se observa el throughput obtenido en un sistema DS/CDMA según el protocolo ISMA descrito para diferentes valores de la probabilidad de reintento  $p_r$ . Se observa que cuanto menor es  $p_r$  más lentamente se produce el decaimiento del throughput al aumentar la probabilidad de generación de nuevos mensajes  $p_i$  (y por lo tanto la carga), aunque, tal y como se aprecia en la Figura 3.18, empeoran ligeramente las prestaciones para cargas menores, en las que el retardo observado es mayor que

para valores superiores de  $p_r$ , debido a una ralentización del acceso de los usuarios que hayan sufrido alguna colisión.

En relación a esta última figura debe destacarse que, en el modelo de generación de mensajes considerado, no se genera un nuevo mensaje hasta que se ha finalizado la transmisión del mensaje en curso, lo que sería equivalente a no considerar buffer de mensajes en el transmisor. Así, el retardo presentado sería únicamente el retardo asociado al protocolo, sin contemplar la posibilidad de ningún retardo asociado al tiempo de espera en cola y que, en cualquier caso, será tenido en cuenta en el próximo capítulo, donde se contemplará, entre otras cosas, que se generen nuevos mensajes mientras dura la transmisión en curso.

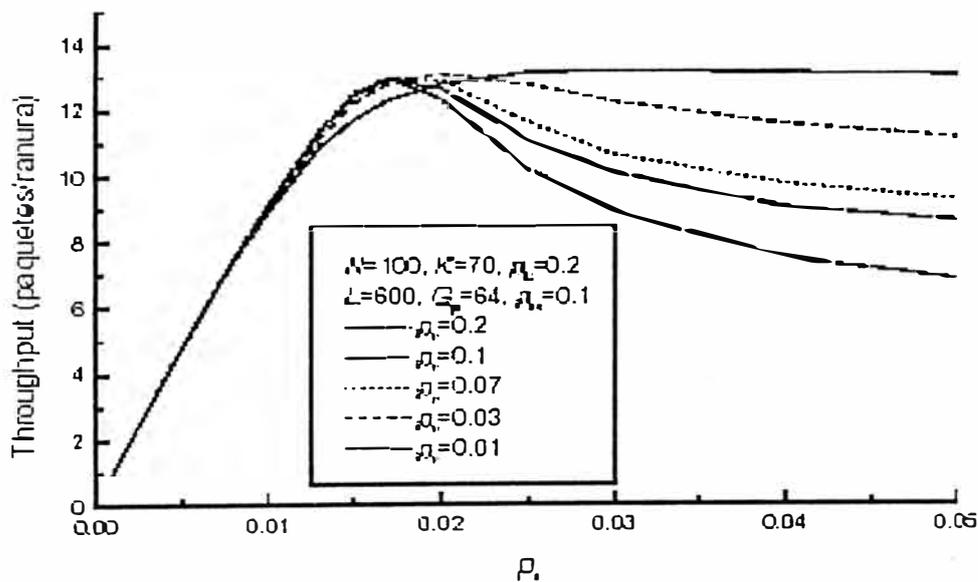


Figura 3.17: Throughput del sistema ISMA-DS/DSMA para diferentes valores de  $p_r$

Otra medida de interés para valorar el comportamiento de un sistema de estas características es el número medio de códigos libres existente, que debe ser contemplado en conjunción con otras curvas como la de throughput y retardo, y que se presenta en la Figura 3.19. En dicha figura se aprecia como el número de

códigos libre decrece a medida que se va incrementando la carga pero hasta el punto en que el sistema llega a su throughput máximo, momento en que parece estabilizarse a un cierto valor más o menos constante. Este hecho pone de manifiesto que, una vez llegados a este nivel de carga, el sistema es incapaz de incrementar el número de accesos correctos a pesar de que crezca el número de intentos, limitado por la interferencia multiusuario existente. Igualmente, se observa como para las cargas más elevadas, el número de códigos libre es menor cuanto mayor es la probabilidad  $p_r$ , lo que indica que se incrementa el número de usuarios que se encuentran en estado de transmisión o de retransmisión. En estas condiciones de carga alta, el interés es reducir  $p_r$ , para evitar accesos y así reducir el nivel de interferencia a fin de que los usuarios que están ocupando algún código lo liberen lo antes posible.

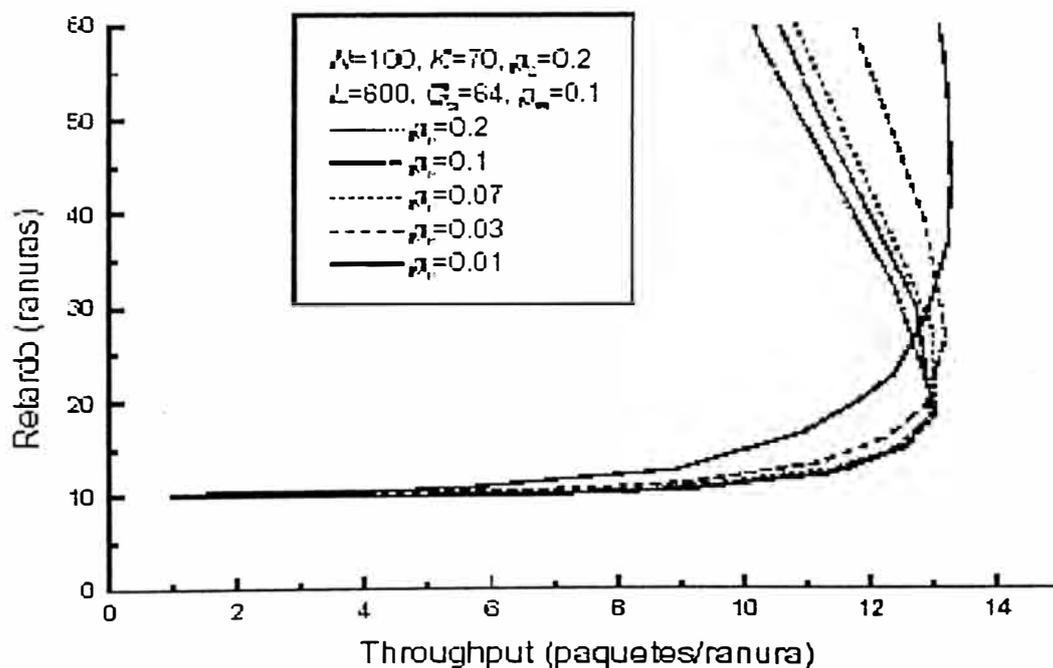


Figura 3.18: Retardo del sistema ISMA-DS/CDMA para diferentes valores de  $p_r$

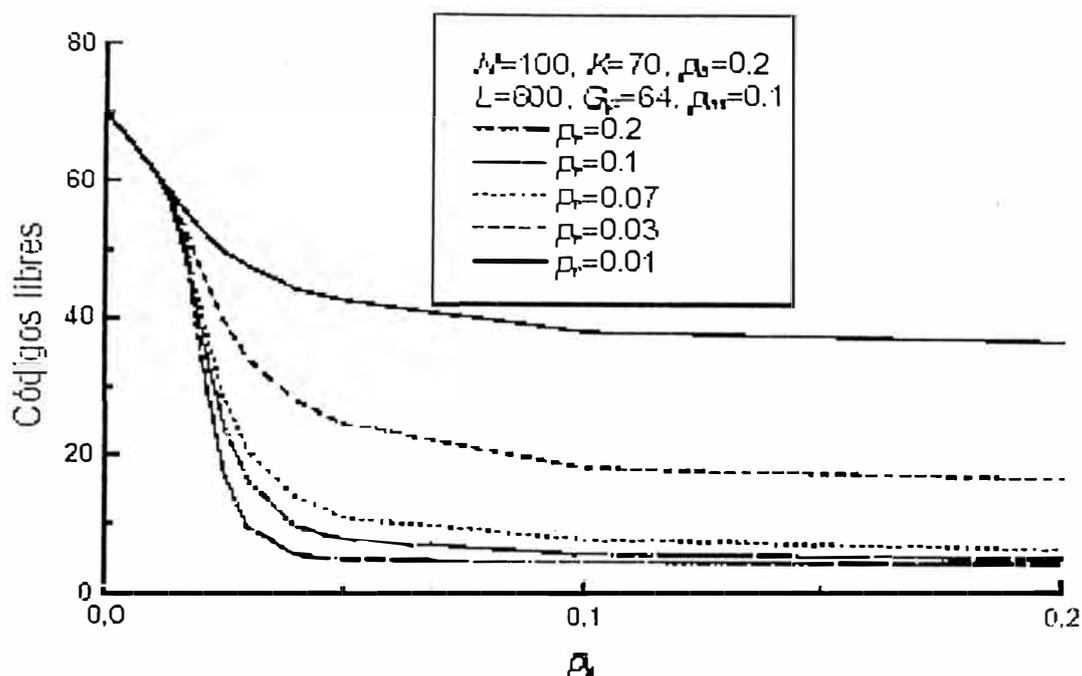


Figura 3.19: Número de códigos libres en un sistema ISMA-DS/CDMA para diferentes valores de  $p_r$ .

A la vista de los resultados obtenidos, la conclusión que se extrae del análisis de  $p_r$  es que, si bien para cargas elevadas interesa reducir dicha probabilidad, para cargas inferiores resultará beneficioso aumentarla para no penalizar innecesariamente a los usuarios que sufran colisiones. De este modo, más que trabajar con un valor de constante de  $p_r$  puede resultar más apropiada una estrategia adaptativa del valor de  $p_r$  en función del estado del canal en un momento dado, que podrá ser conocido a partir del número de códigos libres, difundido por la estación base.

### 3.9 Influencia de la probabilidad de retransmisión $p_b$ .

Otro de los aspectos que interesa analizar en un sistema ISMA-DS/CDMA es el efecto de la probabilidad de retransmisión  $p_e$  de los paquetes que no son correctamente recibidos una vez ya se dispone del código asignado. A primera vista, puede parecer lógico pensar que interesa trabajar con probabilidades de retransmisión altas para aprovechar al máximo el código que se tiene adquirido, especialmente si el sistema no está muy limitado por interferencias. Sin embargo, si se dispone de muchos códigos y en consecuencia hay muchos usuarios en el sistema, el uso de probabilidades de retransmisión elevadas puede hacer que continuamente se estén produciendo errores en la transmisión con lo que no se puedan transmitir los mensajes correctamente y en consecuencia no se liberen los códigos, lo que sería negativo tanto en términos de acceso como de transmisión.

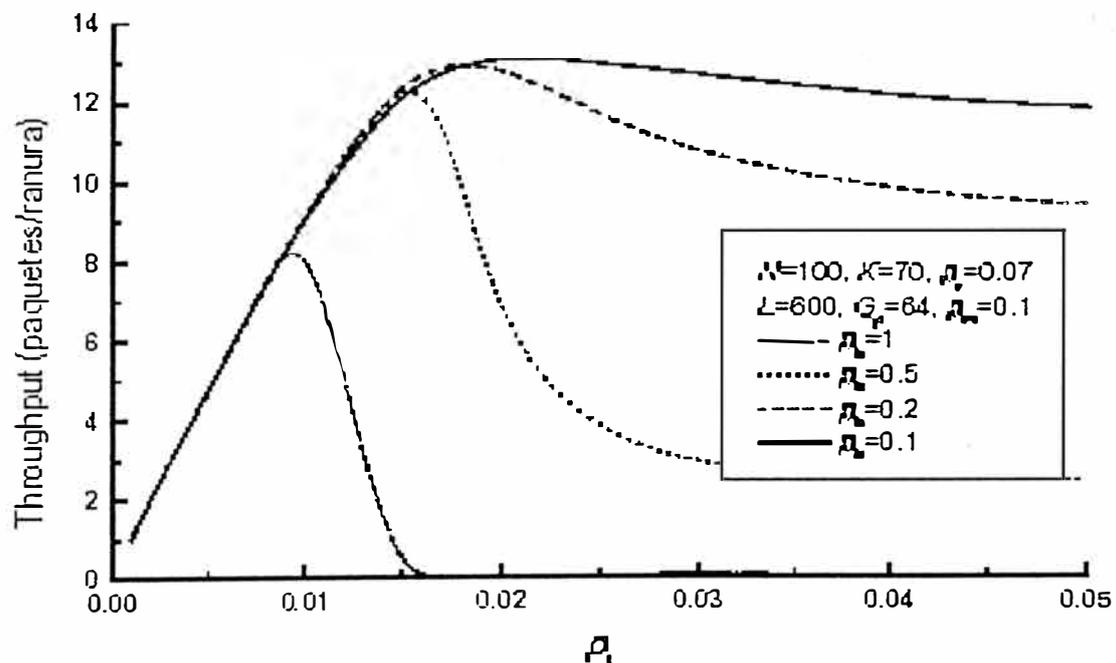


Figura 3.20: Throughput para diferentes valores de  $p_b$ .

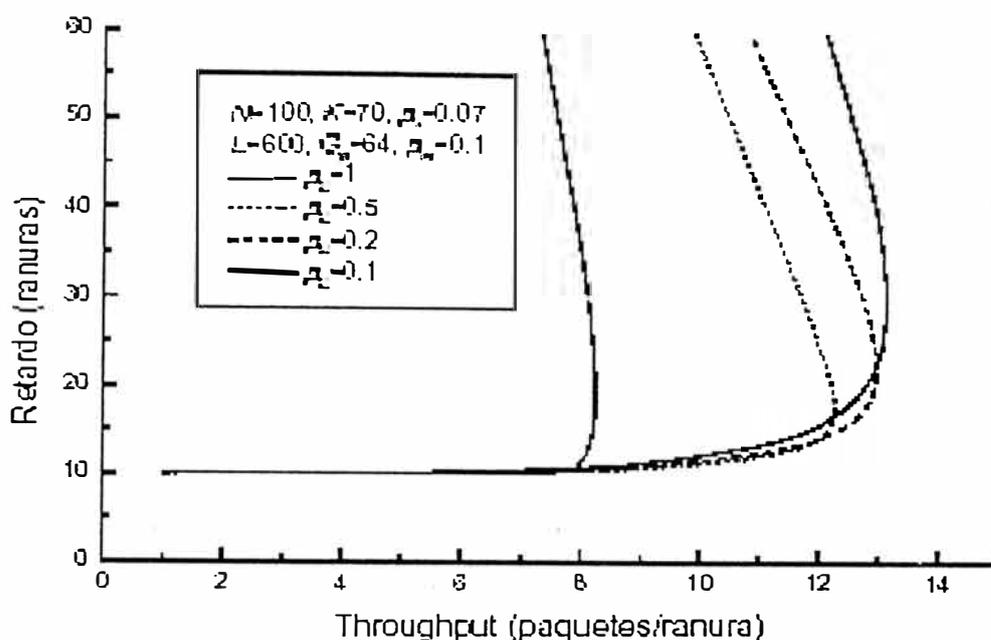


Figura 3.21: Retardo para diferentes valores de  $p_b$ .

En la Figura 3.20 se muestran los resultados en términos de throughput para diferentes valores de la probabilidad  $p_b$ , mientras que en la Figura 3.21 se presentan los resultados en términos de retardo. Los resultados que se observan son similares a los obtenidos en el apartado anterior al ir variando la probabilidad  $p_r$ . En ambos casos una reducción de la probabilidad resulta beneficioso para cargas elevadas. Por lo tanto, la idea de trabajar con  $p_r$  elevada para facilitar la transmisión de mensajes una vez se ha adquirido un código no es siempre adecuada, y los valores muy elevados son especialmente negativos según se desprende de las gráficas. Un razonamiento a esta circunstancia se encuentra en la Figura 3.22 donde se representa el número de códigos libres del sistema, de donde se deduce directamente el número de usuarios que tienen un código adquirido. Este número es suficiente como para que, aun en ausencia de nuevos accesos a código, si todos estos usuarios transmitieran simultáneamente, el nivel de interferencia generado

fuese tan elevado que prácticamente no se recibieran paquetes correctos. En concreto, para los parámetros de ganancia de procesamiento y longitud de paquete utilizados, se ha deducido numéricamente de la ecuación:

$$S = x p_{ok}(x) = x \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3G_p}{2(x-1)}} \right) \right)^L$$

,que el número de usuarios transmitiendo simultáneamente en el canal que maximiza el número de paquetes correctamente enviados es de unos 16 aproximadamente, mientras que en todos los casos de la figura el número de usuarios que tienen un código es muy superior. Esto implica que, para garantizar que haya transmisiones correctas y se puedan liberar códigos, no todos los usuarios deben transmitir a la vez, lo que finalmente se traduce en una necesidad de reducir la probabilidad  $p_b$ .

Se observa que, contrariamente a lo que pasaba al variar  $p_r$ , en que el número de códigos libres era menor cuanto mayor era esta probabilidad, ocurre lo contrario al variar  $p_b$ , lo que es lógico en tanto que valores bajos de dicha probabilidad harán que los usuarios conserven el código durante más tiempo a la vez que limitarán las interferencias, facilitando, al menos desde este punto de vista, el acceso de nuevos usuarios que contribuirá a reducir más el número de códigos libre. Por el contrario, valores altos de  $p_r$  originarán un nivel de interferencias que provocará por un lado que no se lleguen a producir nuevos accesos al dificultar la obtención de un código, y por otra parte que los usuarios que poseen un código lo mantengan al no poder enviar los paquetes correctamente, con lo que el número de códigos libres se mantendrá en un valor más elevado que para valores bajos de  $p_b$ .

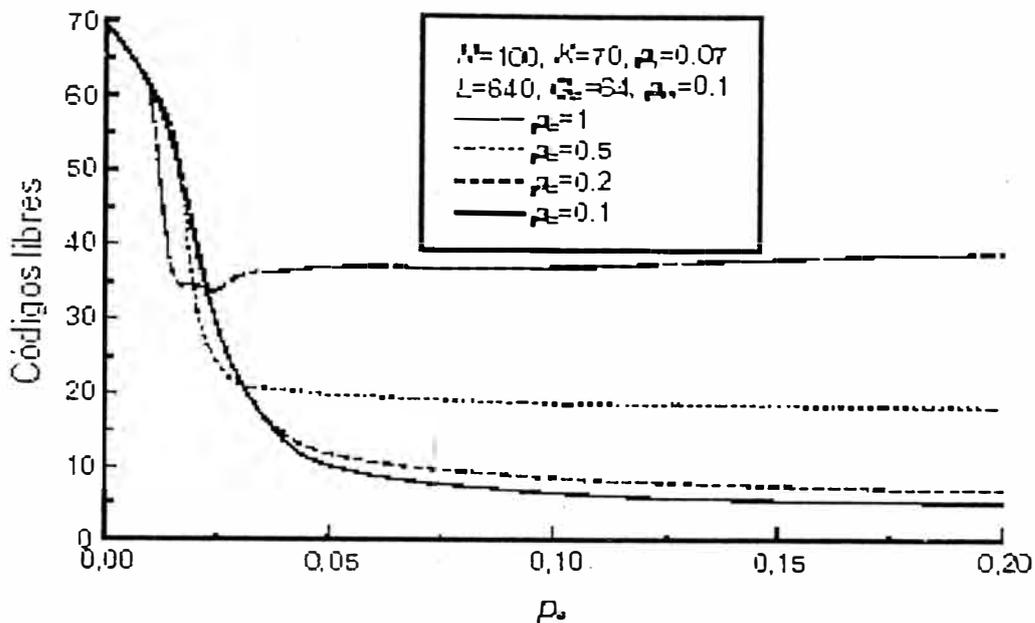


Figura 3.22: Número de códigos livres para diferentes valores de  $p_b$ .

Assim, se a conclusão geral do apartado anterior era que o adequado em termos de  $p_r$  era que não tivesse um valor constante, mas dependente do estado do sistema em um momento dado, ou dito de outra forma, incrementar o valor quando há códigos livres e reduzi-lo à medida que existe um menor número de eles, a conclusão respecto ao valor de  $p_b$  a utilizar é que parece que há de estar em certa maneira ligado à utilização que se faz dos códigos. Em particular, se o sistema fosse capaz de que em todo momento o número de códigos asignado fosse tal que quedassem suficientes códigos disponíveis como para não entorpecer o acesso a código e que ademais o nível de interferência gerado estivesse controlado, poderia ser vantajoso trabalhar com valores altos de  $p_b$ . De lo contrario, se deveria reducir  $p_r$ . Esta condição, por lo tanto, permite supeditar o valor de  $p_b$  a que necesariamente se efectue um control suficientemente adequado das interferências por meio de  $p_r$ .

## CAPITULO IV

### ASIGNACIÓN DE CANALES

#### 4.1 Estrategia de asignación de canales en un esquema TDD-TD/CDMA.

En el marco de los futuros sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, reflejados en la propuesta UTRA de acceso radio para UMTS se contemplan dos posibilidades en lo que a la técnica de duplexado empleada se refiere. Por un lado existe el duplexado por división en frecuencia, FDD, que considera una separación entre los enlaces ascendente y descendente a nivel de bandas de frecuencia utilizadas, y por el otro existe el duplexado por división en tiempo, TDD, que por el contrario asume una separación entre ambos enlaces a nivel de diferentes instantes temporales.

Hasta el momento, en el presente informe de suficiencia se ha contemplado únicamente la primera de las dos posibilidades que es, por otra parte, la más utilizada tanto en los sistemas de segunda generación como la que ha adquirido un mayor grado de relevancia hasta la fecha en la definición de los estándares UMTS. Sin embargo, el mecanismo de duplexado TDD presenta de forma inherente un conjunto de características que lo convierten en adecuado para la transmisión a velocidades elevadas en entornos de reducida movilidad y que además incorpora la posibilidad de adaptarse dinámicamente a las diferentes asimetrías que pueden darse según el tipo de servicios considerado. A modo de ejemplo puede considerarse el tráfico relacionado con el mundo de Internet, que presenta una

naturaleza claramente asimétrica desde el punto de vista de que las cantidades de información que han de transmitirse hacia el usuario, esto es archivos, imágenes, páginas WWW, etc., presentan un volumen mucho mayor que la información que debe ser transmitida en el sentido contrario la cual, esencialmente, constará de pequeños comandos que desencadenen la descarga de páginas, reconocimientos asociados al mecanismo TCP empleado, ... Por este motivo, parece lógico habilitar mecanismos que tengan en cuenta esta diferente ocupación de recursos en uno y otro sentido, como ocurre con la técnica de duplexado TDD.

De todos modos, dentro de la propuesta UTRA TDD, la diferencia respecto de UTRA FDD no radica únicamente en el mecanismo de duplexado, sino que la técnica de acceso múltiple empleada también presenta una naturaleza diferente al tratarse de un híbrido entre TDMA y DS/CDMA. Así, cada trama TDD está compuesta por un conjunto de ranuras temporales cada una de las cuales puede ser utilizada por diferentes usuarios separados mediante el empleo de secuencias código ortogonales OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor). Dentro de esta estructura de trama, habrá ranuras destinadas al enlace ascendente y ranuras destinadas al enlace descendente, no existiendo ninguna especificación a priori sobre el número de ranuras de cada tipo, lo que permite ajustar la estructura de trama a la asimetría del tráfico manejado.

Bajo el marco de referencia planteado, y en línea con el trabajo ya expuesto dentro de este estudio, a lo largo de este capítulo y del siguiente se analiza la adaptación a un entorno TDD de los mecanismos de transmisión de paquetes estudiados en el contexto FDD. Para ello, se discutirán inicialmente algunas de las peculiaridades que la combinación TDD-TD/CDMA presenta y que deben ser tenidas en cuenta a la hora de desarrollar protocolos de acceso múltiple y mecanismos de gestión de recursos adecuados. Dentro de estas peculiaridades

quizá la más relevante es la problemática relacionada con el diferente grado de asimetría que puede existir entre celdas vecinas, y que puede originar, bajo determinadas condiciones, situaciones de elevada interferencia. El modo de combatir esta problemática radica en apoyarse en mecanismos apropiados de asignación dinámica de canales DCA en función de la interferencia detectada en cada uno de los recursos considerados. Por consiguiente, al plantear soluciones para garantizar calidad de servicio en esquemas de transmisión por paquetes en un entorno de estas características, es necesario abordar, además de los aspectos ya considerados como el protocolo de acceso múltiple, el algoritmo de gestión de recursos y el control de admisión, un mecanismo de asignación dinámica de canales adecuado, siendo este último el que se pretende cubrir en detalle a lo largo de este capítulo. A su vez, para el capítulo siguiente se dejarán los aspectos relativos al protocolo de acceso y al algoritmo de gestión de recursos.

## **4.2 Descripción general de la estructura de canales físicos definida en UTRA TDD.**

Con el objetivo de ubicar el presente análisis dentro de un contexto lo más realista posible, se ha tomado como referencia la estructura de canales físicos que se define para el modo TDD en la propuesta UTRA de acceso radio para UMTS, y que a continuación se detalla, a modo de planteamiento introductorio.

### **4.2.1. Organización de la estructura de tramas y de ranuras temporales.**

Los canales físicos constituyen el soporte sobre el que se ubican los diferentes canales de transporte en UTRA TDD. La estructura básica sobre la que se sustenta cada portadora en UTRA TDD está constituida por tramas de 10 ms cada una compuesta por un total de 15 ranuras temporales de duración 666  $\mu$ s, correspondiente a 2560 chips por ranura a la tasa de 3.84 Mc/s. Aunque esta

estructura de trama es análoga a la definida para el modo FDD, existe un conjunto de diferencias fundamentales entre ambas propuestas:

1.- El significado de ranura temporal es diametralmente opuesto en ambas propuestas: si bien en UTRA FDD surge de la necesidad de disponer de un control de potencia suficientemente rápido, de manera que cada ranura se corresponde con un ciclo de control de potencia y un terminal hace uso de todas las ranuras de la trama, en UTRA TDD el concepto de ranura proviene de la componente por división en tiempo heredada de la técnica de acceso múltiple empleada, que como ya se ha especificado es un híbrido entre TDMA y CDMA. De este modo, los usuarios no emplearán todas las ranuras de la trama sino únicamente aquellas que de algún modo les hayan sido asignadas.

2.- Cada una de las ranuras de la trama puede estar asignada al enlace ascendente o al descendente, obteniéndose diferentes configuraciones que permiten un alto grado de flexibilidad adaptándose al grado de asimetría de los diferentes servicios. En cualquier caso, es una limitación establecida en la propuesta que, como mínimo, una ranura deberá corresponder al enlace ascendente, a través del cual viajará el canal de acceso aleatorio RACH, y otra al enlace descendente, que transportará el canal de difusión BCH y el de sincronización SCH. A modo de ejemplo, en la Figura siguiente se muestran diferentes configuraciones posibles, caracterizadas por el número de ranuras dedicadas a cada enlace y por los denominados puntos de conmutación (switching points), que son las separaciones entre ranuras ascendentes y descendentes.

3.- La componente TDMA de la propuesta UTRA TDD origina la necesidad de utilizar mecanismos de avance temporal (time advance) para evitar el posible solapamiento que pudiera ocurrir en diferentes ranuras debido a los diferentes tiempos de propagación hacia la base de las señales provenientes de usuarios

distintos. A estos efectos, existen dos modos de funcionamiento relativos al avance temporal empleado:

a) En caso de no existir sincronización en el enlace ascendente, la resolución empleada en el avance temporal es de 4 chips. Esta resolución temporal se traduce en una resolución espacial de valor 156.25 m, de manera que se obtiene una baja capacidad para discriminar ubicaciones de terminales diferentes. El valor del avance temporal se codifica con un número entre 0 y 63.

b) En caso de utilizarse sincronización en el enlace ascendente, el ajuste del avance temporal se lleva a cabo con una granularidad por debajo del período de chip mediante una resolución de 1/4 de chip. Este valor se traduce en una resolución espacial de 9.76 m, otorgando, por lo tanto, una mayor capacidad para posicionar terminales. Debe notarse que el empleo de esta técnica, conjuntamente con los códigos OVSF utilizados, permite obtener en el enlace ascendente un alto grado de ortogonalidad entre las señales provenientes de diferentes usuarios.

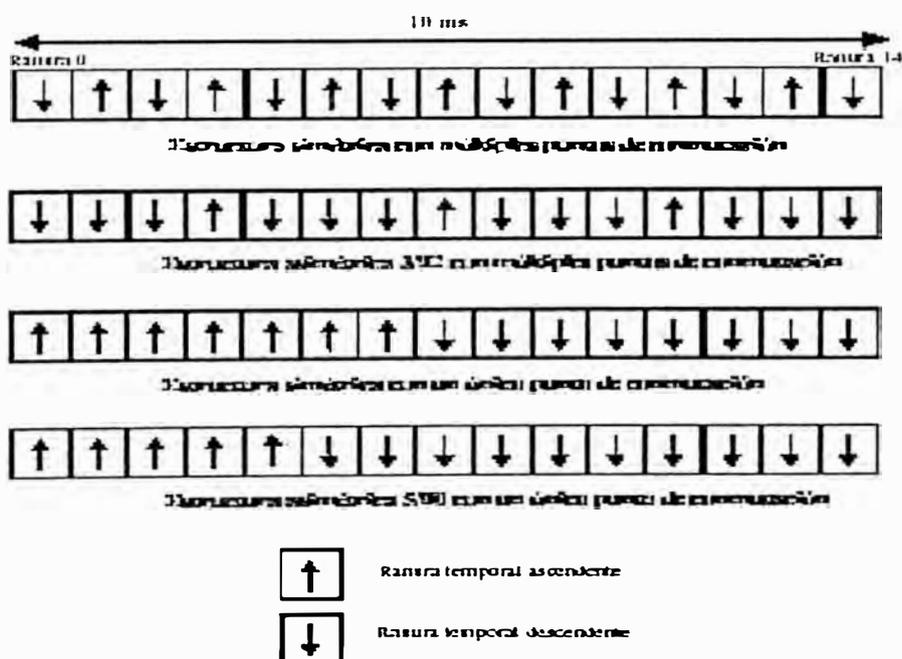


Figura 4.1: Ejemplo de diferentes figuras asimétricas en una trama FDD.

#### 4.2.2 Códigos de ensanchado.

Dada la naturaleza CDMA del acceso radio UTRA TDD, es preciso definir el tipo de secuencias código que permiten separar las transmisiones efectuadas dentro de una misma ranura temporal. Al igual que ocurre en el caso del duplexado FDD, el proceso de ensanchado se efectúa mediante dos tipos de secuencias código:

1) Códigos de canalización: permiten efectuar la separación entre terminales de una misma estación base. Se hace uso de los denominados códigos OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor), una familia de códigos ortogonales que, a partir de la estructura en árbol mostrada en la Figura 4.2, permite alternar diferentes valores de ganancia de procesado entre 1 y 16 preservando la ortogonalidad.

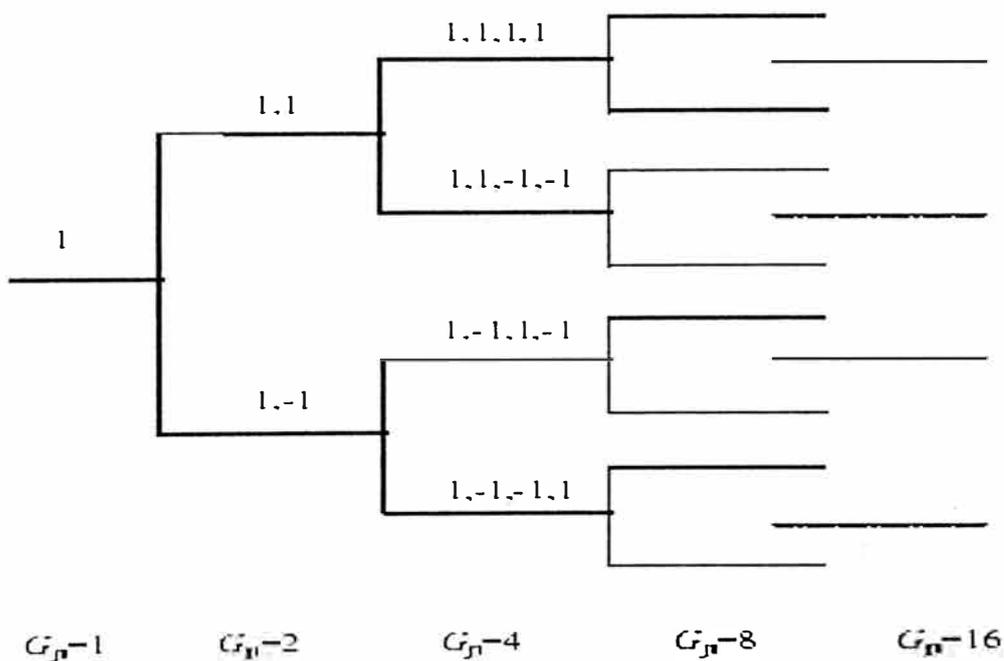


Figura 4.2: Árbol de códigos OVSF.

Nótese en la Figura 4.2 el mecanismo de generación de los códigos OVSF: como puede observarse, existe una rama básica, de ganancia de procesado 1, a

partir de la cual se obtienen las secuencias a emplear con las ganancias de procesamiento superiores. Obsérvese como, para pasar de una ganancia de procesamiento  $G_p$  a  $2G_p$ , lo que se hace es, en la rama superior, duplicar la secuencia origen, y en la rama inferior duplicar e invertir dicha secuencia. Así, por ejemplo, partiendo de la secuencia de dos chips (1, -1) correspondiente a  $G_p=2$  se obtienen dos secuencias de 4 chips, correspondientes a  $G_p=4$ , de valores (1,-1,1,-1) (se ha duplicado la secuencia origen) y (1, -1, -1, 1) (se ha duplicado e invertido la secuencia origen).

Mediante este mecanismo de generación se obtienen conjuntos de  $G_p$  secuencias de ganancia de procesamiento  $G_p$ , todas ellas ortogonales. Debe tenerse presente que la ortogonalidad no se preserva entre una secuencia y las de  $G_p$  diferentes que se encuentran en su misma rama. Por este motivo, la asignación de códigos OVSF debe llevarse a cabo cuidadosamente porque la utilización de ciertos códigos puede inhabilitar la utilización de otros. A modo de ejemplo, considérese la asignación a un usuario del código (1, -1) de  $G_p=2$ ; esta circunstancia inhibiría para otros usuarios los códigos (1,-1,1,-1) y (1, -1, -1, 1) de  $G_p=4$ , así como todos los códigos de ganancia de procesamiento superior que de ellos se deriven. Igualmente, estaría inhibida la utilización de  $G_p=1$ .

2) Códigos de scrambling: tras efectuar el proceso de ensanchado mediante el código de canalización, se aplica un código de scrambling único para cada celda, lo que permite distinguir las transmisiones realizadas en estaciones base diferentes. Existen un total de 128 códigos de scrambling complejos diferentes, todos ellos de longitud 16 chips.

El mencionado proceso de ensanchado es válido tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente, lo que garantiza un elevado grado de ortogonalidad en las transmisiones en ambos sentidos, contrariamente a lo que ocurre en el modo FDD, en que las señales de los usuarios en el enlace

ascendente viajan ensanchadas mediante secuencias de scrambling diferentes que no son perfectamente ortogonales. Esta característica de UTRA TDD provoca que la interferencia intracelular sea muy pequeña y que mayoritariamente el sistema esté limitado por la interferencia de otras celdas. Factores adicionales que contribuyen también a la reducción de la interferencia intracelular en el enlace ascendente son:

- empleo de estrategias de detección multiusuario: Gracias a la utilización de cierto tipo de secuencias de entrenamiento para la estimación de la respuesta impulsional de los canales de diferentes usuarios, que se describirán posteriormente, así como al reducido número de señales simultáneas de que se dispone (a lo sumo 16), es posible implementar en la estación base mecanismos de reducción de la interferencia a base de estimar, para un usuario dado, la contribución de interferencia del resto de usuarios y restarla de la señal total recibida.
- mecanismos de avance temporal: Como ya se ha especificado, en el caso de sincronización en el enlace ascendente, es posible conseguir ajustar las diferentes señales recibidas con una resolución de hasta 1/4 de chip. Esta alineación entre las señales recibidas de diferentes usuarios permite preservar en un alto grado la ortogonalidad aportada por los códigos OVSF.

#### **4.2.3 Transmisión multicódigo y transmisión con múltiples ganancias de procesado.**

Dentro de la normativa UTRA TDD, se definen dos posibilidades de utilización de la estructura del árbol de códigos OVSF para obtener velocidades de transmisión variables, a saber, el empleo de transmisión multicódigo o de transmisión con múltiples ganancias de procesado (denominada, habitualmente, multisreading). En el primer caso, el aumento de velocidad de transmisión se

consigue mediante la transmisión en paralelo de diferentes códigos de igual ganancia de procesado, en concreto,  $G_p=16$ . Por el contrario, en el segundo caso, la variación de velocidad se consigue a base de desplazarse convenientemente por el árbol de códigos OVFSF utilizando diferentes ganancias de procesado entre 1 y 16.

A efectos de consumo de recursos del sistema, es indiferente el empleo de una u otra estrategia, puesto que el mismo número de bits se transmiten, por ejemplo, mediante dos códigos de  $G_p=16$  que mediante un código de  $G_p=8$  bits. Así pues, las diferencias entre una y otra estrategia quedan patentes con los siguientes aspectos:

- la transmisión multicódigo requiere de tantas ramas en el transmisor como códigos simultáneos se estén transmitiendo, al necesitarse un proceso de ensanchado para cada código. Esto se traduce en una mayor complejidad física del equipo transmisor.
- en caso de emplearse transmisión multicódigo un elevado nivel de linealidad es requerido en los amplificadores en transmisión, para cubrir un mayor margen dinámico resultante de la contribución de las diferentes transmisiones en paralelo.
- la transmisión con múltiples ganancias de procesado permite un menor nivel de granularidad al efectuarse la asignación de recursos, dado que la velocidad de transmisión puede únicamente ajustarse en potencias de dos. A modo de ejemplo, considérese el número de bits que se envían mediante el uso de tres códigos de  $G_p=16$  en paralelo. Bajo esta hipótesis, para poder enviarse la misma cantidad de información útil, empleándose una estrategia de ganancia de procesado variable, la única posibilidad sería el uso de un código de  $G_p=4$ , cuya capacidad de transmisión es superior a tres códigos en paralelo, de modo que existiría un cierto desaprovechamiento de recursos. Nótese, en cualquier caso, que la problemática de la granularidad puede mejorarse mediante el uso simultáneo de ambas

estrategias. Así pues, en el ejemplo considerado, bastaría con emplearse un código de  $G_p=8$  y otro de  $G_p=16$ .

Partiendo de estas características, la propuesta UTRA TDD define que estas dos estrategias se empleen en los dos enlaces existentes. Así, se especifica que:

- en el enlace ascendente se utiliza una combinación entre múltiples ganancias de procesado y multicódigo, pero con la limitación de un máximo de dos códigos en paralelo, lo que resulta del deseo de mantener una menor complejidad en el transmisor de la estación móvil, manteniendo un mayor grado de granularidad de la que se obtendría con el uso únicamente de múltiples ganancias de procesado.
- en el enlace descendente se emplea transmisión multicódigo, de modo que tan solo es posible la transmisión con  $G_p=16$ . La única salvedad es cuando un usuario ocupa todos los recursos de una ranura, caso en que puede emplearse  $G_p=1$ . En este caso, la opción tomada pone de manifiesto el mantenimiento de la mejor granularidad combinada con el hecho de que la complejidad en la estación base es un aspecto mucho menos problemático que en el terminal móvil. De hecho, debe notarse que en el transmisor de la base es necesario, en cualquier caso, disponer de tantas ramas como códigos existan, aunque no se empleara multicódigo para un usuario, puesto que podría darse el caso extremo de que cada rama del transmisor fuera ocupada por un usuario distinto.

#### **4.2.4 Estructura de las ráfagas en UTRA TDD.**

Cada usuario al que se le ha asignado una ranura y un código de ensanchado transmite la información organizada según una cierta estructura de bits denominada ráfaga (burst) que incluye tanto bits de información como secuencias de entrenamiento destinadas a la estimación de canal. La longitud en bits de estas

ráfagas depende del factor de ensanchado empleado de manera que en todo momento se mantenga constante la tasa de chips utilizada.

Dentro de UTRA TDD se definen dos tipos de ráfagas básicas que son empleadas por la mayoría de los canales. Su estructura se muestra en la Figura 7.3. Como puede observarse, la diferencia entre las dos ráfagas radica en la longitud de la secuencia de entrenamiento o midámbulo, que repercute sobre la cantidad de información que puede transmitirse en cada ráfaga.

#### 4.2.5 Campo de datos

La longitud de cada uno de los dos campos de datos de las ráfagas 1 y 2 son 976 y 1104 chips, respectivamente. A partir de estos valores, en función de la ganancia de procesamiento empleada, que toma valores entre 1 y 16 y considerando que se emplea una modulación QPSK, el número de símbolos en cada campo de datos es de  $976/2^K$  y  $1104/2^K$  para las ráfagas 1 y 2, con  $K=0..4$ .

De este modo, el número mínimo de bits que pueden enviarse en una ráfaga se da para la ganancia de procesamiento máxima, 16, y es de 244 bits para la ráfaga de tipo 1 y de 276 para la ráfaga de tipo 2. Por el contrario, haciendo uso de la mínima ganancia de procesamiento, 1, el número de bits asciende a 3904 y 4416, respectivamente. Por lo tanto, la máxima velocidad de transmisión teórica que podría conseguirse mediante UTRA TDD se daría cuando un usuario tuviera asignadas 13 ranuras para el enlace ascendente o descendente (siempre debería existir una ranura para el canal de acceso aleatorio y otra para el canal de difusión y de sincronización, por lo que no sería posible mantener 15 ranuras) y en cada una transmitiera el máximo número de bits posible. Esto supondría una tasa bruta de  $13 \cdot 4416 \text{ bits} / 10 \text{ ms} = 5.74 \text{ Mb/s}$ , que se reduciría a 2.87 Mb/s caso de emplearse codificación de canal de tasa 1/2.

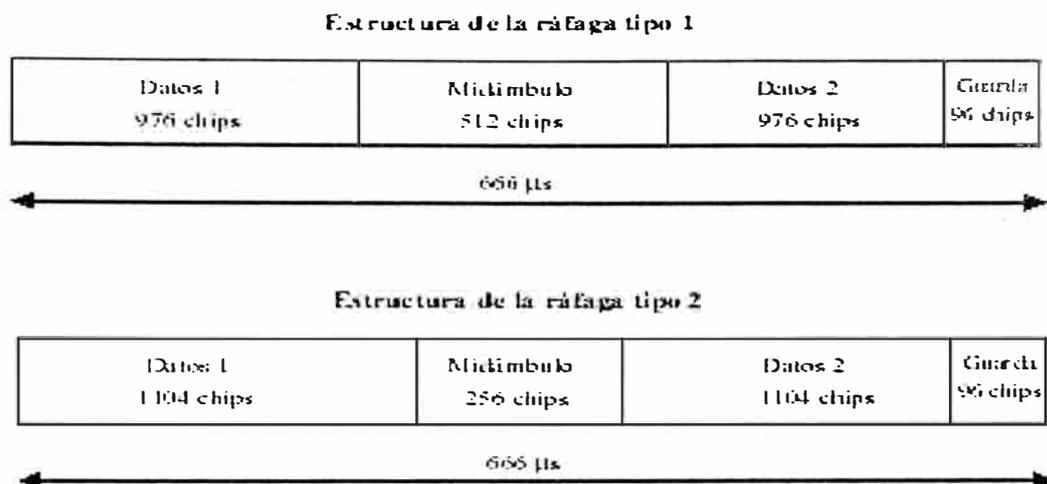


Figura 4.3: Estructura de ráfagas 1 y 2.

Cabe destacarse que, dentro de la estructura básica mostrada en la Figura 4.3, existen algunas variantes que incluyen la presencia de bits destinados al control de potencia en el enlace ascendente (bits TPC) así como bits para indicar el formato de transmisión empleado (bits TFCI). La presencia o no de estos campos en la ráfaga deberá señalizarse mediante mensajes de niveles superiores para poder efectuar correctamente la decodificación de la información.

#### 4.2.6 Midámbulo.

El midámbulo o secuencia de entrenamiento se ubica en la parte intermedia de cada ráfaga y permite efectuar la estimación de la respuesta impulsional del canal para cada transmisión efectuada. Cada usuario activo dentro de una misma ranura utiliza un midámbulo diferente, existiendo una correspondencia directa entre los midámbulos empleados y los códigos OVSF.

En cada celda existe un conjunto diferente de midámbulos y cada conjunto se construye, como se muestra en la Figura siguiente para el caso de la ráfaga de tipo 1, a partir de diferentes desplazamientos cíclicos de una secuencia básica de

símbolos complejos de período 3 chips diferente para cada una de las celdas presentes en el sistema. Tal y como se observa, repitiendo el período básico de una secuencia de  $P=456$  chips se construye una secuencia mayor de 939 chips. A partir de aquí, los midámbulos numerados del 1 al 8 se obtienen como fragmentos de  $L_m=512$  chips de esta última secuencia desplazados 57 chips de modo que el origen del midámbulo 8 coincide con el de la secuencia original. Análogamente, los midámbulos numerados del 9 al 16 se obtienen como fragmentos de igual longitud y también separados 57 chips pero con un desplazamiento adicional respecto del inicio de la secuencia inicial de valor 28 chips.

Esta característica de generación de los diferentes midámbulos simplifica la estimación conjunta de las respuestas impulsionales de cada una de las transmisiones llevadas a cabo en una ranura dada, pues permite que con un único correlador sean obtenidas secuencialmente las estimaciones de cada una de ellas.

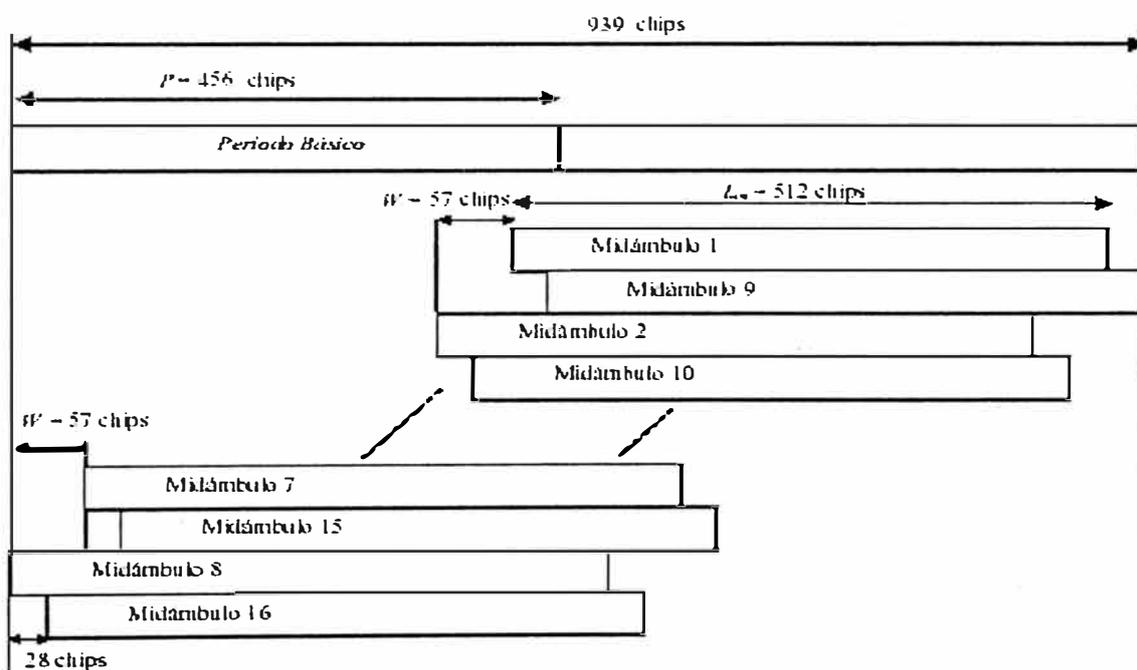


Figura 4.4: Generación de midámbulos para la ráfaga tipo 1.

En caso de emplearse la ráfaga de tipo 1 el período de la secuencia básica es  $P=456$  chips mientras que para la ráfaga de tipo 2 es  $P=192$  chips. Según el mecanismo de generación planteado, esto provoca que mediante la ráfaga de tipo 1 puedan obtenerse hasta 16 midámbulos (esto es, capacidad para estimar simultáneamente hasta 16 respuestas impulsionales diferentes) mientras que con la ráfaga de tipo 2 únicamente sea posible obtener hasta 6 midámbulos. Por consiguiente, esto impone restricciones sobre el número máximo de transmisiones simultáneas que pueden efectuarse en una ranura del enlace ascendente, siendo la ráfaga de tipo 1 la única que puede llegar a permitir que los 16 códigos OVSF de una ranura estén ocupados al mismo tiempo. Por otra parte, dado el mecanismo de generación de secuencias, no es posible el uso simultáneo en una misma ranura de ráfagas de los tipos 1 y 2. Nótese igualmente que para el enlace descendente no existe ninguna limitación en el número de usuarios activos que venga impuesta por la longitud de los midámbulos puesto que, en cualquier caso el receptor debe estimar únicamente una respuesta impulsional.

#### 4.2.7 Período de guarda.

Para ambos tipos de ráfagas, el período de guarda establecido para evitar las posibles interferencias entre ranuras consecutivas es de  $TG= 96$  chips. Esto supone que, en ausencia de ningún mecanismo de avance temporal, el máximo radio que podría tener una celda sería de:

$$R_{\text{max}} = \frac{c \cdot TG}{2} = 3.75 \text{ km}$$

Nótese, de todos modos, que el radio máximo resultante excede los radios típicos de las celdas TDD que, principalmente, serán micro y picoceldas, y que, en

cualquier caso, esta limitación surgiría únicamente si se transmitieran ráfagas de los tipos 1 y 2 sin ningún mecanismo de avance temporal.

#### 4.2.8 Ráfaga de acceso.

Si bien las ráfagas de los tipos 1 y 2 son las empleadas por la mayoría de los canales de transporte (canales de tráfico TCH, de difusión BCH o canales compartidos USCH y DSCH), existe un tipo de ráfaga que, al igual que ocurre en sistemas de segunda generación como GSM, tiene en cuenta las peculiaridades del acceso aleatorio al sistema y por lo tanto presenta una estructura que difiere de la ráfaga de tráfico. En particular, en UTRA TDD se define la ráfaga de acceso, o canal físico PRACH (Physical Random Access Channel), que es la empleada por los usuarios cuando desean acceder al sistema por vez primera.

La estructura de la ráfaga de acceso es esencialmente la misma que la de la ráfaga de tipo 1 pero con la salvedad de que el campo de datos 2 se ha recortado a 880 chips en beneficio de un mayor tiempo de guarda al final de la ranura, que pasa a ser de 192 chips, el doble que en las ráfagas de los tipos 1 y 2. Este mayor tiempo de guarda responde a la imposibilidad de aplicar mecanismos de avance temporal al efectuarse el acceso al sistema debido a la carencia de un canal en el enlace descendente que pueda comunicar el avance a aplicar. Con el tiempo de guarda definido para el PRACH, el máximo radio que la celda UTRA TDD podrá tener será de 7.5 km.

Respecto al tipo de midámbulos empleado en la ráfaga de acceso, éstos son los mismos que se utilizan en la ráfaga de tipo 1.

Por otra parte, una de las limitaciones definidas para el canal PRACH es la ganancia de procesamiento empleada, que únicamente puede tomar dos valores, 8 ó 16, y en ambos casos el número máximo de accesos simultáneos está limitado a 8.

#### 4.2.9 Ráfaga de sincronización.

Por último, otra ráfaga de características esencialmente diferentes a las ráfagas de tipos 1 y 2 es la utilizada por el canal de sincronización SCH, cuya finalidad es permitir a los terminales móviles la adquisición del sincronismo a nivel de trama y de ranura temporal de modo que sean capaces de decodificar el canal de difusión BCH y así poder extraer los parámetros necesarios para efectuar el acceso al sistema cuando lo consideren oportuno.

Fundamentalmente, el canal de sincronización, tal y como se muestra en la Figura siguiente, se construye a partir de la transmisión simultánea de 4 secuencias de 256 chips, a saber, el denominado código de sincronización primario, común para todas las celdas del sistema, y tres códigos de sincronización secundarios. El instante de inicio de la transmisión de estas cuatro secuencias ocurre tras un cierto desplazamiento temporal u offset diferente para cada estación base, respecto del inicio de la ranura. Dicho offset viene motivado por la existencia de sincronización a nivel de ranura entre estaciones base de UTRA TDD, lo que podría originar un efecto captura por el cual la señal de una estación base enmascarase la señal del resto de estaciones y, en consecuencia, limitase la capacidad del terminal para tomar medidas de más de una base.

Existen dos posibilidades de ubicación del canal de sincronización dentro de la estructura de trama UTRA TDD: bien puede ubicarse en una única ranura o bien en dos diferentes separadas por 8 ranuras, siendo esta última estructura más apropiada en entornos de alta densidad celular. En cualquier caso, el canal físico PCCPCH (Primary Common Control Physical Channel) que transporta el canal de difusión BCH, se ubica siempre en una de las ranuras ocupadas por el canal de sincronización, empleando una secuencia código diferente.

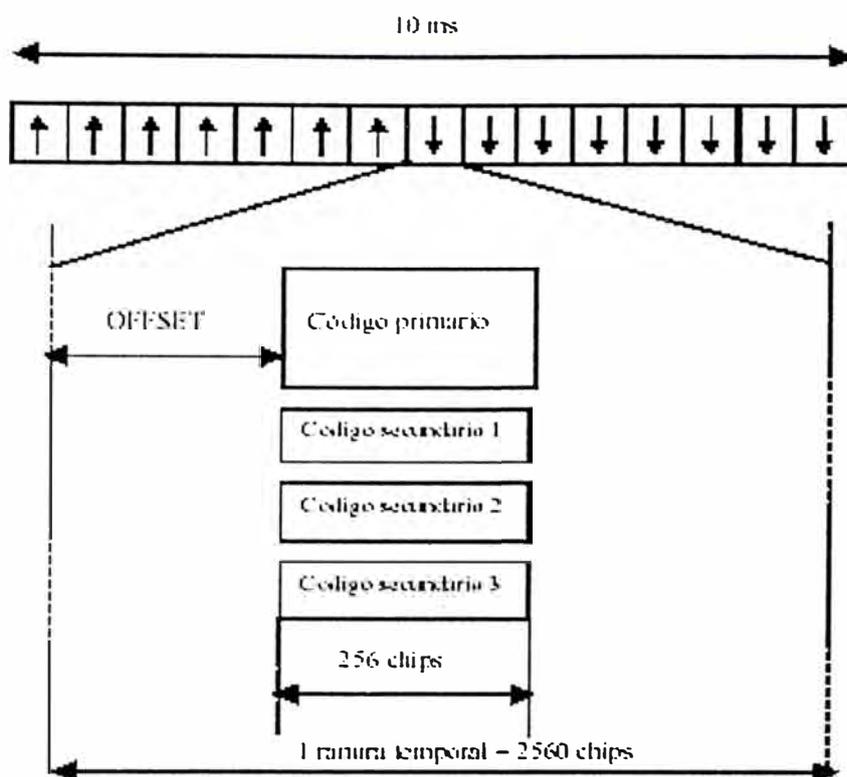


Figura 4.5: Estructura de una ranura temporal de sincronización.

La estructura del canal de sincronización responde al procedimiento seguido por los terminales para efectuar el proceso de búsqueda de celda cuando son activados:

1.- En primer lugar, el terminal efectúa una detección, mediante filtro adaptado, del código de sincronización primario, que es conocido al ser único para todo el sistema. Esto le permite obtener el sincronismo de ranura temporal con la base de la que recibe más potencia.

2.- Una vez conseguido el sincronismo de ranura temporal, se procede a la detección de los tres códigos de sincronización secundarios. Existe un total de 12 códigos de sincronización secundarios diferentes para todo el sistema. A partir de este conjunto, se definen 32 combinaciones de tres códigos, de modo que cada

estación base tiene asignada una de estas combinaciones, lo que la diferencia del resto de sus vecinas. A partir de la detección de la combinación empleada, así como de la información modulada QPSK en estas secuencias código, el terminal es capaz de extraer la siguiente información:

- el número de ranuras que ocupa, dentro de la trama, el canal de sincronización
- el offset respecto del inicio de la ranura
- el grupo de códigos de SCRAMBLING al que pertenece el empleado por la base en cuestión. Existe un total de 32 grupos, cada uno constituido por 4 códigos de SCRAMBLING.
- posición, dentro de la trama, que ocupa el canal BCH

3.- Finalmente, a partir de la información extraída del canal de sincronización, el terminal es capaz de detectar, por correlación con los 4 códigos de SCRAMBLING posibles según el grupo determinado, cual es el código de SCRAMBLING empleado por la estación base así como la secuencia periódica básica para generar los midámbulos. Tras este procedimiento, el terminal es capaz de decodificar la información del canal de difusión y extraer los parámetros necesarios para efectuar el correspondiente acceso cuando lo considere oportuno.

#### **4.3 Peculiaridades del duplexado TDD en un entorno TD/CDMA.**

A continuación se discuten algunos de los aspectos característicos de la técnica de duplexado TDD combinada con la técnica de acceso múltiple TDMA/CDMA.

##### **4.3.1 Control de potencia.**

Como es sabido, uno de los elementos fundamentales en cualquier sistema de transmisión basado en DS/CDMA, es la necesidad de disponer de un control de potencia que permita mantener regulado el nivel de interferencia generado sobre el

resto de conexiones. Dentro de las dos posibilidades para llevar a cabo el control de potencia, que son el control en lazo abierto y en lazo cerrado, dentro de un entorno de duplexado FDD existe una diferencia sustancial entre uno y otro método, dado el diferente comportamiento del canal a nivel de desvanecimientos rápidos en los enlaces ascendente y descendente. Sin embargo, al considerar una técnica de duplexado TDD, aparece el concepto de RECIPROCIDAD del canal, por el cual, al viajar los enlaces ascendente y descendente a la misma frecuencia, si la separación temporal entre ambos es menor que el tiempo de coherencia del canal, los desvanecimientos en uno y otro enlace van a ser aproximadamente iguales, con lo que un control de potencia en lazo abierto puede tener unas prestaciones similares a las del control en lazo cerrado.

Partiendo de esta consideración de reciprocidad, en el contexto UTRA TDD se define para el enlace ascendente un control de potencia en lazo abierto a través del cual el terminal móvil es capaz de determinar la potencia a transmitir a partir de la siguiente expresión:

$$P_T = \alpha L_p + (1 - \alpha) L_0 + I_{UTR} + SIR_{UTR} + C$$

$L_p$  es la atenuación estimada para el canal de difusión, que se puede calcular haciendo uso de la potencia transmitida en dicho canal descendente cuyo valor es comunicado por la base,  $L_0$  es el promedio de la atenuación teniendo en cuenta los valores medidos en las diferentes ranuras anteriores, por lo que dicho promedio habrá eliminado el efecto de los desvanecimientos rápidos, y  $\alpha$  es un factor de ponderación entre 0 y 1 para contabilizar la bondad del control de potencia en lazo abierto. Por lo general, decrece al incrementarse la separación temporal entre la ranura descendente sobre la que se toman las medidas y la ranura ascendente sobre la que se aplican, de modo que si se trata de ranuras

consecutivas vale 1, entendiendo que la reciprocidad del canal es buena, mientras que si la separación temporal crece hasta 7 ranuras, el valor es 0 entendiéndose que la validez de la medida tomada en el enlace descendente es poco adecuada y que, por lo tanto, es preferible tomar como referencia la atenuación promediada  $L_0$ .

En relación a  $I_{BTS}$  y  $SRI_{target}$ , ponen de manifiesto que el control de potencia está orientado a garantizar un cierto nivel de relación señal a interferente de valor  $SRI_{target}$ , de modo que para determinar el nivel de potencia a transmitir es preciso hacer uso del nivel de potencia interferente medido en la estación base,  $I_{BTS}$ , y que es difundido por ésta. Finalmente,  $C$  es una constante adicional que el operador puede ajustar según sus necesidades.

Como puede deducirse de la anterior expresión, existe una relación entre la validez de la hipótesis de reciprocidad del canal y el tiempo de separación entre el enlace descendente y el ascendente. A efectos prácticos, es preciso que dicho tiempo sea inferior al tiempo de coherencia del canal radio, ligado con la velocidad del móvil. Bajo esta consideración, si se asume un tiempo de coherencia mínimo de 7 ranuras ( $T_{c\ min}=4.66ms$ ), con una frecuencia portadora de 2 GHz, la velocidad máxima de un terminal para mantener la reciprocidad del canal será de:

$$v_{max} = \frac{c}{4.13 \cdot f \cdot T_{c\ min}} = 7.8 \text{ m/s} = 28 \text{ km/h}$$

Nótese que el entorno de desarrollo de un esquema UTRA TDD se plantea generalmente para situaciones de baja movilidad, por lo que la velocidad máxima calculada puede suponer una cota adecuada.

#### 4.3.2 Estrategias de diversidad

#### 4.3.2.1 Combinación pre-rake

Partiendo de la hipótesis de reciprocidad presente en el esquema TD-SS-SS-SS-SS CDMA, otra de las posibilidades de mejora que esta técnica puede aportar en lo que a simplicidad en la construcción de terminales móviles se refiere es la capacidad de transmitir la señal predistorsionada según el canal estimado en el enlace ascendente. De este modo, asumiendo que el canal será el mismo en ambos enlaces, este proceso de predistorsión evita al terminal el tener que llevar a cabo el proceso de combinación rake en recepción consiguiendo el mismo efecto de diversidad que obtendría con dicho proceso. En definitiva no es más que efectuar la combinación rake en transmisión según la respuesta impulsional estimada inversa del canal, de modo que, al convolucionar la señal enviada con el canal real, la señal recibida en el terminal sea directamente la señal deseada, similar a la que se hubiera obtenido tras efectuar una combinación rake convencional, tal como se ilustra en la Figura 4.6. De ahí el nombre de combinación pre-rake que se ha dado a esta estrategia.

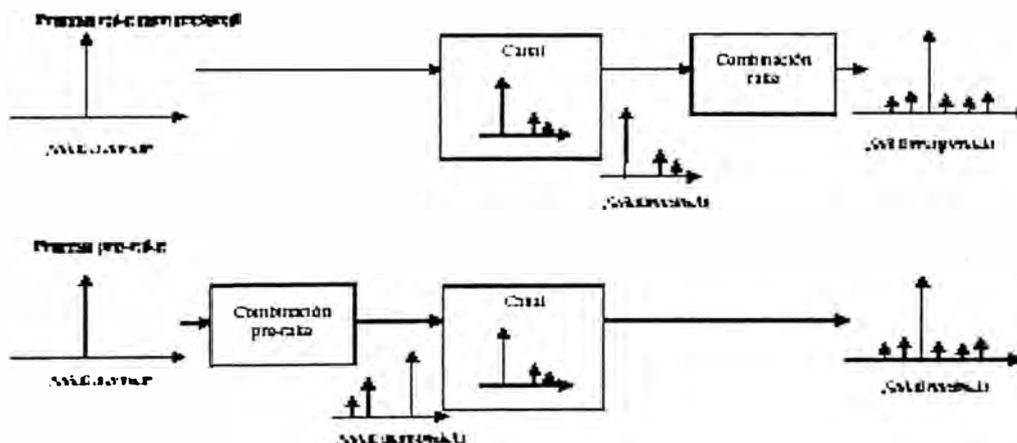


Figura 4.6: Estrategia de combinación pre-rake.

Debe tenerse en cuenta que la estrategia explicada es válida únicamente en tanto que las condiciones del canal no cambien entre los enlaces ascendente y descendente, por lo que es preciso que la separación entre ambos no supere el tiempo de coherencia del canal. En cualquier caso, los resultados presentados anteriormente demuestran que el comportamiento en términos de probabilidad de error es ligeramente mejor en caso de utilizar el sistema rake convencional que en caso de emplearse pre-rake, por lo que las ventajas de esta estrategia deben entenderse únicamente para el enlace descendente como un modo de simplificar el diseño del terminal y, en consecuencia, de reducir su tamaño y coste.

#### **4.3.2.2 Diversidad por preselección de antena.**

Nuevamente gracias a la reciprocidad del canal es posible conseguir mejoras en el mecanismo de diversidad por antena trasladando la complejidad del mismo a la estación base y simplificando en consecuencia el terminal móvil. En particular, la posibilidad planteada consiste en aprovechar la información obtenida de la utilización de diversidad en la estación base para determinar cual es la antena más apropiada para efectuar la transmisión hacia el terminal móvil, disfrutándose así, aun cuando el móvil disponga de una única antena, de las ventajas de la diversidad por selección.

De este modo, la estación base tiene suficiente con determinar a través de cual de sus antenas receptoras recibe mayor nivel proveniente del enlace ascendente y utilizar esta antena para transmitir en el enlace descendente, asumiendo que las condiciones del canal no habrán variado sustancialmente entre ambos enlaces. La Figura siguiente ilustra el funcionamiento de este mecanismo.

Dentro de la propuesta UTRA TDD está contemplada la utilización de este mecanismo de diversidad por preselección para canales dedicados. En este caso,

se contempla, además del proceso de selección, la posibilidad de aprovechar la estimación del canal en ambas antenas para ponderar con pesos adecuados cada una de ellas en la transmisión del enlace descendente, lo que permite mejorar las prestaciones obtenidas respecto al caso de utilizar únicamente diversidad por selección.

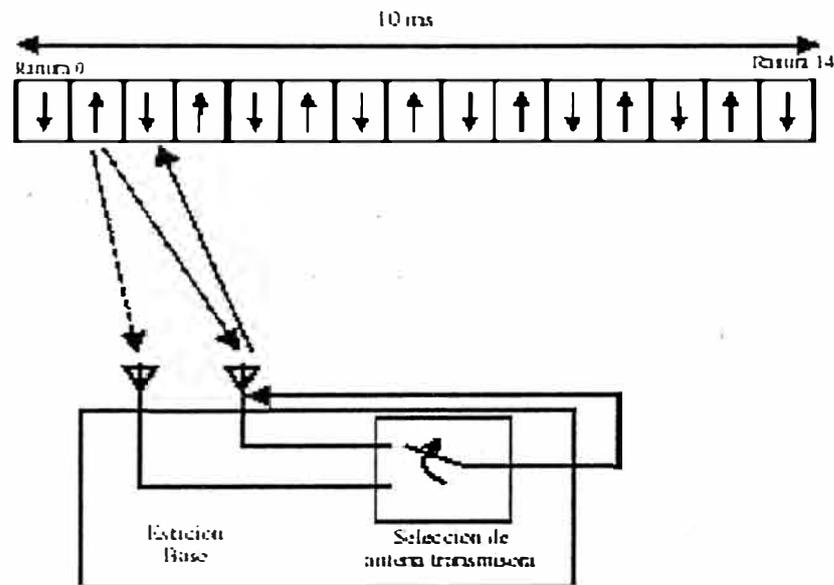


Figura 4.7: Diversidad por preselección de antena.

Una de las funcionalidades que cobra especial importancia dentro de un contexto de transmisión mediante el mecanismo de acceso TDD-TD/CDMA es la capacidad para discernir cuales son los recursos más apropiados para ser empleados por cada terminal en cada instante temporal. Dicha decisión debe tener presentes criterios basados en la cantidad de interferencia que cada terminal percibe en cada una de las ranuras, y que puede variar principalmente en función de la carga total presente en el sistema pero también según la posición ocupada por cada terminal respecto de su estación base, siendo este último aspecto especialmente crítico cuando se considera la existencia de celdas vecinas con

diferentes niveles de asimetría en sus estructuras de trama, como se discutirá en el apartado siguiente.

Nótese, en cualquier caso, que esta funcionalidad no tiene la misma relevancia dentro de un entorno FDD-DS/CDMA, en el que no existe una componente TDMA. Esto es debido a que no existirán diferencias fundamentales en el nivel de interferencia medido para diferentes recursos del sistema (secuencias código, en este caso). Dicho de otro modo, partiendo de la hipótesis de que las propiedades de correlación cruzada de las diferentes secuencias código empleadas son similares, un terminal no va a apreciar diferencias sustanciales si en lugar de trabajar con un cierto código lo hace con otro. Por el contrario, en TDD-TD/CDMA las diferencias entre recursos sí que pueden ser apreciables puesto que puede haber ranuras con un nivel de ocupación y un nivel de interferencia superior que otras.

En consecuencia, cuando se efectúa la gestión de la calidad de servicio dentro de un esquema TDD-TD/CDMA es preciso tener en cuenta estas diferencias en el nivel de interferencia observado para distribuir los recursos apropiadamente entre los diferentes terminales, a través de la funcionalidad denominada Asignación Dinámica de Canales (DCA, del inglés Dynamic Channel Allocation) en tanto que debe garantizar durante todos los instantes que dure la transmisión que los recursos empleados son apropiados desde el punto de vista de interferencias, y para ello deberá variar dinámicamente, según los cambios registrados en el sistema, la correspondencia entre recursos y terminales. Nótese que esta evolución del sistema podrá ser tenida en cuenta tanto a partir de las propias medidas reportadas por los terminales relativas al enlace descendente, como a partir de la propia gestión de recursos que puede distribuir la carga adecuadamente entre las diferentes ranuras del sistema.

Al considerar mecanismos basados en transmisión de paquetes con el objetivo de garantizar unos ciertos niveles de calidad de servicio, como ya se ha venido comentando a lo largo del presente estudio, las funcionalidades a tener presentes eran el protocolo de acceso múltiple, el algoritmo de gestión de recursos y el control de admisión. Siguiendo esta línea, dentro de un entorno TDD-TD/CDMA, a este conjunto deberá añadirse forzosamente la funcionalidad del DCA, que deberá coordinarse con el protocolo de acceso y el algoritmo de gestión de recursos para determinar donde se debe transmitir. De este modo, la interrelación entre las diferentes funcionalidades para garantizar calidad de servicio en un entorno TDDTD/CDMA queda modificada según se presenta en la Figura 4.8.

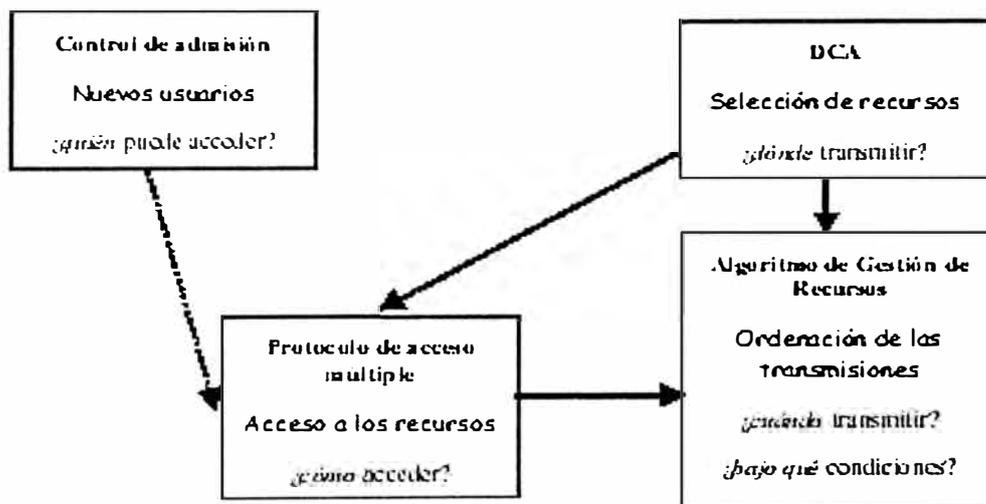


Figura 4.8: Interrelación entre las funcionalidades que garantizan la Calidad Servicio

Tal y como se aprecia en dicha figura, el protocolo de acceso múltiple establece las reglas de funcionamiento para llevar a cabo el acceso al sistema, y cuando dicho acceso haya sido logrado, será el algoritmo de gestión de recursos el responsable de ordenar las transmisiones y determinar en qué instante se pueden

llevar a cabo de modo que los recursos se empleen de forma eficiente según la calidad de servicio especificada. Nótese que el mecanismo de asignación dinámica de canales actúa tanto sobre el protocolo de acceso, en tanto que un terminal puede tener presentes criterios de interferencia medida al seleccionar el recurso más apropiado para efectuar el acceso, como sobre el algoritmo de gestión de recursos, que debe tener en cuenta qué recursos son apropiados para cada usuario desde un punto de vista de interferencia para efectuar una asignación apropiada. Finalmente, en base a la evaluación del sistema global para diferentes situaciones de carga y de tipos de tráfico, se determinaría la región de admisión, que permitiría saber cuando un nuevo usuario puede ser aceptado para involucrarse en el protocolo de acceso y el algoritmo de gestión de recursos.

#### **4.4 Problemática de la diferente asimetría en un entorno celular.**

Uno de los aspectos más ventajosos del duplexado TDD es su inherente flexibilidad para adaptarse a diferentes niveles de asimetría del tráfico manejado, simplemente mediante la asignación de un número mayor de ranuras para el enlace descendente o el ascendente según sea el caso. Sin embargo, al trasladar esta característica a un entorno celular, se introduce una nueva problemática que no aparecía en el contexto FDD, y que no es más que la posibilidad de disponer de celdas con diferentes estructuras asimétricas que pueden dar lugar a situaciones de elevada interferencia llegando a degradar enormemente las prestaciones obtenidas. En particular, existen dos tipos de interferencia diferenciados que no aparecían en FDD, y que son la interferencia entre móviles y la interferencia entre estaciones base.

A efectos de ilustrar esta problemática, considérese el ejemplo mostrado en la Figura siguiente, en la que aparecen dos estaciones base, BS1 y BS2, y dos

terminales móviles, MS1 conectado a BS1 y operando en el enlace descendente (DOWN), y MS2, conectado a BS2 y operando en el enlace ascendente (UP). Ambos terminales trabajan en la misma ranura, dentro del período  $\Delta T$  de la estructura de trama de ambas bases, que también se muestra en la figura. Tal y como se establece dentro de la propuesta UTRA TDD, las dos bases están sincronizadas a nivel de trama y ranura. Bajo estas condiciones, la interferencia intercelular debe tener en cuenta las siguientes contribuciones:

1.- Interferencia Móvil a Móvil (MS a MS): Este tipo de interferencia se da en el enlace descendente de MS1 y viene originada por la presencia del terminal MS2. En el caso de que la separación entre ambos terminales sea pequeña, especialmente si MS2 se encuentra ubicado lejos de su estación base BS2, con lo que requerirá de mayor potencia transmitida, el nivel de potencia interferente recibido en MS1 proveniente de MS2 puede ser excesivamente elevado comparado con la señal útil de MS1. Dado que ambos terminales trabajan con la misma frecuencia portadora y en el mismo tiempo, el único mecanismo de separación de ambas señales es el diferente código de SCRAMBLING empleado, que puede resultar insuficiente al tener las señales útil e interferente niveles de potencia muy diferentes. Nótese que esta interferencia no es más que la traslación del efecto cerca-lejos (near-far) a nivel de terminales móviles. En un caso general, es importante darse cuenta de que este tipo de interferencia no afectará por igual a todos los terminales que operen en una ranura, sino que será dependiente de la posición relativa de cada móvil con respecto de su estación base y con respecto del resto de terminales presentes en el resto de estaciones base.

2.- Interferencia base a base (BS a BS): Este tipo de interferencia se da en el enlace ascendente de MS2 y viene originada por la potencia transmitida en el enlace descendente por BS1, que puede llegar a enmascarar la señal recibida del

terminal móvil. Este problema es especialmente crítico cuando existe visibilidad directa entre las diferentes estaciones base de un sistema TDD, puesto que en este caso las condiciones de propagación son más favorables en el camino entre estaciones base que en el camino de base a móvil, con lo que la señal interferente puede estar muy por encima de la señal útil. Así pues, al igual que ocurre con la interferencia MS a MS, el mecanismo de separación de las señales útil e interferente, basado en los códigos de SCRAMBLING, puede resultar insuficiente, por lo que se deberá recurrir a otros mecanismos, principalmente basados en la aplicación de algoritmos DCA y en el empleo de inclinaciones eléctricas en las antenas de las estaciones base, de modo que la línea de visibilidad directa no coincida con ningún lóbulo principal del diagrama de radiación. Debe notarse que, en este caso, y a diferencia de la interferencia MS a MS, el nivel de interferencia proveniente de la base vecina es el mismo para todos los terminales afectados en una misma ranura, independientemente de su posición, aunque únicamente aquellos terminales que se ubiquen más cerca de BS2 podrán llegar a ser capaces de transmitir un nivel de potencia suficiente como para compensar la interferencia existente al sufrir menos pérdidas de propagación en el camino con su estación base.

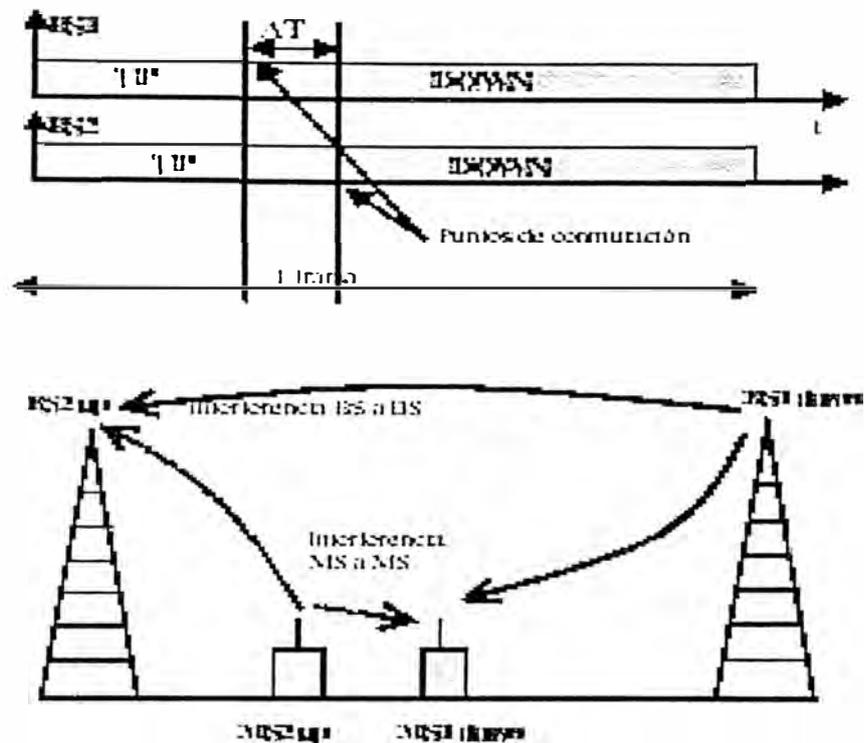


Figura 4.9: Interferencias en un entorno TDD.

La solución a esta problemática no es sencilla, hasta tal punto que muchas veces se plantea la posibilidad de que todas las celdas de un mismo operador trabajen con una misma estructura asimétrica, es decir, con las mismas ranuras destinadas a los enlaces ascendente y descendente. En cualquier caso, esto simplemente traslada el problema a la coexistencia entre operadores, dado que mantener la misma asimetría a nivel de operadores diferentes puede resultar más complicado. En estas circunstancias, la asignación de portadoras a nivel de operador puede reducir notablemente el efecto, aunque sin eliminarlo completamente pues la separación entre portadoras adyacentes en TDD será *muy* inferior a la separación que pueda existir, por ejemplo, entre los enlaces ascendente y descendente de un esquema FDD.

Nótese que en general este tipo de soluciones tenderán a reducir notablemente la flexibilidad prometida por los sistemas TDD en cuanto a adaptación a la asimetría del tráfico, puesto que presuponen unas características de asimetría similares en todas las celdas del sistema, lo cual no tiene por qué ser cierto. Partiendo de este planteamiento, y como una forma de paliar esta carencia de flexibilidad, anteriormente se analiza cual es el factor de asimetría (relación entre el número de ranuras del enlace descendente y el número de ranuras del enlace ascendente) óptimo para una celda aislada en función de las características de su tráfico y en otra sección se generaliza el estudio en un entorno multicelular para determinar cual es el factor de asimetría que permite maximizar la utilización del sistema cuando el tráfico de cada una de las celdas presenta un grado de asimetría diferente. La conclusión que se extrae de dicho estudio es que, en efecto, existe un valor óptimo que permite maximizar la utilización (llegando a valores alrededor del 90% en los ejemplos considerados), pero que este valor depende enormemente de la distribución del tráfico entre las diferentes celdas, y que el uso de un factor de asimetría diferente del óptimo puede reducir enormemente la utilización del sistema (hasta valores inferiores al 20%). Esto es debido a la posibilidad de que, en ciertas celdas, existan transmisiones que no puedan cursarse por carencia de recursos en alguno de los dos enlaces si el factor de asimetría tomado difiere en exceso del que sería adecuado para la celda en cuestión.

A la vista de estos resultados, parece interesante determinar algún mecanismo que sea capaz de reducir este tipo de interferencia característica de los entornos TDD-TD/CDMA de manera que hiciera posible la coexistencia de celdas adyacentes con diferentes grados de asimetría. La posibilidad planteada en este trabajo, y que se desarrollará a partir de la siguiente sección, se basa en el diseño de esquemas DCA eficientes y que distribuyan los terminales adecuadamente

dentro de la estructura de trama teniendo en cuenta la problemática a la que se debe hacer frente. Obviamente, al considerar un mecanismo de gestión de recursos con calidad de servicio, dichos esquemas deberán operar en conjunción con el protocolo de acceso múltiple y el algoritmo de gestión de recursos, en la medida que se planteó anteriormente en la Figura 4.8.

## CAPITULO V

### CALIDAD DE SERVICIO EN SISTEMAS DE TRANSMISION POR PAQUETES

#### 5.1 Calidad de servicio en sistemas de transmisión por paquetes basados en ISMA-DS/CDMA FDD.

Quizá uno de los aspectos más importantes al que los futuros sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación deberán hacer frente es la capacidad para ofrecer un amplio abanico de servicios multimedia, que presentan estadísticas de tráfico muy diferentes de los habituales servicios de voz, al estar constituidos básicamente por tráfico a ráfagas. Estos servicios deberán ser ofrecidos bajo un conjunto de garantías de Calidad de Servicio (QoS, del inglés Quality of Services) que también difieren notablemente de las propias de los sistemas destinados a la transmisión de voz. Dichas garantías deben incorporar tanto aspectos relacionados con el retardo en la transmisión que se va a poder tolerar como otros relacionados con la máxima tasa de error, y todas ellas son directamente dependientes del servicio en cuestión y de sus necesidades de interactividad y robustez frente a errores de transmisión. Bajo estas consideraciones, deberá ser posible la coexistencia de aplicaciones de voz, con requerimientos restrictivos en lo que a retardo se refiere y bajos requerimientos de tasa de errores, con otras aplicaciones de datos, que serán mucho más sensibles a

las pérdidas que se puedan originar pero que presentarán una tolerancia superior en términos de retardo.

Dentro de este contexto, se hace patente la necesidad de incorporar mecanismos de transmisión que difieren de los habitualmente utilizados para servicios en modo circuito, lo que se ha traducido en el desarrollo de sistemas de transmisión en modo paquete, que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles a la vez que preserven unas calidades de servicio específicas. El protocolo de acceso múltiple ISMA-DS/CDMA FDD es una muestra de este tipo de mecanismos, como lo serían igualmente otros protocolos como S-ALOHA o DQRAP. Sin embargo, cuando se desea incorporar calidad de servicio, algunos aspectos adicionales que deben ser tenidos en consideración son los que se detallan a continuación:

- Este tipo de protocolos presentan un cierto componente aleatorio en el acceso, existiendo una gradación que iría desde los mecanismos puramente aleatorios como SALOHA hasta otros que presentan una aleatoriedad prácticamente nula como los mecanismos de sondeo o polling, a costa de una menor flexibilidad para adaptarse a las variaciones del tráfico. En cualquier caso, este componente aleatorio dificulta la posibilidad de incorporar, mediante los protocolos de acceso por sí solos, garantías específicas de calidad de servicio sobre las transmisiones a efectuar.
- Del mismo modo, y considerando la coexistencia de servicios con diferentes requerimientos de calidad, será necesario efectuar una distinción entre los usuarios involucrados para procurar que la calidad específica sea satisfecha para todos ellos. Incluso dentro de un conjunto de usuarios pertenecientes a un mismo servicio será preciso efectuar distinciones en función del tiempo que pueda haber transcurrido desde que llegaron al sistema o de la cantidad de información que

deseen enviar, y que conduzcan a una cierta priorización en la asignación de recursos entre los usuarios que deseen transmitir en un momento dado. Por lo tanto, la característica de equitatividad en la gestión de recursos requerida en el diseño de un protocolo de acceso al medio debe romperse para poder hacer frente a los diferentes requerimientos, haciendo uso de algoritmos de asignación apropiados.

- Finalmente, y para poder garantizar que todos los usuarios existentes en el sistema en un momento dado puedan ver satisfechos sus requerimientos de calidad, será preciso habilitar mecanismos de control que determinen si un nuevo usuario puede o no ser aceptado en el sistema a fin de no comprometer la calidad ofrecida al resto de usuarios ya aceptados.

En base a estas consideraciones, es preciso complementar la funcionalidad del protocolo de acceso al medio con otras funciones que permitan satisfacer las citadas garantías de calidad para todos los usuarios. En particular, dentro de este estudio se ha identificado un conjunto de tres funcionalidades que surgen al abordar la gestión de calidad de servicio para sistemas de transmisión por paquetes en un contexto DS/CDMA FDD, y que difieren de las habitualmente consideradas para los sistemas en modo circuito. La interrelación entre estas funcionalidades se muestra en la Figura 5.1 y a continuación se detalla cada una de ellas.

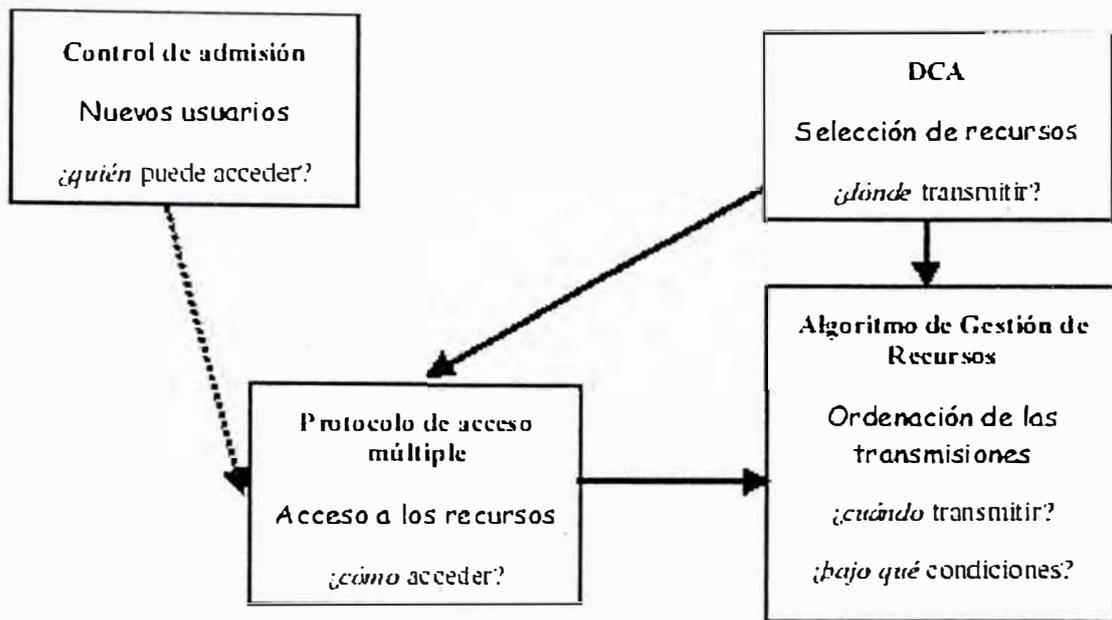


Figura 5.1: Interrelación de funcionalidades destinadas a garantizar la Calidad de Servicio en un esquema de transmisión por paquetes.

Dado que en los sistemas de transmisión por paquetes los usuarios no disponen continuamente de un recurso asignado, esto es, en DS/CDMA de una secuencia código sobre la que transmitir, se hace patente la necesidad de definir un conjunto de reglas que permitan a los usuarios acceder de forma eficiente al sistema, consiguiendo un recurso, y llegar a notificar al gestor de recursos sus requerimientos de transmisión para que posteriormente sean regulados en función de la calidad que se deba garantizar. Es esta básicamente la misión principal del protocolo de acceso múltiple, especificando cómo los diferentes usuarios acceden a los recursos.

Dentro de los requerimientos para un protocolo de acceso que ya fueron vistos, cabe reseñar la importancia de que el acceso sea lo más ágil posible, de modo que la notificación de las necesidades de transmisión se pueda efectuar en un tiempo inferior al máximo que se puede tolerar para la transmisión de los

recursos, y que dependerá de la calidad de servicio que se deba ofrecer. En esta línea, el mecanismo de acceso deberá hacer frente a la aleatoriedad intrínseca de la propia generación del tráfico pero también a la componente aleatoria introducida por el propio protocolo, y que deberá ser limitada de algún modo, sin perder flexibilidad, para poder acotar eficientemente el máximo retardo de acceso.

De entre los diferentes protocolos de acceso existentes, a lo largo de este capítulo se partirá de la base del protocolo ya analizado ISMA-DS/CDMA para FDD y se le incorporará un mecanismo de sondeo o polling complementario para acotar el retardo total de acceso.

#### **5.1.1 Algoritmo de gestión de recursos.**

Una vez los usuarios han logrado el acceso al sistema mediante el protocolo de acceso múltiple especificado, es preciso efectuar una gestión de los recursos apropiada para que las transmisiones se lleven a cabo ordenadamente según la calidad de servicio de cada una. Dicho de otra forma, el hecho de haber adquirido un recurso no da permiso directamente para llevar a cabo la transmisión, sino que debe ser el gestor quien, en base a las peticiones del conjunto de terminales, confirme o no dicho permiso tras la aplicación de un cierto algoritmo de gestión de recursos cuya misión es, por lo tanto, especificar cuándo un usuario determinado de entre el conjunto de usuarios del sistema tiene permiso para transmitir en cada instante de tiempo, así como la cantidad de información que se puede enviar. Nótese que en un sistema DS/CDMA, este último aspecto estará relacionado directamente con la ganancia de procesamiento y la potencia aceptada, y por lo tanto permite regular la interferencia presente en el sistema y así poder mantener la tasa de error bajo los límites establecidos para cada servicio.

A lo largo de la literatura, los mecanismos de gestión de recursos tradicionalmente se han considerado desde el punto de vista de ordenar el acceso a un recurso compartido por parte de un número de flujos de información de modo que cada flujo utilice el recurso según la calidad de servicio que haya contratado. Esto se traduce en un reparto del recurso temporalmente según una cierta política usualmente denominada, en consecuencia, como algoritmo de scheduling. Dentro de este contexto, y bajo una perspectiva más propia de la red fija que del acceso radio, se ha asumido que una vez se concede el recurso a uno de estos flujos, la transmisión se lleva a cabo satisfactoriamente. Algunos algoritmos clásicamente utilizados son los denominados GPS (Generalized Processor Sharing), FFQ (Fluid Fair Queueing), VC (Virtual Clock), WFQ (Weighted Fair Queueing), WF<sup>2</sup>Q (Worst-case fair Weighted Fair Queueing), entre otros.

Sin embargo, al considerarse un acceso radio con las estrategias de scheduling anteriormente citadas surgen problemas relacionados con el hecho de que disponer del canal para transmitir en un momento dado no garantiza bajo ningún concepto que la transmisión pueda realizarse satisfactoriamente. Esto conlleva el tener que considerar por un lado las posibles retransmisiones que deban efectuarse así como las penalizaciones en términos de retardo introducidas por el efecto del canal. Bajo este prisma, han surgido nuevos algoritmos de scheduling que modifican los anteriormente citados para tener en cuenta la problemática del canal. Entre ellos, destacan CIF-Q (Channel-Condition Independent Fair Queueing), SBFA (Server Based Fairness Approach ) o WFS (Wireless Fair Service).

La idea fundamental que se esconde detrás de estos últimos algoritmos consiste en hacer uso de una política de SCHEDULING de referencia como FFQ o WFQ e incorporar el conocimiento a priori del estado del canal, que se asume diferente para cada usuario. De este modo, cuando, según el algoritmo de

referencia, a un usuario le fuese asignado el recurso pero percibiese un canal en malas condiciones, renunciaría a la transmisión en favor de otro usuario que dispusiera de un canal más favorable. Este mecanismo introduce una clasificación de los usuarios como *leading* si han recibido en un instante dado más servicio del que les correspondería según el esquema de referencia, *lagging* si han recibido menos servicio, o bien *satisfied* si la cantidad de servicio recibida coincide con la que se hubiera recibido según el esquema de referencia. En base a esta clasificación, se establecen mecanismos de compensación para reducir el exceso de servicio de los usuarios *leading* a favor de los que se encuentren en situación *lagging*.

En cualquier caso, debe reseñarse que todas estas estrategias están orientadas hacia sistemas de transmisión basados en la técnica TDMA/FDMA, presuponiendo que es posible conocer a priori y de forma centralizada el estado del canal para cada usuario. Sin embargo, al considerarse una técnica de acceso como DS/CDMA limitada por interferencias, y en la que no existe un límite rígido respecto del número de transmisiones que pueden aceptarse, pues depende de las ganancias de procesado empleadas y de la máxima tasa de error que puede tolerarse, los algoritmos anteriores no son directamente aplicables, pues todos ellos asumen que únicamente un usuario puede ocupar el canal simultáneamente. De hecho, en DS/CDMA, el concepto de algoritmo de gestión de recursos no se limita únicamente a un reparto temporal (como correspondería a un algoritmo de *SCHEDULING* clásico) sino que va más allá al incorporarse también la necesidad de decidir sobre parámetros de la transmisión tales como la ganancia de procesado o la potencia transmitida para regular la interferencia total de modo que todos los usuarios aceptados para transmitir vean satisfechos sus requerimientos de tasa de error. Por este motivo, si bien un algoritmo de gestión de recursos en DS/CDMA

puede partir de una política de *SCHEDULING* clásica, será preciso complementarla con otros mecanismos para arbitrar los parámetros dependientes de la técnica de acceso múltiple empleada. Es por esto por lo que, a lo largo de este estudio, se denomina a este tipo de estrategias como algoritmos de gestión de recursos y no simplemente como algoritmos de *SCHEDULING*.

Algunos ejemplos de algoritmos de gestión de recursos en DS/CDMA planteados en la literatura los constituyen mecanismos como los presentados anteriormente, y se basan fundamentalmente en la definición de unos anchos de banda equivalentes para cada usuario en función de la potencia transmitida, la ganancia de procesamiento o la velocidad de transmisión. Dependiendo del ancho de banda sobrante en el sistema se permite la entrada o no de nuevos usuarios. A su vez, siguiendo una idea parecida, se definen dos tipos de usuarios, los de tiempo real (RT), y los de no tiempo real (NRT), y según el nivel de carga que ofrecen los primeros, y la diferencia entre este nivel y un cierto umbral máximo de interferencia tolerada, se permite o no el acceso de usuarios NRT al sistema. Análogamente, se plantea un esquema también con dos clases de servicio y se intenta determinar una política de ordenación de transmisiones adecuada para maximizar el *THROUGHPUT* del sistema, llegándose a la conclusión de que resulta preferible una política en la que se acepte cada vez un único usuario con una ganancia de procesamiento reducida frente a la posibilidad de aceptar varios usuarios simultáneamente con ganancias de procesamiento mayores, reduciendo por lo tanto la componente CDMA del acceso en pro de una mayor componente TDMA. En cualquier caso, estas estrategias no tienen explícitamente en consideración los retardos máximos involucrados, sino que se basan en garantizar unos ciertos niveles de capacidad, prescindiendo de si deben existir retransmisiones o no o de si se pueden aplicar técnicas para variar la velocidad de transmisión. Dentro de este

contexto, en se plantea un algoritmo que reúne los requerimientos de retardo con los de tasa de error en un entorno TDMA - CDMA con varias clases de servicio. Este algoritmo se basa en distribuir los usuarios entre diferentes ranuras temporales, intentando que en cada una existan usuarios con iguales requerimientos de tasa de error. Sin embargo, la componente TDMA de este algoritmo lo hace a priori más apropiado para un entorno como el que se verá en capítulos posteriores dedicados a la técnica TDDTD/CDMA, que para un contexto como el FDD en el que no existen diferentes ranuras temporales y, por lo tanto, parece más razonable explotar la capacidad de variación de la ganancia de procesamiento entre los diferentes usuarios.

En base al contexto planteado, y de forma genérica, el modo de operación de un algoritmo de gestión de recursos para DS/CDMA consistiría en partir de un conjunto de usuarios con sus correspondientes necesidades de transmisión y requerimientos de calidad de servicio y llevar a cabo dos procesos básicos:

1.- Priorización: Consiste en ordenar a los diferentes usuarios que han logrado el acceso a las secuencias código y disponen de información para transmitir en base a algún tipo de criterio preestablecido que tenga en cuenta las diferentes necesidades de cada uno en términos de la calidad de servicio que se les deba garantizar.

2.- Asignación de recursos: Partiendo de la ordenación llevada a cabo por la priorización, este proceso es responsable de aceptar o rechazar las diferentes transmisiones según la regulación de la interferencia, determinando las ganancias de procesamiento de cada una de ellas. El proceso de asignación podría subdividirse en los siguientes dos procesos:

2.1.- Determinación de la ganancia de procesamiento preferida por cada usuario, en base a criterios del volumen de información que se debe transmitir, de la cantidad

de usuarios presente en el sistema, y también del retardo que pueden tolerar las diferentes transmisiones.

2.2.- Chequeo para la aceptación o rechazo de las transmisiones. Partiendo de la priorización y de las ganancias de procesado seleccionadas, se comprobaría, usuario a usuario, si la aceptación de una nueva transmisión continúa cumpliendo las restricciones de interferencia de los usuarios ya aceptados. Las transmisiones no aceptadas pasarían automáticamente al proceso de reparto llevado a cabo en el siguiente instante temporal.

En relación al cálculo de la ganancia de procesado, nótese que puede efectuarse basándose en un proceso totalmente centralizado, en que el gestor de recursos calcule cual es la ganancia más apropiada para cada petición aceptada, o bien en un proceso con un grado de descentralización mayor en el que fuesen los propios usuarios los que solicitaran una cierta ganancia de procesado y el gestor simplemente la aceptara o no. En este caso, se podría pensar en la aplicación de un algoritmo descentralizado como ThMS como base para la determinación de la ganancia de procesado.

### **5.1.2 Control de admisión.**

Esta funcionalidad es responsable de determinar si un nuevo usuario que quiera incorporarse al sistema puede ser aceptado o no, de modo que el número total de usuarios que puede verse involucrado en los procesos establecidos por el protocolo de acceso y el algoritmo de gestión de recursos esté limitado. En definitiva, el control de admisión será responsable de indicar quien puede llegar a aplicar el conjunto de reglas fijado por el protocolo de acceso, tal y como se aprecia en la Figura siguiente.

La funcionalidad asociada al control de admisión en un entorno de transmisión por paquetes presenta en cualquier caso unas diferencias sustanciales respecto de la misma función en un contexto de circuitos. En particular, en un entorno de conmutación de circuitos donde los usuarios disponen permanentemente de los recursos, partiendo del número disponible de recursos y de los requerimientos de velocidad de transmisión y tasa de error de cada usuario, puede ser más o menos fácil determinar si un nuevo usuario puede ser aceptado en el sistema o no. Sin embargo, en un contexto de conmutación de paquetes donde pueden existir más usuarios que recursos y los primeros únicamente acceden a los recursos cuando por las características de su tráfico desean transmitir, la determinación de si un nuevo usuario puede ser aceptado en el sistema pasa a depender directamente de la capacidad de actuación conjunta del protocolo de acceso y del algoritmo de gestión de recursos frente a los requerimientos de calidad del nuevo usuario.

La Figura 5.2 intenta poner de manifiesto las diferencias entre el control de admisión para los usuarios en modo circuito y en modo paquete. Los usuarios en modo circuito cuando desean iniciar una conexión, tras pasar por el control de admisión de circuito (mediante algún procedimiento específico del sistema por ejemplo basado en un acceso a través de un canal tipo RACH), pasan de estar registrados en el sistema a disponer de un cierto recurso, esto es una secuencia código con una cierta ganancia de procesado y un nivel de potencia para transmitir, de los que dispondrán permanentemente hasta finalizar su comunicación, regresando al estado de usuarios registrados. Bajo este supuesto, un nuevo usuario sólo podrá ser aceptado si esto no supone una degradación para el resto de usuarios ya aceptados en el sistema. Por el contrario, los usuarios en modo paquete, cuando deseen iniciar una sesión de transferencia de paquetes (por

ejemplo transferencias de ficheros FTP, una sesión WWW, etc.), tras pasar por el control de admisión de paquete mediante el procedimiento correspondiente, por ejemplo a través del canal RACH, pasan de estar registrados a ser usuarios modo paquete sin recurso pudiendo conseguir un código mediante las reglas especificadas por el protocolo de acceso múltiple. Tras lograr adquirir un código, pasan a ser usuarios modo paquete con recurso, y a partir de ese instante, sus transmisiones deberán ser reguladas por el algoritmo de gestión de recursos, que determinará si en cada instante pueden transmitir y con qué ganancia de procesado y potencia. Si el algoritmo resuelve que cierto usuario no puede transmitir en un momento dado, su petición quedará almacenada para el reparto del siguiente instante temporal, por lo que el usuario continúa siendo un usuario modo paquete con recurso. Únicamente se abandonará este estado cuando se haya finalizado la transmisión de un conjunto de paquetes, regresándose al estado modo paquete sin recurso si la sesión no ha finalizado y por lo tanto pueden llegar nuevos paquetes, o bien al estado de usuario registrado si la sesión ha finalizado.

Dado que el algoritmo de gestión de recursos se encarga, partiendo de un conjunto de peticiones, de determinar cuales son aceptadas para la transmisión en un instante dado según las condiciones de interferencia requeridas para dicho instante, su funcionalidad sería conceptualmente más próxima al control de admisión en modo circuito, mientras que el control de admisión en modo paquete respondería más a una decisión respecto del número de usuarios total en modo paquete que existieran en el sistema que a una evaluación de las interferencias para un instante dado.

En cierta forma, efectuando un paralelismo entre el control de admisión en modo circuito y el control de admisión en modo paquete, se puede afirmar que la admisión de usuarios de paquetes actuaría en dos fases diferenciadas: una primera

que determina si un usuario puede aceptarse en el sistema para poder contender con otros usuarios en el acceso a los recursos, y una segunda que determinaría si un usuario tiene derecho a transmitir en un momento dado según la situación de carga total. Mientras que la primera fase responde al control de admisión propiamente dicho, la segunda se encontraría ubicada dentro de la funcionalidad del algoritmo de gestión de recursos. Igualmente, mientras que una respuesta negativa en la primera fase supondría que el usuario no puede permanecer en el sistema, una respuesta negativa a la segunda fase únicamente supondría la imposibilidad de transmitir en un instante dado, pero el usuario permanecería en el sistema con la garantía de que tarde o temprano podrá llegar a transmitir.

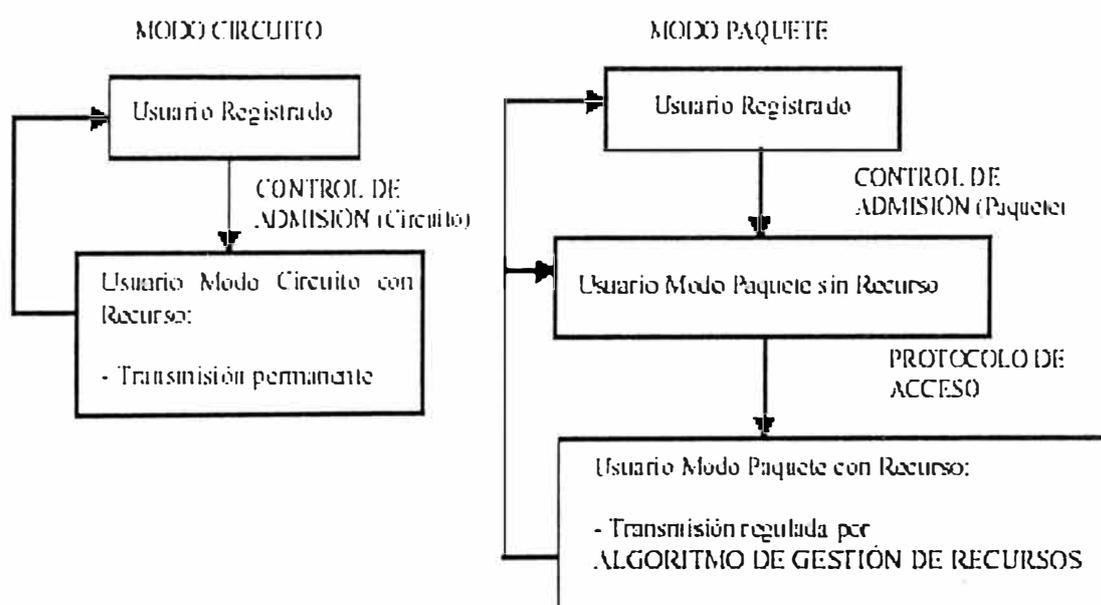


Figura 5.2: Control de admisión en modo circuito y en modo paquete.

Bajo el planteamiento realizado, el diseño del control de admisión en modo paquete es más complejo que el de modo circuito y pasa por la evaluación del comportamiento conjunto del protocolo de acceso y el algoritmo de gestión de recursos bajo diferentes condiciones de carga, esto es, bajo diferentes valores del

número de usuarios en modo paquete (con y sin recurso) para las diferentes clases de servicio consideradas, asumiendo que todos los usuarios han superado positivamente el control de admisión. A partir de esta evaluación, y habiéndose fijado un cierto criterio de máxima degradación permitida para la calidad de servicio, se determinaría cual es el número máximo de usuarios que pueden tolerarse en el sistema para garantizar esta calidad. Este número máximo permitiría tomar la decisión sobre si un nuevo usuario puede ser admitido o no. Los criterios de máxima degradación de la calidad de servicio para definir el control de admisión suelen ser de tipo estadístico y están relacionados con parámetros como el porcentaje de paquetes que superan un cierto umbral de tiempo, el retardo medio de transmisión, ... A modo de ejemplo, algunos de los requerimientos que define la propuesta GPRS (*General Packet Radio System*) para sus clases de servicio son un retardo medio inferior a 0.5 s y un retardo superado a lo sumo en un 5% de los casos de 1.5 s.

Nótese en cualquier caso que la definición final de la calidad de servicio en base a un cierto criterio de degradación estadístico supone aceptar que puedan existir usuarios cuyos requerimientos de calidad no se vean satisfechos en algunos casos. Este aspecto origina que se suele denominar a este tipo de calidad de servicio como  $\text{soft-QoS}$ , denotando un cierto grado de tolerancia ante la degradación, para diferenciarla de otra calidad de servicio con requerimientos totalmente estrictos. De todos modos, debe puntualizarse que en el entorno de transmisión por paquetes radio, dadas las propias limitaciones introducidas por el canal y por la aleatoriedad del tráfico involucrado, es habitual siempre considerar este tipo de calidad soft.

El estudio del control de admisión, como se ha dicho, pasa por determinar para diferentes niveles de carga total en el sistema, el máximo número de usuarios

de cada clase de servicio que pueden ser aceptados, que es lo que se denomina como región de admisión, constituida por todas aquellas combinaciones de número de usuarios de cada clase que permiten mantener los criterios de calidad de todos ellos. A modo de ilustración de este concepto, considérese un sistema con dos tipos de usuarios, los de la clase 1 y los de la clase 2, cada uno con sus requerimientos de calidad y un cierto patrón de generación de tráfico caracterizado por su tasa media y su tasa de pico. Para determinar la región de admisión, se evalúa el sistema para diferentes situaciones de número de usuarios y se determina en cada caso el número máximo de usuarios de cada clase para cumplir simultáneamente todos los criterios establecidos de calidad. En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo de la región de admisión total para dos clases de servicio al considerarse tres criterios diferentes que deben cumplirse. Cada uno de los criterios establece una determinada región, con lo que la región de admisión total será la intersección de las tres regiones, esto es, la zona que se muestra sombreada en la figura. De forma análoga el estudio podría extenderse a más clases de servicio, a costa de tener que evaluar el sistema bajo un mayor número de situaciones.

Partiendo de la región de admisión, el modo de funcionamiento del control de admisión consistiría en que, para cada nuevo usuario que deseara incorporarse al sistema, y en función del número de usuarios en un cierto instante, se determinaría si la aceptación del usuario mantendría el sistema en un punto perteneciente todavía a la región de admisión o si por el contrario el sistema se encontraría fuera de dicha región. En el primer caso el nuevo usuario sería aceptado mientras que en el segundo caso sería rechazado.

Finalmente, una última funcionalidad que se suele considerar es la denominada como control de congestión, consistente en habilitar mecanismos de control para hacer frente a posibles situaciones en las que, debido a la variabilidad d

del tráfico, se pudieran comprometer las garantías de los usuarios aceptados en el sistema. En cualquier caso, es de esperar que, si los mecanismos de control de admisión y de gestión de recursos están bien diseñados, se pueda prescindir la mayoría de las veces de esta funcionalidad, por lo que no será tomada en cuenta en el presente estudio.

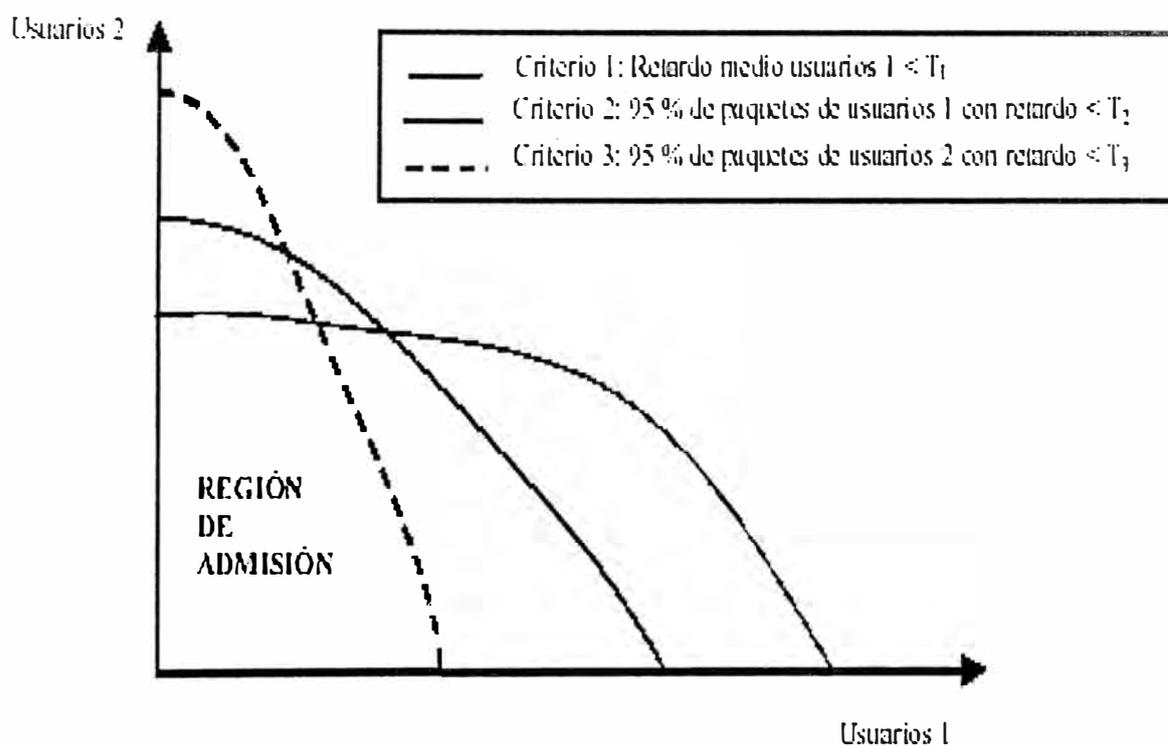


Figura 5.3: Ejemplo de cálculo de la región de admisión.

## 5.2 El protocolo ISMA-DS/CDMA en un contexto FDD con garantías de calidad de servicio.

En base al planteamiento teórico efectuado para garantizar calidad de servicio en sistemas de transmisión por paquetes, a lo largo de esta sección se

plantea la integración del protocolo de acceso múltiple ISMA-DS/CDMA FDD propuesto anteriormente dentro de la estructura de funcionalidades descrita en el apartado anterior.

### **5.2.1 El protocolo ISMA-DS/CDMA FDD con mecanismos de sondeo.**

Dentro del diseño de las funcionalidades para garantizar calidad de servicio en un entorno de transmisión por paquetes, el protocolo ISMA-DS/CDMA FDD puede ser empleado como mecanismo para que los usuarios sean capaces de conseguir un recurso y así iniciar el proceso de transmisión según los permisos resultantes de la aplicación del algoritmo de gestión de recursos. En particular, existen dos características del protocolo propuesto que pueden ser importantes de cara a facilitar las garantías de calidad:

1.- En primer lugar, ISMA-DS/CDMA FDD presenta una capacidad de regulación del acceso de nuevos usuarios al sistema por medio de la aplicación de probabilidades variables en función del número de códigos ocupados en un momento dado, de modo que se impida el acceso de nuevos usuarios una vez se haya superado un cierto umbral de ocupación. Con respecto de otros protocolos más simples como S-ALOHA, esta capacidad de regulación es de interés al intentar garantizar calidad de servicio para evitar que la componente aleatoria del acceso pueda dar lugar a situaciones de elevada interferencia no previstas por el algoritmo de gestión de recursos debidas exclusivamente a los usuarios que pretenden acceder.

2.- En segundo lugar, la capacidad de adaptación de la velocidad de transmisión planteada según el algoritmo ThMS con el protocolo ISMA-DS/CDMA FDD también puede ser aprovechada dentro del proceso de regulación de la interferencia. En particular, se puede pensar en un mecanismo descentralizado por el que sean los

propios usuarios los que, en base a la aplicación de dicho algoritmo, comuniquen conjuntamente con el acceso su propuesta de velocidad o ganancia de procesamiento para la transmisión que deseen efectuar. De este modo, el algoritmo de gestión de recursos puede partir de esta propuesta para aceptar o no las diferentes transmisiones, simplificándose el proceso de dicho algoritmo.

En cualquier caso, y tomando como protocolo de acceso múltiple ISMA-DS/CDMA FDD, uno de los aspectos a solucionar para garantizar una cierta calidad de servicio en un mecanismo de transmisión por paquetes consiste en acotar el retardo de acceso al sistema por parte de un terminal. Efectivamente, nótese que hasta que un terminal no consigue un código para transmitir, el gestor de recursos no puede saber que debe incorporar las necesidades de dicho terminal al algoritmo de gestión, por lo que el proceso de garantía de calidad no ha podido iniciarse todavía y está supeditado a la capacidad que pueda presentar el protocolo de acceso para mantener un retardo reducido. Si la aleatoriedad de dicho protocolo origina un retardo elevado, puede darse la situación en que el máximo retardo tolerado expire incluso antes de haberse podido notificar la petición al gestor de recursos.

Dentro de este contexto, se consideran los dos casos siguientes, dependiendo de si el terminal se encuentra en el transcurso de una sesión de transferencia de paquetes o al inicio de ésta:

1.- Acceso al inicio de una sesión. No resulta excesivamente crítico puesto que el no poder iniciar una sesión en un cierto tiempo máximo tiene connotaciones para el usuario de no disponibilidad de recursos en la red, que siempre presenta menor importancia que la posibilidad de interrumpir una transmisión en curso. Por este motivo, un protocolo de acceso como ISMA-DS/CDMA FDD puede resultar suficiente para llevar a cabo este acceso.

2.- Acceso en el transcurso de una sesión. En un contexto de transmisión por paquetes, en que el tráfico presenta una naturaleza a ráfagas, intercalando períodos de actividad más o menos pronunciada con otros intervalos en los que no se dispone de información para transmitir, es preciso que las garantías de calidad de servicio se mantengan a lo largo de toda la sesión. A modo de ejemplo piénsese en transmisiones basadas en el protocolo TCP (Transport Control Protocol), habitualmente empleado en Internet, en las que los segmentos o paquetes se generan a ráfagas que pueden estar notablemente espaciadas dependiendo del retardo total extremo a extremo que incluye el interfaz radio y la red fija. En una situación de estas características, la calidad de servicio en el interfaz radio debe garantizarse para todos y cada uno de los diferentes paquetes generados. El no cumplimiento de estos requerimientos presenta para el usuario connotaciones de interrupción de un servicio contratado, mucho más negativas que la imposibilidad de iniciar una sesión.

Consecuentemente, y partiendo de esta problemática, es preciso disponer de un mecanismo suficientemente ágil que permita a los usuarios regresar a los recursos en un tiempo acotado, pero tratando de evitar que los terminales dispongan de recursos mientras no tienen información para transmitir y así hacer un uso eficiente de los mismos. Si esta función se encomendara únicamente a un protocolo de acceso aleatorio como ISMA-DS/CDMA FDD, la propia naturaleza aleatoria del acceso evitaría que se pueda hablar de garantías en lo referente a un retardo máximo. Piénsese por ejemplo en la probabilidad de acceso que se aplica para regular la interferencia: si el número de usuarios es elevado, dicha probabilidad puede ser pequeña con lo que el retardo puede crecer notablemente. Por este motivo, parece necesario incorporar algún mecanismo adicional que permita acotar el retardo de acceso del protocolo ISMA-DS/CDMA FDD. Esta es la

función del mecanismo de sondeo o *POLLING* periódico que se propone añadir al protocolo, de modo que se conjugue la flexibilidad del acceso aleatorio con la capacidad de proporcionar garantías de retardo que ofrece una estrategia como el sondeo. El diagrama de estados que define el comportamiento de los terminales móviles en el mecanismo ISMA-DS/CDMA FDD con sondeo es el que se muestra en la Figura siguiente, y se describe a continuación, asumiendo que, con anterioridad a poder aplicar este diagrama de estados, cada terminal ha debido pasar a través del control de admisión correspondiente.

1.- Los terminales permanecen en estado de Inactividad hasta el inicio de una nueva sesión. A partir de este instante, intentan acceder al sistema aplicando probabilidades de acceso variables en función de los códigos ocupados según el mecanismo ISMA-DS/CDMA FDD.

2.- Si consiguen adquirir un código, y mientras dispongan de paquetes en el buffer, transmiten trama a trama según los permisos proporcionados por el algoritmo de gestión de recursos que posteriormente se detallará (estado código adquirido, en la Figura 5.4), a partir de la indicación de las necesidades de transmisión comunicadas por parte del usuario. En el enlace descendente correspondiente al código adquirido se indican los correspondientes permisos. En caso de no disponer de nuevos paquetes para transmitir, por ejemplo porque se ha vaciado el buffer, se mantendrá el código durante  $N_r$  tramas, tal y como muestra el contador *cont* de la figura. Tras este tiempo, se procederá a liberar el código y se pasará al estado Sin Código. Este tiempo está fundamentalmente pensado para que, en caso de requerirse retransmisiones de paquetes ya enviados, éstas se puedan efectuar de forma inmediata, sin tener que realizar un nuevo acceso. Igualmente, puede ser útil para hacer frente a mensajes que lleguen con una separación temporal muy

pequeña respecto de la última transmisión, evitando así tener que contendér por un nuevo recurso.

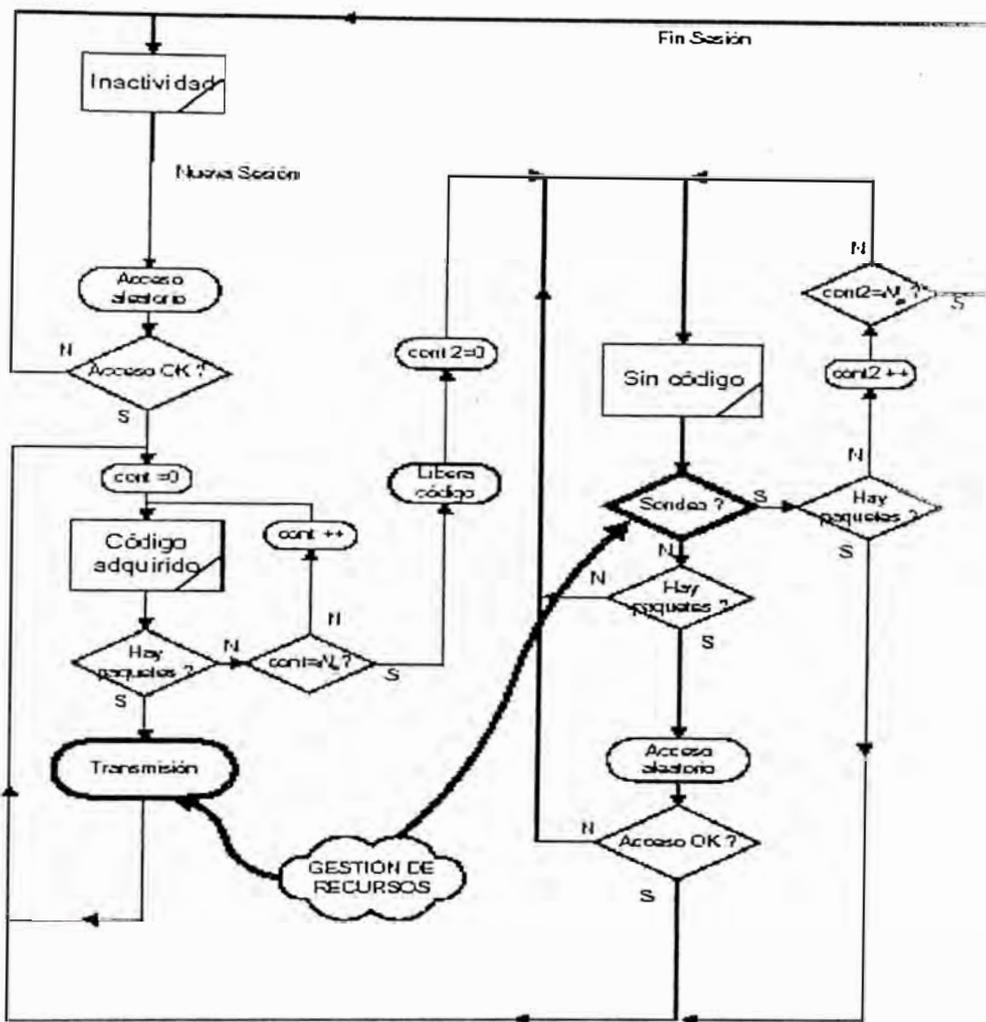


Figura 5.4: Diagrama de estados del funcionamiento de un terminal según el protocolo ISMA-DS/CDMA FDD con sondeo.

3.- Tras la liberación del código, si llegan nuevos paquetes para ser transmitidos, el terminal dispondrá de dos posibilidades para volver a acceder al sistema: la primera es intentar el acceso como si de un móvil proveniente del estado de inactividad se tratase, esto es, aplicando la probabilidad de acceso variable según el número de

códigos ocupados según el protocolo ISMA-DS/CDMA FDD. De todos modos, este mecanismo basado en un acceso puramente aleatorio será incapaz de garantizar, por sí solo, una buena calidad en términos de retardo. Por este motivo, la segunda posibilidad consiste en que, periódicamente cada  $P_p$  tramas, se realice un sondeo hacia aquellos móviles que recientemente hayan liberado su código, lo que equivaldrá a efectuarles la reserva de un código para la transmisión en la siguiente trama, facilitándoseles de este modo el regreso al sistema. Dicha reserva se notificaría a través de un canal de difusión común.

4.- Si un móvil recibe un sondeo y no tiene todavía información, no hará uso de él, con lo que se incrementará el contador  $cont2$  de sondeos consecutivos no respondidos. Este contador origina que tras  $1S$  sondeos consecutivos sin respuesta hacia un usuario se asuma que dicho usuario ha finalizado la sesión y se le dejen de hacer sondeos. A partir de este momento, la única posibilidad de regresar al sistema será a través del protocolo ISMA-DS/CDMA FDD básico.

Obsérvese como el mecanismo de sondeo simplemente se debe contemplar como una última posibilidad para acceder al sistema dentro de un retardo acotado, pero no como una sustitución del mecanismo ISMA-DS/CDMA FDD, pues los terminales pueden hacer uso de este protocolo siempre que lo consideren oportuno, siguiendo sus reglas preestablecidas. Por este motivo, la incorporación del mecanismo de sondeo no supone una pérdida de la flexibilidad inherente al mecanismo de acceso aleatorio.

Otro aspecto a destacar es el hecho de que el mecanismo de sondeo dota al sistema con un grado de adaptabilidad a la carga, pues para cargas bajas los usuarios accederán predominantemente mediante ISMA-DS/CDMA FDD, mientras que para cargas elevadas las probabilidades de acceso de dicho protocolo serán

inferiores y los usuarios empezarán a hacer uso predominantemente del mecanismo de sondeo para lograr el acceso.

El mecanismo propuesto será válido para todos aquellos terminales a los que se quiera garantizar calidad de servicio, aunque con diferentes valores para  $P_p$ ,  $N_p$ , y  $N_f$  en función de los requerimientos de servicio y de las características de generación del tráfico, como se discutirá posteriormente. Por el contrario, los usuarios sin calidad de servicio garantizada, usualmente denominados best effort, no dispondrán de la posibilidad de sondeo y deberán hacer uso únicamente del protocolo ISMA-DS/CDMA FDD.

Como puede apreciarse en la Figura 5.4, dentro del mecanismo propuesto, el algoritmo de gestión de recursos es responsable por un lado de regular las transmisiones de los usuarios con código adquirido y por el otro de contabilizar cuándo se debe efectuar un sondeo hacia un usuario, contemplando también dicho sondeo a efectos de la interferencia generada por una posible respuesta.

A modo de ilustración del proceso explicado en la Figura 5.5 se muestra un ejemplo del funcionamiento de un terminal según el proceso descrito, orientado a mostrar la temporización asociada al proceso dentro de la estructura de tramas considerada. Como puede apreciarse, lo primero que hace el terminal al iniciar su sesión con el mensaje 0 ( $M_0$ ) es seleccionar un código  $C_i$  del conjunto disponible difundido por la base y, tras aplicar la probabilidad de acceso correspondiente, transmitir un preámbulo de acceso en dicho código con la petición  $P_0$  para transmitir dicho mensaje 0, tal y como opera el protocolo ISMA-DS/CDMA FDD descrito en anteriores capítulos. A continuación espera a la respuesta  $R$  de la estación base en el enlace descendente que confirma el acceso, pero antes de continuar con la transmisión, espera a recibir el permiso correspondiente por parte del algoritmo de gestión de recursos, que viaja en el enlace descendente asociado

al código seleccionado. Tras efectuarse dicho proceso de gestión\_ a partir de todas las peticiones recibidas, la base responde permitiendo la transmisión con el indicador  $S=1$ , de modo que a lo largo de la trama 2 ( $t=2$ ) el terminal envía el mensaje 0 ( $M_0$ ) conjuntamente con la petición  $P_1$  de transmitir el nuevo mensaje 1 que acaba de llegar.

El gestor de recursos ejecutaría nuevamente en la siguiente trama el algoritmo correspondiente a partir de todas las peticiones e indicaría en el enlace descendente la inhibición o no de la transmisión. Supóngase que se marca como permitida ( $S=1$ ) en el enlace descendente de  $C_i$  a lo largo de la trama 2. Esto permite al usuario transmitir el mensaje 1 ( $M_1$ ) a lo largo de la trama 3, conjuntamente con la petición ( $P_2$ ) de transmitir el mensaje 2, que ya se encuentra en su buffer de salida. En el correspondiente enlace descendente se recibe el reconocimiento relativo a la correcta recepción del mensaje 0 (denotado como ack 0).

Supóngase que en  $t=3$  el algoritmo de gestión\_ no acepta la petición  $P_2$ . En este caso lo marca con  $S=0$  en el enlace de bajada, y dicha petición queda almacenada para la siguiente trama. En  $t=4$  el terminal no puede indicar su petición puesto que no tiene permiso para transmitir. Sin embargo, a lo largo de  $t=4$  se le concede el permiso y en  $t=5$  transmite el mensaje 2 ( $M_2$ ) conjuntamente con la petición  $P_3$  de transmitir los mensajes 3 y 4 que le han llegado (para ello, se asume que dichos dos mensajes se pueden enviar de forma conjunta aplicando la velocidad mayor posible). Esta petición es aceptada, de modo que en  $t=6$  envía dichos mensajes. Además, como su buffer ha quedado vacío, transmite una petición en blanco  $NP$  indicando que no dispone de nueva información para transmitir en la siguiente trama. A partir de aquí mantiene el código pero se activará

el contador cont del número de tramas  $N_f$  sin información antes de liberar el código (en este ejemplo se supone  $N_f=3$ ).

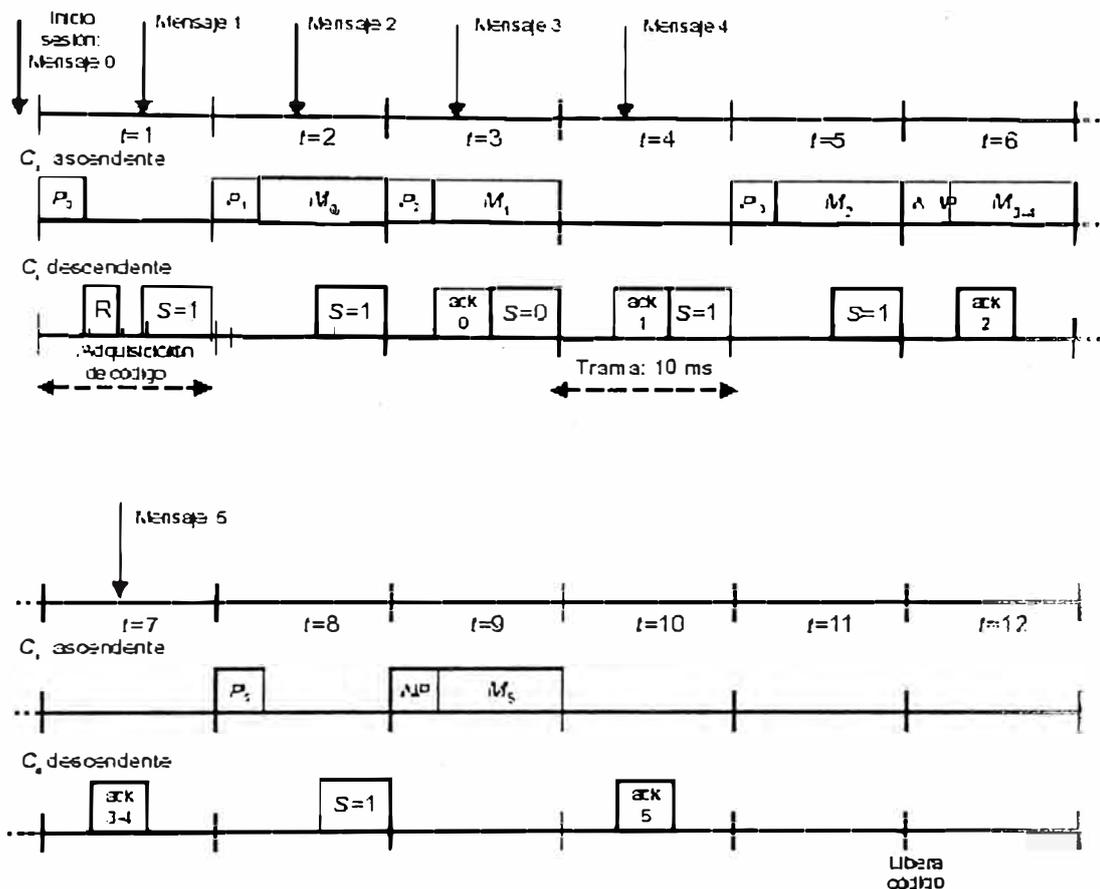


Figura 5.5: Ejemplo de la estructura de tramas del mecanismo propuesto.

Al inicio de  $t=7$  prosigue sin información para transmitir con lo que no envía ninguna petición. Sin embargo, en  $t=8$  ya le ha llegado el mensaje 5 por lo que vuelve a enviar una petición de transmisión  $P_5$ . La base se la acepta y transmite el mensaje en  $t=9$ . A partir de este instante ya no recibe más mensajes de modo que tras  $N_f = 3$  tramas sin información se procede a la liberación del código.

A partir de aquí, asúmase que el terminal recibe un nuevo mensaje G. Suponiendo que no se le hiciera sondeo en la trama siguiente a aquella en que lo recibe, intentaría acceder a un código igual que si de un inicio de sesión se tratase. En el caso de no adquirir el código correctamente, esperaría a recibir un sondeo por parte de la estación base reservándole un código a través de un canal de difusión común. Como respuesta a ese sondeo, transmitiría su petición de envío del nuevo mensaje y, si llegara correctamente, dispondría ya del código adquirido para continuar con la transmisión.

### **5.3 Calidad de servicio en un esquema por paquetes TDD-TD/CDMA.**

De acuerdo con el planteamiento efectuado para el diseño de mecanismos de transmisión por paquetes con garantías de calidad de servicio y de las funcionalidades que de dicho planteamiento se derivan, reflejadas, para un entorno TDD-TD/CDMA, en la Figura 5.1 del principio del presente capítulo, y una vez se han abordado las diferentes posibilidades de asignación de recursos DCA, a continuación se plantea el estudio de protocolos de acceso múltiple y algoritmos de gestión de recursos en la misma línea que se siguió en el contexto FDD.

Así pues, en el presente capítulo, y como continuación del anterior, se abordará en primer lugar la caracterización de protocolos de acceso múltiple adecuados que permitan a los usuarios la entrada al sistema TDD-TD/CDMA de forma eficiente. Al igual como se hizo en los capítulos dedicados a FDD, se propone esencialmente la utilización del protocolo ISMADS/ CDMA pero teniendo en cuenta las peculiaridades que se derivan del entorno considerado, como la componente TDMA presente. A efectos comparativos, se considerará también un protocolo de acceso basado en el canal RACH (Random Access Channel) y que por lo tanto carece de la mayor flexibilidad de que dispone ISMA. Posteriormente, se procederá

al estudio de algoritmos de gestión de recursos bajo un esquema de sondeo o polling para acotar el retardo en el acceso.

#### **5.4 Protocolos de acceso múltiple para TDD-TD/CDMA.**

##### **5.4.1 El protocolo ISMA-TD/CDMA**

Como ya se ha comentado extensamente a lo largo del presente estudio, la característica principal del protocolo ISMA (Inhibit Sense Multiple Access) consiste en la notificación del estado de ocupación de los diferentes recursos del sistema, de modo que los terminales puedan efectuar el acceso al mismo en base a esta ocupación. Esta característica permite reducir en cierto modo el grado de aleatoriedad del acceso, lo que se traduce en una mayor eficiencia del mismo, al reducirse las colisiones, respecto de un esquema de acceso convencional basado en un mecanismo S-ALOHA, pero manteniendo todavía un elevado grado de la flexibilidad característica de los esquemas de acceso aleatorios.

Dentro del contexto TDD-TD/CDMA, y a diferencia de lo que ocurría en el esquema FDD ya estudiado, los recursos cuyo estado de ocupación se debe notificar son las parejas ranura temporal / código OVSF, tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente, destinadas a la transmisión en modo paquete. A diferencia de lo que ocurre en un protocolo basado en el acceso a través de un canal específico como el RACH, el protocolo ISMA no requiere de un canal de acceso concreto, sino que dicho acceso puede intentarse en cualquier recurso que no se marque como ocupado, lo que garantiza una mayor capacidad para dicho acceso. De este modo, el acceder a un recurso (ranura temporal / código OVSF) de forma satisfactoria supone que ningún nuevo usuario podrá intentar

acceder a dicho recurso hasta finalizarse la transmisión en curso. Al trasladar este mecanismo de acceso al contexto de canales físicos y de transporte definidos en UTRA TDD, sería equivalente a asumir que todos aquellos recursos del enlace ascendente no ocupados de una trama son canales RACH, en tanto que en todos ellos puede intentarse el acceso; una vez éste haya sido satisfactorio sobre uno de estos recursos, pasaría a convertirse en un canal del tipo USCH (Uplink Shared Channel), cuyas transmisiones se regularían mediante el algoritmo de gestión de recursos apropiado. A su vez, las transmisiones en el enlace descendente estarían vinculadas al canal de transporte DSCH (Downlink Shared Channel) de UTRA TDD. En cualquier caso, la ranura RACH específica definida en UTRA TDD puede mantenerse y dedicarse, por ejemplo, al acceso de usuarios en modo circuito, lo que facilitaría la coexistencia entre los sistemas de transmisión de paquetes y los de transmisión en modo circuito.

Este mecanismo garantiza que, una vez un usuario ha conseguido el acceso a un recurso, lo va a mantener mientras disponga de información para transmitir. Sin embargo, el hecho de disponer de este recurso no significa que se vaya a poder utilizar cuando se desee, puesto que deberá ser el algoritmo de gestión de recursos quien determine, en cada trama, si un móvil dispone o no de permiso para transmitir, de manera que se puedan conjugar las transmisiones de usuarios diferentes con la estructura de códigos OVSF utilizada en el esquema TDD, que se mostró en la Figura 4.2. Nótese que, dadas las peculiaridades de dicha estructura, si a un usuario se le permitiera la transmisión a una ganancia de procesamiento inferior a la máxima, 16, esto podría impedir la transmisión de otros usuarios que dispusieran de códigos OVSF diferentes pero que se ubicaran dentro de la misma rama del árbol, lo que justifica la regulación que debe efectuar el algoritmo de gestión de recursos en términos de la gestión de los códigos disponibles.

Al tratar de adaptar el mecanismo ISMA-DS/CDMA al esquema de transmisión TDDTD/CDMA los aspectos diferenciales respecto de FDD que deben ser tenidos en cuenta, y que influirán sobre las reglas de funcionamiento del protocolo son los siguientes:

1.- Componente TDMA. Como ya se ha dicho, provoca que los recursos sean no únicamente los códigos sino las parejas ranura / código OVSF, por lo que cada usuario deberá seleccionar la ranura y el código que considere más apropiados. Los niveles de interferencia serán en general diferentes para cada una de las ranuras y para cada móvil en particular, contrariamente a lo que ocurría en el esquema FDD. Por este motivo, la selección de recursos ahora no tiene por qué ser aleatoria sino que puede tener en cuenta también dichos niveles de interferencia para determinar sobre qué ranura un móvil desea intentar el acceso.

2.- Característica asimétrica del sistema. Si bien en el esquema FDD considerado se ha asumido que cada código del enlace ascendente dispone a priori de su correspondiente pareja en el enlace descendente, con lo que la selección del primero define directamente el segundo, la propia estructura de trama asimétrica del esquema TDD impide la asociación entre recursos del enlace ascendente y del enlace descendente, puesto que pueden existir más recursos en una dirección que en la otra. Por este motivo, el mecanismo de acceso en TDD/TD-CDMA deberá no únicamente abordar la consecución de un recurso en el enlace ascendente sino también en el enlace descendente.

Debe tenerse en cuenta que el protocolo de acceso múltiple únicamente afecta a aquellas transmisiones en el enlace ascendente, puesto que es el caso en que la estación base no conoce cuando un terminal dispone de información para transmitir. Por el contrario, en las transmisiones en el enlace descendente la red ya conoce hacia qué terminales debe enviar la información, de modo que puede

ejecutar directamente el algoritmo de gestión de recursos y notificar la asignación de recursos en el enlace descendente a través de mensajes específicos tipo paging por canal común.

Hechas estas puntualizaciones, las reglas de funcionamiento del protocolo propuesto, al que se denominará ISMA-TD/CDMA para diferenciarlo de la versión desarrollada en FDD, vienen definidas a continuación.

#### **5.4.2 Reglas de funcionamiento del protocolo ISMA-TD/CDMA para TDD.**

1.- Los terminales móviles se sincronizan con el sistema y determinan la posición del canal de difusión o broadcast, que ubica la situación del canal en el que se informa de la ocupación de los recursos.

Este canal requiere de un bit (1:ocupado, 0:libre) por cada uno de los recursos existentes, tanto ascendentes como descendentes. Así pues, asumiendo en el peor de los casos la presencia de 13 ranuras x 16 códigos OVSF = 208 recursos, el número de bits necesario para una tasa de codificación de esta información de  $r=1/2$  sería de 416 bits. En el contexto de UTRA TDD se precisaría de dos canales físicos CCPCH (Common Control Physical Channel), pues cada uno de ellos es capaz de transportar 244 bits de información al viajar en una ráfaga de tipo 1 con ganancia de procesamiento 16 [89]. Nótese que se ha considerado la existencia únicamente de 13 ranuras en lugar de las 15 existentes en la trama puesto que se asume que ni la ranura que transporta el canal RACH ni la ranura del canal de difusión pueden ser seleccionados por el esquema de transmisión por paquetes.

2.- En base a sus necesidades y al estado de ocupación de recursos difundido por la estación base, cada terminal móvil selecciona un recurso en el enlace ascendente y otro en el enlace descendente aplicando una cierta

probabilidad de acceso que, al igual que ocurría en el caso FDD, puede ser variable según una cierta función dependiente del número de recursos ocupados. El recurso del enlace descendente es necesario, de cara a las transmisiones del enlace ascendente, para comunicar la siguiente información:

- Comandos de gestión de recursos: permisos para transmitir en la siguiente trama, ganancia de procesado que se puede emplear y ranuras adicionales que se pueden utilizar.
- Comandos DCA: en función del nivel de interferencia medido y de la aplicación de un esquema de asignación DCA como los planteados anteriormente se debe comunicar al terminal las posibles reasignaciones de ranuras que puedan ocurrir.
- Reconocimientos de los paquetes enviados en el enlace ascendente.
- Control de nivel físico: comandos de control de potencia y de avance temporal.

En caso de que la petición llegue correctamente, es decir, si la interferencia no ha degradado la transmisión y si ningún otro usuario ha seleccionado el mismo recurso ascendente, el acceso a dicho recurso se habrá efectuado satisfactoriamente y el terminal estará en disposición de regular sus transmisiones en función de los comandos de gestión de recursos que se le comuniquen a través del recurso descendente seleccionado.

En relación a la consecución de este último recurso, el del enlace descendente, debe notarse que al sistema le es posible discriminar las "colisiones" que se produzcan en la selección de dicho recurso, es decir, la posibilidad de que más de un usuario haya seleccionado el mismo recurso descendente. Esto es debido a que la selección se conoce tras la decodificación del mensaje transmitido en el enlace ascendente, por lo que si varios usuarios, en recursos ascendentes diferentes, han solicitado el mismo recurso descendente, el sistema es capaz de

conocer qué usuarios están involucrados en esta selección y efectuar la redistribución apropiadamente.

3.- Tras efectuar la petición en el enlace ascendente, el móvil escucha a través del recurso seleccionado del descendente la respuesta por parte de la base. En esta respuesta se debe indicar el identificador del móvil que ha enviado la petición así como el recurso seleccionado del ascendente que ha sido correctamente adquirido. Igualmente se comunicará explícitamente el recurso del descendente que ha sido asignado a dicho terminal. Esto permite que, en el caso de que más de un usuario haya seleccionado el mismo recurso descendente, todos ellos reciban la confirmación del acceso a través de dicho recurso y se les pueda comunicar qué recurso descendente se les asigna a cada uno de ellos para las siguientes tramas, garantizando que en todo momento, cada recurso descendente esté asignado a un único usuario.

Se asume, por lo tanto, la existencia de una estructura del mensaje enviado organizado en diferentes campos que permitan el envío de información a más de un terminal móvil con el mismo mensaje. Una posible organización sería la que se presenta en la Figura siguiente, en la que, para cada terminal involucrado, se indican los correspondientes recursos ascendente (UL) y descendente (DL) confirmados, existiendo un carácter de final de mensaje que permite detectar la finalización del conjunto de terminales direccionados y el inicio de los bits de relleno hasta completar el número de bits de la ranura.

4.- A partir de la siguiente trama, los recursos correctamente adquiridos pasan a difundirse como ocupados, conjuntamente con los recursos que ya estaban ocupados de tramas anteriores, de modo que el procedimiento de acceso pueda repetirse según las mismas reglas especificadas.

Identificador MS1	Recurso UL MS1	Recurso DL MS1
Identificador MS2	Recurso UL MS2	Recurso DL MS2
Identificador MSn	Recurso UL MSn	Recurso DL MSn
Campo de final de mensaje	Bits de Relleno	

Figura 5.6: Posible estructura de campos del mensaje de confirmación en el enlace descendente.

5.- En base a los requerimientos de transmisión de los distintos usuarios (número de paquetes a transmitir, timeouts, etc.) la red lleva a cabo el algoritmo de gestión de recursos. El resultado de éste se traduce en permitir o no la transmisión a aquellos usuarios que disponen de algún recurso así como de indicar la ganancia de procesado que se puede emplear.

6.- Aquellos usuarios cuyo acceso no fructifica, es decir, que han sufrido una colisión o bien que el nivel de interferencia ha degradado su transmisión hasta el punto que no se ha detectado correctamente el mensaje transmitido repetirán el proceso explicado en futuras tramas.

Respecto de la interacción entre el esquema DCA que se emplee y el protocolo de acceso, hay que tener presente que, por motivos de interferencia, el esquema DCA puede decidir la reasignación de recursos de los enlaces ascendente o descendente. Esta notificación deberá ser comunicada al móvil en cuestión a través de su recurso correspondiente del enlace descendente.

A modo de ilustración, en la Figura 5.7 se muestra un ejemplo de funcionamiento del protocolo propuesto, en el que existe una estructura de trama donde las ranuras 2 a 5 están destinadas para el enlace ascendente y las ranuras 6

a 14 para el enlace descendente. A su vez, la ranura 0 transporta la información de difusión y la ranura 1 el canal RACH para el acceso en modo circuito. En el ejemplo planteado, se han producido 4 accesos en la trama actual:

- el terminal MS 1 accede en la ranura 3 y el código 1 y solicita para el descendente la ranura 9 y el código 2
- el terminal MS 2 accede en la ranura 4 y el código 3 y solicita para el descendente la ranura 8 y el código 1
- el terminal MS 3 accede en la ranura 4 y el código 15 y solicita para el descendente la ranura 9 y el código 2
- los terminales MS 4 y MS 5 intentan acceder en la ranura 5 y el código 0, produciéndose, en consecuencia, una colisión que impide a la red identificar ambos accesos, que por lo tanto no serán confirmados

En base a estos accesos, únicamente los terminales MS1, MS2 y MS3 consiguen efectuar el acceso correctamente, lo que será comunicado en las correspondientes respuestas en los recursos seleccionados del enlace descendente. Nótese que MS1 y MS3 han seleccionado el mismo recurso de dicho enlace, motivo por el que ambos reciben la confirmación en el mismo recurso, esto es, la ranura 9 y el código 2. Sin embargo, en el mensaje de confirmación se indicará que, para las siguientes tramas, el recurso descendente asignado será la ranura 9 y código 2 para uno de los dos móviles y otro recurso diferente para el otro terminal. Así se garantiza que la posible existencia de una colisión en el enlace descendente no entorpezca el procedimiento de acceso.

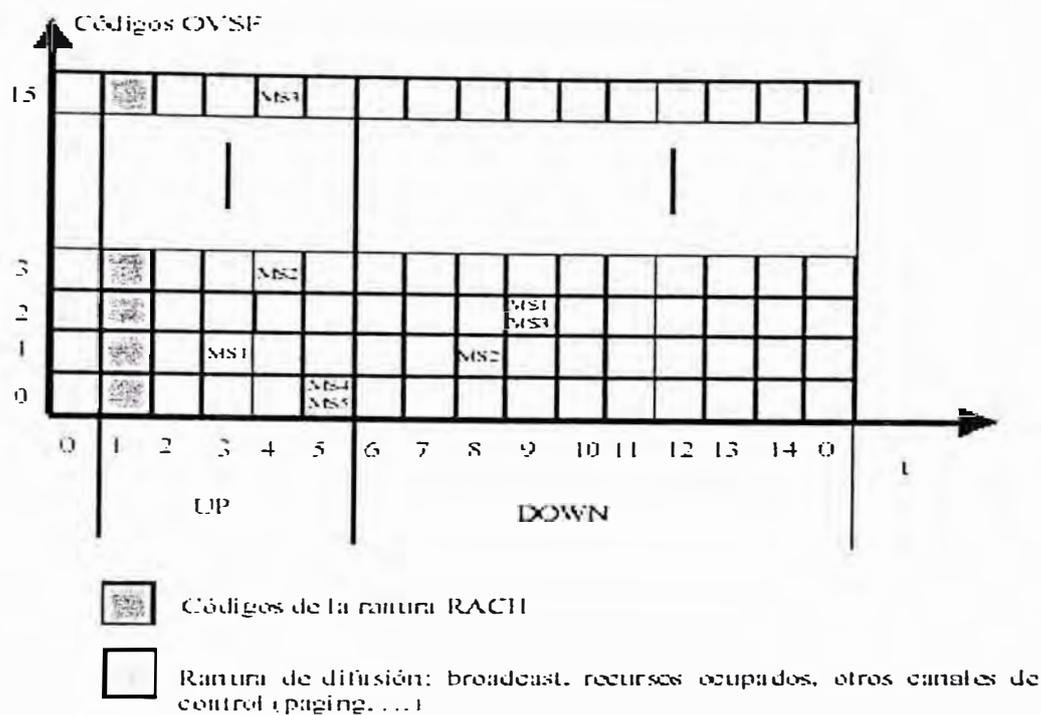


Figura 5.7: Protocolo de acceso múltiple ISMA-TD/CDMA

### 5.5 Calidad de servicio en TDD-TD/CDMA

Cuando se desea mantener unas ciertas garantías de calidad de servicio en los mecanismos de transmisión de paquetes quizá el aspecto que cobra más relevancia, al margen del protocolo de acceso múltiple, es el algoritmo de gestión de recursos que se encarga de efectuar una ordenación adecuada de las transmisiones en función de las características de calidad que deban garantizarse para cada una. Sin embargo, no hay que olvidar la interrelación que se mostró en la Figura 5.1 entre el algoritmo de gestión de recursos y las diferentes funcionalidades como el protocolo de acceso o el control de admisión, pues las garantías de calidad de servicio deberán obtenerse como el resultado global de la aplicación de dichas funciones.

De este modo, conjuntamente con el algoritmo de gestión de recursos resultará interesante el uso de mecanismos para reducir la aleatoriedad del protocolo, como los ya presentados en el estudio FDD, basados en estrategias de sondeo sobre los diferentes terminales, que permitan mantener acotado bajo unos ciertos límites el retardo en el acceso al sistema, pues si no se efectuara un control adecuado sobre dicho retardo, aun disponiendo de un buen mecanismo de gestión de recursos podrían no mantenerse los requerimientos establecidos para la calidad de servicio, simplemente por la componente aleatoria intrínseca del protocolo de acceso.

De este modo, a lo largo de esta sección se planteará un algoritmo de gestión de recursos para ordenar eficientemente las transmisiones en un contexto TDD-TD/CDMA en conjunción con los protocolos de acceso ya presentados DSA++ e ISMA-TD/CDMA, los cuales serán complementados con un mecanismo de sondeo.

### **5.5.1 Algoritmo de gestión de recursos.**

A la hora de definir el conjunto de recursos que se deben gestionar entre los diferentes terminales para adecuar las transmisiones a la calidad de servicio que se deba garantizar es preciso tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

- por un lado la propia limitación debida al número de recursos existente en el esquema TDD-TD/CDMA, con un conjunto específico de ranuras y códigos de ensanchado disponibles
- por el otro las limitaciones originadas por la componente CDMA del acceso que se traducen en una necesidad de regular la interferencia total generada.

Así pues, en relación a la primera limitación existe un total de  $N_{up}$  ranuras para el enlace ascendente y de  $N_{down}$  ranuras para el enlace descendente,

dependiendo del grado de asimetría considerado, y con la posibilidad de efectuar hasta 16 transmisiones simultáneas en cada uno mediante los 16 códigos OVSF de ganancia de procesado 16. De este modo, el número total de recursos disponible para el enlace ascendente será de  $16 \cdot N_{up}$  y de  $16 \cdot N_{down}$  para el descendente. Los recursos de una ranura pueden ser utilizados por terminales diferentes con el empleo de códigos diferentes o bien por un único terminal mediante el uso de diferentes ganancias de procesado (multispreading) o de diferentes códigos (multicódigo), siendo ambas posibilidades equivalentes en términos de consumo de recursos salvo por una mejor granularidad que puede conseguirse mediante la técnica multicódigo. A diferencia de lo que ocurre en UTRA TDD, en un contexto como UTRA FDD no existe una limitación tan rígida en lo que a número de códigos disponibles se refiere, por lo que el control de los recursos por parte del algoritmo de gestión estará mucho más orientado a la regulación de la interferencia que a la ocupación de los códigos.

En relación a la componente CDMA del esquema de transmisión, la necesidad de regular la interferencia del sistema impone un conjunto de restricciones al reparto de los recursos que debe efectuar el algoritmo de gestión, resultando en que no siempre todos los recursos existentes están disponibles para todos los terminales. En particular, las interferencias que deben tenerse en cuenta son las siguientes, además del posible efecto del ruido térmico, que en general será despreciable:

a) Interferencia intracelular: Dada la ortogonalidad de los códigos empleados dentro de una misma celda, conjuntamente con las estrategias de avance temporal así como el control de potencia en lazo abierto con prestaciones similares al control en lazo cerrado, esta interferencia presentará valores muy reducidos respecto de la interferencia proveniente de otras celdas.

b) Interferencia intercelular: En este caso la interferencia proviene de terminales de otras celdas cuya separación respecto de los terminales de la celda considerada vendrá únicamente motivada por la existencia de códigos de scrambling diferentes entre las distintas celdas, por lo que no se mantendrá la condición de ortogonalidad propia de la interferencia intracelular.

Respecto a esta interferencia cabrá destacar las dos posibilidades ya vistas anteriormente:

- Interferencia en ranuras en el mismo estado de transmisión en todas las bases, esto es, ranuras que o bien se encuentran en el enlace ascendente o bien en el enlace descendente pero este rasgo es igual en todas las celdas. El efecto de esta interferencia se reflejará en una cierta limitación sobre el número máximo de transmisiones simultáneas o lo que es lo mismo, de recursos ocupados, que se puedan aceptar en una celda para mantener la interferencia generada en las celdas vecinas por debajo de un umbral máximo.

- Interferencia MS a MS y BS a BS, debida a diferentes asimetrías entre estaciones base vecinas. Si bien se ha visto que es posible mitigar esta interferencia mediante estrategias DCA adecuadas, como la repartición en función del avance temporal o de las pérdidas de propagación estimadas, en determinadas situaciones y para algunas ranuras, esta interferencia puede conducir a imposibilitar la transmisión en dichas ranuras, lo que se traduce en una reducción del número de recursos a repartir. Para el enlace ascendente, esta imposibilidad será la misma para todos los terminales, mientras que en el enlace descendente dependerá de cada terminal y de su posición relativa respecto de otras bases y terminales.

En todo caso, estas diferentes situaciones deberán ser detectadas mediante la realización de medidas de interferencia en los diferentes recursos existentes que deberán ser tenidas en cuenta por el procedimiento de gestión de recursos para

saber en cada caso cuales son los recursos sobre los que debe efectuar la repartición de las transmisiones procurando que las posibles variaciones de interferencia que se generen hacia otras celdas sean lo menor posibles para mantener al máximo la validez de las medidas tomadas de una trama a la siguiente.

Así pues, como resultado del proceso de medidas que se haya efectuado relativo a la interferencia presente en el sistema en cada caso, el conjunto de recursos de partida de que dispone el algoritmo de gestión de recursos para efectuar el reparto es el que se muestra en la Figura 5.8 para el enlace ascendente, existiendo un total de  $N_{up}$  ranuras tras haber descontado las inutilizadas por la interferencia BS a BS, y un número máximo de códigos  $G$  que se pueden ocupar simultáneamente en cada ranura, en función de la interferencia intercelular máxima que se pueda generar hacia otras celdas. En general, el valor de  $G$  podría ser diferente para cada ranura considerada. Para el enlace descendente el esquema sería análogo con la peculiaridad de que el conjunto de ranuras inutilizadas sería diferente para cada terminal.

### **5.5.2 Descripción de las peticiones de transmisión.**

El algoritmo de gestión de recursos se efectuará trama a trama, para así dotar al sistema de una mayor capacidad de adaptación a la existencia de tráfico a ráfagas que pueda disponer de restricciones elevadas en términos de retardo. De este modo, es preciso disponer en cada trama de las necesidades de transmisión de los diferentes usuarios relativas a la siguiente trama para así poder efectuar el reparto de recursos.

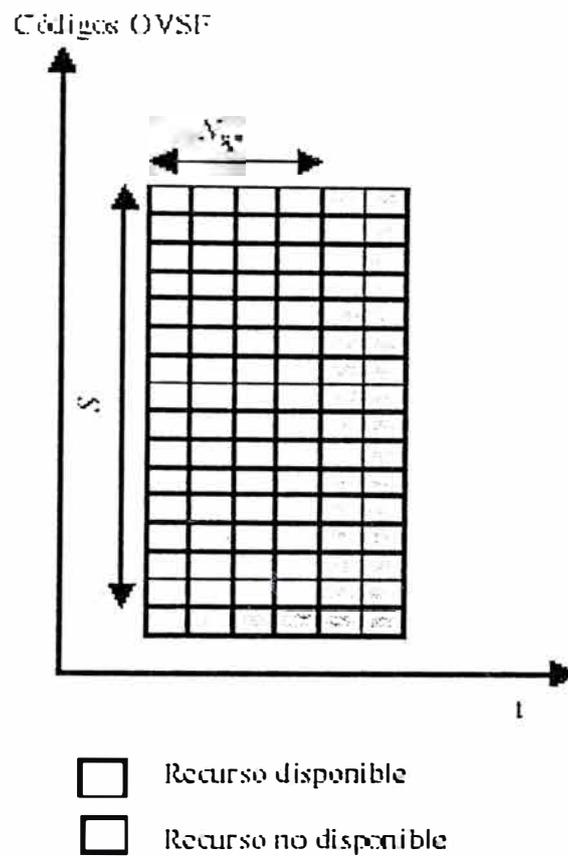


Figura 5.8: Recursos a repartir por el proceso de gestión de recurso

Dichas necesidades de transmisión las comunican los nuevos usuarios en el momento del acceso a través de la petición inicial, e irán siendo actualizadas por el propio algoritmo a medida que vayan siendo servidas en las sucesivas tramas. De este modo, la red sabrá en cada momento cuales son los requerimientos de cada terminal para la siguiente trama, en función de su petición inicial, de los recursos que se le hayan ido asignando en las transmisiones anteriores y de las posibles retransmisiones que hayan sido necesarias. Para aquellos terminales cuyas necesidades cambien a lo largo de la transmisión de un conjunto de paquetes, fundamentalmente debido a la llegada de nuevos paquetes para ser transmitidos, es posible que comuniquen dichos cambios al efectuar una transmisión, lo que

permitirá que se modifique el listado de necesidades de transmisión en la red de cara a la aplicación del algoritmo de gestión de recursos.

Así pues, el algoritmo de gestión de recursos, tanto en el enlace ascendente como en el descendente, se puede ejecutar en cada trama partiendo del conjunto de necesidades de transmisión para la siguiente trama de los diferentes usuarios, lo que se ha dado en llamar peticiones. Nótese que mediante la actualización apropiada de las diferentes peticiones a medida que sus requerimientos se van satisfaciendo se puede independizar la ejecución del algoritmo de gestión de recursos de una trama a la siguiente, lo que simplifica su diseño. En la Figura 5.9 se muestra la interrelación entre las diferentes fases del algoritmo de gestión de recursos: en una trama dada, a partir de los recursos disponibles y de las peticiones existentes, tanto de nuevos usuarios como peticiones antiguas, se efectúa en primer lugar una priorización según un cierto criterio y a partir de esta priorización se lleva a cabo el reparto o distribución de recursos, tras el cual los terminales pueden proceder a efectuar sus transmisiones. Entonces, de cara a la trama siguiente se actualizan las peticiones antiguas, tanto si han podido recibir algún tipo de servicio como si han sido postergadas, descontando los paquetes que hayan sido correctamente enviados y actualizando los diferentes temporizadores que pudieran existir. Así, en la trama siguiente el proceso se repetirá partiendo nuevamente de las peticiones existentes y de la tabla de recursos disponible actualizada según las posibles variaciones que hayan acontecido por las interferencias del sistema.

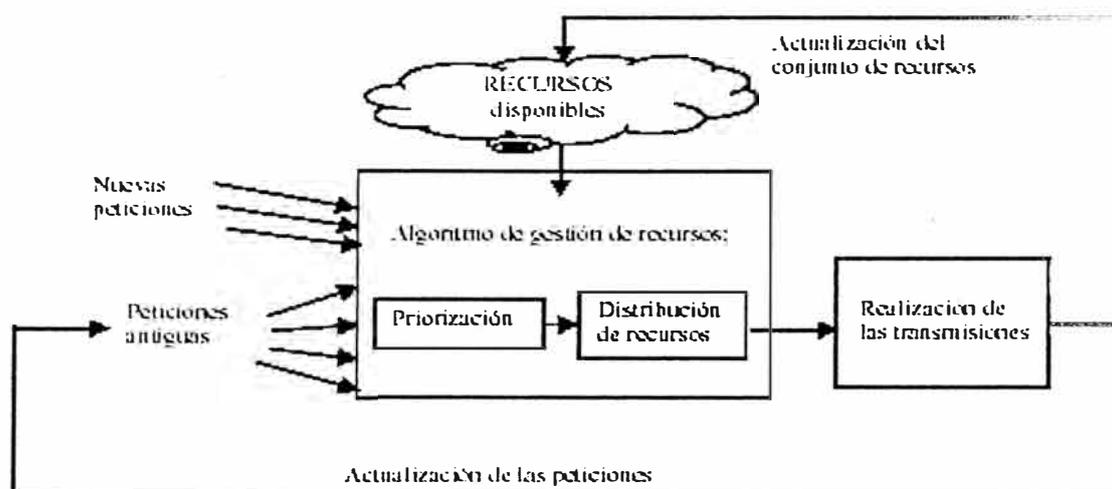


Figura 5.9: Procedimientos del algoritmo de gestión de recursos.

A modo de ejemplo, supóngase que en un momento dado existen en el sistema 3 peticiones, correspondientes a 3 usuarios. El usuario 1 requiere del envío de 1000 bits, el usuario 2 de 500 bits y el usuario 3 de 2000 bits. En función de algún cierto criterio a definir, como por ejemplo los requerimientos de retardo de cada una o el volumen de información a transmitir, las tres peticiones se priorizan y el algoritmo de gestión les asigna recursos para la siguiente trama. Así, se asume que a cada usuario se le permite transmitir 500 bits, que son correctamente enviados. Esto supondrá que de cara a la siguiente trama, al margen de nuevas peticiones que lleguen de otros usuarios, se deberán actualizar las peticiones de los usuarios 1 y 3 que pasarán a ser de 500 y 1500 bits respectivamente, mientras que la petición del usuario 2 ya se habrá completado y desaparecerá del conjunto de peticiones. Por otro lado, la actualización del conjunto de recursos disponibles se llevaría a cabo en función de las medidas de interferencia que pudieran realizarse, y que por ejemplo

podrían conducir a declarar una cierta ranura como no utilizable para alguno de los usuarios si se percibiera en ella una interferencia muy elevada.

## CONCLUSIONES

Bajo la perspectiva del actual crecimiento de los mercados asociados con la telefonía móvil y con las aplicaciones basadas en el acceso a Internet, que plantean como reto para los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación el poder ofrecer estos servicios bajo unos requerimientos específicos de calidad y utilizando eficientemente los recursos radio, las aportaciones del presente informe de suficiencia se han centrado en el estudio de sistemas de transmisión por paquetes basados en la técnica de acceso CDMA, bajo los modos de duplexado por división en frecuencia FDD y en tiempo TDD. El planteamiento realizado ha consistido en analizar las diferentes funcionalidades relacionadas con el nivel 2 de la estructura OSI, subdividido en los niveles MAC y LLC. En particular, con respecto al nivel MAC, se han identificado un conjunto de funcionalidades propias de la transmisión de paquetes con calidad de servicio, como son el protocolo de acceso múltiple, el algoritmo de gestión de recursos, el control de admisión y, en el modo TDD, también la estrategia de asignación de canales, puntos que han sido cubiertos a lo largo del presente informe según un eje vertebrador constituido por el protocolo de acceso ISMA. Así, a continuación se resumen las principales aportaciones del presente estudio.

1.- Con respecto de los protocolos de acceso, se ha desarrollado en primer lugar un modelo teórico para el estudio del protocolo de acceso múltiple ISMA bajo la técnica DS/CDMA, que gestiona el acceso de un conjunto de usuarios en modo paquete a

un cierto número de secuencias código. El modelo se ha diseñado a partir de diferenciar los procesos involucrados en el protocolo, tales como el acceso a por código, la transmisión, el reintento de acceso tras no lograr un código o las retransmisiones de paquetes afectados por la interferencia multiusuario una vez se ha logrado satisfactoriamente un código. Partiendo de este modelado, se han analizado diferentes parámetros de interés, llegando a las siguientes conclusiones:

**a)** El estudio de diferentes posibilidades en relación al número total de códigos disponible ha permitido la determinación de la existencia de un número óptimo de códigos por encima del cual no se consiguen mejoras significativas en el sistema. Esto es debido a que las prestaciones del protocolo mejoran al incrementarse el número de códigos únicamente en tanto que el sistema se encuentre limitado por las colisiones en el acceso a dichos códigos, pero una vez el número de códigos es tal que permite que el sistema se encuentre limitado por las interferencias propias de la técnica de acceso, no se obtienen beneficios por disponer de un número superior de códigos. Se ha observado como, para una ganancia de procesado dada, este número óptimo de códigos se encuentra alrededor del doble del máximo número de transmisiones correctas que se pueden alcanzar en un sistema ideal limitado únicamente por interferencias.

**b)** Del estudio de las probabilidades de re acceso  $p_r$  y de retransmisión  $p_b$ , se ha observado como resulta más conveniente su ajuste adaptativo en función de las condiciones de carga del sistema que el empleo de valores fijos, pues en general se pueden admitir probabilidades altas para valores de carga bajos que deben reducirse al incrementarse la carga. Esta variación adaptativa permite un buen comportamiento no sólo en términos de throughput sino también en relación al retardo.

2.- Vistas las posibilidades del protocolo ISMA-DS/CDMA se ha planteado su integración dentro de una estructura de tramas FDD teniendo en cuenta algunos aspectos prácticos no considerados por simplicidad en el modelado anterior como son la difusión eficiente del estado de ocupación de los códigos teniendo en cuenta el número de accesos correctos que se hayan producido en la última trama, la inhibición al inicio de la transmisión de aquellos usuarios cuyo acceso no fructifique, o bien la imposibilidad de disponer de reconocimientos instantáneos de los paquetes transmitidos.

3.- Partiendo del nuevo esquema ISMA-DS/CDMA FDD se han llevado a cabo una serie de optimizaciones teniendo en cuenta, en primer lugar, la adaptación de las probabilidades de acceso al sistema bajo diferentes funciones decrecientes con el número de códigos ocupado en cada instante a fin de mantener el nivel de interferencia global acotado lo que se traduce en una mayor eficiencia para los accesos y para las transmisiones. El protocolo ISMADS/CDMA FDD bajo este mecanismo de adaptación ha mostrado un THROUGHPUT máximo alrededor del 91% del máximo teórico que podría lograrse para un esquema ideal con ganancia de procesado fija.

4.- Siguiendo con los protocolos de acceso, ISMA también ha sido integrado en un contexto de transmisión TDD-TD/CDMA. Al compararlo a nivel de acceso con un protocolo como DSA++ integrado en TDD-TD/CDMA, las prestaciones han resultado mejores para ISMA requiriendo además el envío de un menor volumen de información a través del canal común.

5.- Siguiendo en la línea de garantizar calidad de servicio sobre transmisión de paquetes, se ha abordado el diseño de mecanismos de gestión de recursos operando en conjunción con el protocolo ISMA-DS/CDMA FDD con el algoritmo ThMS desarrollado. Así, se ha definido un esquema de priorización basado en el

máximo retardo tolerado por cada paquete y un procedimiento de regulación de las interferencias. Adicionalmente, y con objeto de reducir la aleatoriedad en el acceso propia del protocolo empleado, se ha complementado ISMADS/CDMA FDD con un mecanismo de sondeo que permite mantener acotado el retardo de acceso a la vez que conservar la propia flexibilidad del protocolo. Los aspectos a destacar de la operación conjunta de estos mecanismos son los siguientes:

a) El mecanismo de sondeo es especialmente adecuado para los usuarios con limitaciones muy estrictas en términos del máximo retardo tolerado. Por el contrario, a medida que el retardo tolerado por los usuarios es superior, el efecto de emplear el sistema de sondeo es menos significativo pues se permite al retardo de acceso tomar valores superiores, con lo que el algoritmo de gestión de recursos por sí solo resulta en la mayoría de los casos suficiente para garantizar el retardo máximo especificado.

b) El mecanismo propuesto se ha analizado bajo diferentes valores de parámetros relacionados con el sondeo, concluyendo que interesa que el período de sondeo sea lo más grande posible mientras esté por debajo del máximo retardo tolerado, pues así se minimiza el número de sondeos realizado conservando las prestaciones de retardo de acceso máximo.

c) Del estudio del sistema ante diferentes clases de servicio, se ha deducido que, gracias al mecanismo de prioridades, el esquema propuesto permite gestionar adecuadamente las transmisiones para mejorar la región de admisión global.

6.- Se ha analizado la influencia en general del mecanismo conjunto de gestión de recursos y sondeo respecto de un sistema que empleara únicamente el protocolo ISMA-DS/CDMA FDD con el algoritmo ThMS para diferentes valores del máximo retardo tolerado por las clases de servicio. Se ha llegado a la conclusión de que el esquema propuesto es especialmente útil cuando las restricciones de retardo son

muy estrictas, pues en este caso resulta imprescindible acotar el retardo de acceso y ordenar eficientemente las transmisiones. Por el contrario, cuando el máximo retardo tolerado crece, las diferencias entre utilizar el esquema propuesto o hacer uso únicamente del protocolo ISMA-DS/CDMA FDD con algoritmo ThMS se reducen, en parte gracias a la propia capacidad de este último para regular la interferencia global presente en el sistema.

7.- Teniendo en cuenta las peculiaridades del entorno de transmisión TDD-TD/CDMA se ha proseguido con el desarrollo de algoritmos de gestión de recursos en este entorno. El algoritmo de gestión de recursos y el protocolo de acceso múltiple han sido complementados con un mecanismo de sondeo similar al desarrollado en FDD. El efecto de este mecanismo, utilizado en combinación con ISMA-TD/CDMA y con un protocolo DSA++ con acceso a través del canal RACH, es el de igualar las prestaciones de acceso de ambos, provocando que el sistema esté finalmente limitado por el algoritmo de gestión de recursos. A estos efectos, se ha visto que DSA++ obtiene una mejora mayor que ISMA-TD/CDMA a través del mecanismo de sondeo, ya que sus prestaciones a nivel de acceso son peores.

8.- Siguiendo en el entorno TDD-TD/CDMA se han evaluado diferentes posibilidades de asignación de canales DCA para hacer frente a las interferencias MS a MS y BS a BS típicas de este tipo de entornos con coexistencia de celdas vecinas con diferentes estructuras asimétricas. Frente a esta problemática, se han estudiado varias posibilidades:

a) En primer lugar, se ha contemplado el uso de la información de avance temporal, recabada por ejemplo en el sistema UTRA TDD, para ubicar los terminales en las diferentes ranuras de modo que aquellos terminales más alejados de su estación base estén asignados a las ranuras menos afectadas por las interferencias MS a MS y BS a BS. Esta estrategia resulta apropiada en

condiciones de carga elevada con poca variabilidad en el tráfico ofrecido gracias a que reduce la interferencia BS a BS al requerir de la transmisión de menos potencia por parte de la base interferente en las ranuras conflictivas, y también reduce la interferencia MS a MS al garantizar que los terminales más alejados no están en dicha zona conflictiva por lo que ni reciben este tipo de interferencia ni tampoco la generan.

b) En segundo lugar se ha considerado una estrategia basada en la estimación de las pérdidas de propagación respecto de la estación base propia para asignar las ranuras, de tal forma que aquellos terminales con mejores condiciones de propagación se ubiquen en la zona conflictiva. Esta última estrategia presenta globalmente para cargas elevadas un mejor comportamiento que el mecanismo basado en avance temporal cuando se considera variabilidad en el tráfico de paquetes.

c) Por último, se ha analizado una distribución ordenada de terminales, repartiendo primero las ranuras más protegidas y ocupando la zona conflictiva de la estructura de tramas únicamente cuando es necesario. Esta estrategia resulta óptima en el caso de baja carga, evitando totalmente las interferencias MS a MS y BS a BS, aunque presenta algunas deficiencias de carácter práctico, relacionadas con una distribución no homogénea de las potencias entre las diferentes ranuras. Para cargas elevadas, esta distribución presenta peor comportamiento que los mecanismos basados en avance temporal o en niveles de potencia.

## ANEXO A: TERCERA GENERACIÓN EN EL PERÚ

### I. Marco Legal

El Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción del Perú, a través de la Unidad Especializada en Concesiones de Telecomunicaciones (UECT), tiene competencia sobre la política y los mecanismos de otorgamiento de concesiones, así como la asignación y el monitoreo del espectro radioeléctrico. Se busca promover la competencia, facilitar el desarrollo de nuevos servicios y tecnologías, promover la inversión y maximizar el uso eficiente del espectro radioeléctrico.

La política de acceso al mercado peruano utiliza mecanismos competitivos (subastas o concursos) para la asignación del espectro cuando la disponibilidad de frecuencias limita el número de operadores en un servicio y haya más demanda que oferta del espectro.

No existe limitación en cuanto al número de concesionarios, salvo en aquellos casos en que haya restricciones de espectro. Si no hay tal restricción se les otorgará la concesión a solicitud de parte. En general, cuando la prestación de los servicios involucra asignación del espectro, los operadores deben cumplir con metas de uso de las frecuencias razonables y justificadas ya que su uso restringe a otro operador potencial de ofrecer servicios usando ese espectro. Tales metas de uso son propuestas por cada operador y aprobadas conjuntamente con la asignación del espectro mediante Resolución Viceministerial, y se refieren a la forma cómo será utilizado el espectro en concordancia con el plan de expansión

respectivo. En la actualidad se encuentra en preparación la versión definitiva de la norma sobre las Metas de Uso de Espectro Radioeléctrico de Servicios Públicos de Telecomunicaciones.

El avance de la tecnología y la convergencia de servicios han hecho que los servicios tiendan a homogenizarse, desapareciendo las líneas divisorias entre estos, este es el caso de los servicios móviles. En este contexto, la tendencia a nivel mundial es que los servicios móviles compitan entre sí, sin embargo para que ello sea posible es necesario que estos servicios estén sujetos a las mismas normas de regulación.

En efecto, la necesidad de estaciones radioeléctricas, enlaces de radio entre las estaciones base y las centrales de conmutación del sistema móvil, incremento progresivo de cobertura, necesidad de evitar interferencias y radiación electromagnética excesiva, entre otros, hace necesario el contar con un reglamento común aplicable a todos los servicios públicos móviles.

Es conveniente señalar que los reglamentos específicos de los servicios móviles, como en el caso del Servicio Telefónico Móvil, del Teleservicio Móvil de Canales Múltiples de Selección Automática y del Servicio de Buscapersonas, han estado vigentes desde hace varios años atrás y actualmente ya no responden a la situación actual, debido a los avances tecnológicos en la industria de telecomunicaciones. Ello restringe el aprovechamiento del potencial que ofrece la tecnología actualmente, y los mayores beneficios que esta puede representar para los usuarios.

Asimismo, las restricciones que pudieran existir en la legislación puede ocasionar dificultades para que los operadores puedan ofrecer mayores facilidades tecnológicas a sus usuarios. La incertidumbre de la legislación o las diferencias en

la reglamentación entre servicios que compiten en el mismo mercado, podría inhibir la realización de inversiones en estos servicios.

A la fecha se ha venido elaborando un proyecto de reglamento para servicios móviles teniendo en cuenta los aportes de las empresas operadoras de éstos servicios. Próximamente se publicará el referido proyecto para posterior aprobación de la versión final correspondiente.

## **II. Introducción**

IMT-2000 (International Mobile Telecommunications–2000), previamente conocido como FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications Systems), es la visión de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para el acceso móvil global para el siglo XXI proporcionando servicios de voz y datos de alta velocidad, así como servicios multimedios. IMT-2000 es un avanzado concepto de comunicaciones móviles destinado a proporcionar servicios de telecomunicaciones a escala mundial, independientemente de la localización, de la red o del terminal de usuario. Debido a la evolución tecnológica, a estos sistemas se les conoce como Sistemas de Tercera Generación (3G).

En la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del año 1992 (CMR-92), se identificaron las bandas de 1885 - 2025 MHz y 2110 - 2200 MHz para IMT-2000<sup>2</sup>.

En la CMR-97 se reconocieron las necesidades de espectro adicional para IMT-2000, incluyendo este tema en el ítem 1.6 de la agenda para la próxima reunión CMR-2000.

En la CMR-2000, se identificaron adicionalmente las bandas 1 710-1 885 MHz y 2 500-2 690 MHz para ser utilizadas por las administraciones que deseen implementar las IMT-2000.

Con la identificación de las bandas para los sistemas móviles 3G por la CMR 2000 y las actividades del GT 8F del UIT-R y de los órganos de normas tecnológicas 3GPP y 3GPP2, se torna relevante que el Perú identifique planes de banda específicos para los sistemas 3G.

Además, la armonización mundial de uso de frecuencias por los sistemas 3G facilita la itinerancia global y economías de escala. El elemento clave en el éxito de los sistemas 3G es la habilidad del equipo terminal no sólo de permitir las comunicaciones a mayores velocidades que los actuales sistemas móviles, sino el ofrecimiento de múltiples servicios multimedia, con operación a nivel mundial sin ninguna limitación.

Muchas administraciones están procediendo a identificar los planes de espectro y bandas para IMT-2000 y sistemas futuros que mejor satisfagan sus necesidades nacionales. Países de la Región 2 como Canadá, Estados Unidos y Venezuela han iniciado el proceso de consultas con miras a adoptar planes de bandas armonizados este año o a comienzos del próximo, lo que dará lugar al otorgamiento de licencias en los próximos dos años.

Actualmente en el Perú, los servicios de telefonía móvil y PCS son prestados por tres operadores como muestra la siguiente tabla:

<b>EMPRESA</b>	<b>SERVICIO</b>	<b>COBERTURA</b>
Telefónica Móviles S.A.C.	Telefonía móvil	Nivel Nacional
Bellsouth Perú S.A.	Telefonía móvil	Nivel Nacional
TIM Perú S.A.C.	Servicio de Comunicaciones Personales	Nivel Nacional

La gran expansión del servicio de telefonía móvil se dio desde 1996, debido entre otros factores a la introducción del sistema "El que llama paga" y a la

reducción del costo de acceso, han hecho que a diciembre de 2000 existan 1'258,615 líneas de telefonía móvil en servicio a nivel nacional. En este número de líneas solamente están incluidas líneas de Telefónica Móviles y de Bellsouth Perú, debido a que TIM Perú empezó a operar a partir de abril del año 2001.

Asimismo, el ingreso del tercer operador que brinda el servicio de comunicaciones personales utilizando sistemas de comunicaciones personales (PCS) fue posible mediante la asignación de la banda "A" a nivel nacional. Dicha banda fue adjudicada mediante concurso público de ofertas en marzo de 2000 a STET MOBILE HOLDING N.V. del grupo Telecom Italia, otorgándosele la concesión a TIM PERÚ S.A.C., la cual ofreció US\$ 180 millones de dólares siendo el precio base de US\$ 47 millones de dólares.

### **III. El Espectro Radioeléctrico y el Reglamento de la Ley**

El espectro radioeléctrico es el medio por el cual pueden propagarse las ondas radioeléctricas sin guía artificial. Constituye un recurso natural limitado que forma parte del patrimonio de la nación.

El Perú, como toda América Latina, está ubicado en la Región 2 definida por la UIT, y al igual que muchos países de Latino América y Europa, han seguido las recomendaciones de la UIT-R (ex CCIR) para las atribuciones de las bandas a los diferentes servicios radioeléctricos fijos y móviles.

Corresponde al MTC la administración, la asignación y el control del espectro de frecuencias radioeléctricas y, en general, cuanto concierne al espectro radioeléctrico.

El uso del espectro radioeléctrico requiere de una concesión (servicios públicos) o autorización (servicios privados) expresa del servicio de

telecomunicación correspondiente, previo cumplimiento de los requisitos establecidos en el Reglamento.

La utilización del espectro radioeléctrico tiene un valor económico por derecho propio: como bien de comercio o mercancía. Por ello, como cualquier otra mercancía, se le asigna un valor comercial y las licencias para usar el espectro podrían ser vendidas a los operadores mediante concursos públicos.

El uso del espectro dará lugar al pago de un canon que deberán satisfacer los titulares de estaciones radioeléctricas. Es importante determinar con precisión el monto a pagar (canon) por el uso del espectro radioeléctrico, dependiendo de los servicios utilizados.

El canon anual que deben abonar los titulares de concesiones (uso público) o autorizaciones (uso privado) por concepto del uso del espectro radioeléctrico actualmente se calcula aplicando los porcentajes que se fijan sobre la Unidad Impositiva Tributaria (UIT) vigente al primero de enero del año en que corresponda efectuar el pago. Para el presente año una UIT está fijada en S/. 3000 (tres mil nuevos soles).

#### **IV. Situación de las Bandas identificadas para IMT-2000 en el Perú**

Luego de los resultados de la CMR-2000 con relación a las bandas que han sido identificadas para la implementación de IMT-2000, la Administración del Perú ha tomado algunas medidas con relación al tratamiento de éstas.

El Plan Nacional de Asignación de Frecuencias (PNAF), es el documento técnico normativo que contiene los cuadros de atribución de frecuencias a los servicios de telecomunicaciones, así como las normas técnicas generales para la utilización del espectro radioeléctrico.

El PNAF establece que las bandas comprendidas de 1710-1850 MHz, 1990-

2025 MHz, 2110-2200 MHz y 2500-2690 MHz (como muestra el siguiente cuadro), se mantienen en reserva. Mientras dure tal situación, el Ministerio no realizará nuevas asignaciones en alguna de estas bandas. Cuando cese la situación de reserva de estas bandas de frecuencias, el Ministerio asignará el espectro mediante concurso público de ofertas, excepto para casos como el servicio móvil por satélite y el servicio fijo y/o móvil utilizando estaciones en plataformas a gran altitud, es decir, los casos de sistemas globales reconocidos mediante acuerdos internacionales.

RESERVA		RESERVA		RESERVA		RESERVA
1710 2690	1850	1990	2025	2110	2200	2500

El mismo plan establece que el rango comprendido de 1850-1990 MHz (como muestra el cuadro) está destinado a los servicios públicos móviles y fijos que se prestan mediante Sistemas de Comunicaciones Personales (PCS) y aplicaciones de Acceso Inalámbrico Fijo (FWA). El otorgamiento de autorización para el uso de frecuencia para la explotación de PCS y aplicaciones FWA será por concurso público de ofertas.

1850	1865	1870	1885	1890	1895	1910	1930	1945	1950	1965	1970	1975	1990 MHz
A	D	B Reserva	E	F Reserva	C Reserva		A'	D'	B' Reserva	E'	F' Reserva	C' Reserva	

## V. Situación del Espectro Radioeléctrico para las comunicaciones móviles en el Perú

### Bandas atribuidas al servicio de Telefonía Móvil:

En el Perú no hay más disponibilidad de banda de frecuencias para el servicio de telefonía móvil.

Banda A: 824-835 MHz / 869-880 MHz y 845-846,5 MHz / 890-891,5 MHz, utilizada por la empresa TELEFÓNICA MÓVILES S.A.C.

Banda B: 835-845 MHz / 880-890 MHz y 846,5-849MHz / 891,5-894 MHz, utilizada por la empresa BELLSOUTH PERÚ S.A.

Nota: La Banda B' (846,5-849MHz / 891,5-894 MHz) fuera de la ciudad de Lima, está reservada para los servicios de telecomunicaciones en áreas rurales.

**Bandas atribuidas al Servicio de Comunicaciones Personales (PCS):**

Banda A: (A: 1850-1865 MHz, apareada con A': 1930-1945 MHz), explotadas por TIM PERÚ S.A.C.

Banda B y C en reserva.

**Bandas atribuidas para aplicaciones de Acceso Inalámbrico Fijo:**

Banda D: (D: 1865 – 1870 MHz, apareada con D': 1945 – 1950 MHz)

Banda E: ( E: 1885 – 1890 MHz, apareada con E': 1965 – 1970 MHz)

Banda de 1910 a 1930 MHz

Banda F: en Reserva

Nota: Cabe indicar que no existen asignaciones en estas bandas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] L. G. Alonso, J. Pérez Romero, R. Agustí, O. Sallent, "Técnicas de Transmisión por Paquetes alternativas a S-ALOHA basadas en CDMA para sistemas de comunicaciones móviles", Congreso Telecom I+D, Barcelona-Madrid, Noviembre, 2001.
- [2] "The Future Mobile Market. Global trends and developments with a focus on Western Europe", Report No.8 from the UMTS Forum. Octubre, 2000.
- [3] "Minimum Spectrum Demand per Public Terrestrial UMTS Operators in the initial phase", Report No.5 from the UMTS Forum. Diciembre, 1999
- [4] H. Holma, A. Toskala, : WCDMA for UMTS , John Wiley & Sons, England, Enero, 2000.
- [5] TR 101 146 v3.0.0 "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA); Concept Evaluation", UMTS 30.06 version 3.0.0. Abril, 2001.
- [6] J. Pérez, O. Sallent, R. Agustí, "Técnicas de ARQ en un esquema de acceso por paquetes DS-CDMA", Congreso URSI, Pamplona, Septiembre, 1999.

[7] J. Pérez-Romero, R. Agustí, O. Sallent, F. Casadevall, "Issues on Packet Transmission Strategies in a TDD-TD/CDMA scenario", IST Mobile Summit, Galway, Irlanda, Octubre, 2000

[8] L. G. Alonso, R. Agustí, O. Sallent, "A near-optimum MAC Protocol based on the Distributed Queueing Random Access Protocol (DQRAP) for a CDMA Mobile Communication System", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.18, No. 9, Septiembre, 2000.

[9] H. Holma, A. Toscali, WCDMA for UMTS, John Wiley & Sons, England, Julio, 2000.

[10] K. Parsa, "An Overview of Common Packet Channel (CPCH), an Optimum Wireless Internet Mechanism in 3GPP W-CDMA System and Comparison of Various UMTS Non Real Time Data Deployment Options", PIMRC Conference, Londres, Reino Unido, Septiembre, 2000.

[11] <http://www.3gpp.org> , <http://www.umts-forum.org>, <http://www.cellular.co.za>,  
<http://www.cdq.org>, <http://www.cdmaonline.com>, <http://www.cdma-america.com>,  
<http://www.totalcelular.com>, <http://www.ericson.com.mx>, <http://www.mtc.gob.pe>