

## **PARTE II: FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **6 COMUNICACIONES MÓVILES**

Dos de los principales motores de la Sociedad de la Información han sido, sin duda, Internet y las comunicaciones móviles. Dejando a un lado la evidente influencia de Internet en la Sociedad de la Información, el cambio que ha producido en el sector de las telecomunicaciones la introducción de la movilidad ha sido crítico, no sólo por la extensión de la posibilidad de la comunicación en cualquier momento y en cualquier lugar, sino por la propia personalización en la naturaleza de la comunicación entre individuos.

Sin embargo, la introducción de la movilidad e Internet en la vida cotidiana ha sido muy lenta, ya que pasaron varias décadas desde la concepción de ambas tecnologías y su desarrollo técnico hasta su incorporación conjunta como elemento constitutivo de la sociedad.

#### **6.1 GENERACIONES MÓVILES**

En la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles celulares se suelen considerar distintas generaciones. El paso de una a otra viene marcado por un salto significativo tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. Así, junto con el soporte de nuevos servicios, cada generación trae consigo mejoras de calidad y de seguridad. Al mismo tiempo, y mediante la adopción de avances técnicos en tecnologías radio y de conmutación, la transición va acompañada de mejoras de calidad y de eficiencia [4].

A continuación se describen las características básicas de las generaciones móviles definidas hasta la fecha.

- Sistemas de primera generación (analógicos). Surgidos a finales de los 70 y principios de los 80, prácticamente el único servicio que ofrecen es la telefonía básica. Dentro de estos sistemas destacan: NMT (Nordic Mobile Telephony), AMPS (Advanced Mobile Phone Service), TACS (Total Access Communication System) y sus variantes, o el sistema japonés propietario de NTT (Nippon Telegraph & Telephone). Esta primera generación presentaba escasas prestaciones y altos costes.
  
- Sistemas de segunda generación (digitales). Aparecen a principios de los 90 y se caracterizan por emplear transmisión digital en la interfaz radio, mejorando la calidad de las comunicaciones (por ejemplo, mediante técnicas de corrección de errores) y dotando de mayor capacidad a los sistemas. Además del servicio telefónico, se ofrecen otros como mensajes cortos y servicios portadores de datos modo circuito. Algunos de los principales sistemas 2G son: D-AMPS (Digital AMPS, sucesor digital de AMPS), cdmaOne (también conocido por la

norma de ANSI que lo describe: IS-95) y GSM (Global System for Mobile Communications), en sus tres bandas de operación (900/1800/1900 MHz). A pesar del éxito de los sistemas 2G, poseen algunas limitaciones, especialmente en lo relativo a servicios de datos (por ejemplo, GSM ofrece servicios de datos modo circuito hasta 9600 bit/s), pero sí logran economías de escala asociadas a la mayor capacidad proporcionada por la tecnología y la adopción de la misma por un gran número de operadoras en todo el mundo.

■ La primera solución adoptada para proporcionar mayores velocidades a los sistemas 2G, y al mismo tiempo aumentar la gama de servicios, fue introducir la conmutación de paquetes. Se han definido varias extensiones a los sistemas 2G, dando lugar a lo que se conoce como sistemas de generación 2,5. Entre dichas extensiones se encuentran: HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data), GPRS (General Packet Radio Service), y EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Dentro de estas extensiones, cabe destacar que GPRS utiliza esencialmente la misma interfaz aire que el GSM convencional, pero incluye una nueva capa de acceso al medio, MAC (Medium Access Control), y una nueva capa de control de radio, RLC (Radio Link Control). Con ello la transmisión de la información se puede realizar a distintas velocidades (9,6; 13,4; 15,6 y 21,4 kbit/s), dependiendo del tipo de codificación. La velocidad es adaptativa, de forma que puede optimizarse dependiendo de las características del canal.

■ Sistemas de tercera generación (multimedia). Aunque los sistemas de generación 2,5 suponen mejoras significativas respecto los sistemas 2G, resultan insuficientes para satisfacer la demanda creciente de mayores anchos de banda para el soporte de servicios avanzados, especialmente los servicios multimedia (audio, vídeo y datos). Para satisfacer dicha demanda es necesario un salto tecnológico importante, cuyo punto de partida es el empleo de una interfaz radio de mayor capacidad. La aparición de nuevas tecnologías (nuevas arquitecturas y dispositivos) y la consolidación de otras anteriores (por ejemplo las redes IP) ha facilitado la evolución natural desde la voz hacia los datos. Esto ha permitido la creación de medios más potentes y novedosos y de nuevos canales de relación entre personas o entre personas y sistemas. Los principales sistemas 3G son UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), y CDMA2000, encuadrados dentro del marco global de sistemas 3G promovido por la ITU-T.

■ Las siglas HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) ilustran la evolución de la tercera generación de telefonía móvil, conocida como 3.5G, la antesala de la cuarta generación (4G) y la que dará lugar a la tan ansiada convergencia de redes. HSDPA mejora significativamente la capacidad máxima de transferencia de información y puede alcanzar tasas de 14 Mbps, con tasas de 'throughput' (capacidad de datos celulares) cercanas a 1Mbps de media. HSDPA además, consigue esto, empleando la misma infraestructura y espectro radio que UMTS, por lo cual no requiere de inversiones significativas por parte de las operadoras para su puesta en marcha.

■ Sistemas de cuarta generación. La cuarta generación, con la que se alcanzarán velocidades de 100 Mbps o más, fue originalmente planificada para el año 2010. Sin embargo, son muchas las compañías que han movido este objetivo para años anteriores. Entre las principales novedades de la 4G están que las redes son por

completo de paquetes conmutados basadas en IPv6, que es posible el handover entre redes móviles y redes inalámbricas de área local y que se soportan mayores anchos de banda para proporcionar servicios multimedia a bajo coste.

En la figura 1-1 podemos ver una clasificación de los distintos sistemas de comunicaciones móviles en función de la generación a la que pertenecen.

	1G	2G	2,5G	3G
Europa	NMT, TACS	GSM900 & 1800, DECT	GPRS	UMTS (WCDMA), EDGE
Estados Unidos y Latinoamérica	AMPS	TDMA, cdmaOne, GSM850 & 1900	CDMA2000 1xRTT, GPRS	EDGE, CDMA2000 1xEV-DO
Japón	IMTS	PHS, cdmaOne, PDC	CDMA2000 1xRTT	FOMA, WCDMA, CDMA2000 1xEV-DO
China		GSM, cdmaOne	CDMA2000 1xRTT	TD-SCDMA

**Figura 1-1 Tecnologías que utilizan los sistemas móviles de las distintas generaciones**

## **6.2 LA MOVILIDAD EN LAS COMUNICACIONES**

La posibilidad de poder comunicarse en cualquier momento y desde cualquier lugar que se necesite o se desee, independientemente de que el usuario se encuentre en un lugar fijo o en movimiento, ha sido desde siempre uno de los principales objetivos de cualquier sistema de telecomunicaciones.

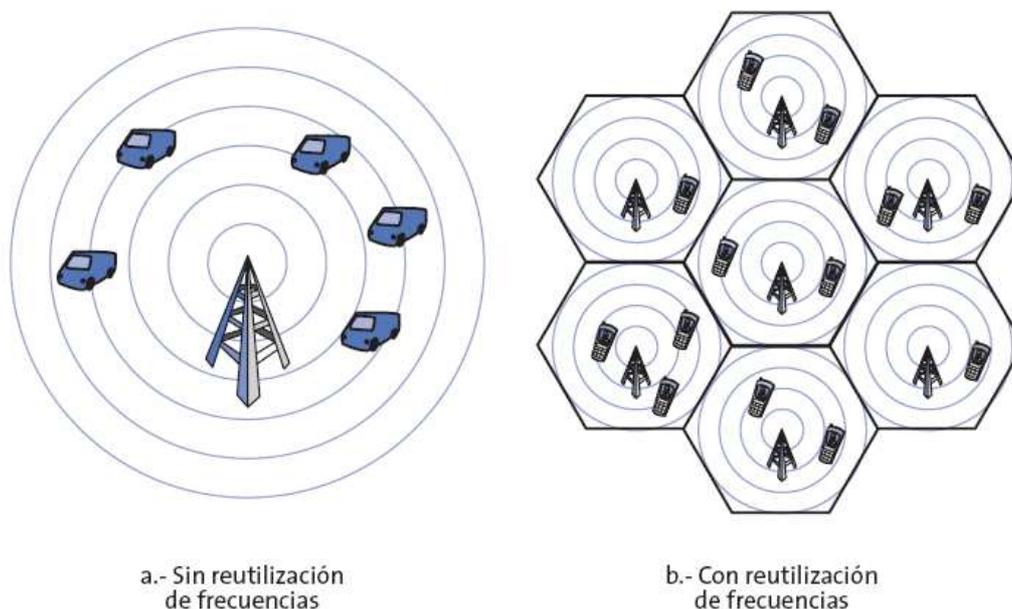
La movilidad en las telecomunicaciones ha estado asociada, fundamentalmente, a la utilización de la transmisión por radio en el acceso frente a la utilización de cables o fibra óptica [26]. La provisión de la movilidad, como se verá más adelante, implica el soporte a un conjunto de funcionalidades adicionales, que requieren de la red una cierta inteligencia, superior a la necesaria para soportar las comunicaciones fijas.

Sin el espectacular desarrollo de la microelectrónica, las comunicaciones móviles, tal y como las conocemos actualmente, no hubieran tenido la posibilidad de existir. Por ejemplo, para poder realizar todos los procesos de la interfaz radio de un terminal (modulación, demodulación, etc.) en tiempo real fue necesario recurrir en el año 1987 a un superordenador Cray de una universidad noruega. Cinco años más tarde, sin embargo, esos mismos algoritmos y procesos se implementaban en el

microprocesador de un terminal móvil. En este sentido, la especificación de GSM tuvo la virtud de proponer soluciones tecnológicas inviables en el momento de su publicación pero que los avances técnicos hicieron posible en el momento del despliegue de las redes. Del mismo modo, los progresos en microelectrónica han permitido la reducción en el tamaño de los terminales así como la incorporación de nuevos elementos a los mismos.

Pero si hay un hecho significativo en la historia de las comunicaciones móviles, este es el desarrollo del concepto de reutilización celular de las frecuencias. Dicho concepto lo propuso por primera vez en 1947 un ingeniero de los laboratorios Bell, Douglas H. Ring. Hasta entonces las transmisiones móviles se realizaban con la máxima potencia para proporcionar un área de cobertura lo más extensa posible. Sin embargo, el concepto de red celular proponía dividir el espectro disponible en varios canales, limitar la potencia de los transmisores y extender la cobertura instalando un número mayor de éstos. La clave reside en reutilizar la misma frecuencia en aquellos transmisores que estén lo suficientemente alejados entre sí para no interferirse. A la zona cubierta por un transmisor se le denominó célula.

La aplicación del concepto de red celular presenta varias ventajas (ver la Figura 1-2). Por un lado, aumenta la capacidad de las redes. Por otro, permite que los transmisores portátiles requieran una menor potencia, por lo que su coste, tamaño y peso se reduce. También complica la gestión de la movilidad, haciendo necesario el soporte al proceso de traspaso si se quiere mantener la conexión cuando el usuario se desplaza por la zona de cobertura entre las distintas células.



**Figura 1-2 Redes Móviles**

La principal dificultad que acarrearán desde el punto de vista técnico estas redes es la necesidad de planificar las frecuencias, labor que puede resultar muy compleja (desafortunadamente las áreas de cobertura de las células en escenarios reales no tienen el aspecto hexagonal que se utiliza en los análisis teóricos), pues si dos células que están

próximas entre sí utilizan las mismas frecuencias serán susceptibles de que se produzcan interferencias en recepción, tanto en los terminales como en la red. La planificación de frecuencias intenta, mediante la adecuada asignación de frecuencias a cada célula, minimizar estas interferencias.

Un desarrollo tecnológico que libera de la necesidad de realizar la planificación de frecuencias es la utilización de técnicas de espectro ensanchado para soportar el acceso múltiple en la interfaz radio. Esta aplicación del espectro ensanchado al acceso múltiple se denomina Code Division Multiple Access (CDMA, también conocido por su acrónimo en minúscula *cdma*). El fundamento teórico del espectro ensanchado fue formulado por Claude Shannon en la década de los cuarenta (aunque ya en 1924 Alfred Goldsmith había solicitado una patente para un sistema que, en esencia, aplicaba los conceptos de espectro ensanchado a la modulación en frecuencia, FM). Shannon estableció en su célebre teorema que era posible intercambiar, para una tasa binaria, ancho de banda y relación señal interferencia. Es decir, que era posible transmitir una determinada información con un nivel de señal muy próximo al de ruido, e incluso menor que éste, si se utilizaba un ancho de banda lo suficientemente elevado. La primera aplicación de esta tecnología se produjo en las comunicaciones militares, ya que era un medio eficaz para evitar las interferencias de banda estrecha. Es una anécdota muy conocida el hecho de que un tipo de técnica de espectro ensanchado, salto en frecuencia o *frequency hopping*, fue patentado por la actriz Hedy Lamarr, con la ayuda del compositor George Antheil, como un sistema para evitar la interceptación de las comunicaciones entre submarinos.

Las técnicas de espectro ensanchado se han utilizado y se utilizan en múltiples sistemas de comunicaciones. La primera aplicación comercial de este tipo de tecnología se realizó en 1980 y fue la utilización de la técnica de secuencia directa por Equatorial Communications en los transpondedores de sus satélites geoestacionarios. Actualmente, el GPS es el sistema de satélites más conocido que utiliza espectro ensanchado.

A finales de los años 80 varias compañías norteamericanas, como Milicom y Qualcomm, propusieron a la FCC la aplicación del espectro ensanchado al acceso múltiple en los sistemas móviles. El resultado, después de varios años de trabajo y experimentación, fue el estándar IS-95, publicado en 1993, siguiendo básicamente la propuesta de Qualcomm (que controla de una forma casi absoluta la evolución de este estándar). La primera red comercial la desplegó en 1995 Hutchison Telecom en Hong Kong, seguida al año siguiente por la que desplegó PrimeCo (posteriormente Verizon Wireless) en 14 ciudades de Estados Unidos.

El sistema de acceso múltiple CDMA es la base de los sistemas de tercera generación, como es el caso de UMTS y *cdma2000*, y de otro tipo de sistemas como las redes de área personal Bluetooth. Las redes WiFi 802.11b utilizan técnicas de espectro ensanchado para proteger la información y minimizar las interferencias, pero el acceso al medio se realiza en el dominio del tiempo (no son, por tanto, sistemas CDMA).

Se identifican tres funcionalidades básicas para el soporte de la movilidad (tal y como se proporciona en las redes móviles actuales):

1. La itinerancia (*roaming*), que permite a un usuario acceder a los servicios desde redes de distintos operadores o proveedores de servicios (siempre y

cuando existan acuerdos entre ellos). Es frecuente distinguir entre itinerancia nacional e internacional (en función de que las redes que ofrecen el servicio pertenezcan a operadores del mismo o de distintos países) e itinerancia entre redes que utilizan distintas tecnologías (lo que implica la utilización de terminales duales).

2. El traspaso (o handover), que es el proceso que permite el mantenimiento de la conexión cuando cambia el punto de acceso a la red debido al movimiento del terminal. Existen distintos tipos de traspasos en función de los criterios utilizados; por ejemplo, quién se encarga de controlar el proceso (¿el móvil o la red?), el proceso implica o no una ruptura de la conexión en algún instante de su ejecución (¿el traspaso es duro o suave?) o cuáles son los elementos de la jerarquía de red implicados en el proceso.

3. El soporte a la localización. Esta funcionalidad se divide, a su vez, en otras dos:

a. La funcionalidad de localización, que es el procedimiento que emplea la red para localizar el punto de acceso más adecuado para el establecimiento de la conexión cuando hay una llamada dirigida al terminal.

b. La funcionalidad de actualización de la localización, que es el procedimiento mediante el que la red se mantiene informada de cuál es la localización aproximada de los usuarios.

Asociados con estos dos procesos se definen unas agrupaciones de células denominadas áreas de localización, caracterizadas por un identificador único. La red transmite la identidad del área de localización a través de unos canales de señalización común, de manera que todos los terminales móviles que están encendidos escuchan periódicamente estos canales en la célula que les proporciona mejor cobertura y verifican si ésta corresponde a un área de localización distinta a la de la última verificación. Si es así, informan a la red de este cambio. La red almacena este dato en una base de datos asociada al usuario, empleándolo para redirigir hacia el área de localización correspondiente las llamadas dirigidas a dicho usuario. Por su parte la red radio informa de la llamada entrante al móvil a través de un canal de mensajería (paging), que se transmite en todas las células del área de localización.

## **7 EL SISTEMA UMTS**

### **7.1 INTRODUCCIÓN**

El Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) es el nombre que recibe en Europa el sistema de comunicaciones móviles que va a permitir que este tipo de comunicaciones lleguen a un número muy elevado de usuarios [5]. Los clientes del sistema UMTS van a tener acceso a un conjunto de servicios en su versión más evolucionada, con acceso a la red Internet y con facilidades multimedia.

Diversos organismos de estandarización, coordinados por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), han estado trabajando desde finales de la década de los 80 en la especificación de un conjunto de sistemas que permitan satisfacer las necesidades actuales y futuras del mercado de las telecomunicaciones móviles. El resultado definitivo de este trabajo es la tercera generación de sistemas de comunicaciones móviles.

Inicialmente la intención de la UIT era definir un sistema global que reuniera unas características concretas, que mencionaremos más adelante. Sin embargo, debido a la imposibilidad de llegar a un consenso en la definición de la tecnología que sustentase tal sistema, el objetivo inicial tuvo que ser sustituido por la meta de lograr una familia de sistemas distintos con características comunes. La familia de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación se conoce con el nombre de IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000) [3].

La ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) marca que los sistemas IMT-2000 deben cumplir los siguientes requisitos [10]:

- Comunicaciones desde cualquier sitio y en cualquier instante: implica la necesidad de una cobertura global que proporcione unos servicios mínimos básicos bajo cualquier condición, en terminales de cómoda portabilidad.

- Sistema Global: para asegurar la compatibilidad a nivel mundial se requiere un estándar global con un diseño común aunque se implementen diferentes sistemas y tipos de terminales. Una consecuencia directa es el uso de una banda de frecuencias común a nivel mundial. Gracias a esta globalización del sistema se conseguirá una reducción de los costes.

- Conjunto amplio de servicios: la tecnología de nueva generación debe ir acompañada de una nueva generación de servicios, fundamentalmente servicios multimedia, Internet, etc. Se requiere un canal que llegue a los 2 Mbps y que permita tasas variables y múltiples conexiones simultáneas.

- Infraestructura de red única: toda la infraestructura de telecomunicaciones necesaria debe estar integrada en una única red y esta infraestructura debe ser común a todos los usuarios e independiente del tipo de servicio que se solicite. Se busca evitar en los operadores la coexistencia de múltiples redes para distintos servicios, dificultando la integración de los sistemas de telecomunicaciones existentes de manera global.

- Integración de las redes de conmutación de las redes móviles y fijas: se sigue el mismo principio que en el anterior requerimiento: la unificación de las infraestructuras de comunicaciones. Es un requisito que las redes móviles y fijas lo compartan todo y se diferencien solo en lo imprescindible: en la red de acceso y en las funciones para la gestión de la movilidad. Todas las redes deben compartir la parte de conmutación y transporte, de esa forma se evitan las duplicaciones, resulta un sistema más flexible y versátil y se facilita la prestación de servicios propios de la red fija a través de la red móvil.

- Evolución y migración: el sistema se basa en una arquitectura flexible, abierta y modular que permitirá la integración de los avances tecnológicos y de diferentes

servicios y aplicaciones. Además tiene la capacidad de coexistir y trabajar conjuntamente con los sistemas anteriores al IMT-2000 existentes, tanto móviles (GSM, GPRS,...) como fijos (RDSI, RDSI-BA,...).

- Utilización de tecnologías de transporte de banda ancha (ATM): una de las tendencias más fuertes de la investigación actual es utilizar técnicas de banda ancha con ATM en lugar de seguir utilizando las técnicas de banda estrecha utilizadas hasta ahora en los sistemas móviles. La utilización de este tipo de transporte permitiría una integración más completa entre la red fija y la red móvil.

- Cobertura para regiones subdesarrolladas: los sistemas inalámbricos permiten una cobertura global (acceso por satélite) que se puede aprovechar en los países subdesarrollados para cubrir el vacío de comunicaciones existente en la actualidad con un coste mínimo. En algunos casos se puede utilizar una cobertura terrestre (macrocélulas) para proveer acceso fijo a multitud de pequeños núcleos ahora aislados, permitiendo a los operadores proveer servicios de una manera rápida, flexible y poco costosa.

- Terminales autoadaptativos y programables: resulta evidente en los sistemas móviles que, así como la infraestructura del operador se puede ir revisando, corrigiendo y mejorando, actualmente resulta imposible llevar a cabo las mismas mejoras en los nuevos terminales móviles en funcionamiento. Por eso la ITU especifica que los nuevos terminales tienen que ser capaces de ser reprogramables a través de 'updates' de software desde la red (para corregir errores o introducir mejoras).

- Entorno virtual propio: cada usuario tiene su propio perfil donde se incluyen todos los servicios que tiene contratados, este entorno propio se tiene que mantener, independientemente de su localización, excepto en el caso de que el único acceso disponible en aquella ubicación tenga unas prestaciones insuficientes para prestar dicho servicio (Ejemplo: el servicio de videoconferencia proporcionado por un entorno picocelular no podrá ser ofrecido en un lugar donde la única cobertura disponible sea la de la red de satélites).

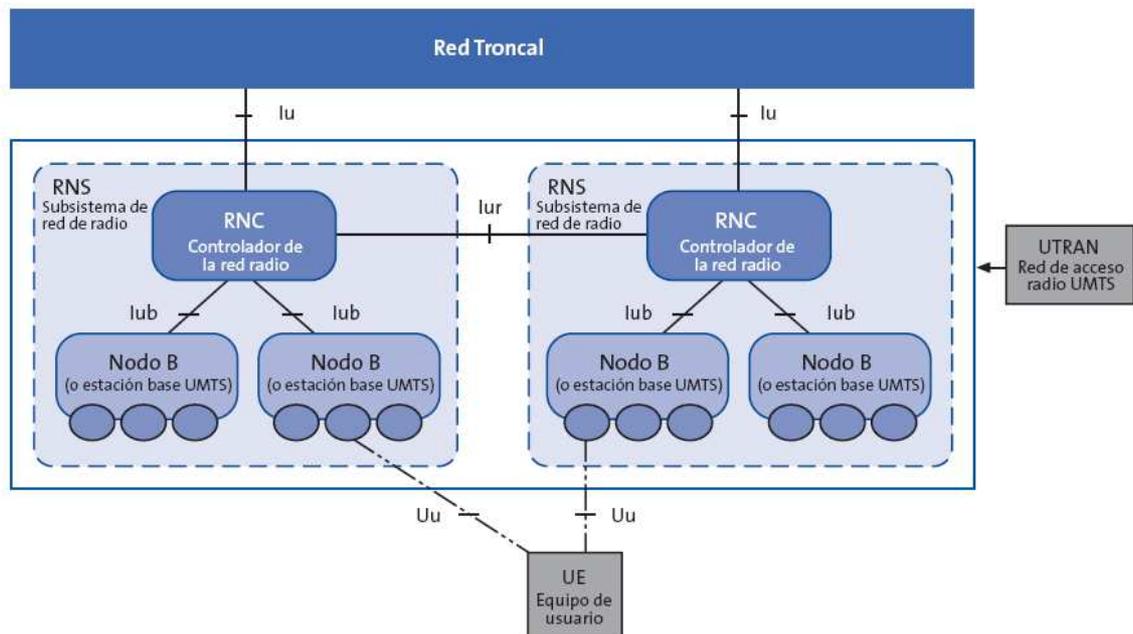
## **7.2 ARQUITECTURA DE RED**

Las redes UMTS se componen en realidad de dos grandes subredes: la red de Telecomunicaciones y la red de gestión. La primera se encarga de proporcionar la conexión extremo a extremo (con todo lo que ello implica); la segunda realiza la provisión de medios para la facturación y tarificación de los abonados, así como el registro y la definición de los perfiles de servicio, la seguridad y la operación de los elementos de red. Por sencillez, en adelante se hablará de "red UMTS" para designar la red de telecomunicaciones del sistema [26].

La arquitectura de una red UMTS está compuesta por tres partes fundamentales (ver la Figura 2-2):

- El núcleo de red (CN, Core Network).
- La red de acceso radio

- Los equipos de usuario (UE, User Equipment).



**Figura 2-2 Arquitectura general de UMTS**

Los equipos de usuario acceden a través de la interfaz radio (Uu), basada en UMTS en tecnología WCDMA. El modelo que describimos aquí asume el empleo de la interfaz radio terrestre (UTRA, UMTS Terrestrial Radio Access), basada en el despliegue de estaciones base terrenas. Bajo esta modalidad (en UMTS se prevén otras modalidades de acceso, incluido el vía satélite, USRAN, UMTS Satellite Radio Access Network), la red de acceso recibe la denominación de UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network).

En el núcleo de red, CN, se encuentran los recursos de conmutación y transmisión necesarios para completar el trayecto de la comunicación hacia el abonado remoto, que puede pertenecer a la misma red UMTS o a una red externa (otras redes telefónicas, Internet, etc.). El CN contiene también funciones relativas a la gestión de los abonados: identidades, claves de autenticación, parámetros de suscripción, etc.

La red de acceso UTRAN se encarga de transportar el tráfico de usuario (voz, datos, señalización móvil-red) hasta el núcleo de red, con el que se comunica a través de la interfaz Iu. Al tratarse de un sistema de comunicaciones móviles, el usuario no dispone de recursos de transmisión asignados de manera estática en la UTRAN. En consecuencia, ésta se encarga también de gestionar la asignación dinámica de dichos recursos cada vez que el móvil utiliza la red.

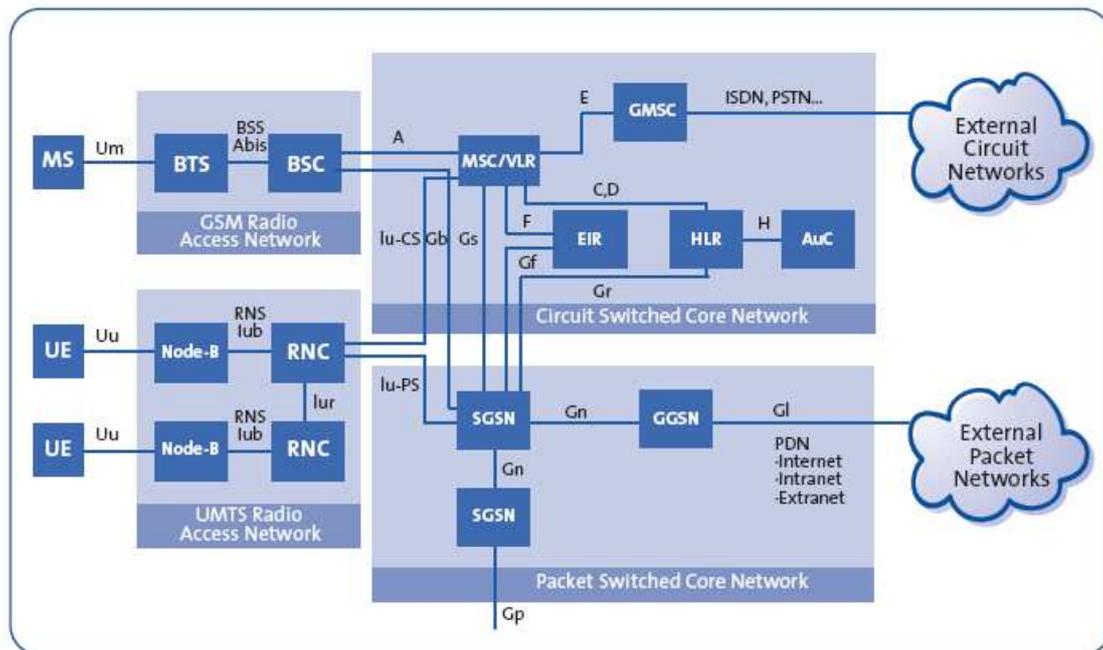
El equipo de usuario, UE, está constituido por dos elementos, el módulo de identidad de abonado UMTS, USIM (UMTS Subscriber Identity Module) y el equipo móvil, ME (Mobile Equipment). La USIM es una tarjeta inteligente que identifica al usuario de una red UMTS, con independencia del equipo móvil (el terminal) en el que se halle insertada en un momento dado.

### 7.2.1 NÚCLEO DE RED

El núcleo de red incorpora funciones de transporte (de la información de tráfico y señalización, incluida la conmutación) y de inteligencia (aquí se incluye el encaminamiento, además de la lógica y el control de ciertos servicios, y la gestión de la movilidad).

En UMTS se ha buscado definir un núcleo de red universal, que pueda gestionar distintos tipos de red de acceso radio y conectarse a distintos tipos de redes fijas. En una primera fase se parte de la red troncal GSM, con lo que se busca minimizar costes y facilitar la evolución.

Como ocurría en GSM/GPRS, en la primera fase de UMTS el núcleo de red se ha dividido en dos dominios: el de conmutación de circuitos (Circuit Switch, CS) y el de conmutación de paquetes (Packet Switch, PS). A través del modo CS se encaminarían los tráficos de voz y datos en modo circuito, y el modo PS haría lo propio con el tráfico de datos en modo paquete. Los elementos funcionales comunes a los dos dominios (ver la Figura 2-3) son:



GSM Radio Access Network: Red de acceso radio GSM  
 UMTS Radio Access Network: Red de acceso radio UMTS  
 Circuit Switched Core Network: Red troncal (conmutación de circuitos)  
 Packet Switched Core Network: Red troncal (conmutación de paquetes)  
 External Circuit Networks: Redes externas (por conmutación de circuitos)  
 External Packet Networks: Redes externas (por conmutación de paquetes)

**Figura 2-3 Elementos funcionales de la red troncal**

- HLR (Home Location Register). Esta entidad funcional es una base de datos encargada de la organización y gestión de los usuarios de la red móvil. Una red UMTS deber tener al menos un HLR, aunque pueden coexistir varios, dependiendo del número de usuarios o de la organización del sistema. Esta base de datos contiene informaciones tales como las relativas a los servicios contratados, la restricción de servicios (por ejemplo, limitaciones en la itinerancia), los servicios suplementarios (información

acerca del estado de la llamada en curso y del número llamado), la localización del usuario (área de VLR), etc. Esta información, relacionada con cada usuario queda registrada mediante varios tipos de identificación: IMSI (International Mobile Station Identity), número que identifica unívoca y universalmente a un abonado móvil; MSISDN (Mobile Station International ISDN Number), número que permite a los abonados móviles conectar con un usuario determinado; MSCN y VLRN, números de localización; datos específicos para GPRS, como el SGSN Number, destinado al enrutamiento de la información hacia el terminal; datos específicos para LCS (LoCation Services), como el LMU (Location Measurement Unit); etc...

■ VLR (Visitor Location Register). Es el registro en el que una red UMTS almacena datos temporales sobre los terminales móviles, que se encuentran momentáneamente en el área controlada por una MSC concreta. Cuando uno de estos terminales entra en una nueva área de localización comienza un procedimiento de registro, mediante el cual la MSC a cargo de dicha área toma nota del evento, y comunica a su VLR la identidad del área de localización en la que se encuentra el móvil. Si el móvil no estaba ya registrado en el VLR, éste y el HLR se intercambian la información necesaria para permitir gestionar los servicios que solicite dicho móvil.

■ AuC (Authentication Center). Es la entidad que almacena los datos necesarios para la identificación de los usuarios y el cifrado de la información. Está asociado al HLR y únicamente tiene conexiones directas con este bloque, a través del interfaz H. El AuC utiliza el IMSI de los abonados para que éstos sean autenticados, asignando una clave a cada uno de ellos, y para que se cifren las comunicaciones, en la parte radio, entre el terminal móvil y la red. Además, realiza las funciones de seguridad y tarificación para las comunicaciones en modo paquete.

■ EIR (Equipment Identity Register). Es la entidad lógica responsable del almacenamiento en la red de los IMEIs (Internacional Mobile Equipment Identities, o identidades de los equipos terminales). Los equipos se asignan a una lista blanca, gris o negra, atendiendo a su situación como tales equipos. Es decir, que puedan operar sin restricciones en la red, que deban ser objeto de cierto seguimiento o que tengan prohibido el servicio, respectivamente.

■ SMS-GMSC (Short Messages Services Gateway MSC). Actúa como una interfaz entre el centro de servicios de mensajes cortos, SMSC, y la PLMN (Public Land Mobile Network), para permitir que los mensajes cortos se entreguen a los terminales móviles desde el centro de servicios. Debe existir como mínimo un SMS-GMSC, siendo decisión del operador que todas o algunas de las MSC dispongan de esta función de central frontera.

■ SMS Interworking MSC (Short Messages Services Interworking MSC). Actúa como una interfaz entre las MSC y el centro de servicios de mensajes cortos, para permitir que los mensajes cortos se envíen desde los terminales móviles al centro de servicios. Al igual que el SMS-GMSC, debe existir como mínimo un SMS-IMSC, pudiendo implementarse la función en todos los MSCs de la red.

Los elementos particulares del dominio CS son:

- U-MSC (UMTS Mobile-services Switching Centre), que constituye la interfaz entre el sistema móvil y las redes fijas. Realiza todas las funciones necesarias para manejar los servicios de conmutación de circuitos desde y hacia los terminales móviles. Las U-MSC realizan todas las funciones de señalización y conmutación relativas a los móviles situados en un área geográfica designada como área de MSC (MSC Area). La principal diferencia entre una U-MSC y una central de conmutación clásica de una red telefónica fija es que la U-MSC debe tener en cuenta el impacto de la asignación de recursos de radio y la naturaleza móvil de los terminales. Ello supone que debe realizar los procedimientos de registro de localización y de traspaso.

- U-GMSC (UMTS Gateway MSC). Cuando una red, al entregar una llamada a la PLMN (Public Land Mobile Network), no puede interrogar al HLR, la encamina hacia una U-GMSC, que es la que se encarga de interrogar al HLR correspondiente, y de dirigir, posteriormente, dicha llamada a la MSC de la que depende el móvil en cuestión. Debe existir como mínimo un GMSC, aunque puede habilitarse la funcionalidad en todos los MSC de la red. En general, la única diferencia entre un MSC y un GMSC es que el GMSC solamente se encarga de tareas de encaminamiento por lo que no se comunica con ningún elemento del subsistema de acceso radio.

- IWF (InterWorking Function). Es una entidad funcional asociada a la U-MSC. El IWF proporciona la funcionalidad necesaria para permitir el interfuncionamiento entre una red UMTS y otras redes fijas (ISDN, PSTN y PDNs). Sus funciones dependen de los servicios y el tipo de la red fija. Incluso puede llegar a no tener función alguna cuando ambas redes sean compatibles.

Por último, los elementos específicos del dominio PS son:

- U-SGSN (UMTS Serving GPRS Support Node), que es el nodo servidor de las comunicaciones en modo paquete. Debe existir como mínimo un SGSN, aunque lo habitual es partir la zona de cobertura y dedicar un SGSN a cada una de las divisiones. Es equivalente al MSC en el dominio PS y proporciona la funcionalidad de transferencia y encaminamiento de los paquetes a todos los abonados al servicio UMTS de una zona determinada, conocida como Área de Servicio SGSN. Otras funciones son el cifrado de datos y autenticación de usuarios, gestión de conexiones y movilidad, control de enlace con los terminales y toma de datos de tarificación. Internamente mantiene una base de datos con información relativa a los usuarios. Entre otros almacena el tipo de suscripción al servicio UMTS, el IMSI, las identidades temporales y direcciones PDP. También mantiene los datos de localización del terminal móvil, el VLR asociado y las direcciones de los GGSN con los que el usuario mantiene comunicación.

- U-GGSN (UMTS Gateway GPRS Support Node), que es el nodo frontera de las comunicaciones en modo paquete. Almacena dos tipos de información (necesaria para manejar las llamadas de datos originadas y terminadas en el terminal): la identidad del terminal (IMSI y cero o más contextos PDP) y la información de localización (la dirección del nodo U-SGSN en el que el terminal está registrado).

Adicionalmente, para realizar el soporte de los servicios multimedia IP, se considera la inclusión de nuevos elementos de red, como son:

- **BG (Border Gateway).** Es una pasarela entre una PLMN que soporta GPRS y una red de conexión entre PLMNS, utilizada para interconectar con otras PLMN que también soportan GPRS. El papel de la BG es aportar el nivel de seguridad apropiado para proteger a la PLMN y a sus terminales.

- **SIP y H.323.** Son dos servidores que gestionan el control del servicio de voz sobre IP, así como los servicios multimedia.

De todos los elementos nombrados destacar que desde la Release 4 de la especificación de UMTS se permite que tanto el U-MSC como el GMSC se implementen en dos entidades diferentes que lo sustituyen realizando todas sus funciones. Las dos entidades en las que se implementa el U-MSC son: el MSC Server y el Circuit Switched Media Gateway (CS-MGW). Y el GMSC se implementa en: el GMSC Server y el IWF (Interworking Function). Pasamos a describirlas a continuación:

- **MSC Server.** Se encarga de realizar todas las funciones relacionadas con la señalización entre los terminales y la red. Básicamente está formado por los sistemas de control de llamadas y control de movilidad del MSC. El MSC Server es responsable del control de establecimiento y terminación de las llamadas en el dominio de conmutación de circuitos. También mantiene el control del estado de la conexión durante el transcurso de llamada. Además contiene internamente un VLR que incluye las funciones y datos de servicio de los subscriptores móviles.

- **Circuit Switched Media Gateway (CS-MGW).** Como complemento al bloque anterior, la entidad Circuit Switched Media Gateway se encarga de las funciones relacionadas con el envío y recepción de los datos de usuario. El CS-MGW es el bloque de la red troncal que proporciona la conexión con la red de acceso, a través de la interfaz Iu.

- **GMSC Server.** El Gateway MSC Server realiza todas las funciones relacionadas con el control de la comunicación, así como la gestión de información de movilidad de los terminales. Esencialmente abarca todas las características de un GMSC relacionadas con la señalización.

- **Interworking Function (IWF).** Como se indicó anteriormente, permite la interconexión de la red móvil con otras redes externas, sean fijas o móviles, proporcionando las funcionalidades necesarias para la conversión de los diversos protocolos empleados. Si se ha de realizar el cambio, la conversión que realiza el IWF se hace de forma transparente, sea cual sea el tipo de datos que se transportan.

Tanto el MSC Server como el MGW interactúan entre ellos y con otros diversos bloques para controlar y establecer los recursos radio a utilizar. La utilización conjunta del MSC Server y MGW emula por completo al bloque MSC, permitiendo, al igual que el GMSC Server y el IWF, a las nuevas revisiones de UMTS mantener una total independencia entre la capa de señalización y la capa de transmisión de datos.

La estrategia adoptada de dividir la red troncal en los dos dominios de conmutación descritos tiene la ventaja de que facilita al máximo la migración hacia las redes 3G a partir de las 2G, como ya se ha comentado anteriormente. Sin embargo, constituye a la vez un freno para el soporte de servicios más avanzados. Por ello, ya desde los comienzos del sistema se planteó la necesidad de evolucionar hacia conceptos más modernos y versátiles, asegurando, eso sí, la coexistencia e interoperabilidad de las redes 2G y 3G.

### **7.2.2 RED DE ACCESO RADIO**

La red de acceso radio proporciona la conexión entre los terminales móviles y el núcleo de red. En UMTS la red de acceso radio se denomina UTRAN, y se compone de un conjunto de sistemas de red radio o RNS (Radio Network System), constituidos a su vez por un controlador radio RNC (Radio Network Controller) y una serie de Nodos B (estaciones base) dependientes de él. El RNC se encarga de controlar a uno o varios Nodos B bajo su cargo. Los elementos funcionales (ver figura 2-3) que constituyen la UTRAN se comunican entre sí a través de:

- La interfaz entre el núcleo de red y el RNC: Iu
- La interfaz entre dos RNCs: Iur
- La interfaz entre un RNC y un Nodo B: Iub
- La interfaz radio o aire (entre un Nodo B y un terminal móvil): U<sub>u</sub>

En los apartados siguientes se hace una exposición general de todas las interfaces, con especial énfasis en la interfaz radio.

#### **7.2.2.1 Interfaz radio (U<sub>u</sub>)**

Si en el núcleo de red el sistema UMTS ofrece un enfoque evolutivo, tratando de construir las redes 3G sobre lo ya existente en la 2G, la situación en el tramo radioeléctrico presenta un enfoque revolucionario.

Desde la perspectiva europea, se ha optado por una ruptura prácticamente total con lo que había antes. Se ha recurrido a una técnica de acceso múltiple, como es DS-CDMA (Direct Sequence-Code Division Multiple Access), diferente de TDMA (Time Division Multiple Access), empleada en la mayoría de los sistemas de 2G.

##### **7.2.2.1.1 Técnica de acceso DS-CDMA**

En un sistema de comunicaciones móviles el medio de transmisión radioeléctrico es común a todos los usuarios. Las técnicas de acceso múltiple tienen como objetivo regular el acceso a los usuarios a dicho medio manteniendo una calidad adecuada en sus comunicaciones. Las principales técnicas de acceso múltiple empleadas en los sistemas de comunicaciones móviles son FDMA (Frequency Division Multiple Access), TDMA (Time Division Multiple Access) y CDMA (Code Division Multiple

Access). En la figura 2-4 podemos ver un gráfico comparativo de estas técnicas de acceso múltiple.

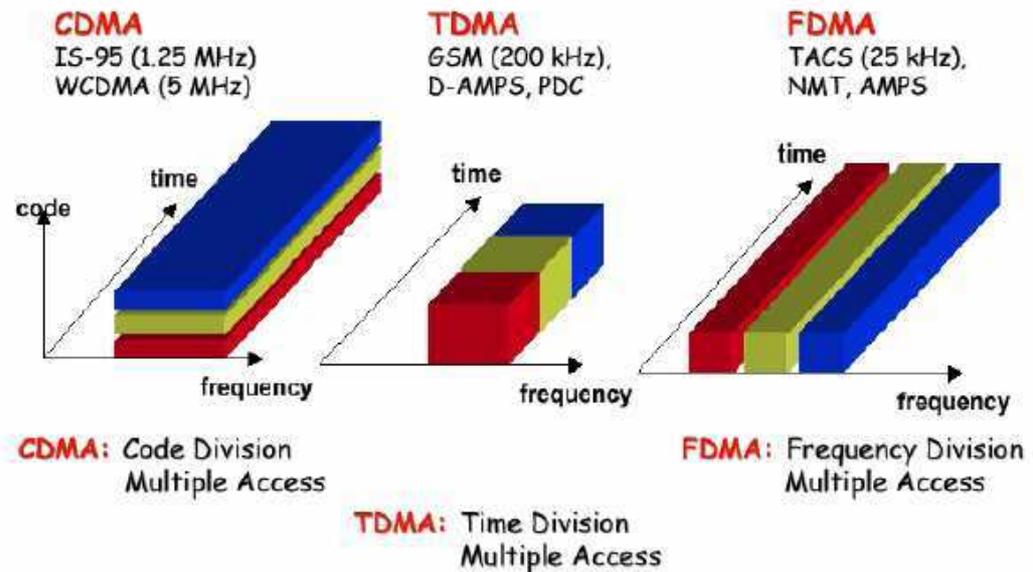


Figura 2-4: Comparación entre CDMA, TDMA y FDMA.

En el acceso múltiple por división en frecuencia, FDMA, la banda de frecuencias disponible se divide en varios canales no solapados. A cada usuario se le asigna un canal de frecuencias único y exclusivo durante el período de tiempo que dura la comunicación. Con este método vemos que se abusa de un recurso limitado y escaso, como es el espectro radioeléctrico.

En el acceso múltiple por división en tiempo, TDMA, a cada uno de los usuarios que comparten el mismo espectro de frecuencia, se les permite acceder al medio en intervalos de tiempo distintos. Cada usuario utiliza todo el ancho de banda disponible durante el tiempo que tiene asignado.

El acceso múltiple por división en código (CDMA) es una tecnología de acceso múltiple, en la cual los usuarios se distinguen entre sí por unas secuencias de código únicas para cada uno de ellos, lo que significa que todos los usuarios pueden transmitir al mismo tiempo utilizando la misma frecuencia portadora [3], [4], [5].

En CDMA, señales de usuarios diferentes comparten la misma banda de frecuencias y además se superponen temporalmente. Esto permite una reutilización universal de la banda de servicio, y es esta una de las características fundamentales del CDMA. Revoluciona los sistemas de comunicación móviles gracias a las siguientes características:

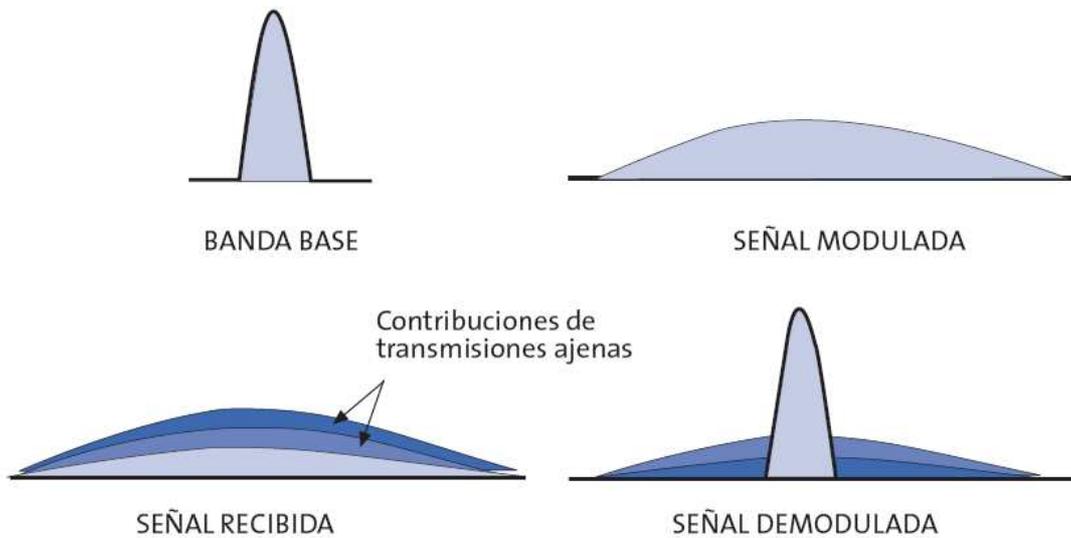
- Aumenta la capacidad de tráfico.
- Mejora la calidad de la voz y reduce los efectos del desvanecimiento multitrayecto.

- Reduce la incidencia de las interrupciones de llamada debidas a fallos en el handover.
- Garantiza un mecanismo fiable de transporte para comunicaciones de datos.
- Reduce el número de estaciones base necesarias para mantener un tráfico determinado.
- Reduce los costes de desarrollo y puesta en marcha, dado que son necesarias menos estaciones base.
- Reduce la potencia media transmitida.
- Reduce la interferencia hacia otros componentes electrónicos.
- Reduce los riesgos potenciales para la salud.
- Ofrece una banda grande, adecuada para las transmisiones multimedia.

Gracias a esta serie de ventajas, el CDMA ha sido elegido como técnica de acceso para UMTS.

DS-CDMA va un paso más allá en la tecnología CDMA. Se trata de una solución perteneciente a un grupo más extenso de técnicas, conocidas como de espectro ensanchado. Todas ellas generan, a partir de la señal en banda base, una señal moduladora de un ancho de banda mucho mayor que el de la señal en banda base, empleando un código de expansión espectral que permite la separación entre diferentes comunicaciones que comparten una misma portadora. Esta operación ofrece una importante ventaja, como es la mejora de la inmunidad frente a desvanecimientos selectivos en frecuencia.

En el caso de la técnica DS-CDMA, el ensanchamiento se consigue multiplicando la señal digital en banda base por una secuencia conocida por los dos extremos en la comunicación. Dicha secuencia posee una velocidad mucho mayor que la de banda base. El producto modula a una portadora, con lo que se consigue una señal modulada cuyo ancho de banda es sustancialmente mayor que el ancho de banda original. En recepción se multiplica la señal desmodulada por la misma secuencia, lo que permite la recuperación de la señal de banda base. Esta operación restaura el ancho de banda de la señal útil en recepción, pero en cambio ensancha la de cualquier señal interferente de banda estrecha que pudiera recibirse, reduciendo la cantidad de energía de ésta que interfiere con la señal útil (ver la Figura 2-5).



**Figura 2-5 Concepto de la técnica DS-CDMA**

Por tanto, para el acceso múltiple se separan cada uno de los canales con códigos ortogonales entre sí, de forma que conocidos esos códigos es posible recuperar la señal original. Para adaptar la señal original al canal se utilizan dos tipos de códigos: los códigos de canalización y los de scrambling.

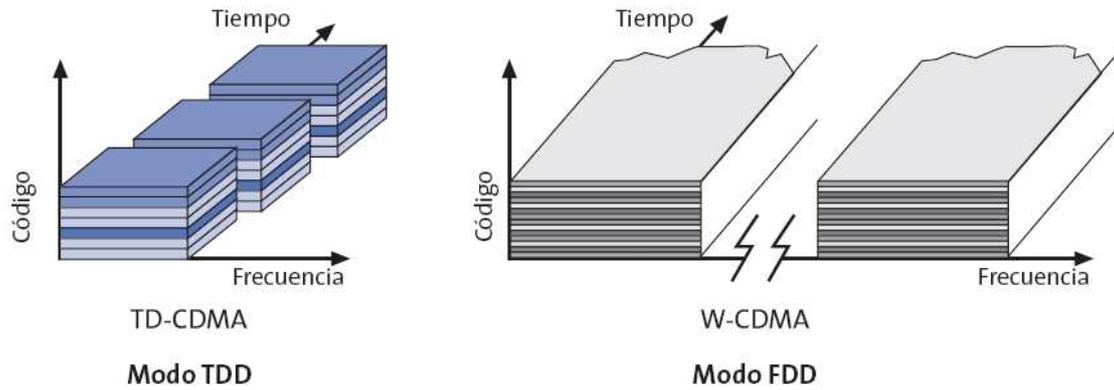
Los códigos de canalización son códigos ortogonales entre sí. Su longitud es igual al factor de ensanchamiento, SF, puesto que cada bit de la señal de datos se multiplica por un código de canalización completo. Los códigos de canalización pertenecen a un tipo de códigos conocidos como OVVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor codes), códigos ortogonales con factor de ensanchado variable. Este tipo de códigos se caracteriza porque pueden definirse secuencias con distintas longitudes o factores de ensanchado, manteniendo la ortogonalidad entre ellas. Esta característica hace que los códigos OVVSF resulten especialmente indicados para los sistemas UMTS, puesto que permiten trabajar con servicios de velocidad variable cambiando únicamente el SF de la secuencia.

Los códigos de scrambling pertenecen al grupo de secuencias pseudoaleatorias o de pseudo-ruido. Este tipo de secuencias presenta propiedades muy parecidas a las de una secuencia puramente aleatoria, con la diferencia de que son periódicas y pueden ser reproducidas. Las secuencias pseudoaleatorias tienen buenas propiedades de autocorrelación y correlación cruzada, aunque el producto entre dos códigos es distinto de cero, por lo que pertenecen al grupo de secuencias no ortogonales. Los códigos de aleatorización permiten separar las señales transmitidas desde distintas fuentes.

La conjunción de ambos códigos, canalización más scrambling define unívocamente la dimensión código en los sistemas DS-CDMA. Los códigos de scrambling facilitan la gestión de los recursos radio y su administración entre las diferentes células y usuarios, mientras que los códigos de canalización sirven para producir el ensanchamiento adicional de la señal hasta el nivel requerido.

### 7.2.2.1.2 Componentes FDD y TDD

La interfaz radio UMTS se estructura sobre la base de dos componentes: el componente FDD (Frequency Division Duplex) y el componente TDD (Time Division Duplex) [26]. Estos componentes se muestran en la Figura 2-6.



**Figura 2-6 Comparación entre FDD y TDD**

En el caso de FDD el acceso múltiple se realiza por división en código y en frecuencia, utilizando dos portadoras distintas: una para el enlace ascendente y otra para el descendente. En el modo TDD el acceso múltiple se hace por división en código y en tiempo: existe una única portadora e intervalos temporales de transmisión, que se reparten entre distintos usuarios y, a su vez, entre los dos sentidos de transmisión (ascendente y descendente). El número de intervalos temporales asignados a cada uno de los sentidos del enlace es configurable.

En la Tabla 2-7 se recogen las características técnicas de los modos de funcionamiento del sistema UMTS (FDD y TDD).

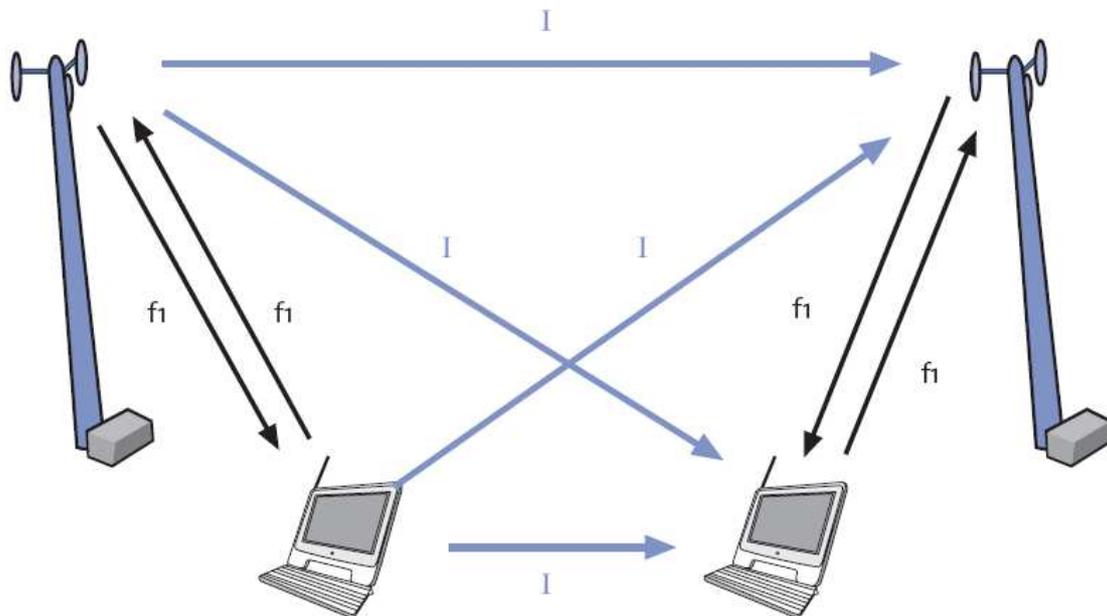
Parámetro	FDD	TDD
Banda de frecuencia	1.920 MHz - 1.980 MHz (enlace ascendente) 2.110 MHz - 2.170 MHz (enlace descendente)	1.900 MHz - 1.920 MHz y 2.010 MHz - 2.025 MHz (banda no pareada)
Mínimo ancho de banda necesario	2 x 5 MHz	5 MHz (1,6 MHz para 1,28 Mchip/s)
Reutilización de frecuencia	1	1
Codificación de voz	Codecs AMR (4,75 kHz - 12,2 kHz, GSM EFR = 12,2 kHz) y SID (1,8 kHz)	Codecs AMR (y GSM EFR)
Codificación de canal	Códigos convolucionales. Turbocódigos para datos de alta velocidad. Se necesita duplexor (separación de 190 MHz) Soporta conexiones asimétricas	Códigos convolucionales. Turbocódigos para datos de alta velocidad. La trama TDMA consiste en 15 intervalos de tiempo (T) Cada TS puede transmitir o recibir No necesita duplexor Soporta conexiones asimétricas
Receptor	Rake	Detección conjunta (Rake en el móvil)
Modulación	QPSK	QPSK
Tasa de chip	3,84 Mchips	3,84 Mchip/s ó 1,28 Mchip/s
Ganancia de procesamiento (varía dependiendo de la tasa binaria de información)	Enlace ascendente: Potencias de 2, desde 4 hasta 256 Enlace descendente: Potencias de 2, desde 4 hasta 512	Enlace ascendente y descendente: Potencias de 2, desde 1 hasta 16
Longitud de trama	10 ms (38.400 chips)	10 ms
Número de slots/trama	15	15
Tipos de "handover"	Soft, softer (hard, si hay más de una frecuencia portadora FDD)	Hard
Control de potencia	Periodo: 1500 Hz Tamaño de paso: 0,5, 1, 1,5 y 2 dB (variable) Alcance: 80 dB (enlace ascendente), 30 dB (enlace descendente)	Periodo: 100 Hz ó 200 Hz (enlace ascendente), 800 Hz (enlace descendente) Tamaño de paso: 1 dB, 2 dB y 3 dB (variable) Alcance: 65 dB (enlace ascendente), 30 dB (enlace descendente)
Potencia de pico en el terminal móvil	Clase 1: +33 dBm (+1 dB/-3dB)=2 W Clase 2: +27 dBm Clase 3: +24 dBm Clase 4: +21 dBm	Clase 1: +33 dBm (+1 dB/-3 dB)=2 W Clase 2: +27 dBm Clase 3: +24 dBm Clase 4: +21 dBm
Número de códigos únicos de identificación de estación base	512/portadora	512/portadora
Spreading factor (capa física)	4...256 (UL), 4...512 (DL)	1, 2, 3, 8, 16

**Tabla 2-7 Características técnicas de los modos de funcionamiento del sistema UMTS (FDD y TDD)**

En el entorno de operación de UMTS, el modo TDD se considera más adecuado para proporcionar servicios de datos en entornos microcelulares o de interiores, y no tanto para entornos macrocelulares, por distintas razones:

- Debido a la necesidad de disponer de sincronización entre las estaciones base.
- Debido a los problemas originados por las interferencias no controlables.

En efecto, el hecho de que coincida el enlace ascendente en una estación con el descendente de otra vecina puede producir interferencias, no solo de estación base a móvil y de móvil a estación base (como sucede en los sistemas TDD), sino también entre estaciones base y entre móviles asignados a distintas estaciones base. En la Figura 2-8 se refleja esta situación.



**Figura 2-8 Interferencias en los sistemas TDD**

Este tipo de interferencias es común a otros sistemas con duplexión en el tiempo. Sin embargo, son más acusados en el sistema UMTS TDD en el que se utiliza un patrón de reutilización 1/1. Una forma de controlar este tipo de interferencias es requerir que todas las estaciones base que constituyen la red (que deben estar sincronizadas) transmitan con la misma división de intervalos y la misma asignación a cada uno de ellos a los enlaces ascendente y descendente. Esto, obviamente, reduce la flexibilidad del sistema para asignar recursos en los distintos sentidos de la comunicación (solo serían posibles asignaciones a largo plazo, sin distinciones entre células).

En Europa, el organismo CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) ha establecido el reparto del espectro UMTS para cada modo de operación. El criterio de asignación adoptado, puede resumirse de la siguiente manera [4]:

- Para la operación FDD han sido asignadas dos bandas pareadas de 60 Mhz (1920-1980 MHz para sentido ascendente y 2110-2170 MHz para sentido descendente), lo que supone un total de 12 pares de portadoras de 5 MHz.
- Para la operación TDD en Europa se han asignado dos bandas que en total suman 25 MHz (1900-1920 y 2020-2025 MHz), lo que supone un total de 5 portadoras de 5 MHz (existen 10 MHz adicionales en la banda 2010-2020 que están reservados para operación TDD sin licencia).

Vemos que el número de portadoras disponibles para UMTS es reducido: 12 pares de portadoras para FDD y 7 portadoras para TDD. Teniendo en cuenta que en un país pueden asignarse varias licencias UMTS, el número de portadoras a disposición de un operador será aún menor. Así, por ejemplo, en el caso de España se concedieron inicialmente cuatro licencias (Vodafone, Retevisión Móviles, Telefónica Móviles y Xfera), habiendo asignado a cada operador tres pares de portadoras FDD y una portadora para TDD.

#### **7.2.2.1.3 Estructura del protocolo radio**

Uno de los aspectos que comparten las dos componentes de UMTS (FDD y TDD) es la estructura del protocolo radio, que se establece conforme al modelo de capas OSI (ver la Figura 2-9). Del total de capas, son tres las que intervienen en el protocolo radio: la capa física (L1), la de enlace de datos (L2) y la de red (L3). Además, la estructura se complementa con una división vertical en dos planos, denominados respectivamente de control (C) y de usuario (U). El plano de control contiene los aspectos ligados a la señalización de sistema, mientras que el plano de usuario abarca los relativos al trasvase de información de tráfico entre usuarios.

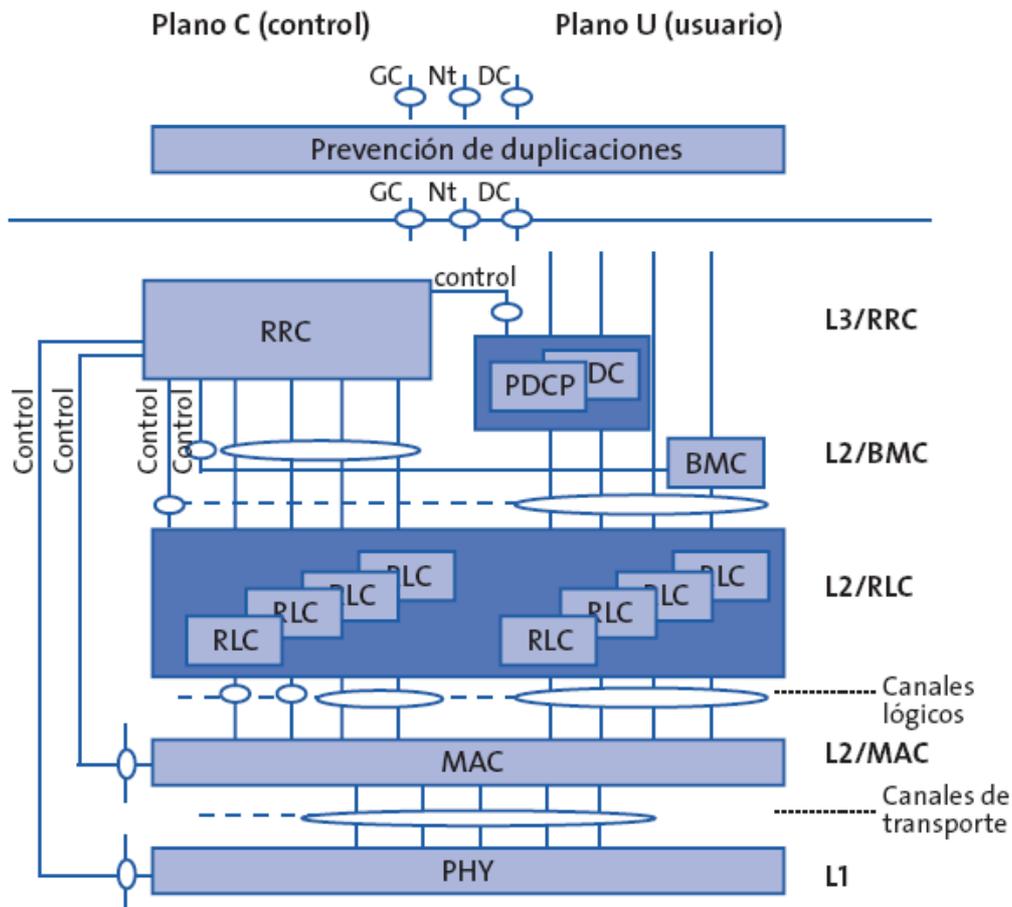


Figura 2-9 Planos de control y de usuario de la interfaz radio

De acuerdo con el modelo OSI, y en líneas generales, la capa física es la encargada de los procesos necesarios para transmitir la información sobre el medio correspondiente, en este caso, el radioeléctrico.

La capa 2, de enlace de datos, tiene la misión genérica de ofrecer, a partir del recurso de transmisión que pone a su disposición la capa física, un servicio de transmisión libre de errores a la capa superior. Normalmente, y así ocurre en UMTS, esta capa se desglosa en varias subcapas. Y en este caso, el desglose es distinto según sea el plano C o U que se considere.

Empezando por su parte inferior, la primera subcapa de datos es la de control de acceso al medio o MAC (Medium Access Control). Básicamente alberga los protocolos relativos a la gestión del acceso a los recursos por los que los usuarios compiten en un sistema multiacceso, mediante mecanismos de acceso aleatorio, en el caso de UMTS.

Por encima de la subcapa MAC se encuentra la RLC (Radio Link Control), encargada en términos generales, de ofrecer un servicio de transmisión de datos para la capa de red.

Por encima de la subcapa RLC la porción de la capa 2 que pertenece al plano C no contiene más subcapas. Sin embargo, en el plano de usuario se sitúan dos subcapas más: la BMC y la PDCP. La subcapa BMC (Broadcast/Multicast Control Protocol) contiene el protocolo que regula la transmisión de la información relativa a los servicios

de difusión general o multidifusión sobre la interfaz radio, siempre bajo el modo transparente o sin acuse de recibo de la subcapa RLC.

La subcapa PDCP (Packet Data Convergence Protocol) es aplicable solo al dominio del modo paquete. Este protocolo tiene un doble cometido: comprimir los paquetes procedentes de la capa superior (para mejorar la eficiencia espectral) y aislar al resto de los protocolos UTRAN de la necesidad de cambios (por causa de la introducción de nuevos protocolos de red en modo paquete).

Por encima de la capa 2 se encuentra la capa 3 o de red. Su cometido es conseguir que los paquetes de información alcancen su destino. En el caso de la interfaz radio, también se sitúan en ella diversos procesos de control del enlace. Se subdivide en tres subcapas: gestión de los recursos radio o RRM (Radio Resource Management), control de llamadas o CC (Call Control) y gestión de la movilidad o MM (Mobility Management). De las tres subcapas, los elementos de la red de acceso radio (RNC y Nodo B) únicamente actúan sobre la primera (RRM), ya que las otras dos (MM y CC) son transparentes para ellos.

Vamos a comentar con mayor amplitud estas capas:

### Nivel Físico

La capa física ofrece los servicios a los niveles superiores, dando a la transmisión a nivel físico la información generada a partir del nivel dos de la pila protocolaria. En particular, los canales de transporte (TrCh) son los servicios ofrecidos por el nivel físico a los niveles superiores. Estos están definidos en base al tipo de información transferida y al modo de transferirla sobre el interfaz radio.

Para garantizar la transmisión de los servicios multimedia, será necesario prever la modalidad de transmisión sobre los canales dedicados que presentarán diversos requisitos de calidad. En general, los requisitos asociados a este nivel son los siguientes:

- Máxima tasa de error que podrá soportar para garantizar la calidad del servicio.
- Máximo retardo de transmisión (end-to-end delay) que puede soportar el servicio en cuestión.

Estos parámetros influyen en el tipo de codificación a utilizar para recuperar los errores introducidos por el canal de propagación, en la profundidad de los bloques de interleaving y en el número máximo de retransmisiones consentidas en el caso en el que se adopte una técnica ARQ (Automatic Repeat Request).

Los diversos servicios estarán sometidos a una codificación y un interleaving independientes en base a cada uno de sus requisitos de calidad (cuanto mayor es la profundidad de interleaving, mejores son las prestaciones en términos de tasa de error, pero mayor será el retardo introducido). Se multiplexan y el flujo que obtenemos se somete a una nueva operación de interleaving (igual a la de una trama radio) y se mapea en uno o más canales físicos según la velocidad a la que se quiera transmitir.

La capa física incluye las siguientes funcionalidades [3]:

- Distribución y combinación de la macro diversidad y ejecución del soft handover.
- Detección de errores en los canales de transporte e indicación a las capas superiores.
- Codificación y decodificación, FEC (Forward Error Correction), interleaving y deinterleaving de los canales de transporte.
- Multiplexado de los canales de transporte y demultiplexado de los canales CCTrCH (Coded Composite Transport Channel).
- Adaptación la de velocidad de transmisión.
- Mapeado de los CCTrCH sobre los canales físicos.
- Modulación y demodulación, spreading y despreading de los canales físicos.
- Sincronización en tiempo y en frecuencia (chip, bit, slot (intervalo), trama).
- Medida de las características radio (incluyendo FER, relación señal a interferencia SIR (Signal Interference Ratio), nivel de potencia de la interferencia, etc.) e informe a las capas superiores.
- Control de potencia en lazo cerrado.
- Procesado en radiofrecuencia.

Los canales de transporte, que contienen los datos generados por el nivel anterior, vienen mapeados en diversos canales físicos y además sus respectivos TFI (Transport Format Indicator) se combinan en los TFCI (Transport Format Combination Indicator). El TFCI se transmite sobre el canal de control físico para indicar al receptor que canales de transporte están activos en la trama corriente.

### Nivel MAC

A continuación describiremos los diversos servicios que el MAC ofrece a los niveles superiores y las funciones que realiza:

■ **Transferencia de datos:** este servicio lleva a cabo la transferencia de MAC SDU sin acuse de recibo entre entidades MAC de igual nivel, sin proporcionar ninguna confirmación, ni segmentación de datos que debe por tanto ser solucionada por las capas superiores.

■ **Reasignación de recursos radio y de parámetros MAC:** este servicio es el encargado de modificar la asignación de los recursos y el formato de los canales de transporte utilizados para una comunicación, dependiendo de la velocidad instantánea de los canales lógicos.

■ **Informe de las medidas:** envío de los informes de las medidas de tráfico y calidad, realizadas localmente, a la capa RRC, para que en esta capa se puedan tomar decisiones de control de los recursos radio.

El nivel MAC realiza las siguientes funciones [10]:

- Mapeado de los canales lógicos sobre los canales de transporte: los canales lógicos vienen directamente mapeados sobre los canales de transporte apropiados según corresponda.

- Selección de un formato de transporte apropiado para cada canal de transporte: para cada canal de transporte se asigna el formato más apropiado dependiendo de la velocidad de datos instantánea que hay que transmitir en cada momento. El control de los formatos de transporte y la posibilidad de una variación rápida permiten una utilización eficiente del canal de transporte.

- Gestión de la prioridad entre los diversos flujos de datos pertenecientes a cada terminal móvil, UE: de este modo es posible asignar una tasa de bit superior, a un flujo de datos con alta prioridad, y análogamente una tasa más baja a un flujo de datos con prioridad menor.

- Gestión de la prioridad entre terminales móviles: para utilizar los recursos radio de manera eficiente, el MAC realiza la gestión de la prioridad sobre los canales comunes y dedicados, utilizando una programación dinámica (dynamic shedding).

- Identificación de los UE en canales comunes de transporte: cuando un UE utiliza un canal común, se tiene la necesidad de identificarlo. Dado que el nivel MAC gestiona el acceso a los canales de transporte y efectúa la multiplexación sobre los mismos, la identificación de los UE es desarrollada a este nivel.

- Multiplexación y demultiplexación de las PDU de los niveles superiores.

- Control del volumen de tráfico: esta función toma medidas del volumen de tráfico en los canales lógicos e informa al RRC, para que en esta capa se puedan tomar decisiones de conmutación de canales de transporte.

- Conmutación dinámica del tipo de canal de transporte: ejecuta la conmutación entre canales comunes y dedicados basándose en las decisiones tomadas por el RRC.

- Cifrado de los datos para transmisión en modo transparente del RRC.

### Nivel RLC

El nivel RLC realiza las siguientes funciones:

- Segmentación y reensamblado: esta función realiza la segmentación y el reensamblado de las PDU de los niveles superiores de dimensión variable en RLC PU (Payload Unit) de dimensiones menores que pueden ser adaptados a los actuales formatos de transporte.

- Concatenación: si el contenido de una SDU de nivel RLC no se corresponde con un número entero de RLC PU, se concatenan en una misma PU el primer segmento de la siguiente SDU con el último segmento de la anterior SDU.

■ **Padding (relleno de ceros):** se utiliza en aquellos casos en los que no se puede aplicar la función de concatenación y los datos a transmitir no ocupan una PDU entera, por lo que el resto del campo de datos se rellena con ceros.

■ **Transferencia de datos entre los usuarios de los servicios del subnivel RLC.** Esta función soporta tres modalidades: con acuse de recibo, sin acuse de recibo y transparente.

■ **Corrección de errores:** esta función establece la corrección de errores en las retransmisiones de los datos recibidos no correctamente en la modalidad de transferencia con acuse de recibo.

■ **Entrega en secuencia de las PDU del nivel superior:** esta función preserva el orden con el que la PDU del nivel superior se transfiere en modalidad con acuse de recibo.

■ **Control de flujo:** permite que una entidad receptora del subnivel RLC controle la velocidad con que la entidad transmisora envía información.

■ **Comprobación de la secuencia de número en el modo de transferencia de datos sin confirmación:** esta función garantiza la integridad de las PDUs concatenadas y proporciona un mecanismo de detección de SDUs erróneas del subnivel RLC.

■ **Protocolo de detección de errores y recuperación de información en las operaciones del subnivel RLC.**

■ **Función de cifrado en el subnivel RLC para evitar la adquisición de datos no autorizada en los modos de transferencia con y sin confirmación.**

■ **Función de suspensión y reanudación de la transferencia de datos.**

Los principales servicios que ofrece a los niveles superiores son los siguientes:

■ **Instauración y liberación de una conexión RLC:** se establece una conexión para cada enlace radio.

■ **Transferencia de datos en modalidad transparente:** con este tipo de servicio se permiten transmitir las PDU de los niveles superiores sin añadir ninguna información de protocolo, limitándose a la segmentación y al reensamblado.

■ **Transferencia de datos en modalidad unacknowledged (sin acuse de recibo):** con este tipo de servicio se transmiten las PDU de los niveles superiores sin garantía de la entrega a la entidad del mismo nivel. Esta modalidad necesita el soporte de las siguientes características: funcionalidad de detección de datos erróneos (se reparten sólo las SDUs a la entidad receptora del nivel superior, que estén libres de errores en la transmisión), entrega única (cada SDU se entrega una única vez a la entidad receptora superior, mediante la función de detección de duplicación), entrega inmediata (la

entidad receptora del subnivel RLC debe entregar de forma inmediata las SDUs a la entidad receptora del nivel superior una vez recibidas).

- Transferencia de datos en modalidad acknowledged (con acuse de recibo): con este tipo de servicio se garantiza la entrega a la entidad del mismo nivel. Si el subnivel RLC no puede asegurar la llegada correcta de los datos se lo notifica al subnivel RLC del lado transmisor. Para este servicio se soportan ambas modalidades de entrega, en secuencia y fuera de secuencia. La modalidad con acuse de recibo necesita de las siguientes características: entrega de la SDU al nivel superior libre de errores, entrega única, y entrega de la SDU en el mismo orden con el que se ha transmitido (si esta función no se usa, se utilizará la entrega fuera de secuencia).

- Establecimiento de la calidad de servicio: el nivel de red configura el protocolo de retransmisión para proporcionar distintos niveles de calidad de servicio, QoS.

- Notificación al nivel superior de los errores no recuperables.

#### **7.2.2.2 Interfaz entre RNC y nodo B (Iub)**

Es la interfaz entre un Nodo B y su RNC, a través de ella el RNC puede indicar al nodo B que establezca o libere los enlaces radio en el área de cobertura del grupo de celdas que el nodo controla.

La interfaz Iub se basa en la estructura lógica del Nodo B, en la que se separa el control de los canales comunes del control de los canales dedicados o compartidos. Por eso el protocolo de señalización del interfaz Iub, conocido como NBAP (Node B Application Part), se separa en dos partes:

- Common NBAP: mediante este protocolo de señalización es posible configurar el primer radio enlace de un usuario, configurar la celda, definir las características de los canales comunes y enviar las medidas de calidad realizadas por la celda al RNC.
- Dedicated NBAP: este protocolo permite reconfigurar, añadir o liberar radio enlaces de un usuario, definir las características de los canales compartidos o dedicados, realizar la combinación propia del softer handover y enviar medidas específicas de un radio enlace al RNC.

En la figura 2.10 se muestra la arquitectura de protocolos normalizada para la interfaz Iub [4].

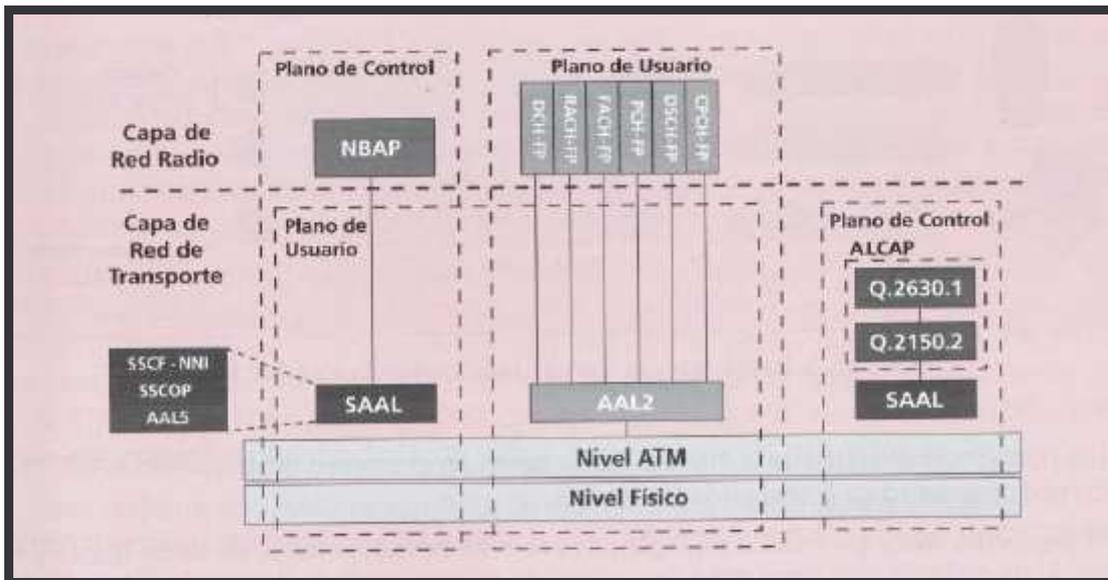


Figura 2-10 Arquitectura de protocolos de la interfaz Iub

### 7.2.2.3 Interfaz entre dos RNC (Iur)

Es el interfaz existente entre dos RNC pertenecientes a la red de acceso UTRAN. Este enlace no existía en los sistemas 2G, y su implantación es opcional. Inicialmente esta interfaz fue diseñada con la intención de liberar al Núcleo de Red de las decisiones relativas a traspasos entre celdas adscritas a RNCs diferentes. Posteriormente, durante el desarrollo del estándar se le añadieron nuevas funciones, entre las que se encuentran la gestión de la movilidad de las conexiones radio dentro de la red de acceso, el soporte de canales de tráfico comunes y dedicados, y el soporte de una gestión de recursos global.

En la figura 2.11 se muestra la arquitectura de protocolos normalizada para la interfaz Iur.

El protocolo de señalización de este interfaz se conoce como RNSAP (Radio Network System Application Part). Los procedimientos de RNSAP están divididos en cuatro grupos: movilidad básica, transporte de canales dedicados, transporte de canales comunes y procedimientos globales.

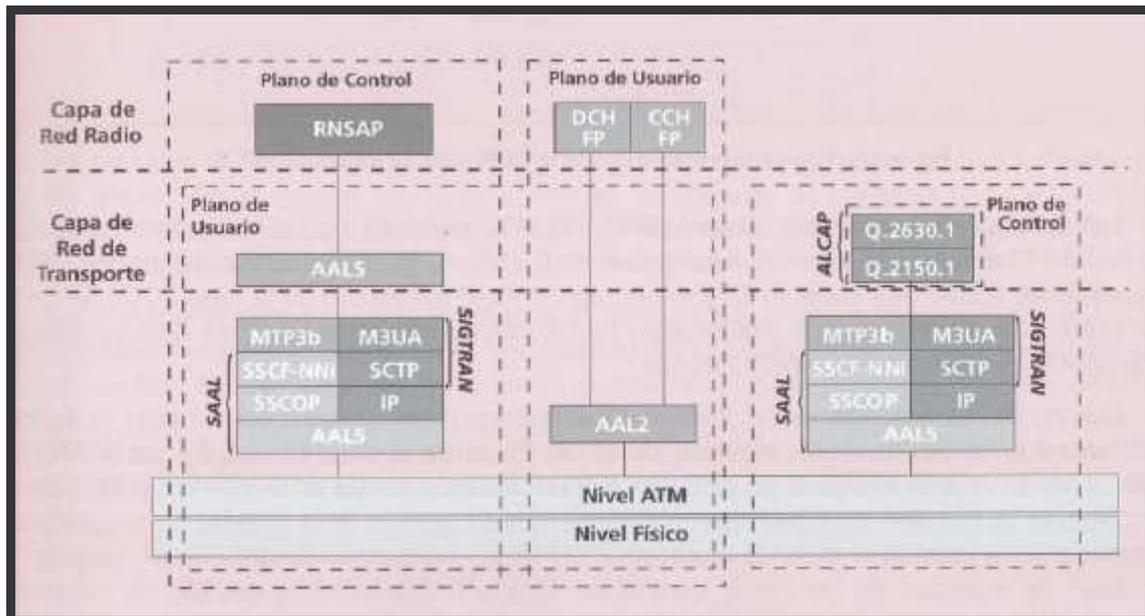


Figura 2-11 Arquitectura de protocolos de la interfaz Iur

#### 7.2.2.4 Interfaz entre el Núcleo de Red y RNC (Iu)

Conecta la red de acceso radio UTRAN al núcleo de red CN. Esta interfaz está estructurada en componentes separadas, cada una de las cuales está asociada a un dominio del núcleo de red. Dependiendo del tipo de servicio se definen dos tipos de interfaz, el Iu CS para servicios basados en conmutación de circuitos, y el Iu PS que conecta la UTRAN con la parte de la red troncal encargada de la conmutación de paquetes.

En el interfaz Iu CS, tanto los datos de usuario como la señalización comparten un mismo medio físico al que acceden utilizando el protocolo ATM (Asynchronous Transfer Mode) de acceso al medio. El medio físico podrá ser fibra óptica, radio enlaces o un simple par de cobre y su elección influirá en la ubicación de los nodos de conmutación de la red troncal con respecto al RNC. Una vez seleccionado el medio físico la implementación de la capa física se realizará utilizando alguno de los estándares de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), siendo los dos modos de transmisión más utilizados el modo PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), y el modo SDH (Synchronous Digital Hierarchy). En la figura 2.12 se muestra la arquitectura de protocolos de la interfaz Iu-CS.

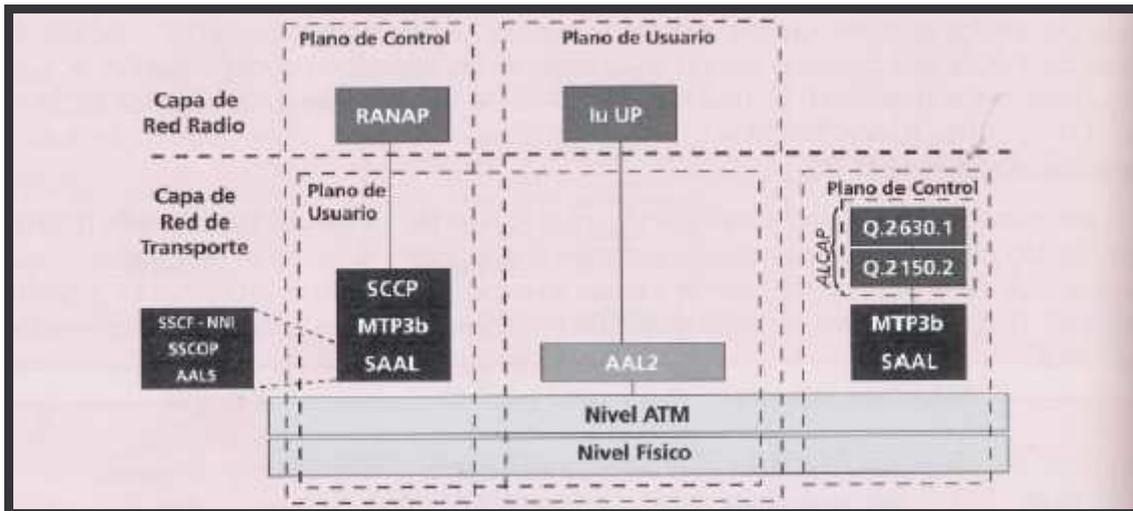


Figura 2-12 Arquitectura de protocolos de la interfaz Iu-CS

En el interfaz Iu PS también se usa una capa de transporte ATM para la transmisión de la información de usuario y de control. Y la capa física será igual que la descrita para la interfaz Iu CS. En la figura 2.13 se muestra la arquitectura de protocolos de la interfaz Iu-PS.

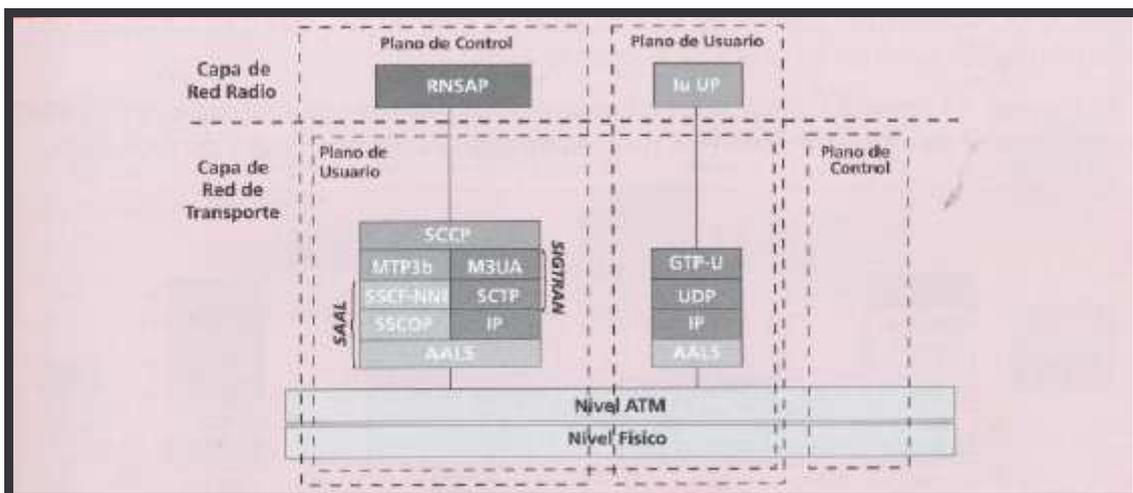


Figura 2-13 Arquitectura de protocolos de la interfaz Iu-PS

### 7.2.2.5 Procedimientos básicos que realiza la red de acceso

Para el funcionamiento óptimo de un sistema móvil es necesario que existan un conjunto de funciones para controlar la red de acceso radio y todos los terminales que la utilizan en cada momento. Todas las funciones disponibles, excepto el traspaso entre sistemas (hacia GSM), resultan esenciales y, por consiguiente, necesarias para el correcto funcionamiento del sistema WCDMA [26]. Estas funciones son:

### 7.2.2.5.1 El control de potencia

El control de potencia regula la potencia transmitida por el Terminal móvil y la estación base, con la finalidad de reducir la interferencia y permitir así aumentar el número de usuarios sobre la misma portadora, es decir, aumentar la capacidad del sistema. Para garantizar un buen funcionamiento, el control de potencia se aplica en los dos enlaces (ascendente y descendente).

En los sistemas CDMA la calidad de un enlace viene determinada por la relación entre la potencia de la señal recibida y las interferencias generadas por el resto de usuarios que comparten la misma banda de frecuencias. Por tanto, es necesario controlar la potencia transmitida en cada enlace con el objetivo de que la relación señal a interferencia recibida esté por encima de un umbral que permita asegurar la calidad de la comunicación. Por otro lado, en un sistema limitado por interferencias es necesario tener en cuenta que si un enlace transmite más potencia de la necesaria, introducirá una interferencia excesiva que reducirá la capacidad del sistema. Por tanto, el control de potencia debe asegurar un equilibrio entre la interferencia producida y sufrida por cada usuario.

El objetivo del control de potencia consiste en que la estación base reciba el mismo nivel de potencia de todos los servicios de usuario que esté cursando, independientemente de la ubicación física del usuario, o lo que es lo mismo, de la distancia entre el abonado y la estación base. Si el nivel de potencia de un terminal es mayor de lo necesario para dar la calidad de servicio requerida, se consumirán recursos en exceso (la potencia total a repartir entre los usuarios dentro de una estación de base está limitada) y se generará a la vez más interferencia a los otros usuarios. Por el contrario, si el nivel de potencia es muy bajo, la calidad de la conexión será muy pobre.

El control de potencia es una función vital para el correcto funcionamiento de los sistemas CDMA. En WCDMA se hace uso de los siguientes mecanismos de control de potencia:

- Control de potencia en lazo abierto: se usa para obtener una aproximación de la potencia con la que debe transmitir el terminal móvil cuando se inicia una comunicación. El receptor del terminal móvil estima la atenuación de propagación de canal midiendo el nivel recibido de una señal de referencia (piloto) emitida con una potencia conocida, y en función de esa estimación determina la potencia de transmisión necesaria para asegurar una correcta recepción. No se usa durante el transcurso de una comunicación, donde pueden emplearse técnicas más precisas que tengan en cuenta los desvanecimientos rápidos debidos a la propagación multicamino.
- Control de potencia en lazo cerrado (Closed Loop Power Control): es un mecanismo de realimentación que tiene como objetivo mantener la relación señal a interferencia ( $F_b/N_0$  o SIR) a un nivel que permita asegurar la calidad de la comunicación. Se implementa mediante dos mecanismos, el primero, el control de potencia rápido, que es el encargado de garantizar una determinada relación  $E_b/N_0$  o SIR, mientras que el segundo, el control de potencia en bucle externo, garantiza un

determinado nivel de calidad de servicio de la comunicación en términos de BER (Bit Error Rate) o BLER (Block Error Rate). El control de potencia en bucle cerrado rápido (Fast Power Control) se ejecuta con una frecuencia de 1500 Hz. El control de potencia en bucle externo (Outer Loop Power Control) se realiza con una frecuencia mucho menor, con valores típicos comprendidos en el intervalo entre 10 Hz y 100 Hz.

#### 7.2.2.5.2 Las funcionalidades “soft” y “softer handover”

Los trasposos (“handover”) son un componente esencial de los sistemas de comunicaciones móviles celulares. La movilidad de los usuarios en estos sistemas provoca variaciones dinámicas en la calidad del enlace y en los niveles de interferencia, requiriendo en determinadas ocasiones que un usuario cambie su estación base de servicio. Los motivos que pueden provocar la ejecución del handover son varios, entre ellos: delimitar el área de cobertura de una célula, garantizar la continuidad de los servicios cuando los usuarios móviles traspasan los límites de cobertura de las células, contrarrestar el deterioro progresivo de la calidad de una conexión, reducir la potencia transmitida, redistribuir el tráfico entre células para evitar situaciones de congestión y aumentar el grado de servicio, acceder a determinados servicios que puedan ofrecerse bajo diferentes modos de operación o redes de acceso, permitir la itinerancia entre distintas redes, o a causa de la intervención del subsistema de operación y mantenimiento.

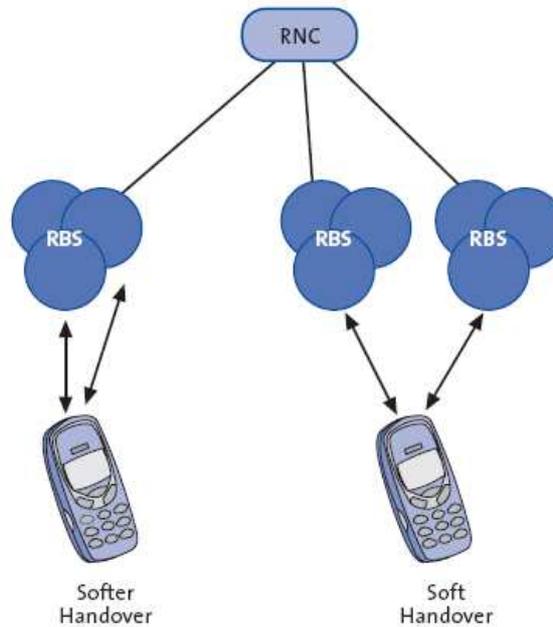
En este punto hablaremos del handover entre células, y en los siguientes comentaremos el handover entre sistemas y entre frecuencias.

Con las funcionalidades soft y softer handover el terminal puede comunicarse simultáneamente con dos o más células de dos o más estaciones base, manteniendo la continuidad y calidad de las conexiones a medida que el usuario se desplaza de una célula a otra. Esta flexibilidad repercute en una reducción notable del número de llamadas caídas, muy importante para los operadores móviles.

En las situaciones de soft y softer handover el terminal ajusta su nivel de potencia al de la estación base que requiere del terminal la menor cantidad de potencia para transmitir.

La diferencia entre soft y softer handover radica en el número de estaciones base a las que el móvil permanece conectado simultáneamente (ver la Figura 2-14). En soft handover el móvil está conectado a varias células de distintas estaciones base, mientras que en softer handover las múltiples células a las que puede estar conectado el móvil pertenecen a la misma estación base.

En una red móvil UMTS bien diseñada, entre el 30 y el 40 por ciento de los usuarios estarán en soft o softer handover.



**Figura 2-14 Las funcionalidades “soft” y “softer handover”**

#### 7.2.2.5.3 El “handover” entre sistemas

Cuando WCDMA se estandarizó, uno de los aspectos clave era garantizar la reutilización de las inversiones actuales en la mayor medida posible. Un ejemplo era el traspaso entre las nuevas redes (WCDMA) y las existentes (GSM), ya sea provocado por motivos de cobertura, de capacidad, o bien por requisitos del servicio ofrecido.

El traspaso entre sistemas por motivos de cobertura se considera muy importante al inicio del despliegue de las redes UMTS, ya que los operadores móviles irán ampliando sus redes UMTS poco a poco, en zonas donde ya tienen infraestructura de red GSM. El traspaso en sentido contrario, es decir, de GSM a WCDMA, también puede tener un efecto benéfico en el reparto de carga de los sistemas.

#### 7.2.2.5.4 El “handover” entre frecuencias (intrasistema)

La necesidad de realizar traspasos entre frecuencias surge en aquellas regiones con alta demanda de usuarios, donde es necesario utilizar varias portadoras WCDMA de 5 MHz.

Este tipo de traspasos tiene un conjunto de implicaciones muy similar al de los traspasos entre sistemas, como es, por ejemplo, la funcionalidad del modo comprimido.

#### 7.2.2.5.5 El control de admisión

Esta funcionalidad se emplea para evitar que el sistema se sobrecargue y, sobre todo, para poder proporcionar la cobertura y calidad esperadas. Cuando un usuario intenta acceder a la red, el sistema de control de admisión estima la carga de la red y, en función de la nueva fracción de carga estimada, el usuario será admitido o por el contrario se le denegará la conexión.

La decisión de aceptación o rechazo de una petición de establecimiento o modificación de portadoras radio debe tomarse teniendo en cuenta tanto los requisitos de calidad del usuario que solicita el acceso como los compromisos de calidad de servicio con los usuarios aceptados previamente en la red. La decisión de admisión estará íntimamente relacionada con la estimación que se realice en cuanto a la disponibilidad de suficientes recursos radio a lo largo de la duración de la conexión para poder proporcionar la calidad de servicio solicitada [4].

El control de admisión debe efectuarse tanto para el enlace ascendente como descendente, y sólo en caso de que se supere en ambos sentidos se podrá aceptar el establecimiento de la portadora radio.

Debe también considerarse que las peticiones pueden provenir de usuarios en tránsito, esto es, usuarios a los que se les permitió el acceso a la red con anterioridad, pero ahora solicitan el acceso a una nueva célula a causa de la movilidad del terminal. En estos casos debe contemplarse algún tipo de priorización en la aceptación, ya que el rechazo supondría la interrupción de una comunicación en curso, impactando de manera muy negativa en la percepción que tiene el usuario de la calidad de la red.

#### 7.2.2.5.6 El control de congestión

Aunque la función de control de admisión funcione correctamente, la sobrecarga del sistema puede llegar a producirse, por ejemplo, en aquellas situaciones en las que los abonados se mueven de una zona a otra de la red.

Si se produce un exceso de carga en el sistema, hay cuatro acciones que se pueden llevar a cabo. En primer lugar se debe activar el control de congestión para reducir la tasa binaria de las aplicaciones que no son en tiempo real (y pueden admitir mayores retardos).

En segundo lugar, si la reducción de la tasa binaria de la acción anterior no es suficientemente efectiva para reducir la carga, el control de admisión puede forzar ciertos trasposos intra o entre frecuencias, y de este modo tratar de que otras portadoras con menos carga pasen a cursar más tráfico.

La siguiente medida sería el traspaso hacia GSM, y si, aún así, se sigue detectando un exceso de carga, no queda más remedio que finalizar algunas conexiones, para proteger la calidad de las conexiones restantes en el sistema.

### 7.2.2.5.7 La sincronización

Uno de los requisitos de estandarización del sistema WCDMA fue evitar la dependencia con sistemas externos para obtener la sincronización entre estaciones base. La sincronización se ha conseguido mediante un mecanismo en el cual, el terminal móvil, cuando sea necesario, mide el offset de sincronización entre las células, e informa de ello a la red. Adicionalmente existe la posibilidad de utilizar una fuente externa, como por ejemplo un GPS, para sincronizar los nodos.

## 7.3 MEJORA DEL SISTEMA WCDMA: HSDPA

Hasta ahora las características de la interfaz radio del UMTS, si bien han supuesto un gran avance respecto a las que proporcionaba el GSM sobre todo en lo que respecta a la transferencia de datos, todavía resultan un poco limitadas cuando se utilizan aplicaciones que requieren transferencias de información a muy alta velocidad o cuando coinciden muchos usuarios de aplicaciones 3G en un área reducida. Esto es especialmente cierto en comparación con el acceso fijo, que en los últimos años ha ido aumentando su capacidad rápidamente gracias a la tecnología xDSL.

Dado que las aplicaciones de datos se descargan mayoritariamente desde la red al terminal, en el estándar del 3GPP, la versión 5 del WCDMA introduce el HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) como primer paso en la evolución de la interfaz radio, permitiendo alcanzar velocidades de transmisión de datos muy superiores a las actuales en el enlace descendente (en teoría hasta 14.4 Mbps).

HSDPA es la evolución de la tercera generación (3G) de tecnología móvil, llamada 3.5G, y se considera el paso previo antes de la cuarta generación (4G), la futura integración de redes.

Es totalmente compatible en sentido inverso con WCDMA y aplicaciones ricas en multimedia desarrolladas para WCDMA funcionarán con HSDPA.

El acceso HSDPA emplea técnicas como la de Modulación y Codificación Adaptativa (AMC) y la Solicitud de Retransmisión Automática Híbrida (HARQ) combinadas con una planificación rápida y un procedimiento de cambio de célula.

Se introduce un nuevo canal de transporte en el enlace descendente denominado HS-DSCH (High-Speed Downlink Shared Channel). Con ello los usuarios comparten una serie de recursos utilizados por la radio (como los códigos de canal y la potencia) de forma dinámica en el tiempo con lo que se consigue una mayor eficiencia. Asimismo, los intervalos utilizados para cada transmisión son más cortos (2 ms).

HSDPA emplea la multiplexación en el tiempo para transferir paquetes de datos en un solo canal compartido y utilizar un multicódigo con un factor de ensanchamiento fijo. A pesar de que pueda parecer una operación sencilla, requiere una cierta funcionalidad y una serie de procedimientos para que sea factible a través de la interfaz aérea; se debe programar cuidadosamente, modular, codificar y enviar los datos

multiplexados a través de la interfaz aérea, además, el enlace radio debe adaptarse a esta finalidad.

Las principales entidades funcionales especificadas en la Versión 5 necesarias para llevar a la práctica la operación de HSDP son:

- AMC (Modulación y Codificación Adaptativa): el principal objetivo de la modulación y la codificación adaptativa es compensar la inestabilidad del canal radioeléctrico ajustando los parámetros de transmisión. La adaptación del enlace radioeléctrico se puede realizar a través de diversos métodos e instrumentos, como la antena adaptativa, la asignación dinámica de código y canal, etc. AMC ajusta los parámetros de la modulación y la codificación de la capa física para compensar las variaciones del canal, y lo consigue, básicamente, usando las mediciones del canal radioeléctrico realizadas con el terminal móvil, utilizando la Indicación de Calidad del Canal (CQI) y el procedimiento de retransmisión. La AMC, sirviéndose de esta información y de la relacionada con el tráfico, como la Calidad de Servicio (QoS) y el estado de los recursos radioeléctricos y físicos, selecciona los métodos de modulación y codificado más adecuados para la red.

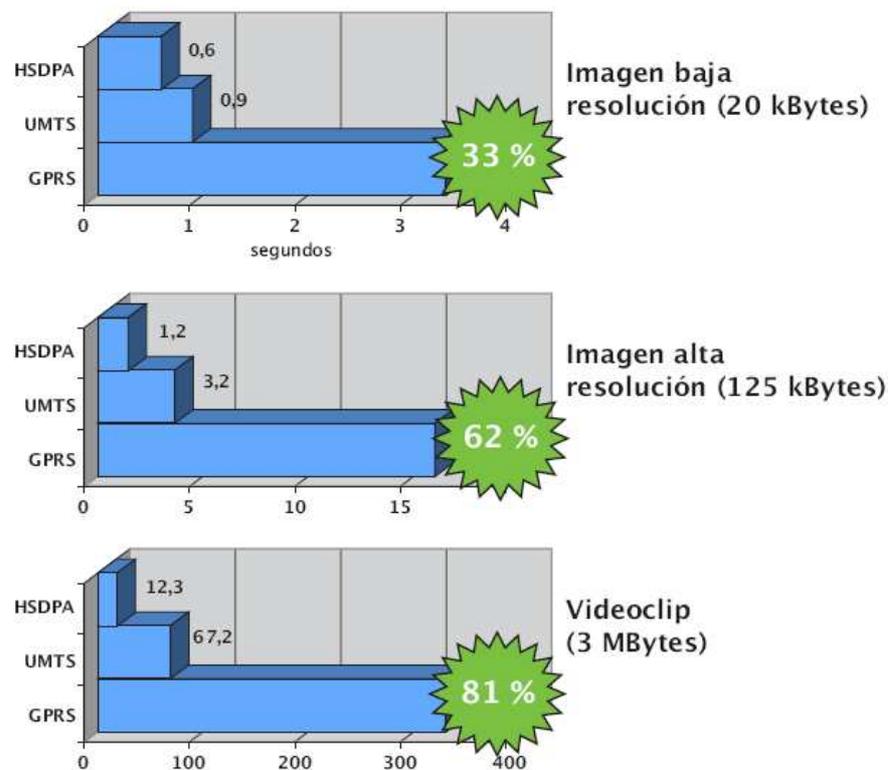
- HARQ (Hybrid Automatic Repeat-Request): a causa de la inestabilidad del canal radio, las medidas radioeléctricas explícitas pueden no ser una base fiable por sí solas para la operación de la AMC y, por eso, se requieren mecanismos complementarios. La HARQ permite que el elemento de red receptor detecte errores y, cuando proceda, solicite la retransmisión. HARQ tiene como ventaja comparado con la ARQ convencional, la capacidad de combinar las estimaciones iniciales o la información explícita recibida de la transmisión original y de las retransmisiones correspondientes, con el proceso de adaptación del enlace. De este modo, ayuda a reducir el número de retransmisiones necesarias y contribuye a la adaptación del enlace sin errores independientemente de las variaciones del canal de radio.

- FPS (Fast Packet Sheduling): el funcionamiento eficiente de HSDPA en lo que respecta a la AMC y la HARQ requiere que el ciclo de planificación de paquetes sea lo suficientemente rápido para seguir las variaciones a corto plazo en una señal de desvanecimiento del Terminal Móvil. Para conseguir esto, se ha ubicado el Programador de Paquetes (PS) en la estación transeptora base en lugar de en el RNC como ocurría en la versión 4. De esta forma se minimiza el retraso en el proceso de planificación y las medidas radioeléctricas también reflejan mejor la condición del canal de radio, con lo que se pueden tomar decisiones de planificación más fiables y acertadas.

- Procedimiento de cambio imperceptible de célula: gracias a este procedimiento el móvil se conecta a la mejor célula disponible en dirección descendente, consiguiendo una perfecta conectividad. Esta técnica reduce también las interferencias indeseables, en especial en el caso del traspaso con continuidad. En los traspasos normales de las redes UTRAN, el cambio de célula en servicio debe decidirse, principalmente, desde el Equipo de Usuario o la red. Sin embargo, la versión 5 únicamente ofrece la opción de control desde la red, y se realiza mediante la señalización del Control de Recursos Radioeléctricos (RRC).

Con estas técnicas se consiguen básicamente las siguientes mejoras (Ver figura 2.15):

- Aumento de la velocidad de descarga, con lo que se mejora la percepción del servicio por los usuarios.
- Menores retardos. La respuesta de la red es más rápida por lo que la percepción de muchos servicios (como web browsing) es mejor y es posible introducir servicios de tipo interactivo (como juegos en tiempo real en red).
- Aumento de la capacidad del sistema. Por lo que se evitan problemas de congestiones en determinadas circunstancias.



**Figura 2-15 Mejoras en las descargas con HSDPA**

Todo ello combinado contribuye directamente a la utilización eficiente del espectro y amplía extraordinariamente la capacidad del sistema para adaptarse a la perfección a las ofertas de servicios de datos. En este respecto, toda la atención se centra en los servicios de streaming, interactivos y diferidos (background), en lugar de los servicios en tiempo real.

Todas estas mejoras suponen una serie de cambios en el sistema; por un lado el terminal actual deberá sustituirse por uno que incorpore las capacidades HSDPA. Básicamente, al tratarse de servicios de datos, los terminales serán tarjetas PCMCIA para PCs portátiles. Los cambios en la red son fundamentalmente de software en los nodos de radio (nodos-B y RNC) y del aumento de la capacidad y potencia de procesado para incrementar la capacidad total del sistema.

## 7.4 SERVICIOS

Por lo que al campo de los servicios se refiere, el enfoque del UMTS ha sido el de evitar un defecto en el que se incurrió en 2G: la excesiva especificación, que ha tenido como consecuencia una mayor dificultad a la hora de conseguir que los operadores puedan diferenciarse entre sí en algo más que en precio de los servicios. Por ello, se ha buscado especificar tan sólo los mecanismos básicos con los que se construyen los servicios, dejando la definición de éstos en manos del mercado. El concepto general de operador de servicios UMTS no tiene por qué ser sinónimo de compañías operadoras de red, sino que puede englobar a las compañías ajenas a ellos, que diseñen y alojen en sus propias plataformas, diferentes aplicaciones que utilicen las redes UMTS para llegar hasta el usuario. En este sentido, no hay que olvidar que la arquitectura cliente-servidor, en la que se basa el sistema, facilita esta posibilidad. Es muy posible, por tanto, que la 3G sea el inicio de una nueva era en materia de servicios móviles de telecomunicación, donde la prestación de éstos se desplace en gran medida hacia fuera de las propias compañías operadoras, en beneficio de terceros, o de compañías mixtas entre operadores, fabricantes, desarrolladores de aplicaciones y proveedores de contenidos [7].

Un elemento importante en este nuevo escenario lo constituirán las denominadas APIs (Application Program Interfaces). Estas iniciales hacen mención a un lenguaje de programación en base al cual terceras entidades podrán desarrollar servicios para una red que los soporte, sin necesidad de conocer los detalles de funcionamiento de ésta.

Otro concepto importante en la provisión de servicios de tercera generación, es el de entorno virtual VHE (Virtual Home Environment). Básicamente, consiste en ofrecer a los abonados un entorno de interacción con los servicios UMTS, de características homogéneas y constantes, independientemente de la red en la que se encuentre el abonado. Esto supone que éste conserve su perfil personal de servicios, su interfaz de acceso y edición de éstos, así como que el repertorio se mantenga constante, sea cual sea el tipo de red de acceso utilizada (esto último, en la medida de las limitaciones que imponga una determinada tecnología de acceso).

La UIT define para los sistemas IMT-2000 las siguientes categorías de servicios:

- Servicios conversacionales. Son servicios en tiempo real, generalmente bidireccionales y con fuertes exigencias en cuanto a retardos que deben ser bajos y constantes. Ejemplos de este tipo de servicios son la voz, la videotelefonía o los videojuegos.

- Servicios afluentes (streaming). Aplicaciones de descarga de contenidos multimedia (audio y video clips) para su reproducción on-line, con una sensación que, sin serlo, se aproxima a la de tiempo real. Son servicios unidireccionales, en los que un usuario humano recibe una secuencia de datos que contiene una señal vocal o visual. En esta clase, la consecución de bajos valores de retardo no es esencial, pero sí en cambio lo es que éstos se mantengan constantes. Ejemplos de este tipo de aplicaciones son la transmisión de imágenes de vídeo procedentes de cámaras conectadas vía UMTS con un centro de supervisión.

- Servicios interactivos. Corresponden a aquellos casos en los que un usuario requiere datos de un equipo remoto. En ellos, es importante no incurrir en excesivos retardos, así como preservar una baja tasa de error. Ejemplos de esta categoría son la navegación web o la consulta de bases de datos conectadas vía UMTS.

- Servicios diferidos (background). Esta última clase da cabida a un número considerable de aplicaciones de datos en las que el usuario no exige una respuesta inmediata por parte de la red, admitiendo retardos que oscilan desde unos pocos segundos hasta incluso varios minutos. Ejemplos de este tipo de servicios son el correo electrónico, los mensajes cortos o la descarga de bases de datos.

## **7.5 EVOLUCIÓN DE LA ARQUITECTURA UMTS**

El desarrollo de las primeras especificaciones de UMTS se produce en un momento en el que la popularización de Internet se encuentra en pleno auge. La continua proliferación de nuevas aplicaciones y la economía de escala conducen al despliegue masivo de redes basadas en el protocolo IP (Internet Protocol), tanto en el ámbito privado como en el público. Yendo aún más lejos, los avances técnicos hacen que la tecnología IP comience a utilizarse no sólo para el transporte de datos, sino de voz e incluso vídeo. De este modo, en pocos años la tecnología IP se convierte en el nuevo paradigma para el despliegue de redes multiservicio. Como cabría esperar, los sistemas UMTS no son ajenos a esta evolución, siendo esta precisamente la clave de las Releases 4 y 5 [4].

En la Release 99, los dominios CS y PS del núcleo de red están sustentados por dos redes de conmutación diferentes: la de circuitos y de paquetes, respectivamente. El mantenimiento de dos redes separadas, herencia de la arquitectura de GSM/GPRS, no resulta adecuado ni desde el punto de vista técnico ni desde el económico. Esto conduce al 3GPP a plantear una nueva arquitectura para el núcleo de red que posibilite el soporte de servicios modo circuito y modo paquete sobre una única red de conmutación. Obviamente, una de las opciones con más fuerza es el empleo de IP como tecnología integradora, acuñándose el término de redes “Todo IP” (“All IP”).

El primer paso hacia un núcleo de red “All IP” se da en la Release 4 (ver figura 2.16), mediante la definición de la arquitectura para el dominio de circuitos independiente de la tecnología de transporte. Esta arquitectura, inspirada en las redes de telefonía IP, consiste esencialmente en reemplazar las centrales telefónicas y la red de circuitos que la interconecta por pasarelas unidas entre sí mediante un “backbone” IP. La nueva arquitectura del CS no impone el empleo de IP, siendo posibles otras alternativas (por ejemplo, ATM). En caso de optar por IP, sin embargo, se logra unificar las tecnologías de conmutación de los dominios CS y PS, alcanzándose una solución “All IP” para el núcleo de red.

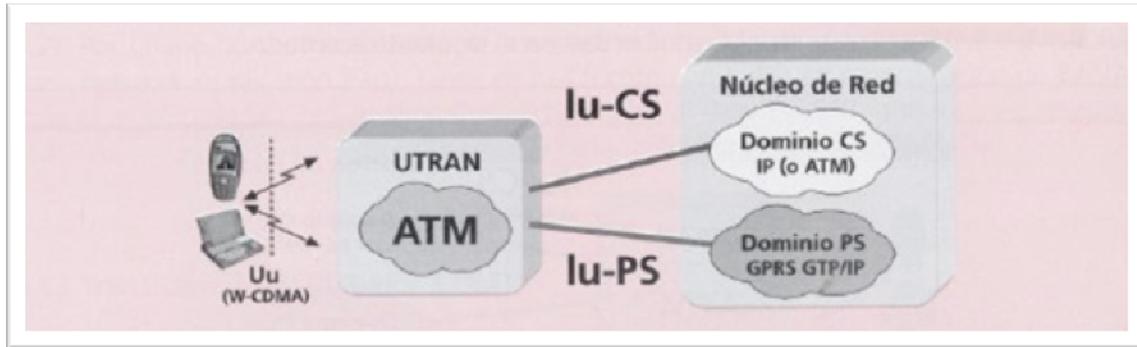


Figura 2-16 Principios de conmutación en UMTS Release 4

La principal motivación del dominio CS en el núcleo de red UMTS es el soporte de aplicaciones modo circuito, y especialmente el servicio telefónico. Sin embargo, se mencionó la creciente utilización del protocolo IP para el transporte de voz y vídeo. Ello da lugar a considerar la posibilidad de que sean los propios terminales UMTS los que efectúen el empaquetado y desempaquetado de voz y vídeo, y utilicen los servicios portadores modo paquete del dominio PS para intercambiarlos con sus interlocutores. Este es precisamente uno de los principales objetivos de la Release 5 de UMTS (figura 2.17).

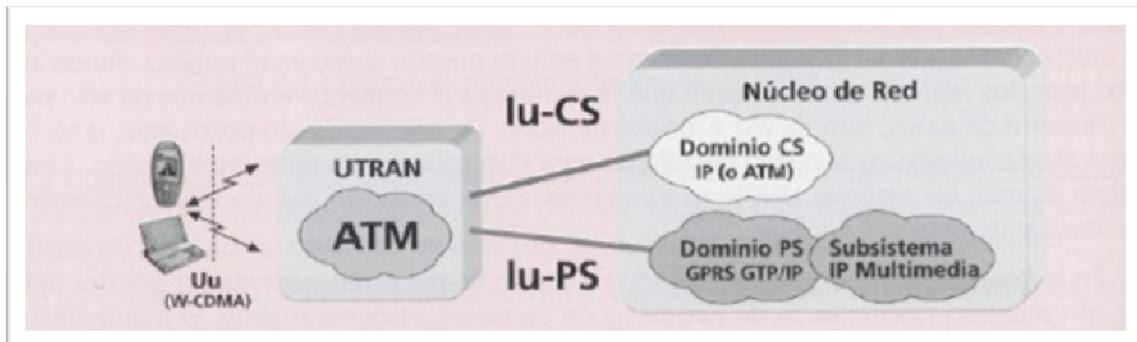


Figura 2-17 Principios de conmutación en UMTS Release 5

El interés por poder entablar llamadas telefónicas o sesiones de videoconferencia entre terminales conectados a una red IP ha dado lugar al desarrollo de soluciones normalizadas como los estándares H.323 de la UIT-T, y SIP (Session Initiation Protocol), del IETF (Internet Engineering Task Force). Debido a una mayor flexibilidad y sencillez de este último protocolo, el 3GPP ha decidido su empleo para el soporte de aplicaciones multimedia IP. La solución adoptada pasa por la inclusión en el núcleo de red de elementos especializados en el manejo de sesiones SIP. Esos elementos residen dentro del Subsistema IP Multimedia, IMS (IP Multimedia Subsystem), definido en la Release 5, y que puede considerarse como una extensión del dominio PS.

Con objeto de extender el concepto de arquitectura “All IP” también a la red de acceso, se trabaja en el desarrollo de una variante de UTRAN basada en IP. Debido a dificultades técnicas encontradas a la hora de especificar una red de acceso IP (IP-RAN), los trabajos han sido pospuestos para la Release 6. El escenario final resultante sería el que se muestra en la figura 2.18:

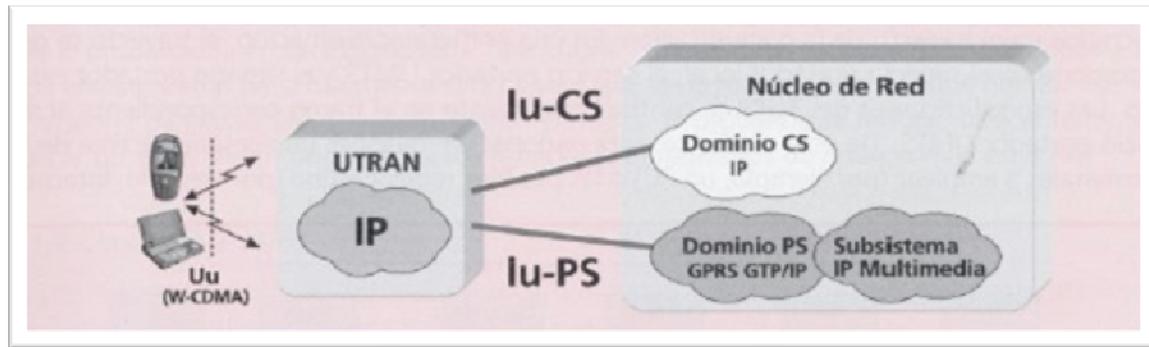


Figura 2-18 Principios de conmutación en UMTS Release 6

## 8 PLANIFICACIÓN RADIO

### 8.1 INTRODUCCIÓN

La planificación radio en UMTS tiene por finalidad realizar los cálculos de cobertura y capacidad con objeto de optimizar el despliegue de estaciones base para cumplir los objetivos de calidad de servicio establecidos por el operador. El proceso de planificación es diferente según la modalidad de explotación, en FDD o en TDD.

En TDD la metodología es diferente a la aquí descrita. Como, además, la explotación TDD parece que inicialmente, estará limitada a escenarios de interiores y zonas restringidas, la planificación será un proceso “a la medida”, que dependerá estrechamente de las zonas elegidas: su topografía, características de propagación y distribución del tráfico. Por todo ello, en lo que sigue, se presentara únicamente una metodología de planificación para el modo FDD [5].

Conviene advertir que siendo WCDMA una tecnología nueva y compleja, el proceso de planificación no está cerrado. En muchos casos, la complejidad del análisis teórico de los modelos del sistema radio es tal que no existen soluciones en forma de funciones matemáticas, por lo que debe recurrirse a la realización de simulaciones por ordenador o a efectuar simplificaciones para obtener las estimaciones de capacidad.

Por consiguiente, en este capítulo se presentará una metodología de planificación actual, con algunas simplificaciones que permitan obtener resultados coherentes.

Para comenzar, es importante poner de relieve las diferencias que existen entre la planificación de un sistema CDMA y un sistema TDMA.

En un sistema TDMA, como GSM, el primer paso en la planificación suele ser garantizar unos determinados objetivos de cobertura. A medida que aumenta la demanda de tráfico se incrementa la capacidad del sistema añadiéndose mas portadoras a los emplazamientos instalados, con el límite que impone el plan de frecuencias (es decir, la reutilización que permita garantizar una determinada calidad de servicio y el

número de frecuencias disponibles). Eventualmente, la capacidad puede incrementarse con estructuras celulares más densas.

En un sistema CDMA la situación es más compleja, ya que la cobertura, el tráfico cursado (no solo su volumen, sino el tipo - voz, datos -) y la distribución geográfica de los usuarios, están relacionados entre sí, como se verá más adelante en este capítulo. A medida que el tráfico por estación crece, los radios de cobertura efectivos de las células empiezan a disminuir. Esto quiere decir que, para garantizar unos objetivos de cobertura, un determinado despliegue solo será efectivo si el tráfico cursado se ajusta a los parámetros de diseño.

Cuando la demanda de tráfico supera el valor previsto, no es posible garantizar la cobertura. Este problema puede resolverse de distintas formas:

- Añadiendo una frecuencia más (con lo que el tráfico por portadora disminuye y se incrementa la cobertura)
- Aumentando la densidad de la estructura celular, mediante la inserción de nuevos emplazamientos.

Ambas soluciones tienen sus ventajas y sus inconvenientes.

Respecto de la primera, hay que tener en cuenta que el número de frecuencias disponibles para cada operador es escaso (tres como máximo). Instalar una segunda frecuencia en un emplazamiento supone, para los mismos objetivos de cobertura y grado de servicio, incrementar la capacidad del mismo en algo más de un 100%. Pero el principal problema radica en las dificultades que entraña para un sistema CDMA el traspaso entre distintas frecuencias, que exige trabajar en modo comprimido, por lo que conviene limitar en la medida de lo posible las zonas en las que debe producirse. Por tanto ésta no es una buena solución para proporcionar capacidad cuando el crecimiento de la demanda se produce en zonas puntuales (hot spots), pero puede serlo si el tráfico crece de forma más o menos uniforme en una zona más extensa.

El principal inconveniente de la segunda opción es su mayor coste económico. Por otro lado, el proceso de densificación debe realizarse procurando situar los nuevos emplazamientos allí donde se genera la demanda si se quiere optimizar la eficiencia espectral.

Una estructura jerárquica de capas (macro/microcelular) con distintas frecuencias, plantea los mismos problemas comentados anteriormente, además de otros adicionales, como es la posibilidad de que se produzcan interferencias de canal adyacente (si las frecuencias de cada capa lo son) cuando, por ejemplo, un móvil conectado a una macrocélula se encuentra muy próximo a una microcélula. En cualquier caso, parece conveniente que en una capa microcelular superpuesta con otra macrocelular se cursen servicios de alta tasa binaria con terminales lentos o estáticos, para los que la probabilidad de salir de la zona de cobertura sea pequeña.

## 8.2 CAPACIDAD DE LAS CÉLULAS

### 8.2.1 GENERALIDADES

La capacidad en CDMA está muy relacionada con la cobertura celular y debe analizarse por separado para los enlaces ascendente y descendente.

Los valores de capacidad y cobertura deben garantizar el cumplimiento del requisito de calidad de recepción en todas las ubicaciones del escenario de planificación. Es decir, el valor de la relación energía por bit/densidad de perturbación (interferencia múltiple más ruido térmico)  $E_b/N_0$  debe ser superior a un umbral que depende del tipo de servicio y de la tasa de errores de bit BER (Bit Error Rate). En consecuencia, para todos los enlaces ha de verificarse el conjunto de inecuaciones:

$$\frac{[P_{t,k} G_t / A_{ij}] / R_k}{[I_{int} + I_{ext} + N] / W} \geq \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_k \quad (3-1)$$

donde tenemos la potencia en transmisión del transmisor *i-ésimo* para el servicio *k-ésimo*, por la ganancia de antena del transmisor, dividido por la atenuación del trayecto y el régimen binario en transmisión, dividido todo por la interferencia mas el ruido, partido por la velocidad de chips.

El sistema (3-1) contiene una inecuación por cada tipo de servicio, terminal móvil y enlace (ascendente y descendente) presentes en el escenario de planificación. La relación de igualdad implica un control de potencia perfecto. En la práctica, se presupone esa igualdad incluyendo un margen aleatorio que modele el error de control de potencia.

Para que un enlace puede considerarse viable, la potencia transmitida debe ser menor que la máxima disponible. De no cumplirse esta condición, tal enlace deberá considerarse fuera de servicio. El objetivo de la planificación es asegurar que el conjunto de terminales móviles en situación de fuera de servicio sea inferior a un cierto porcentaje, fijado como objetivo de calidad y que depende del tipo de servicio.

Este proceso de cálculo es engorroso y no puede utilizarse para determinar los lugares óptimos de ubicación de las estaciones ni el radio celular. Por ello se hace uso de diversas simplificaciones para obtener de forma rápida el radio de cobertura de las células. Tales simplificaciones son adecuadas cuando el tipo de servicio es único. Si hay varias clases de servicios, suelen realizarse simulaciones para obtener el radio celular.

A continuación se presentara un modelo analítico simplificado para el cálculo de la capacidad, el cual se estudiara vinculado a la cobertura, por la íntima relación existente entre dos magnitudes CDMA.

### 8.2.2 CAPACIDAD DEL ENLACE ASCENDENTE

La capacidad del enlace ascendente, para un determinado objetivo de calidad, está determinada por:

- El nivel de interferencia generada por los terminales móviles que utilizan la misma frecuencia portadora, tanto en la propia célula como en otras. En función de esta interferencia se obtendrá un cierto número de usuarios y una capacidad de tráfico equivalente (Erlangs) que se denomina soft capacity.
- El número de elementos físicos (hardware) de procesamiento de canales disponibles en el receptor de la estación base (hard capacity).

En el primer caso la capacidad puede aumentar a costa de una degradación de la calidad del servicio.

Para introducir el tema y adquirir los conceptos fundamentales, se presenta a continuación un modelo sencillo de cálculo de capacidad en el enlace ascendente para un único tipo de servicio.

En los servicios de voz y en los de datos por paquetes, la transmisión no es continua, sino intermitente. Ello se recoge en el denominado factor de actividad  $\alpha$  que expresa el porcentaje de tiempo de transmisión en una sesión ( $\alpha < 1$ ). Suponiendo que hay  $K$  usuarios ocupados con llamadas en la célula y que el control de potencia es ideal (todos se reciben en la estación base con potencia  $P_r$ ) la potencia de interferencia interna que percibe un usuario es la resultante de la actividad de los  $K-1$  restantes:

$$I_{int} = P_r(K - 1)\alpha \quad (3-2)$$

La interferencia externa puede expresarse en función de la interna y del factor de reutilización  $f$ :

$$I_{ext} = (f - 1)I_{int} \quad (3-3)$$

Sustituyendo estas expresiones en (3-1) y despejando la potencia en recepción nos queda:

$$P_r = \frac{N}{G_p / (E_b / N_0) - (K-1)\alpha f} \quad (3-4)$$

siendo  $G_p$  la ganancia de procesamiento ( $G_p = W/R$ ). El valor máximo que puede alcanzar  $K$  es el que hace que la potencia de recepción tienda a infinito:

$$K_{max} = 1 + \frac{G_p / (E_b / N_0)}{\alpha f} \quad (3-5)$$

Se llama factor de carga de la red, al cociente:

$$X = \frac{K-1}{K_{max}-1} \quad (3-6)$$

También sabemos que el factor de ruido  $N = KT_G W F_r$  y  $G_p = W/R$ , sustituyendo todos estos datos en (3-4) y pasando a dBm, queda:

$$S(dBm) = -174 + 10 \log R(bfts/s) + \left(\frac{E_b}{N_0}\right) + F_r(dB) - 10 \log(1-X) \quad (3-7)$$

Para una potencia de transmisión y demás parámetros fijos (ganancias de antenas, pérdidas en elementos pasivos, etc.), la distancia de cobertura es función de la sensibilidad de recepción. Como ésta, según (3-7), depende de la capacidad a través de  $X$ , la citada expresión pone de manifiesto la relación capacidad-cobertura característica del enlace ascendente.

Aplicando (3-5) y (3-6) se puede expresar el incremento del umbral de ruido  $NFR$  como:

$$NFR = \frac{I_{int} + I_{ext} + N}{N} = \frac{P_r(K-1)\alpha_f + N}{N} = \frac{1}{1-X} \quad (3-8)$$

Esta expresión muestra la relación entre el  $NFR$  y el factor de carga. El  $NFR$  representa la degradación de la sensibilidad del receptor CDMA cuando hay  $K$  usuarios respecto a un receptor digital monousuario. Al incremento de potencia necesario para contrarrestar esta degradación se le llama margen de interferencia.

Se pueden generalizar las expresiones anteriores contemplando varios tipos de servicios correspondientes a otros tantos usuarios. Vamos a considerar que tenemos una célula con  $M$  usuarios de  $S$  servicios diferentes. La relación energía por bit/densidad de perturbación para el usuario  $j$ -ésimo es:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j = \frac{P_j/R_j}{[\sum_{i=1, i \neq j}^M \alpha_i P_i + N]/W} = \frac{P_j G_{pj}}{I_{total} - \alpha_j P_j} \quad (3-9)$$

De la expresión anterior se deduce:

$$P_j = \frac{I_{total}}{\alpha_j + K_{0j}} \quad (3-10)$$

siendo  $K_{0j} = G_{pj}/(E_b/N_0)_j$

Se define el factor de carga de conexión  $\lambda_j$  para la conexión del usuario  $j$ -ésimo como:

$$\lambda_j = \frac{P_j \alpha_j}{I_{total}} \quad (3-10)$$

Combinando las dos expresiones anteriores resulta:

$$I_{total} - N = I_{total} \sum_{j=1}^M \lambda_j \quad (3-11)$$

A la suma de los factores de carga de conexión de todos los usuarios se le denomina factor de carga del enlace ascendente  $X_{UL}$ .

$$X_{UL} = \sum_{j=1}^M \lambda_j = \lambda_1 M_1 + \lambda_2 M_2 + \dots + \lambda_S M_S \quad (3-12)$$

donde  $M_i$  es el número de usuarios del servicio  $i$ -ésimo y  $S$  es el número de servicios.

Por tanto a partir de (3-11) llegamos a que:

$$I_{total}(1 - X_{UL}) = N \quad (3-13)$$

por lo que el incremento del umbral de ruido será:

$$NFR = \frac{I_{total}}{N} = \frac{1}{1 - X_{UL}} \quad (3-14)$$

Se observa que esta expresión coincide formalmente con (3-8), siendo una generalización de ésta para el caso multiservicio.

Fijar un valor para el factor de carga del enlace ascendente (en función de la máxima interferencia admisible) nos permite a partir de la ecuación (3-12) obtener una amplia gama de posibilidades para el número de usuarios/tráfico (ya que los factores de carga de conexión son un dato).

Se amplía ahora la definición del factor de carga para que abarque la situación real multicelular. Para ello se introduce el factor de reutilización  $f$ , de manera que el factor de carga para el enlace ascendente queda, finalmente, expresado como sigue:

$$X_{UL} = f \cdot \sum_{j=1}^K \lambda_j \quad (3-15)$$

y el margen de interferencia será, como antes igual a  $-10 \log(1 - X_{UL})$ .

Por último vamos a dar la expresión de la intensidad de tráfico en Erlangs que puede cursarse en una célula en función de todos los parámetros que hemos comentado anteriormente.

La capacidad expresa la intensidad de tráfico que puede cursarse en una célula con un grado de servicio (GOS) caracterizado por una probabilidad de degradación  $P_{out}$  y para un cierto número de servidores  $K$ . Los modelos de tráfico proporcionan funciones de la forma:

$$P_{out} = T(A, K) \quad (3-16)$$

El método de Viterbi nos permite obtener la expresión de la intensidad de tráfico en función de todo lo demás. No vamos a entrar a describir el método de Viterbi ya que conlleva profundizar en la teoría matemática de la tecnología CDMA y se escapa de los objetivos de la planificación radio (para mayor información consultar [5]). La expresión es:

$$A = K'_o \frac{F(B, \sigma_c)}{\alpha \cdot f} \quad (3-17)$$

siendo  $\bar{\alpha}$  el valor medio del factor de actividad y:

$$K'_o = \frac{G_p}{(E_b / N_o) \lambda_j} X_{VL} \quad (3-18)$$

$$F(B, \sigma_c) = \frac{1}{\varphi_c} \left[ 1 + \frac{\varphi_c^3 \cdot B}{2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4}{\varphi_c^3 \cdot B}} \right) \right] \quad (3-19)$$

$$\varphi_c = e^{(\beta \sigma_c)^2 / 2}; \beta = \ln(10) / 10; B = \frac{[Q^{-1}(p_{out})]^2}{K'_o} \quad (3-20)$$

Donde  $\sigma_c$  representa la desviación típica de la fluctuación aleatoria log-normal de media 0 dB que modela la no idealidad del control de potencia.

### 8.2.3 CAPACIDAD DEL ENLACE DESCENDENTE.

De forma similar a como se ha procedido en el apartado anterior, se puede comenzar analizando la cobertura por su influencia sobre la capacidad.

Considérese un usuario genérico controlado en potencia desde la estación de base 1 que recibe interferencia (intracelular) desde esa base en un grado que depende del factor de ortogonalidad  $o$  que se supone variable entre 0 y 1 ( $o=1$  implica ortogonalidad perfecta). Cada usuario está registrado en una célula de tal forma que tienen asignada una fracción de potencia  $\beta \Phi_i$ , determinada en función de la calidad de la comunicación, donde  $\beta$  es la fracción de la potencia total destinada a los canales de tráfico (normalmente  $\beta$  es cercana a 0,9). Asimismo, le llega interferencia intercelular desde  $J$  estaciones adicionales.

Sea  $p_{ij}$  la potencia total máxima recibida por el usuario  $i$ -ésimo desde la base  $j$ -ésima. Deberá cumplirse que  $p_{i1} > p_{ij} (j = 2 \dots J)$ , ya que el móvil se adscribe a la estación desde la que recibe mayor potencia. Llamando  $p_1$  a la potencia radiada por la

estación base 1, se tendrá  $p_{i1} = P_1/I_{i1}$ , siendo  $I_{i1}$  la pérdida de transmisión para el usuario  $i$ -ésimo.

La relación energía de bit/densidad espectral de ruido para el usuario  $i$ -ésimo será:

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_i = \frac{p_{i1}\beta\phi_i/R_i}{(I_{int} + I_{ext} + N)/W} \quad (3-21)$$

La interferencia interna (intracelular) para el usuario  $i$ -ésimo, teniendo en cuenta el factor de ortogonalidad  $\alpha_i$  será:

$$I_{int} = (p_{i1} - \beta\phi_i p_{i1})(1 - \alpha_i) = p_{i1}(1 - \beta\phi_i)(1 - \alpha_i) \quad (3-22)$$

La interferencia externa se debe a señales recibidas desde  $J$  estaciones de base. Supuesto el peor caso (que estas señales están totalmente incorreladas) resulta:

$$I_{ext} = \sum_{j=2}^J p_{ij} = \sum_{j=1}^J p_{ij} - p_{i1} = (f_i - 1)p_{i1} \quad (3-23)$$

Sustituyendo estas dos últimas expresiones en (3-21) y despejando la potencia nos queda:

$$p_{i1} = \frac{N}{\beta\phi_i(k_i + 1 - \alpha_i) - (f_i - \alpha_i)} \quad (3-24)$$

donde  $k_i = G_{pi}/(E_b/N_o)_i$

Despejando de (3-21) el término de potencia total de interferencia  $(I_{int} + I_{ext} + N)$  nos queda:

$$I_{total} = p_{i1}\beta\phi_i k_i \quad (3-25)$$

Sustituyendo  $p_{i1}$  y dividiendo entre  $N$  nos queda el incremento del umbral de ruido para el usuario  $i$ -ésimo:

$$NFR_i = \frac{I_{total}}{N} = \frac{\beta\phi_i k_i}{\beta\phi_i(k_i + 1 - \alpha_i) - (f_i - \alpha_i)} \quad (3-26)$$

A partir del  $NFR$  obtenemos fácilmente el factor de carga para la conexión del usuario  $i$ -ésimo, como  $\lambda_i = 1 - 1/NFR$ :

$$\lambda_i = \frac{f_i - o_i - \beta\phi_i(1 - o_i)}{\beta\phi_i k_i} \quad (3-27)$$

El factor de carga medio para el enlace descendente será:

$$X_{DL} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \lambda_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{f_i - o_i - \beta\phi_i(1 - o_i)}{\beta\phi_i k_i} \quad (3-28)$$

Por lo tanto, el margen de interferencia medio valdrá:  $M_I = -10 \log(1 - X_{DL})$  y puede incluirse en la ecuación de Friis, para obtener la potencia media por usuario:

$$P = L_{media} - 174 + F_r(dB) + 10 \log R(bit/s) + \left( \frac{E_b}{N_o} \right)_{dB} + M_I(dB) \quad (3-29)$$

Siendo  $F_r$  el factor de ruido del receptor y  $L_{media}$  el valor medio de la atenuación en la célula.

Es importante recalcar que la ecuación anterior se ha obtenido para los valores medios (al contrario que la deducida para el enlace ascendente, que es válida en general cuando el error de potencia es nulo). Ello implica que el concepto de margen de interferencia para el enlace descendente sólo es aplicable cuando se define sobre valores medios. Es decir, no puede utilizarse para los cálculos en caso peor de los móviles que están al borde de la célula. Así pues, no tienen sentido hablar de sensibilidad mínima, sino más bien de potencia media transmitida por usuario.

Para la evaluación de la capacidad se sigue el método de Viterbi-Gilhausen, que no vamos a describir porque supone profundizar en los entresijos matemáticos de la tecnología CDMA y se escapa de los objetivos de este Proyecto (para mayor información consultar [5]). La expresión a evaluar es:

$$p_{out} < \underset{s>0}{Min} \exp\left\{ \alpha(1+h) \cdot A \cdot E_y \left[ e^{s(1-o+y)} - 1 \right] - s\beta K_o \right\} \quad (3-30)$$

donde  $K_o = (W/R)/(E_b/N_o)$ ;  $h$  expresa el porcentaje de móviles que se encuentran en situación de traspaso con continuidad;  $E_y$  es la esperanza matemática de la función es  $e^{s(1-o+y)} - 1$ , que se evalúa a partir de:

$$E_y(e^{sy}) = \sum_{y_i} e^{s y_i} \cdot Prob[y = y_i] \quad (3-31)$$

donde la variable aleatoria  $y_i$  es:

$$y_i = \sum_{j=2}^J \frac{p_{ij}}{p_{i1}} \quad (3-32)$$

Para el análisis de  $y_i$  se considera que la pérdida básica de propagación entre el móvil  $i$ -ésimo y la base  $j$ -ésima sigue una ley potencial con exponente 4, y que esta afectada de una variabilidad log-normal con desviación típica  $\sigma = 8 \text{ dB}$ .

La evaluación de (3-30) requiere disponer de distribuciones de la variable aleatoria  $y_i$ , para ello se utilizan histogramas, con los que se generan curvas de capacidad (tráfico de Erlangs) en función de la probabilidad de desbordamiento.

#### **8.2.4 ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE PROCESADORES DE CANAL**

En los apartados precedentes se ha estudiado la relación existente entre cobertura y capacidad. El planificador deberá optimizar ese par de parámetros partiendo de sus previsiones de tráfico y pronósticos de crecimiento. Una vez determinados los valores de esas magnitudes, utilizará los datos de cobertura para evaluar el número de células y de ubicaciones de estaciones de base para dar servicio a la zona de planificación. Los resultados de capacidad permiten establecer el dimensionamiento de los transmisores de estación de base, en cuanto al número de procesadores de canal o tarjetas hardware con que habrá que equipar el transceptor de la estación. El cálculo deberá realizarse de forma que la probabilidad de bloqueo debida a la carencia de un procesador para atender a un usuario de un determinado tipo de servicio, no sea superior a la probabilidad de desbordamiento para ese tipo de servicio utilizada para el cálculo de la capacidad que se acaba de presentar.

En este caso, no será posible tener en cuenta el factor de actividad del servicio si el elemento de canal utilizado por un usuario que no esté transmitiendo o recibiendo información en un determinado momento no puede ser reasignado dinámicamente para atender a otro usuario activo, sino que queda reservado mientras dura la comunicación.

El número de procesadores o elementos de canal debe estimarse a partir de los siguientes parámetros para cada tipo de servicio:

- Tráfico ofrecido por sector o célula.
- Probabilidad de bloqueo por carencia de elementos de canal.

### **8.3 COBERTURA CELULAR**

#### **8.3.1 INTRODUCCIÓN**

Las potencias requeridas y, por tanto, los alcances dependen del número de usuarios activos en la célula. Las células con pocos usuarios tienen coberturas más

amplias que aquellas que tienen un número elevado de usuarios. Como en el despliegue inicial de la red es necesario priorizar la cobertura sobre la capacidad, en una primera fase de la planificación habrá que prever radios de cobertura grandes (macrocélulas) que, posteriormente, se irán reduciendo a medida que la red esté más cargada. En este momento será necesario diseñar un mallado de estaciones más denso. Esto es así porque, en principio, sólo se dispone de una portadora. En realidad los operadores de UMTS podrán utilizar hasta tres portadoras. Pero estas frecuencias adicionales previsiblemente se emplearán para el establecimiento de estructuras celulares jerárquicas, como se indica más adelante.

Cuando el tráfico es muy elevado (extensión de los servicios multimedia) se hace preciso implantar una nueva capa de estaciones microcelulares con una portadora diferente de la usada en las macrocélulas. Esta será la encargada de cursar los servicios de alto régimen binario en zonas localizadas. Para crecimientos ulteriores, en puntos de muy alta densidad de tráfico (hot spots), se introducirá una capa de picocélulas con otra portadora diferente.

### 8.3.2 CÁLCULO DE LA COBERTURA

El diámetro de cobertura del sector puede obtenerse en función de la densidad de tráfico  $\rho$  (*Erlang/Km<sup>2</sup>*).

Supuesto que la cobertura es sectorizada y el diámetro del sector es  $d$ , se tiene:

$$d = \sqrt{\frac{8A}{3\sqrt{3}\rho}} \quad (3-33)$$

donde  $A$  es la intensidad de tráfico que se ha calculado en el apartado anterior.

Después hay que comprobar que el enlace es viable desde el punto de vista radioeléctrico, se tomará la distancia más pequeña de la obtenida para todos los servicios. Con este valor se puede calcular la superficie de la célula y el número de estaciones base necesarios.

Seguidamente deben distribuirse los emplazamientos por la zona de estudio, de manera que la separación entre ellos coincida aproximadamente con las distancias calculadas. Obviamente, las ubicaciones deben respetar los condicionantes del entorno: calles, plazas, así como las limitaciones interpuestas por normas urbanísticas, necesidades de permisos, etc. Esto último es especialmente importante cuando el cálculo se realiza de forma automática, mediante algún algoritmo geométrico ya que entonces será necesario un proceso posterior de ajuste manual de las localizaciones obtenidas.

## 8.4 BALANCES DE ENLACES

Los balances de enlaces permiten determinar los niveles de potencia y alcances en las células. En UMTS los balances son similares a los que se plantean en GSM, con la salvedad de que se incluye un margen para contrarrestar la interferencia múltiple. Se preparan los balances para el enlace ascendente y descendente de manera independiente.

Es importante conseguir un equilibrio razonable entre ambos enlaces. Cuando los enlaces están equilibrados, se minimizan las interferencias y los problemas de traspasos que se producirían si las coberturas en cada sentido fueran muy diferentes.

A continuación se enumeran y comentan los parámetros más importantes que intervienen en los balances de enlaces.

1. Tasa o velocidad binaria (R): es la tasa de transmisión del codificador, en bits por segundo. Determina la ganancia de procesado, de forma que cuanto menor es la tasa binaria mayor es dicha ganancia. Los codificadores de voz pueden reducir su tasa binaria en los periodos de silencio. De esta forma, mejoran su ganancia de procesado, por lo que la potencia de transmisión necesaria es menor, disminuyendo así la interferencia producida en la red. Las tasas binarias típicas de UMTS son: 8 Kbit/s o 12 Kbit/s para voz, 64 Kbit/s, 144 Kbit/s, 384 Kbit/s y 2048 Kbit/s para datos.

2. Potencia de transmisión: para el enlace ascendente, es la potencia nominal de los equipos móviles. Se ha previsto utilizar terminales de usuario de clase 4 para servicios de voz y datos. Éstos tienen una potencia máxima de 21 dBm (125 mW).

Para el enlace descendente, es la potencia total disponible en el Nodo B (estación base). Esta potencia se reparte entre los canales piloto y de control (que toman alrededor del 5 al 10% de la misma) y los canales de tráfico. La potencia máxima para las coberturas macrocelulares es de 43 dBm. Para micro y picocélulas es de 30 dBm. La potencia asignada a los canales de tráfico es variable en función de la interferencia que reciben los móviles desde otras bases. En los balances se trabaja con un valor de caso peor, debiéndose ajustar la potencia máxima a fin de equilibrar los enlaces.

3. Factor de actividad vocal: es un dato estadístico, ya que depende del comportamiento humano. El factor de actividad proporciona una mejora en la capacidad y cobertura en el caso del servicio de voz. Esta mejora es debida a la reducción del nivel de interferencia que supone el utilizar codificadores de voz de tasa variable, los cuales reducen la velocidad de los bits de información en momentos de baja actividad o en periodos de silencio. De esta forma, la relación señal a ruido necesaria en el receptor para demodular la señal correctamente es menor, y por tanto, la potencia de transmisión de la estación base se reduce. En una conversación normal se considera que la señal está activa durante el 35 al 50% del tiempo. Con la influencia del DPCCH, el factor de actividad vocal estaría comprendido entre 0,4 y 0,7. En servicios de datos con conmutación de circuitos el factor de actividad es 1, ya que la utilización del canal es continua.

4. Ganancias de las antenas en transmisión y recepción: se supone una ganancia de las antenas del terminal de 0 dBi, tanto en transmisión como en recepción. En el caso del Nodo B, esta ganancia depende del tipo de antenas utilizadas. Un valor típico es de 18 dBi.

5. Pérdidas en los cables y conectores en transmisión y recepción: en la estación de base dependen de la longitud y tipo de los cables. En el terminal móvil se suponen iguales a 0 dB.

6. Factor de ruido del receptor: los receptores de los Nodos B utilizan amplificadores de bajo ruido con valores típicos del factor de ruido de 2 dB. Para los receptores de los terminales móviles este valor es de unos 8 dB.

7. Carga de la célula (%): valor estimado del factor de carga. Generalmente está comprendido entre el 50 y 65%.

8. Factor de ortogonalidad: en el enlace descendente los códigos utilizados para ensanchar el espectro de la señal de cada canal son ortogonales. Sin embargo, se producen imperfecciones en la ortogonalidad entre los códigos de un mismo sector, debido a la propagación multitrayecto, que produce réplicas con retardo en las componentes de la señal. Un valor típico de reducción de la capacidad de la célula debida a la pérdida de ortogonalidad, en el enlace descendente es 0,4, aunque en microcélulas suelen utilizarse valores inferiores. En el enlace ascendente los códigos no son ortogonales, por lo que este factor vale 0. Este factor solo está justificado teóricamente en el enlace descendente, si bien es costumbre incluirlo también en el ascendente.

9. Margen de interferencia: necesario para compensar las interferencias producidas dentro de la célula, entre los distintos usuarios, como por los usuarios de otras células. Se calcula mediante la expresión  $-10 \log(1-X)$  donde  $X$  es el factor de carga de la célula en tanto por uno.

10. Relación  $E_b/N_0$  objetivo: la relación  $E_b/N_0$  se obtiene dividiendo la energía por bit  $E_b$  entre la densidad espectral de la perturbación. El parámetro  $E_b/N_0$  está muy relacionado con la calidad de los canales de tráfico y determina la capacidad y cobertura de las células UMTS. Los valores objetivo que se utilizan en el diseño de redes son los que garantizan el cumplimiento de los requisitos de calidad ( $BER < 10^{-3}$  para voz y  $BER < 10^{-6}$  para datos).

11. Desviación típica del control de potencia: el control de potencia es un mecanismo clave en sistemas WCDMA, para asegurar que la estación de base reciba a todos los usuarios de su área de cobertura con el mismo nivel de potencia, cualquiera que sea la distancia de estos usuarios a la estación. Este nivel de potencia debe ser el mínimo necesario para mantener el objetivo de calidad del enlace. Niveles de potencia mayores añaden interferencia innecesaria al enlace WCDMA y, por tanto, reducen la capacidad. Por eso, cuanto más preciso sea el control de potencia, mayor será la capacidad del sistema. La desviación típica del control de potencia cuantifica las imperfecciones de dicho control. Un valor usual para este parámetro es 2,4 dB.

12. Valor  $E_b/N_0$  efectivo: es el valor de  $E_b/N_0$  necesario en el receptor para cumplir los requisitos de calidad especificados. Este valor tiene en cuenta las imperfecciones del control de potencia a través de la desviación típica del control.

13. Sensibilidad de terminales y estaciones de base: los estándares elaborados por el ETSI utilizan tipos de entornos radio normalizados, sobre los que se especifica la calidad de servicio que, necesariamente, han de cumplir los equipos (ya sea de la parte de infraestructura o terminales). Estos entornos incluyen ámbitos urbanos, rurales y suburbanos, con distintas velocidades de los móviles. Los valores de sensibilidad están relacionados con los valores de  $E_b/N_0$  de acuerdo con la expresión:

Sensibilidad RX = Ruido térmico + Factor de ruido RX +  $E_b/N_0$  RX + Tasa binaria + Margen de interferencia RX.

14. Ganancia por traspaso con continuidad: SHO (Soft Handover). En comunicaciones móviles, cuando un usuario se mueve del área de cobertura de una estación base al área de cobertura de otra, tienen lugar un traspaso del enlace de radio entre esas estaciones. El sistema WCDMA soporta diferentes tipos de traspaso; más usual es el conocido como traspaso con continuidad. En el enlace descendente, el móvil utiliza el receptor RAKE para demodular las señales de dos o más estaciones base distintas. Las señales se combinan para dar lugar a una señal compuesta de mayor calidad. En el enlace ascendente, la señal transmitida por el móvil se recibe en dos estaciones base que la demodulan por separado y envían las tramas al controlador de estaciones base, RNC, donde se realiza su combinación. Esto proporciona una ganancia, conocida como macrodiversidad en los enlaces descendente y ascendentes, aumentando la calidad de la señal recibida en los dos extremos.

15. Ganancia por diversidad: la diversidad es un procedimiento mediante el cual se obtienen copias de la señal parecidas, de tal forma que se selecciona aquella que sufre menos desvanecimiento por multitrayecto. Cuantas más copias de la señal se tengan para seleccionar, mayor ganancia se obtendrá y cuanto menos se parezcan estas copias desde el punto de vista del comportamiento de los desvanecimientos (cuanto menor sea su correlación), mejor será el efecto de la diversidad.

16. Margen log-normal: los cálculos del balance se han ido realizando para valores medios. Para asegurar la cobertura en un L% de las ubicaciones durante un T% del tiempo debe añadirse un margen. Como se supone que el desvanecimiento lento espacio-temporal tiene una variación log-normal, el margen  $M_{LN}$  es:

$$M_{LN} = \left\{ [k(L)\sigma_L]^2 + [k(T)\sigma_T]^2 \right\}^{1/2} \quad (3-34)$$

Generalmente suele despreciarse la variación temporal, por lo que:

$$M_{LN} = k(L)\sigma_L \quad (3-35)$$

$k(L)$  se obtiene a partir de la distribución gaussiana inversa. Para el valor usual  $L=90\%$ , resulta  $k(L)=1,28$ ;  $\sigma_L$  es la desviación típica de la distribución log-normal de la variabilidad de la atenuación de propagación (o de la potencia recibida) con las ubicaciones. Para la banda de 2000 MHz de UMTS suele tomarse;  $\sigma_L=8$  dB, por lo que

para  $L=90\%$ ,  $M_{LW} = 10,2$  dB. Si se emplean procedimientos de cálculo más precisos la incertidumbre de la predicción es menor y  $M_{LW}$  puede tomar un valor más reducido.

17. Pérdidas adicionales: se incluyen aquí las pérdidas por penetración en edificios y las asociadas a la proximidad del terminal móvil al cuerpo del usuario. En el primer caso, sobre todo en medios urbanos, se prevé la cobertura UMTS desde las macrocélulas no solamente en la calle, sino dentro de edificios o de vehículos. Los valores usuales de pérdidas de penetración son: 15 dB para zonas suburbanas, 10 dB para áreas rurales y 5 dB para el interior de vehículos. Las pérdidas debidas al cuerpo del usuario se estiman en 2 o 3 dB.

18. Atenuación compensable: se calcula mediante las relaciones indicadas en la Tabla de balances. Sirve de base para la obtención de la distancia de cobertura. Debe ser similar para el enlace ascendente y para el descendente.

19. Distancia de cobertura: aplicando los modelos de predicción de propagación, según el tipo de entorno que proceda, se obtienen la distancia de cobertura.

Si realizáramos balances de enlaces para UMTS y DCS, veríamos que la atenuación compensable en UMTS es mayor que en DCS y, por lo tanto, también lo es la distancia de cobertura de las células UMTS. Sin embargo, puede comprobarse que la diferencia se reduce cuando aumenta la carga de la célula UMTS. En consecuencia, puede decirse que en ambientes rurales (con baja capacidad), la cobertura proporcionada por una estación base UMTS es mayor que una estación DCS, pero no así en medios urbanos.

## **8.5 SIMULACIONES DE CAPACIDAD/COBERTURA EN UMTS**

### **8.5.1 INTRODUCCIÓN**

Cuando se manejan tráfico mixtos en un entorno celular WCDMA, las evaluaciones analíticas de capacidad y cobertura son muy complicadas. Puede hacerse un cálculo simplificado empleando los factores de carga como se ha expuesto en el apartado 2, pero si se desea una mayor precisión es más conveniente realizar simulaciones del comportamiento del enlace. Las simulaciones permiten también estudiar el fenómeno de la “respiración celular” y la influencia de los distintos parámetros sobre la probabilidad de desbordamiento, en los enlaces ascendentes y descendentes. En el planteamiento de las simulaciones hay que establecer metodologías de asignación celular y control de potencia para la adscripción de los móviles y la descripción de la dinámica temporal.

Seguidamente se describen, en general, los procesos de simulación.

### 8.5.2 ASIGNACIÓN CELULAR Y CONTROL DE POTENCIA

Las simulaciones deben basarse en algún método de asignación de los terminales móviles a las estaciones base, que sea reflejo de la adscripción real. En el sistema IS-95, se utiliza un algoritmo de asignación por máxima potencia recibida en el canal piloto descendente. En el modelo que se describe en el apartado 3.4.4, se considera una sola célula, considerando el efecto de las demás mediante la eficiencia de reutilización.

Una vez especificada la asignación, la determinación de las potencias de transmisión necesarias para que cumplan los objetivos de calidad para todos los móviles equivale a la solución de un conjunto de ecuaciones similares a las (3-1), que, para el enlace ascendente, se describen como sigue:

$$\sum_{i \neq k} \frac{P_{m,k}}{\alpha_{m,i} P_{m,i} + I_{e,m} + N} = \left( \frac{E_b}{N_o} \right) \frac{R_k}{W} \quad (3-36)$$

donde:

$\alpha_{m,i}$ : variable aleatoria que tiene en cuenta la posible actividad discontinua de la fuente (servicios de voz o datos por paquetes) y toma valores 1 ó 0 según el móvil esté o no activo. Su valor medio es el factor de actividad para el usuario  $i$ -ésimo.

$P_{m,i}$ : potencia de recepción, en la base  $m$ -ésima, del usuario  $i$ -ésimo.

$I_{e,m}$ : interferencia externa, generada por las restantes células sobre la célula  $m$ -ésima. Depende de las potencias en esas células. Como consecuencia de esa dependencia (3-36) es un sistema lineal de ecuaciones.

Al resolver los sistemas de ecuaciones pueden darse 3 situaciones:

- Que las potencias necesarias tomen valores positivos y alcanzables. En ese caso es posible lograr la calidad objetivo para todos los móviles de la red.
- Que alguna solución tome un valor superior al máximo de potencia transmitida, en cuyo caso será imposible alcanzar los objetivos de calidad.
- Si alguna solución toma un valor negativo se dice que el sistema tiene una limitación intrínseca y ni con potencias arbitrariamente grandes se puede alcanzar el objetivo de calidad.

### 8.5.3 EFFECTO DE LA VARIACIÓN TEMPORAL

Durante el funcionamiento, se producen variaciones en las condiciones de propagación para los distintos usuarios (posiciones de estos, desvanecimientos), en el número de los mismos, en el tipo de servicio con el que acceden al sistema, en la actividad de fuente y en el valor exigido de relación energía por bit/densidad de perturbación. Estas variaciones pueden conducir a que no se puedan cumplir los

objetivos de calidad, en ese caso se dice que el sistema está en situación de fuera de servicio o desbordamiento. Es importante apreciar que para un mismo número de usuarios, el sistema puede encontrarse en cada momento en una situación de desbordamiento o no, debido a la variabilidad anteriormente mencionada. Como consecuencia, el problema debe tratarse estadísticamente: para cada número de usuarios existirá una cierta probabilidad de desbordamiento que será una función creciente de dicho número. El límite de capacidad del sistema viene impuesto por la condición de que esta probabilidad no supere un umbral prefijado.

En la práctica, el mecanismo de control de potencia no es perfecto, sino que la señal que se exige en recepción a cada móvil fluctúa en torno al valor ideal. Además la relación  $E_b/N_0$  objetivo para cada móvil depende de las condiciones específicas de propagación (entorno multitrayecto, velocidad de desplazamiento). Como consecuencia, la relación  $E_b/N_0$  objetivo, en un momento dado, para dos móviles con el mismo tipo de servicio será, en general, diferente. Medidas realizadas en el sistema IS-95 permiten caracterizar esta variación en la relación objetivo mediante una distribución gaussiana, en unidades logarítmicas, con una desviación típica de unos 2,5 dB.

#### 8.5.4 PLANTEAMIENTO DE LAS SIMULACIONES

Con objeto de simplificar las simulaciones y obtener resultados independientes de la estructura geográfica de la red considerada (posición de estaciones base, tipo de entorno), se considera un escenario sencillo, con una sola célula. La reducción de capacidad por efecto de la interferencia de las restantes células del sistema se describe mediante el factor de reutilización de la red celular WCDMA. Diversos análisis de interferencia en sistemas celulares CDMA proporcionan para este parámetro valores comprendidos entre 1,3 y 1,7. Puede tomarse un valor 1,6 como representativo de un entorno desfavorable. El análisis se puede aplicar a células omnidireccionales o sectorizadas.

Considérese una célula (sector) de referencia que está atendiendo a K usuarios. Para cada uno de ellos se tienen una relación  $E_b/N_0$  objetivo, igual a la requerida para ese servicio más un término aleatorio que representa la variación por control de potencia no ideal. Resolviendo el sistema de ecuaciones (3-36) se obtienen las potencias en recepción, que nos permiten obtener la potencia de transmisión necesaria. En función de los valores obtenidos, se determina si la red, en el instante considerado, se encuentra o no en situación de desbordamiento. Promediando un número suficiente de realizaciones se estima la probabilidad de desbordamiento. La atenuación tendrá una componente determinista dependiente de la distancia del móvil a la base y otra componente aleatoria por efecto de sombra. La distancia para la cual la probabilidad de desbordamiento es igual a un valor umbral prefijado  $P_{out}$ , se denomina distancia de cobertura, y depende del número y distribución de los usuarios. En el enlace ascendente, esta distancia será la misma para todos los móviles pertenecientes a la misma clase. Para el descendente, la distancia de cobertura es la misma para todos los móviles.

Con estos cálculos obtenemos curvas cobertura-capacidad. Estas curvas permiten determinar la cobertura de la célula en unas condiciones dadas, o bien la capacidad de una célula con una cobertura especificada.

Como consecuencia de las distintas características de los enlaces ascendente y descendente, deben analizarse ambos por separado para determinar cuál es el que limita las prestaciones de la red en unas condiciones determinadas. En general, en situaciones de tráfico simétrico el enlace limitante suele ser el ascendente. En efecto, en el descendente se dispone de mayor potencia por móvil en la estación de base y existe una ortogonalidad parcial que contribuye a reducir la interferencia. Sin embargo, para ciertas aplicaciones de datos como el acceso a Internet, el tráfico descendente puede ser muy superior al ascendente, con lo que el enlace crítico será previsiblemente, el descendente.

En consecuencia, como también se hizo en el estudio analítico, se tratan por separado ambos tipos de enlaces.

■ **Enlace ascendente:** aquí el desbordamiento se produce de forma independiente para cada móvil, cuando no dispone de suficiente potencia de transmisión. Esto permite un análisis del caso peor, suponiendo que el móvil está situado en el borde de la zona de cobertura e ignorando la situación de los demás, ya que sólo es necesario conocer el nivel de potencia recibida. Así, la simulación se basa en calcular los niveles de potencia necesarios en recepción, para los cuales no es preciso conocer la posición de los móviles en la célula. A continuación, se selecciona un móvil, y se supone que está situado en la posición más desfavorable, es decir, con la atenuación mediana máxima prevista para la célula (incluyendo el efecto de las pérdidas por penetración en interiores). La atenuación total se obtiene sumando un término de desvanecimiento por sombra. A partir de la potencia necesaria en recepción y la atenuación se calcula la potencia de transmisión necesaria, teniendo en cuenta las ganancias de las antenas y pérdidas en transmisión y recepción (cables, atenuación del cuerpo humano), y se determina si el móvil está o no en situación de desbordamiento. El resultado de la simulación es, por tanto, la probabilidad de desbordamiento en el límite de cobertura de la célula.

El efecto de la ganancia por traspaso con continuidad en el enlace ascendente se modela suponiendo que el móvil de referencia, al encontrarse en el borde de la célula, está en comunicación con una segunda base, con una atenuación mediana en general distinta (mayor) que respecto a la de referencia. Los desvanecimientos respecto a cada base se generan de forma independiente, con distribución normal (en dB), y se suman a las atenuaciones medianas para obtener las pérdidas totales, eligiéndose la menor de los dos (macrodiversidad por selección).

■ **Enlace descendente:** en el enlace descendente debe tenerse en cuenta, explícitamente, la posición de los móviles, pues, al contrario que en el ascendente, donde las limitaciones de las potencias de transmisión son independientes, la potencia que requiere un móvil es determinante para las características del enlace con los demás móviles, al existir una limitación total transmitida por la base. Así, un móvil tendrá menor probabilidad de desbordamiento cuanto menor atenuación experimenten (más cerca de la base estén) los demás. En la simulación, los móviles se distribuyen aleatoriamente, con una densidad de probabilidad uniforme y la atenuación mediana se calcula como una componente determinista más un desvanecimiento log-normal y un posible término de penetración en interiores. Este último se selecciona generando para

cada móvil una variable aleatoria discreta que indica si se encuentra o no en el interior de un edificio y cuya media representa la proporción prevista de móviles en interiores. Calculando las potencias de recepción y de transmisión de forma análoga a como se hizo en el enlace ascendente, se determina si la potencia total supera o no la máxima potencia disponible en la base para los canales de tráfico. De esta forma, se obtiene la probabilidad de que exista desbordamiento, suceso que, en este caso, es simultáneo para todos los móviles y característico de toda la célula (no del borde de la misma).

La ganancia por traspaso con continuidad en este enlace se tiene en cuenta calculando la atenuación (mediana+desvanecimientos log-normales independientes) hasta cada una de las bases de la primera corona de células vecinas (que son prácticamente las únicas con las que el móvil puede estar en esta situación de traspaso) y, en cada momento se selecciona la mejor, como en el enlace ascendente. Sin embargo, en la realidad puede ocurrir que alguna de estas bases vecinas no pueda atender al móvil por carecer de procesadores de canal disponibles en ese momento (bloqueo), o bien por no tener suficiente potencia de transmisión. En la planificación de sistemas CDMA se dimensiona un porcentaje de procesadores para atender solicitudes de traspaso de otras células vecinas, de modo que la probabilidad de bloqueo es pequeña, pero debe considerarse la segunda causa anteriormente mencionada, esto es, la probabilidad de desbordamiento en la célula vecina. Así, en la simulación se define la probabilidad de que una célula vecina no pueda sustentar el traspaso móvil.

La ortogonalidad parcial en el enlace descendente puede incluirse en el modelo mediante el factor de ortogonalidad parcial para señales correspondientes a usuarios pertenecientes a la célula bajo análisis.

Respecto a la utilización del modelo de propagación en las simulaciones, obsérvese que en el enlace ascendente se especifica el valor de atenuación mediana en el borde, y el método de cálculo de la atenuación de propagación simplemente traduce ese valor en un radio celular máximo. Por el contrario, en el descendente el modelo de propagación interviene directamente en la simulación, ya que los móviles se distribuyen por toda la célula y deben calcularse sus atenuaciones hasta la base.