

2. Fundamento teórico.

2.1. Comunicaciones móviles.

2.1.1. Introducción.

El Reglamento de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) define el servicio móvil como un servicio de radiocomunicaciones entre estaciones móviles y estaciones terrestres fijas, o entre estaciones móviles únicamente [3].

Se distinguen tres tipos de servicios móviles: terrestre, marítimo y aeronáutico. Cada uno de estos servicios puede prestarse mediante medios terrenales exclusivamente o utilizando repetidores espaciales (satélites). En este proyecto se aborda el diseño de una red móvil que proporcione servicio móvil terrestre, así que nos centraremos en este caso.

Los sistemas de radiocomunicaciones móviles permiten el intercambio de información de todo tipo (voz, datos, vídeo) entre terminales móviles (a bordo de vehículos o en posesión de personas) y terminales fijos (centros de control, teléfonos) mediante ondas radioeléctricas, con unas características de calidad determinadas. En los sistemas móviles se aprovecha, plenamente, el carácter inalámbrico de las comunicaciones radioeléctricas y la movilidad inherente, lográndose enlaces de gran ubicuidad, versatilidad y flexibilidad.

Como en cualquier sistema de telecomunicación, en los sistemas móviles se transmite información de usuario o tráfico e información adicional necesaria para el establecimiento, liberación y supervisión de las llamadas, así como para la protección de la información frente a las perturbaciones. A esta información adicional se le llama señalización. La señalización puede intercambiarse junto al

tráfico (señalización por canal asociado) o utilizando recursos específicos (señalización por canal común).

A la superficie geográfica dentro de la cual los terminales pueden establecer comunicaciones con una estación fija, y eventualmente entre sí, se le llama zona de cobertura. Por lo tanto, los sistemas de comunicaciones móviles han de diseñarse de forma que puedan establecerse enlaces desde cualquier lugar de la zona de cobertura. Esto obliga a elegir cuidadosamente la ubicación de las estaciones fijas.

2.1.1.1. Composición de un sistema de comunicaciones móviles.

Todo sistema de comunicaciones móviles está formado por los siguientes elementos:

A) Estaciones fijas (FS): Una estación fija es una estación radioeléctrica no prevista para su utilización en movimiento. Existen varios tipos de estaciones fijas:

- Estación base (BS): Es una estación radioeléctrica fija, cuyo funcionamiento se controla directamente desde una unidad de control situada en un punto especificado. El control puede ser local o remoto, mediante líneas telefónicas o radioenlaces. Las estaciones base tienen como característica primordial el de ser fuentes y destinatarias de tráfico y de señalización. Están constituidas por equipos transceptores, sistemas radiantes y elementos de conexión entre estos.

- Estación de control (CS): Es una estación fija que se utiliza para gobernar el funcionamiento de otra estación radio, normalmente una BS o repetidora.

- Estaciones repetidoras (RS): Son estaciones fijas que retransmiten amplificadas las señales recibidas. Sirven para comunicar estaciones bases con estaciones móviles que están fuera de la zona de cobertura de estas. Se emplean para conseguir una gran cobertura radioeléctrica, por lo que se suelen ubicar en lugares altos. También se usan para el relleno de zonas de sombra en la cobertura de una estación base o para proporcionar cobertura en escenarios difíciles, tales como túneles, estacionamientos subterráneos, etc.

B) Estaciones móviles (MS): Una estación móvil es una estación radioeléctrica del servicio móvil prevista para su utilización en movimiento. El término incluye a los equipos portátiles o de mano, que son aquellos que acompañan al usuario, y a los denominados equipos transportables, que pueden instalarse temporalmente en vehículos (coches o motocicletas) y llevarse también a mano. A las estaciones móviles de un sistema suele llamárseles genéricamente terminales.

Se denomina enlace descendente DL (downlink) al sentido de comunicación de estación fija a terminal móvil. El enlace ascendente UL (uplink) corresponde al sentido de comunicación de terminal móvil a estación fija. La distancia de cobertura en el DL se denomina *alcance*, en el UL *retroalcance*. Hay que intentar que el alcance y el retroalcance sean iguales. Para ello es necesaria la adopción de diversas actuaciones de ingeniería, ya que las estaciones son de naturaleza y características distintas.

C) Equipos de control: En los sistemas de comunicaciones móviles, en general, el conjunto de equipos de control lo forman los dispositivos necesarios para el gobierno de las estaciones de base, la generación y

recepción de llamadas, localización e identificación de usuarios, de equipos y vehículos, transferencia de llamadas a red telefónica, señalización de canales, etc. Se incluyen también aquí los terminales de datos (pantallas, impresoras), miniordenadores y controladores.

2.1.1.2. Planificación de la cobertura en los sistemas móviles.

Se denomina zona de cobertura de la estación base al terreno en torno a dicha estación en la que la señal disponible para los móviles tiene un valor superior al umbral mínimo de funcionamiento. Los sistemas móviles son de cobertura zonal, debiéndose, en teoría, proporcionar servicio en cualquier punto de la zona de cobertura. Esto implica una multiplicidad de trayectos posibles con variadas situaciones de propagación. De aquí que el problema de la predicción de la zona de cobertura de las estaciones del servicio móvil o, a la inversa, la parametrización de esas estaciones en cuanto a potencia, características del sistema radiante, etc., para proporcionar una cobertura determinada, sea de primordial importancia.

El presente Proyecto Fin de Carrera pretende precisamente eso, parametrizar un número a priori desconocido de estaciones base, para proporcionar cobertura a una determinada región. Este problema lo abordaremos en el capítulo 3, de forma inversa. 1) Colocaremos las estaciones base de manera regular por todo el terreno, con una configuración estándar, 2) Calcularemos la cobertura y otros parámetros de la red y 3) Rediseñaremos la red de manera acorde a los resultados de esos cálculos. Repetiremos los pasos 2 y 3 hasta obtener los resultados deseados. En este apartado comentaremos como se realizan los cálculos del paso 2, que parámetros de las estaciones bases determinan la cobertura y que otros efectos influyen en el diseño de un sistema de comunicaciones móviles.

Hoy día, el uso de herramientas informáticas agiliza los cálculos de la cobertura. Se utilizan programas que hace uso de cartografías digitales, dividen el terreno en píxeles y calculan el nivel de señal en cada uno de ellos, haciendo una representación de los distintos niveles según un código de colores. Estas representaciones se denominan mapas de cobertura y son fundamentales en la planificación radioeléctrica de una red móvil.

Los trayectos de propagación entre base y móviles resultan afectados de modo variable por el terreno, por lo que la pérdida de propagación tiene un carácter aleatorio. De esta forma se habla de cobertura en un sentido estadístico. Se utilizan dos grados de calidad estadística de cobertura: el porcentaje de emplazamientos, que indica el tanto por ciento de lugares dentro de la zona de cobertura teórica en que cabe esperar que exista enlace radioeléctrico, y el porcentaje de tiempo, que expresa el tanto por ciento del tiempo en que se espera existirá el enlace. En el primer caso se distingue entre cobertura zonal (se considera todo el área en torno a la estación base) y perimetral (en este caso se considera sólo el perímetro o límite de la cobertura teórica).

El radio de cobertura de una estación base tiene una estrecha dependencia con la altura media de la antena de dicha estación respecto al terreno circundante. Por esto se busca siempre lugares altos para la colocación de las estaciones bases (montes, edificios elevados,...). En muchos casos, aumenta más el alcance incrementando la altura de la antena que elevando la potencia de la transmisión.

Debido a la reducida altura de antena de las estaciones móviles, éstas muchas veces no serán visibles desde la estación base. Sin embargo, la comunicación es posible debido a múltiples reflexiones y difracciones de las ondas y a su poder de penetrabilidad, que es consecuencia de las altas frecuencias utilizadas. Este tipo de propagación, denominada propagación multitrayecto, genera varios caminos radioeléctricos entre transmisor y receptor y, aunque

hace posibles las comunicaciones, produce efectos de dispersión temporal y desvanecimiento selectivo en las señales. Otro efecto que es necesario compensar, es el desvanecimiento selectivo que se produce por el desplazamiento de frecuencias (desplazamiento Doppler) consecuencia del movimiento de los terminales móviles a bordo de vehículos.

2.1.2. La Interfaz radio.

2.1.2.1. Introducción.

En el presente Proyecto se pretende planificar el diseño de una infraestructura de telecomunicaciones que proporcione enlaces de datos entre los terminales y las estaciones base. Es decir, estamos diseñando el nivel físico de la red de acceso de una red de comunicaciones móviles.

Para ello, debemos estudiar las peculiaridades que presenta la capa física de los sistemas de comunicaciones móviles. En este apartado introduciremos algunos conceptos fundamentales en la planificación radioeléctrica de una red móvil.

2.1.2.2. Generalidades.

En los sistemas de telecomunicaciones se distingue entre red de acceso y red de tránsito. En algunos sistemas, como la telefonía básica, cada terminal tiene su propia facilidad de acceso (bucle de abonado por línea). Sin embargo, en el caso de los sistemas móviles la red de acceso debe ser inalámbrica y ha de realizarse mediante el empleo de recursos radioeléctricos compartidos.

Las estaciones móviles (MS) han de acceder a las estaciones de base (BS) (acceso) y desde éstas las comunicaciones pasarán a su destino a través de la red de tránsito. El acceso se realiza a través de una interfaz radio.

En la interfaz radio se distinguen dos enlaces o sentidos de propagación:

- De MS a BS o ascendente (UL).
- De BS a MS o descendente (DL).

En el UL, existen múltiples móviles a los que debe dárseles la posibilidad de utilizar los recursos disponibles en la BS para pasar sus comunicaciones a la red. Esto se realiza mediante las técnicas de acceso múltiple o multiacceso. El multiacceso supone una compartición de recursos para conseguir el efecto de concentración de muchos a uno. En el DL, las comunicaciones procedentes de la red han de llegar, vía la BS, a una MS o grupo de MS determinadas. La técnica utilizada para ello es una multiplexación con difusión selectiva, parcial o global. La comunicación es uno a muchos.

Se denomina canal físico a la facilidad concedida a un usuario mediante la cual este puede acceder al sistema. Las técnicas de multiacceso son procedimientos de asignación de canales físicos a las estaciones. Hay tres métodos básicos de multiacceso:

- FDMA (Frequency Division Multiple Access), acceso múltiple por división de frecuencia.
- TDMA (Time Division Multiple Access), acceso múltiple por división en el tiempo.
- CDMA (Code Division Multiple Access), acceso múltiple por división de código.

2.1.2.3. Entidades y parámetros de la interfaz radio.

Las entidades básicas son: el transmisor deseado que emite con una potencia P_{IRE_D} o P_{RA_D} y el receptor deseado, a cuya entrada hay una potencia de señal deseada P_{SD} , así como una potencia de señal interferente P_{SI} .

En la interfaz radio se producen efectos no deseados que afectan notablemente a la calidad de funcionamiento de los sistemas móviles y se conocen genéricamente como perturbaciones. Las perturbaciones más importantes son el ruido, los desvanecimientos y la interferencia. La consecución de una calidad de funcionamiento adecuada exige la adopción de medidas que contrarresten los efectos e estas perturbaciones.

El ruido que afecta a la recepción de la señal deseada puede provenir de fuentes externas (ruido externo) o ser generado en el propio receptor (ruido interno). Ambos se cuantifican por sendos valores de potencia de ruido: P_{next} y P_{nint} .

Los desvanecimientos se producen por la presencia de obstáculos y la existencia de múltiples trayectos de propagación entre el transmisor y el receptor.

La interferencia se debe a la actuación de otros transmisores que operan en la misma frecuencia que la del receptor considerado (interferencia cocanal) o en frecuencias contiguas (interferencias de canal adyacente).

La calidad de la señal entregada por el receptor a su salida se mide por una tasa de errores, BER, para señales digitales. Esta calidad es función del sistema de modulación que se emplee, pero fijado éste, depende de la relación entre la

potencia de la señal deseada y la potencia de la perturbación evaluada en un punto de referencia del receptor.

En el presente proyecto se propone la planificación radioeléctrica de una red UMTS para una zona urbana. Como veremos en el próximo capítulo, en los sistemas UMTS la perturbación limitante es la interferencia, por tanto nos interesa definir la siguiente relación:

Se define la relación portadora/interferencia (C/I) como el cociente entre la potencia de la señal deseada y la potencia total de las señales interferentes. Se distingue entre los valores de C/I para la interferencia cocanal $(C/I)_c$ y para interferencias de canales adyacentes $(C/I)_a$.

Al valor umbral de la relación portadora/interferencia, correspondiente a una calidad y unas condiciones de recepción determinadas, se les llama relación de protección (R_p).

En ocasiones resulta dominante una de las perturbaciones y así se habla de canales limitados por ruido cuando predomina esta perturbación, como suele suceder en áreas rurales y canales limitados por interferencia si es ésta la dominante, como ocurre en los sistemas móviles celulares en zonas urbanas con gran densidad de estaciones base.

2.1.3. Sistemas móviles celulares.

2.1.3.1. Fundamentos de los sistemas celulares.

Al abordar la problemática de diseñar redes de telefonía móvil públicas se optó en primera instancia por sistemas con una sola estación base, que daba cobertura a toda una zona urbana.

Por limitaciones tecnológicas, una sola estación base no podía proporcionar más de 40 canales, cantidad irrisoria en comparación con las predicciones de demanda futura que se barajaban.

En 1947 nace lo que se denomina Sistema Celular, que permite resolver el problema de exigencia de capacidad de tráfico propio de los sistemas de telefonía móvil públicos. Los sistemas celulares se basan en dos ideas:

- La división de la zona de cobertura en regiones pequeñas, llamadas células, de tamaño variable en función de la demanda de tráfico.
- La reutilización de los canales en células separadas por una distancia suficiente para que la interferencia cocanal sea tolerable.

El tráfico ofrecido en una zona es proporcional a la superficie de la zona. Al ser las células de tamaño reducido, también el tráfico será pequeño y podrá atenderse con un volumen de recursos moderado, manteniendo una probabilidad de pérdida de llamada adecuada.

Además, gracias a la reutilización, se multiplica la capacidad de los canales para cursar tráfico, pudiendo efectuarse en todo momento más llamadas que canales haya disponibles ya que cualquier radiocanal puede cursar varias comunicaciones simultáneamente por células distintas, en tanto que en el sistema de transmisor único solamente podía darse servicio a un abonado por cada radiocanal. Se llama índice de reutilización de un sistema celular al cociente entre el número de radiocanales que se ofrecen y el número de canales disponibles.

En la Figura 1 se muestran sistemas celulares con distancias de reutilización y las frecuencias que utiliza cada celda.

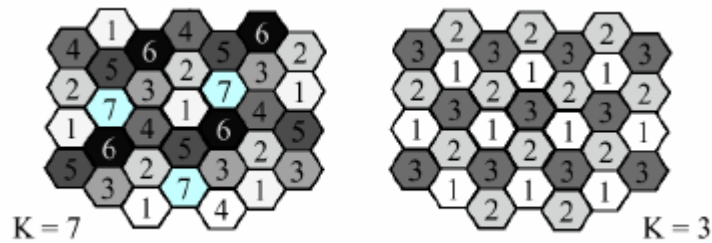


Figura 1: Sistemas celulares con distancias de reutilización de 2 y 1.

2.1.3.2. Planificación de una red celular.

Una vez hemos estudiado el concepto de célula, veamos ahora qué factores influyen en la planificación de un sistema celular.

Cada célula corresponde a una zona de cobertura de una estación base. El diseño de la red de acceso de una red de telefonía móvil pública consistirá entonces, en distribuir adecuadamente las estaciones base por la región objetivo y en fijar los parámetros de diseño de cada una de las estaciones bases para cumplir unas especificaciones.

Cada estación base está formada por antenas y transceptores. La potencia de transmisión, el tipo de antena, la inclinación y altura de esta, son algunos de los parámetros de diseño fundamentales de los que hablaba en el párrafo anterior. Los equipos transceptores de la estación base son los que proporcionan una serie de canales a cada célula, estando limitado el número máximo de canales por razones de interferencia.

Veamos por ejemplo, el caso de multiacceso en el UL por división en frecuencia. Un operador dispone de una banda de frecuencias para ofrecer servicios de telefonía móvil. El operador divide esa banda en canales, que son los que después ofrece para cursar el tráfico. No obstante, no podemos utilizar todos los canales en cada célula, ya que si utilizamos el mismo canal en células

contiguas la interferencia resultará inadmisibles, sólo podemos reutilizar el canal en células distantes. De ahí que el número de canales por célula esté limitado por el nivel de interferencia admisible (que determinará la distancia de reutilización) y por el número de canales de los que dispone el operador.

Como en las redes de telefonía móvil pública la demanda es elevada y en aumento, nos vemos obligados a utilizar el máximo número de canales por célula. Esto provoca que el objetivo principal de la planificación radioeléctrica de una red celular no sea ya dar cobertura a toda la región, sino que la relación portadora/interferencia en toda la zona supere un cierto umbral.

Otras consideraciones importantes que a priori no son triviales son la forma y el tamaño de las células. Si en cada célula se utilizan antenas omnidireccionales, la zona de cobertura sería aproximadamente circular. Sin embargo, las coberturas circulares o no recubren el plano o producen solapes (esto último implica una reducción del rendimiento espectral, porque para la cobertura de un mismo punto se emplean dos canales).

En consecuencia, para la planificación, se estudian coberturas de tipo poligonal, que recubran el plano sin solape. Hay tres polígonos regulares que cumplen esa condición: el triángulo, el cuadrado y el hexágono. El coste económico de la red de acceso de una red móvil depende del número de estaciones bases necesarias, si suponemos que cada estación base corresponde solo con una célula, interesará tener el menor número de células/estaciones base posibles. El número de células necesario es el área total a la que tiene que dar cobertura la red dividida entre el área de cada célula. Como el polígono que fijado el radio de cobertura (distancia del baricentro del polígono al vértice) tiene área mayor es el hexágono, se escoge la forma hexagonal para las redes celulares.

En cuanto al tamaño de las células, ya comentamos que es variable en función de la demanda de tráfico. En zonas rurales, donde la demanda de tráfico es

baja, es posible que podamos dar cobertura a regiones grandes con un número pequeño de canales. Sin embargo, en zonas urbanas, donde la densidad de población es 10 o 20 veces mayor, con el mismo número de canales daremos cobertura a regiones 10 o 20 veces más pequeña, manteniendo constante la probabilidad de bloqueo en llamada. Esto implica reducir 10 o 20 veces el tamaño de la célula. En la Figura 2 se muestra lo comentado gráficamente.

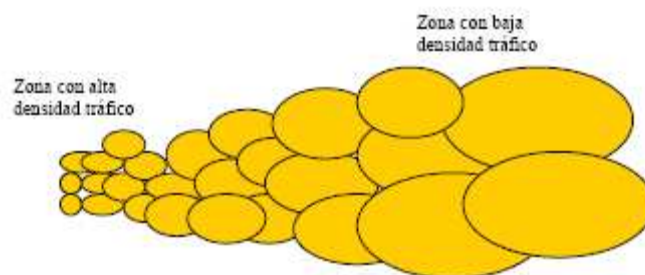


Figura 2: Sistema celular con celdas de distintos tamaños.

2.2. El Sistema UMTS.

2.2.1. Introducción.

El Sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) es el estándar desarrollado para Europa y otras partes del mundo de la tercera generación de comunicaciones móviles [5].

EL IMT-2000 es la familia de estándares que describen la 3G en todo el mundo y en el que está incluido UMTS. La 3G busca con respecto a anteriores generaciones un aumento sustancial en el ancho de banda disponible.

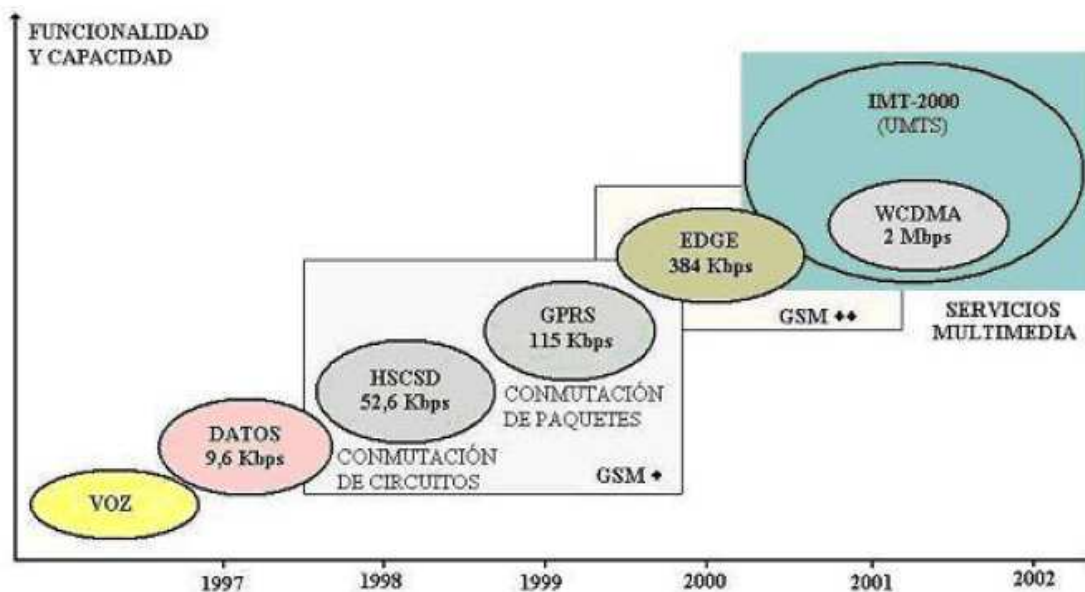


Figura 3: Evolución de las tecnologías de comunicaciones móviles hacia UMTS.

Como podemos ver en la Figura 3, las tecnologías 2G y 2.5G no proporcionan un ancho de banda suficiente como para soportar servicios multimedia y permitir una conectividad natural con Internet. UMTS es el primer acercamiento serio de las comunicaciones móviles al acceso a Internet de banda ancha y a todos los nuevos servicios que dicha capacidad puede proporcionar.

UMTS es un paso más en la evolución de los terminales móviles, los antiguos teléfonos y que cada vez se parecen más a auténticos ordenadores personales. Los terminales de 3ª generación permiten transmisión de texto, voz, video y datos multimedia a velocidades de 2 Mbps, dando acceso a servicios como video bajo demanda, videoconferencia, televisión o Internet de alta velocidad. UMTS también abre la posibilidad de aplicar nuevas formas de tarificación: por bits, tarifa plana.

UMTS se posiciona tecnológicamente como el estándar más equilibrado en el compromiso movilidad/capacidad. Sin embargo todavía queda un amplio camino por recorrer hasta que las comunicaciones móviles puedan codarse con las capacidades ofrecidas actualmente con los estándares WLAN, por lo que

UMTS es un producto condenado a perecer incluso antes de su implantación generalizada. En la Figura 4 podemos apreciar visualmente el aceptable compromiso movilidad/capacidad de UMTS en comparación con otras tecnologías de comunicaciones de mayor y menor capacidad.

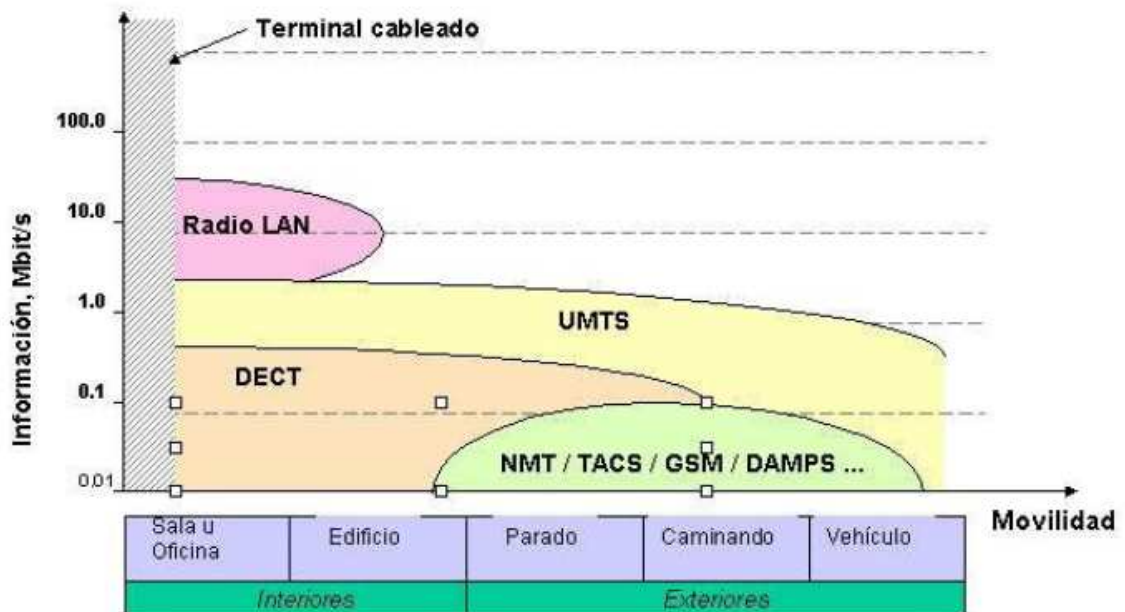


Figura 4: Capacidad del sistema en función de la movilidad.

La ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) marca que los sistemas IMT-2000 deben cumplir los siguientes requisitos [6]:

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

2.2.2. Sistemas CDMA.

2.2.2.1. Introducción.

El CDMA (*Code Division Multiple Access*) es un método de acceso múltiple basado en técnicas de transmisión con espectro expandido. El principio básico de la técnica de espectro expandido es el uso de portadoras *noise like*, es decir, similares al ruido, con ancho de banda mucho mayor que el de las señales a transmitir. Los primeros intereses sobre este tema nacen con la segunda guerra mundial, por la necesidad de comunicarse de manera resistente a las interferencias e interceptaciones [4], [8], [9].

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 ésta 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 multirayecto.
- 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. En los apartados siguientes se describirán las características más destacadas de esta técnica.

2.2.2.2. Señales de banda estrecha y de espectro expandido.

Señales de banda estrecha son aquellas que llevan asignada una porción de banda limitada, lo que significa que toda la potencia de la señal transmitida se concentra en una porción de banda comparable con la banda ocupada por la señal generada por la fuente. Pertenecen a esta categoría las señales radio convencionales. En los sistemas *Spread Spectrum*, en cambio, la señal se extiende, o mejor se distribuye en una porción de banda mucho mayor que la de la señal de información. Esta operación hace que la señal se parezca a una señal de ruido (*noise like*) y trae como ventaja una resistencia mayor a las interferencias. En la Figura 5 se muestran las densidades espectrales de potencia de una señal de banda estrecha y de una de espectro expandido.

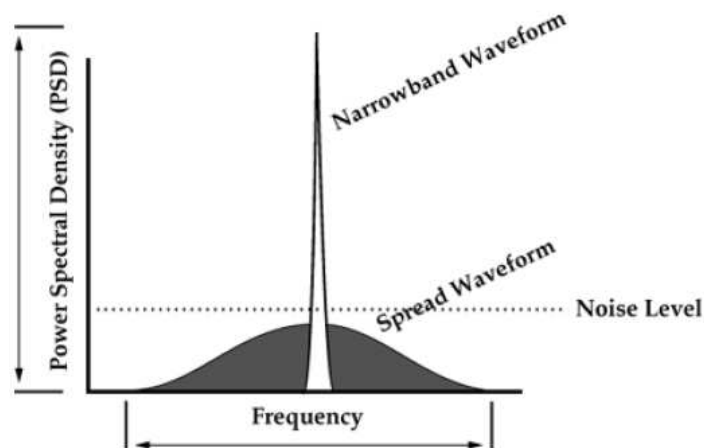


Figura 5: Señales de banda estrecha, de espectro expandido y ruido blanco.

En base a esta primera clasificación se puede subrayar la mayor simplicidad de los sistemas de banda estrecha, sobre todo en términos de realización práctica, si bien hay que tener en cuenta que resultan no aptos para trabajar en ambientes digitales y para satisfacer las cada vez más complicadas y diversificadas condiciones de los servicios sin cable.

De hecho, todos los sistemas de banda estrecha, debido al límite físico de los recursos radio, deberán estar rígidamente reglamentados para evitar la interferencia recíproca y la consiguiente degradación de las comunicaciones.

Los sistemas de espectro expandido aparecen, respecto a los sistemas de banda estrecha, como una técnica de transmisión más evolucionada y eficiente (en términos de utilización de la banda disponible), en cuanto a que consiguen reducir drásticamente tanto las interferencias que afectan a la señal útil como la interferencia que la misma señal útil produce en el resto de las comunicaciones en curso. Estas son las condiciones esenciales para que se produzca un salto de calidad en términos de incremento del número de usuarios que comparten el mismo recurso respecto a los sistemas de banda estrecha.

2.2.2.3. Sistemas de espectro expandido

El desarrollo de esta técnica para fines militares se debió a sus características intrínsecas, que pueden resumirse en:

- Resistencia a la interferencia.
- Baja probabilidad de interceptación.
- Dificultad de descifrado.

El principio fundamental de las técnicas de comunicación a espectro expandido es la distribución del espectro de la señal a lo largo de una porción de banda mucho mayor que el de la señal radio convencional; esta operación hace que la señal sea resistente a la interferencia, pero es justamente la enorme porción de espectro utilizada la que no nos ha permitido por muchos años el aprovechamiento comercial de estas tecnologías. Ha sido en los últimos años cuando dichos sistemas han encontrado una aplicación también en el campo comercial como técnicas de acceso múltiple para los sistemas 3G (WCDMA, TDCDMA).

El alargamiento espectral se obtiene de la multiplicación de la secuencia de información y una secuencia de código que debe ser única para cada usuario y entregada al receptor interesado en esta transmisión. El receptor, conociendo la secuencia de código del usuario, decodifica la señal recibida y reconstruye la secuencia original. Todo esto es posible gracias a que la correlación entre los códigos de los distintos usuarios es baja. La banda de señal asociada a las secuencias de código se elige mucho más ancha que la de la señal de información; de este modo, el proceso de codificación alarga el espectro de la señal. Una técnica de modulación con espectro expandido se caracteriza, por tanto, mediante dos propiedades:

- El ancho de banda de la señal transmitida es mucho más amplio que el de la señal de información.
- El ancho de banda resultante queda determinado, además de por la información que se envía, por una "llave de codificación" particular.

2.2.2.4. Code division multiple access (CDMA).

El CDMA es la técnica de acceso múltiple por división de código que permite a aquellos usuarios que necesiten transmitir simultáneamente, el compartir un único canal radio. En la Figura 6 se muestra gráficamente porque CDMA permite esto y FDMA y TDMA no.

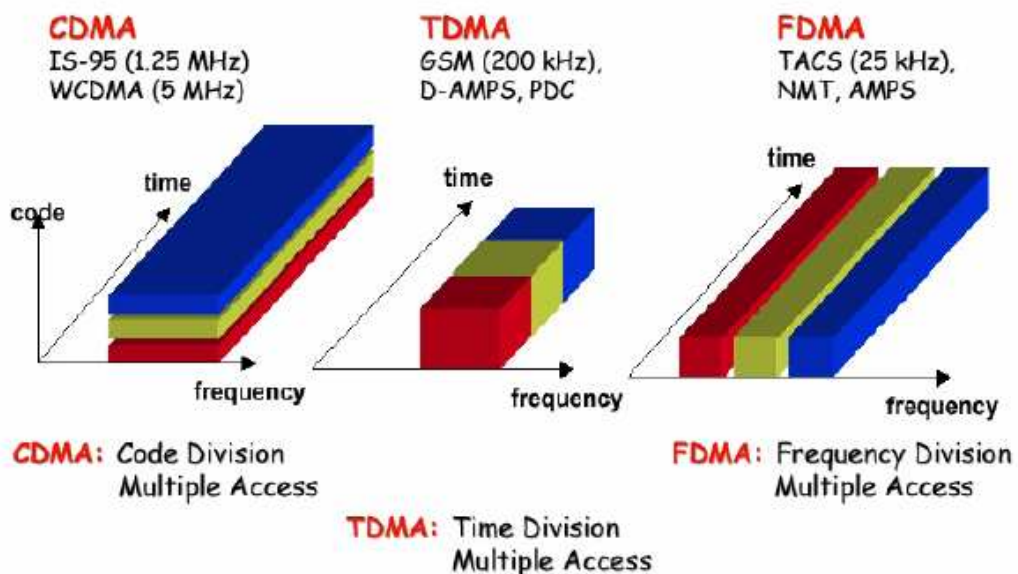


Figura 6: Comparación entre CDMA, TDMA y FDMA.

El método de acceso múltiple más comúnmente utilizado en los sistemas radio móviles es el TDMA (*Time Division Multiple Access*). El TDMA es el método en el que se basa la red GSM, en la que cada usuario ocupa el canal radio por un periodo de tiempo determinado. En una red CDMA, en cambio, todos los usuarios transmiten contemporáneamente y sobre el mismo canal radio.

Usando este tipo de acceso múltiple, las distintas señales resultan superpuestas tanto en tiempo como en frecuencia.

La expansión espectral se produce mediante "secuencia directa" (DS-SS) cuando la secuencia de datos se multiplica por una secuencia de código de frecuencia (*chip rate*) mucho más alta.

En el estándar IS-95, basado en la técnica DS-SS, la frecuencia de cifrado asociada al formato de modulación es de 19.200 símbolos/segundo. La tasa de chip (*chip rate*) de la secuencia de código es de 1.228 MHz. Como consecuencia, hay un ensanchamiento del espectro (se multiplica por un factor de 64).

La secuencia de datos se reconstruirá correctamente en el receptor solo si éste dispone de una secuencia de codificación idéntica a la utilizada anteriormente en el transmisor. De la correlación con la secuencia correcta, se obtendrá a la salida del receptor la señal deseada.

En el momento en que la correlación se realice con una secuencia diversa, el nivel de señal a la salida será muy bajo o, en el caso ideal, incluso nulo. Gracias a esta característica se evita la posibilidad de decodificar erróneamente la señal.

La elección de las secuencias de código es muy importante. La normativa IS-95 prevé la utilización de 64 secuencias de código ortogonales, denominadas funciones de Walsh. Además de éstas se utilizan las secuencias *Pseudo-Noise* (PN), como por ejemplo la "*long code*" para la identificación del usuario, y secuencias PN piloto para la identificación de la estación radio base.

La técnica DS-SS es la más difundida de todas las técnicas SS. Algún usuario transmite simultáneamente al resto de usuarios, empleando toda la banda disponible, y, en fase de recepción, se recuperan una o más señales deseadas multiplicando la forma de onda recibida, que es la superposición de

las transmisiones de todos los usuarios, por los códigos relativos a estas mismas señales (*despreading*). Tras el *despreading*, cada una de las señales no deseadas representa para la señal útil una interferencia, cuyo nivel depende del valor de la correlación entre las distintas secuencias de código.

2.2.3. Arquitectura de red.

2.2.3.1. Introducción.

El sistema UMTS está constituido por una serie de elementos lógicos donde cada uno de ellos tendrá una funcionalidad bien precisa (Figura 7). La arquitectura de la red de tercera generación está dividida en UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*), que representa la red de acceso, en CN (*Core Network*), que es la red de transporte del sistema y en UE (*User Equipment*), que pertenece al usuario.

Tanto el UE como el UTRAN tendrán protocolos completamente nuevos, basados en las necesidades de la tecnología W-CDMA, mientras que CN conservará la definición adoptada en GSM. En la Figura 7 se muestra de manera esquemática los elementos e interfaces que forman la red UMTS:

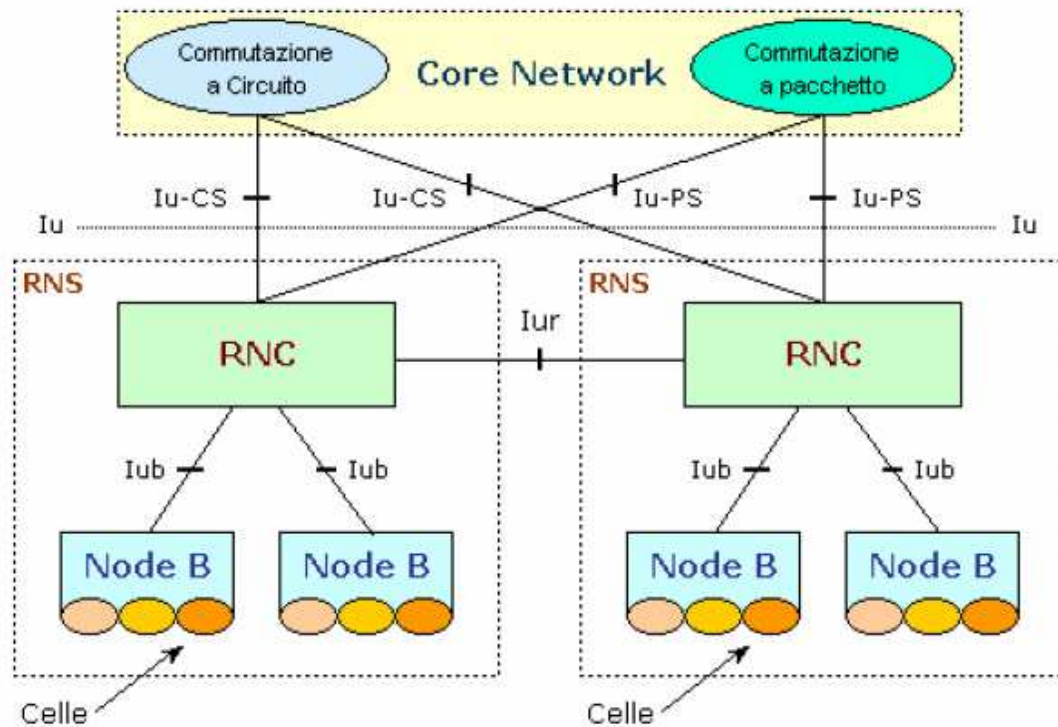


Figura 7: Arquitectura general UMTS

El UE está constituido por dos elementos:

- El *Mobile Equipment* (ME), que representa el terminal radio utilizado para las comunicaciones a través de la interfaz U_u .
- La UMTS *Subscriber Identity Module* (USIM), que es una tarjeta que contiene la identidad del usuario, los algoritmos de identificación y la información útil del terminal.

La red UTRAN está formada por:

- EL nodo B (que se corresponde con la estación base BTS del GSM), que prepara la conversión de los datos entre la interfaz I_{ub} y U_u .

- La *Radio Network Controller* (RNC), que controla la gestión de los recursos radio en el interior de la célula y también se encarga de las decisiones del *handover* que requieren del intercambio de mensajes de señalización sobre la UE.

Y los elementos principales del GSM CN son:

- El *Home Location Register* (HLR), que es un registro *database* que contiene el perfil de los usuarios abonados.
- El Mobile Services Switching Centre/Visitor Location Register (MSC/VLR), en el que la MSC es la central de conmutación de la red radio móvil y el VLR es el registro *database* que contiene la información del móvil cuya posición se encuentra en el área MSC.
- El *Gateway MSC*, que es el punto de unión con las otras redes. Además, se definen los interfaces entre los distintos elementos ya vistos. El interfaz C_u representa la conexión eléctrica entre la USIM y el ME, el U_u es el interfaz radio WCDMA a través de la cual la UE accede al sistema, el I_u conecta la UTRAN con el CN dando la posibilidad de utilizar redes UTRAN y CN de diversos operadores, el interfaz I_{ur} se utiliza para el *soft handover* entre distintas RNC y finalmente el I_{ub} conecta un Nodo B con una RNC.

Un esquema general de una red UMTS y de su interconexión con otras redes es el que se muestra en la Figura 8:

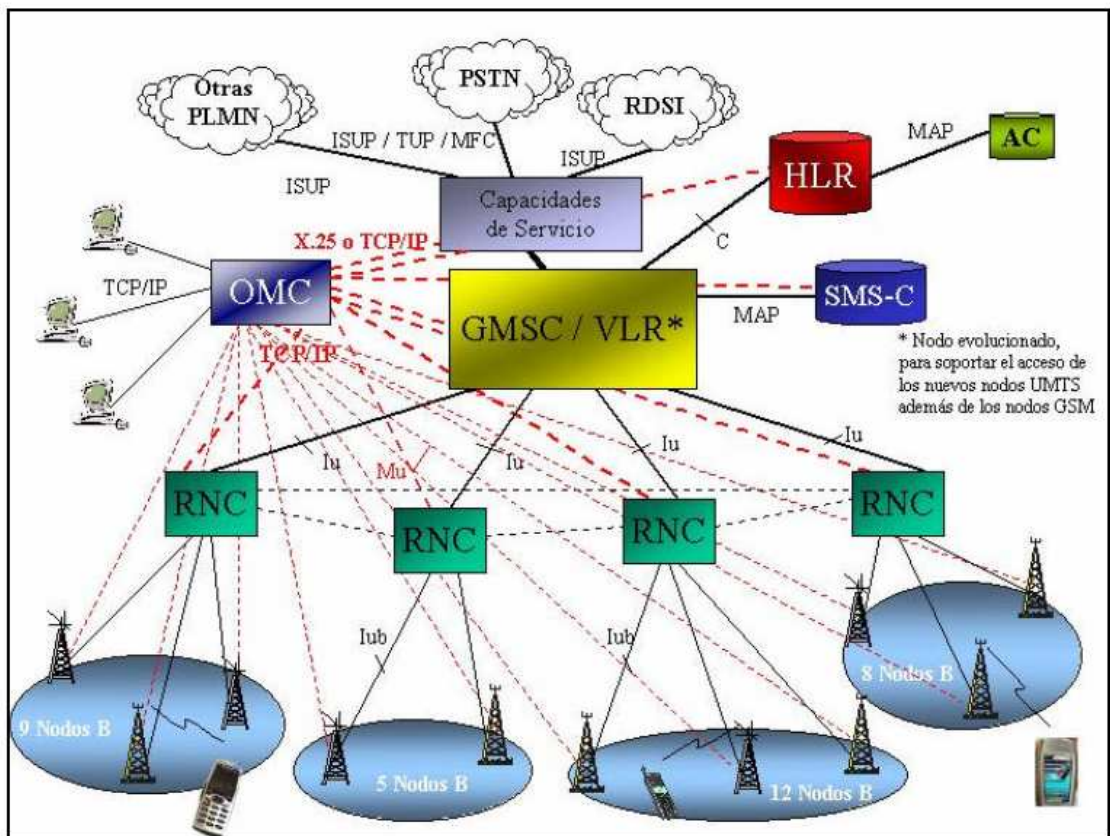


Figura 8: Esquema general de una red UMTS e interconexión con otras redes.

2.2.3.2. UTRAN.

La red UTRAN está constituida por uno o más RNS (*Radio Network Subsystem*), que a su vez contendrán un RNC y uno o más Nodos B. Los principales requisitos a considerar en la proyección de la red UTRAN son el soporte del *soft handover*, es decir, pasar el terminal móvil de una célula a otra, en condiciones de macrodiversidad y el desarrollo de algoritmos de *Radio Resource Management*. El RNC es el responsable de la carga y del control de la congestión de la célula a la que pertenece y además asigna los códigos a las nuevas conexiones radio dentro de la misma célula. Las funciones principales del Nodo B es todo lo que concierne al nivel físico como la codificación del canal, el entrelazado (*interleaving*), el *spreading*,...y provee algunas operaciones de control de los recursos como el *Inner loop power control*.

También un nodo B puede soportar las modalidades de transmisión FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*).

La interfaz radio terrestre UTRA emplea un método de acceso CDMA de banda ancha y espectro extendido (*Wideband Direct Spread CDMA*) y consta de dos modos de operación como ya hemos comentado anteriormente:

- UTRA FDD: Duplexado en frecuencia. Distintos usuarios comparten una misma portadora (5 MHz) al mismo tiempo mediante una multiplexación por código.
- UTRA TDD: Duplexado en tiempo. Se añade el recurso temporal (TS) al código para diferenciar a un usuario de otro dentro de un mismo radiocanal.

Las principales funciones a describir desempeñadas por UTRAN son:

- Transferencia de datos de los usuarios: Esta función provee la transferencia de datos de los usuarios a través de la UTRAN entre los puntos de referencia I_u y U_u .
- Funciones relativas al control del acceso al sistema: Permiten al usuario conectarse a la red UMTS para poder aprovechar los servicios ofrecidos. El acceso al sistema puede ser efectuado tanto desde el terminal móvil (a continuación de una llamada desde el móvil) como de la red (llamada sobre el móvil). Entre estas funciones destacan: *control de admisión* (acepta y rechaza nuevos usuarios), *control de la congestión* (evita la saturación del sistema) y *transmisión de la información del sistema* (distribuye entre los terminales información necesaria para las operaciones de la red).

- Cifrado y descifrado del canal radio: Protege los datos transmitidos sobre la interfaz radio de interceptaciones no autorizadas. Esta función se puede encontrar tanto en el UE como en UTRAN.
- Funciones relativas a la movilidad: *handover* (gestiona la movilidad de los usuarios), *sustituciones del SNRS* (gestiona el paso de una SNRS a otra), *posicionamiento* (permite determinar la posición geográfica de un UE).
- Funciones relativas a la gestión y al control de los recursos radio: La gestión de los recursos radio se ocupa de la localización y el mantenimiento de los recursos radio necesarios para una comunicación. Los recursos radio UMTS deben ser repartidos entre servicios de modalidad de transferencia en modo circuito y servicios con modalidad de transferencia en modo paquete (servicios orientados a conexión y no orientados a conexión). Las funciones más importantes son: *configuración de los recursos radio*, *monitorización del canal radio* (efectúa medidas de los niveles de potencia, BER , interferencia, desplazamiento Doppler...para estimar el nivel de calidad del canal), *control de la división y de la recombinación de los flujos informativos* (macrodiversidad: duplica flujos de información, permitiendo realizar soft handover: varios nodos B dan servicio a un único UE durante el paso de una célula a otra) , *Instauración y liberación de una conexión*, *asignación del enlace radio* (gestiona enlaces físicos en función de la calidad del acceso), *funciones del protocolo radio* (multiplexación, segmentación, ensamblado, acuse de recibo, etc. de toda la información), *control de la potencia sobre el canal radio* (para minimizar las señales interferentes), *codificación y decodificación del canal* (para la detección y corrección de errores), *control y decodificación del canal* (genera información de control para la codificación y decodificación:

código, tasa de código) y por último *gestión del acceso aleatorio en la red* (responde a intentos de accesos a la red).

2.2.3.3. La pila de protocolos.

La pila protocolaria se divide en tres niveles fundamentalmente (Figura 9). Las funciones del interfaz radio (U_{i}) están divididas en tres niveles protocolarios. Al nivel físico pertenecen la codificación, la modulación y el *spreading* de los canales físicos. El nivel de enlace comprende los protocolos de control del acceso al medio (MAC), de control del enlace radio (LRC) y el protocolo de control de acceso al enlace (LAC). El MAC coordina los recursos ofrecidos por la capa física, el LAC desarrolla las funciones de instauración, mantenimiento y liberación de una conexión lógica de red. El nivel de red está dividido en una subcapa de control de los recursos radio (RRC) y en subcapas de gestión de la movilidad (MM) y de la conexión (CM). Este nivel gestiona el control de las llamadas y el *Radio Resource Management*.

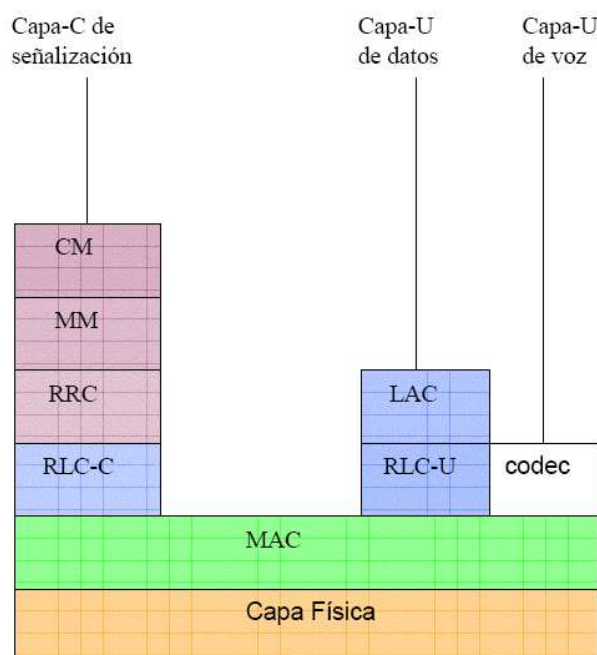


Figura 9: Pila de protocolos de la interfaz ETSI WCDMA.

Las funciones que dependen estrechamente del tipo de interfaz radio utilizada, la WCDMA, son aquéllas relativas a la capa física, que serán analizadas en detalle en el párrafo siguiente, al MAC y a los algoritmos de gestión de los recursos. En el MAC los canales lógicos vienen mapeados en los canales de transporte y además para cada uno de ellos se selecciona el formato de transporte TFI que depende de la tasa de datos de la fuente. El *Radio Resource Managment* desarrolla las funciones como la del control de potencia, el *handover* y el control de la carga. Todo esto lo veremos más detalladamente a continuación.

2.2.3.4. El 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 en transferirla sobre el interfaz radio.

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

- La tasa de error es la máxima tasa de error que podrá soportar para garantizar la calidad del servicio.
- El retardo de transmisión (*end-to-end delay*) es el máximo retardo 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.

En general, podemos decir que las funciones principales del nivel físico serán las siguientes:

- Gestión de la macrodiversidad y ejecución de los *handover* (*soft handover*).
- Detección de errores sobre los canales de transporte y la indicación a los niveles superiores.
- Codificación y decodificación FEC (Forward Error Correction), *interleaving* y *deinterleaving* de los canales de transporte.
- Multiplexación de los canales de transporte y demultiplexación de los CCTrCH (*Coded Composite Transport Channel*).
- Adaptación de la 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).
- Medición e indicación a los niveles superiores.
- Control de potencia a ciclo cerrado.
- Procesamiento a radio frecuencia.

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 qué canales de transporte están activos en la trama corriente.

2.2.3.5. El 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 suministra la transferencia de MAC SDU sin acuse de recibo entre entidades MAC de igual nivel, sin proveer funciones de segmentación y reensamblado que deberán por tanto ser desarrolladas en niveles superiores.
- **Reasignación de los recursos radio y de los parámetros MAC:** Este servicio ejecuta, después de una petición del RRC, la reasignación de los recursos radio y la variación de los parámetros utilizados en el interior del nivel MAC para hacer posible el cambio de formato de transporte y del tipo de canal de transporte.
- **Comunicación de las medidas:** Realiza medidas locales del volumen de tráfico y de la calidad de la transmisión para después comunicárselo al nivel RRC.

El nivel MAC realiza las siguientes funciones:

- 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 en base a la velocidad de la fuente. 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 UE: De este modo es posible asignar a un flujo de datos con alta prioridad una tasa de bit superior a la que tenía y análogamente una tasa más baja a un flujo de datos con prioridad menor.
- Gestión de la prioridad entre el UE: Para utilizar los recursos radio de manera eficiente para tráfico impulsivo, el MAC realiza la gestión de la prioridad sobre los canales comunes y dedicados.
- Identificación de los UE sobre los canales de transporte comunes: Cuando un UE utiliza un canal común, se tiene la necesidad de identificarlo en banda. 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 naturalmente 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 sobre los canales lógicos y se lo comunica al RRC. En base a tales informaciones, el RRC establece si hay que modificar algo en las propiedades del transporte de los canales de tráfico.
- Cambio del tipo de canal de transporte: Ejecuta la conmutación entre canales de transporte comunes y dedicados basándose en las decisiones tomadas por el RRC.
- Cifrado para la modalidad transparente del RRC: En esta función se obtienen adquisiciones de datos no autorizadas y solamente viene efectuada para la modalidad de transmisión RLC transparente.

2.2.3.6. El 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 entra en un número entero de RLC PU, un primer segmento de la próxima RLC PDU se puede insertar en una nueva RLC PU en concatenación con el último segmento de la SDU anterior.
- Padding: Cuando no es posible aplicar la concatenación y los datos que deben ser transmitidos no entran en una RLC PDU de una determinada dimensión, en la parte que resta del campo de datos, se insertan bits de *padding*.
- Transferencia de datos: Esta función se utiliza para el transporte de los datos de los usuarios de los servicios RLC. Las tres modalidades que soporta son la de 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. Si esta función no viene utilizada, entonces aparece el servicio de entrega fuera secuencia.
- Control de flujo: El receptor a través de esta función controla la tasa con la que la RLC en transmisión envía la información.

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:
 - Detección de errores y la consecuente entrega a los niveles superiores de las SDU que no han sido modificadas de los errores introducidos en la transmisión.
 - Entrega inmediata de la SDU a la entidad receptora del nivel superior.
- 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. En el caso en el que la RLC no estuviese en grado de entregar los datos en modo correcto, se enviaría una notificación a la entidad en cuestión. Para este servicio se soportan ambas modalidades de entrega, en secuencia y fuera secuencia. La modalidad con acuse de recibo necesita de las siguientes características:
 - Entrega de la SDU al nivel superior recibida correctamente.
 - Entrega de la SDU en el mismo orden con el que se ha transmitido.
 - Conservación del QoS: El protocolo de transmisión debe ser configurable en el nivel 3 para servir adecuadamente las diversas calidades del servicio.
- Notifica los errores no recuperables.

2.3. Planificación radio.

2.3.1. 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 presentará 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 más 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 sólo 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 sólo 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:

1. Añadiendo una frecuencia más (con lo que el tráfico por portadora disminuye y se incrementa la cobertura) o
2. 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 esta 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 mismo 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.

2.3.2. Capacidad de las células.

2.3.2.1. 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_o 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:

$$\frac{[P_{iik} G_i / A_{ij}] / R_k}{[I_{int} + I_{ext} + N] / W} \geq \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_k \quad (3-1)$$

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 más 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 presentará un modelo analítico simplificado para el cálculo de la capacidad, el cual se estudiará vinculado a la cobertura, por la íntima relación existente entre dos magnitudes CDMA.

2.3.2.2. Capacidad del enlace ascendente

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

- a) 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*.
- b) El número de elementos físicos (hardware) de procesamiento de canales disponibles en el receptor de la estación base (*hard capacity*).

En el caso a) 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 α que expresa el porcentaje de tiempo de transmisión en una sesión ($\alpha < 1$). Supuesto que hay K usuarios ocupados con llamadas en la célula y que el control de potencia es ideal (todos 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:

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

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

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

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

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

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:

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

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 $N = KT_o W F_r$ y $G_p = W/R$, sustituyendo todos estos datos en (3-4) y pasando a dBm, queda:

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

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:

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

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:

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

De la expresión anterior se deduce:

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

Siendo $K_{oj} = G p_j (E_b / N_o)_j$

Se define el factor de carga de conexión λ_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_j es el número de usuarios del servicio j -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. La expresión es:

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

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

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

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

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

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

2.3.2.3. 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 α que se supone variable entre 0 a 1 ($\alpha=1$ 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 β es la fracción de la potencia total destinada a los canales de tráfico (normalmente β 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 $p_{i1}=p_1/l_{i1}$, siendo l_{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:

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

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

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

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:

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

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:

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

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: $M_1 = -10\log(1 - X_{DL})$ y puede incluirse en la ecuación de Friis, para obtener la potencia media por usuario:

$$P = L_{media} - 174 + F_r(dB) + 10\log R(bit/s) + \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{dB} + M_1(dB) \quad (3-29)$$

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. La expresión a evaluar es:

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

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 $e^{s(1-\sigma+y)}$, que se evalúa a partir de:

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

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 está afectada de una variabilidad log-normal con desviación típica $\sigma= 8$ 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.

2.3.2.4. 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.

2.3.3. Cobertura celular.

2.3.3.1. 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.

2.3.3.2. Cálculo de la cobertura.

El diámetro de cobertura del sector puede obtenerse en función de la densidad de tráfico ρ (Erlang/km²). 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.

2.3.4. 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. Estos tienen una potencia máxima de 21 dBm (125 mW).

Para el enlace descendente, es la potencia total disponible en el Nodo B (estación de 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 remodular la señal correctamente es menor, y por tanto, la potencia de transmisión de la estación de 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 sólo 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 Eb/No objetivo: la relación Eb/No se obtienen dividiendo la energía por bit Eb entre la densidad espectral de la perturbación. El parámetro Eb/No 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 Eb/No efectivo: es el valor de Eb/no necesario en el receptor para cumplir los requisitos de calidad especificados. Este valor tienen 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 de 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 remodular las señales de dos o más estaciones de 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 de base que la remodulan 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. Cuanta 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 $k(L)=1,28$; σ_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 $L=90\%$, $M_{LN}= 10,2$ dB. Si se emplean procedimientos de cálculo más precisos la incertidumbre de la predicción es menor y M_{LN} 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 ó 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 de base UMTS es mayor que una estación DCS, pero no así en medios urbanos.

2.3.5. Simulaciones de capacidad/cobertura en UMTS.

2.3.5.1. Introducción.

Cuando se manejan tráficos 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.

2.3.5.2. Asignación celular y control de potencia.

Las simulaciones deben basarse en algún método de asignación de los terminales móviles a las estaciones de 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:

- a) 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.
- b) Que alguna solución tome un valor superior al máximo de potencia transmitida, en cuyo caso será imposible alcanzar los objetivos de calidad.
- c) 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.

2.3.5.3. Efecto 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 ni 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 multirayecto, 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.

2.3.5.4. 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 ρ_{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 base 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 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 tienen en cuenta calculando la atenuación (mediana+desvanecimiento 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 el 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.

