

1 Capítulo 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

1.1 Introducción a las comunicaciones móviles

Los servicios de comunicaciones móviles, y muy en especial la telefonía móvil celular, han constituido uno de los ámbitos de desarrollo tecnológico que más rápida y fuertemente han penetrado en la vida social y económica en la última década del siglo XX. Con seguridad representan un puntal básico del cambio más brusco, en términos de velocidad de implantación de un nuevo servicio, sufrido por la sociedad humana en toda la Historia. Ninguna tecnología hasta el momento ha pasado tan rápidamente de su puesta en marcha inicial a su utilización masiva por millones de personas en todo el planeta.

El desarrollo del mercado de las telecomunicaciones, cuyos dos motores principales son las comunicaciones móviles e Internet, está siendo espectacular, y todas las perspectivas indican que va seguir siéndolo en las próximas décadas. Entre los factores que colaboran a hacer realidad este fenómeno cabe destacar los esfuerzos que en materia de estandarización están haciendo todos los países industrializados, en especial con la idea básica de unificar todos los sistemas a nivel global. Este hecho ayudará a potenciar la liberalización del mercado, la libre competencia, la interconexión total de las redes de comunicaciones existentes, y por tanto el acceso a todos estos servicios de grandes masas de población.

El volumen de negocio que mueven los sistemas de telecomunicaciones en general, y las comunicaciones móviles en particular, tiene una envergadura de tal consideración que todos los gobiernos de los Estados más desarrollados del mundo llevan meses tratando de regular las condiciones en las que las compañías operadoras deberán desarrollar las nuevas redes y cómo van a gestionar los enormes ingresos por impuestos que van a suponer para las arcas públicas.

En este sentido, la ITU (*International Telecommunication Union*) es el organismo intergubernamental que se encarga de coordinar las tareas de estandarización técnica, de gestionar el espectro radioeléctrico y de guiar a los Estados en la adecuación de los marcos jurídicos para la prestación de los diferentes servicios. La ITU se fundó en 1825, cuando algunos gobiernos europeos quisieron gestionar el entonces incipiente servicio telegráfico. De entonces a esta parte, la evolución de este organismo ha sido incesante. En 1985 se creó, dentro del entonces llamado CCIR (Comité Consultivo Internacional de Radio), el grupo CCIR *Interim Working Party 8/13*, actualmente llamado ITU-R *Task Group 8/1* encargado de desarrollar trabajos de estandarización específicos de los entonces futuros sistemas de comunicaciones móviles.

Por el lado estrictamente europeo, en 1988 se fundó la ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*), que viene a ser el equivalente a la ITU dentro del marco únicamente europeo. Sin embargo, en las propias bases de la fundación se establece que la ETSI deberá colaborar en la medida de lo posible con la ITU en la definición y control de los estándares técnicos globales existentes o en preparación. Uno de los comités técnicos de esta organización publicó el libro verde sobre las comunicaciones móviles. Este libro pretende marcar las pautas sobre la política de comunicaciones en el ámbito europeo basada en los recientes avances tecnológicos y del mercado. Los principales objetivos de este libro son potenciar el mercado abierto (máxima liberalización) y desarrollar las comunicaciones personales como fuente de nuevas posibilidades de negocio en la llamada ‘nueva economía’.

1.2 Comunicaciones móviles de tercera generación

En la actualidad, los sistemas de comunicaciones móviles que están en funcionamiento son los llamados sistemas de segunda generación. Entre ellos destacan GSM [1], JDC y cdmaOne (IS-95). Estos sistemas han permitido generalizar los servicios de voz universales en los principales mercados del planeta. Los usuarios, por su parte, están encontrando una utilidad creciente en algunos servicios complementarios ofrecidos por estos mismos sistemas, como el envío de mensajes de texto, el acceso a redes de datos o los servicios de navegación por Internet basados en el protocolo WAP. Todos estos servicios están sufriendo un crecimiento muy acusado en su demanda. En la Figura 1 se muestra un esquema de los sistemas más significativos que se han desarrollado en cada generación de móviles.

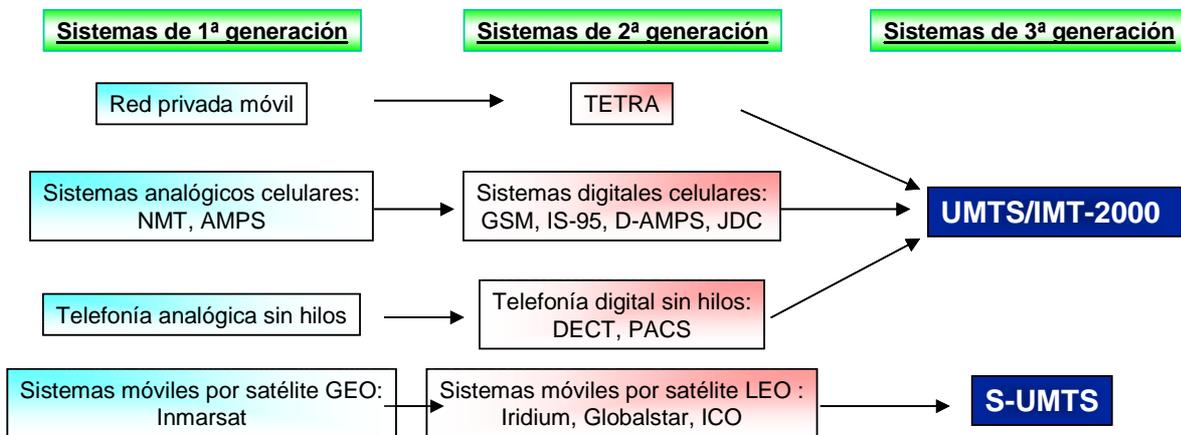


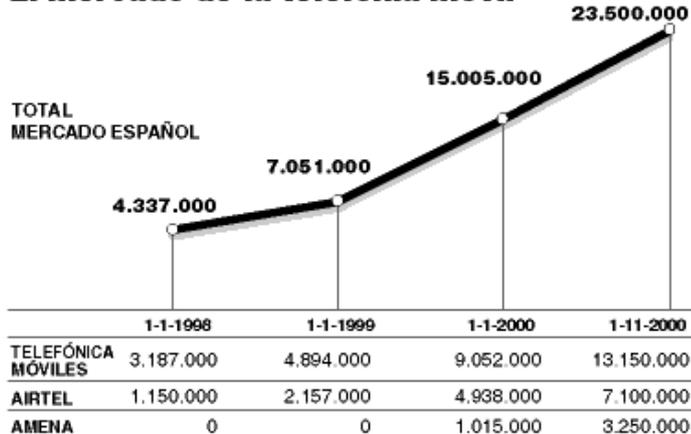
Figura 1. Evolución de los sistemas de telecomunicaciones móviles

1.2.1 ¿Por qué una nueva generación de móviles?

Hay varios elementos que han suscitado la necesidad de plantear la creación de una nueva generación de sistemas de comunicaciones móviles. De entre ellos cabe destacar:

- *El intenso crecimiento de la penetración en el mercado de los sistemas de segunda generación.* En muy pocos años, el teléfono móvil ha pasado a ser una parte sustancial de la dinámica social en los países industrializados. En algunos de ellos, el número de líneas activas ha llegado incluso a superar el número de líneas de telefonía fija. En este sentido, y a título de ejemplo, la Figura 2 muestra la evolución del mercado de las telecomunicaciones en España en los últimos años. Este fenómeno de crecimiento hace que se prevea a medio plazo una saturación de la capacidad de los sistemas de segunda generación. La Figura 3 muestra una predicción del incremento de usuarios en el mercado de las comunicaciones móviles en el futuro próximo [2].

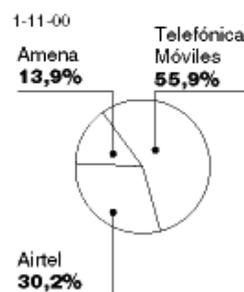
El mercado de la telefonía móvil



EL MERCADO EN EUROPA

1-11-00	% de población con móvil	Número de móviles
Alemania	52,5	43.063.330
Italia	73,5	42.062.333
R. Unido	61,2	35.762.435
Francia	45,2	26.400.000
España	58,7	23.500.000
Holanda	63,3	9.942.676
Suecia	71,0	6.293.660
Portugal	60,2	5.988.583
Grecia	55,4	5.821.328
Austria	72,4	5.795.330

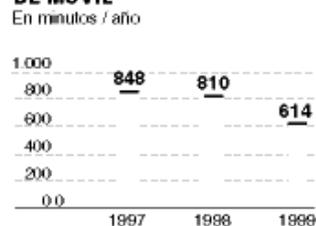
EL REPARTO EN ESPAÑA



FACTURACIÓN MEDIA POR CLIENTE DE MÓVIL



TRÁFICO MEDIO POR CLIENTE DE MÓVIL



Fuente: Mobile Communications y CMT.

EL PAÍS

Figura 2. El mercado de las telecomunicaciones en España

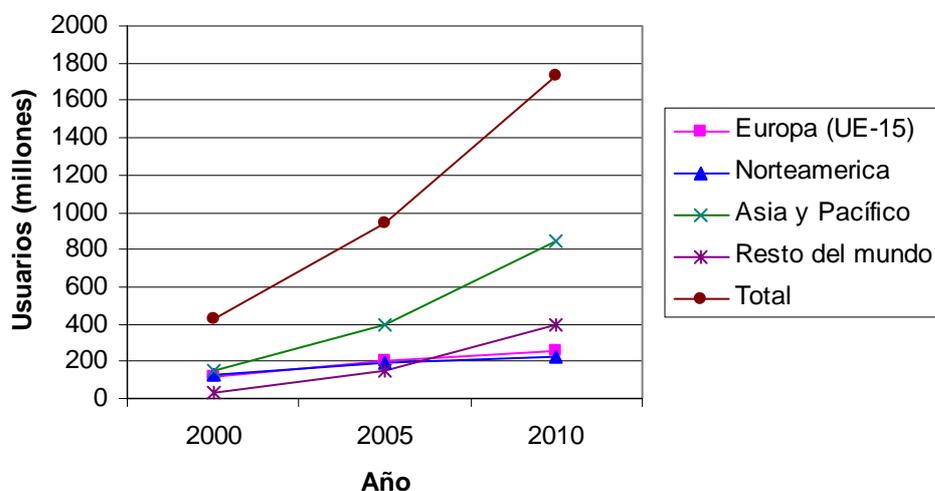


Figura 3. Predicción de la evolución del mercado de las comunicaciones móviles

- *El intenso crecimiento del uso de Internet.* El acceso a la red se ha vuelto también en los últimos años uno de los sectores de las telecomunicaciones donde el aumento de la demanda ha sido más acusado. Este hecho ha producido la aparición de una amplia variedad de nuevos servicios y negocios que han generado la llamada 'Nueva Economía'. La necesidad de combinar los beneficios de las comunicaciones móviles universales y el acceso a Internet ha surgido de forma natural suscitada por los nuevos negocios emergentes.
- *El aumento de la capacidad multimedia de los equipos informáticos.* Este hecho ha supuesto un fuerte incremento del uso de aplicaciones donde la cantidad de información que debe transmitirse por la red es de un volumen elevado. Este volumen además está en constante crecimiento. El ancho de banda necesario para estas transmisiones es por tanto un factor crucial para poder ofrecer la calidad adecuada para las aplicaciones que lo soportan. La demanda de ancho de banda en Internet ha crecido a una velocidad muy superior a la mejora de las infraestructuras, lo que ha producido que algunos servicios hayan tenido que ralentizar su entrada en el mercado debido a la falta de capacidad de transmisión. La posibilidad de tener un acceso de banda ancha desde un terminal móvil abre un universo de posibilidades enorme para desarrollar aplicaciones multimedia de todo tipo. La Figura 4 muestra una previsión del uso multimedia de los terminales móviles en el futuro próximo.

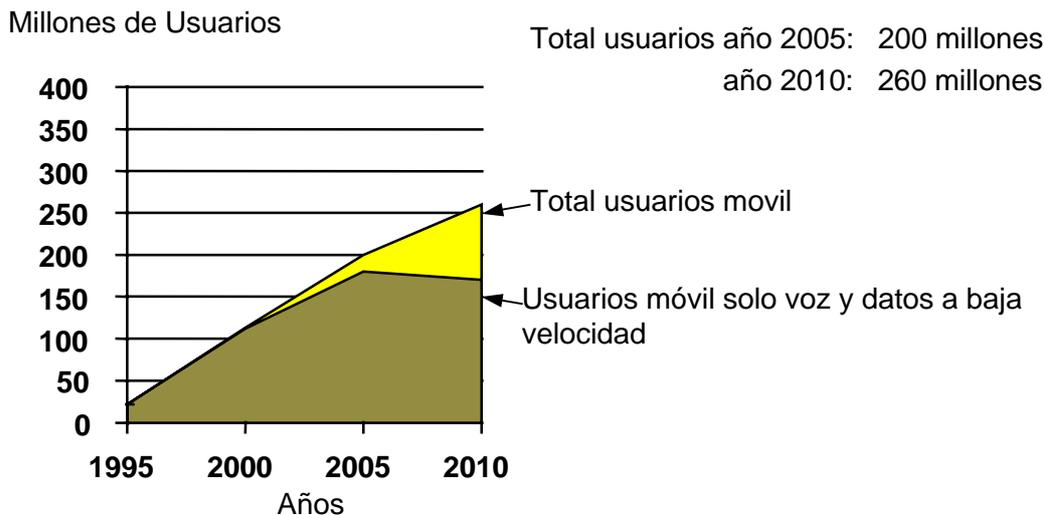


Figura 4. Previsiones de uso de servicios multimedia de alta capacidad

- *El aumento de la movilidad de las personas y los negocios.* El hecho de que la evolución de la economía haya permitido que cada vez los usuarios tengan más posibilidades de viajar y realizar negocios en cualquier parte del planeta, hace que se plantee como un elemento de gran utilidad el disponer de una herramienta de uso global, que sea capaz de comunicarse con la red de datos en cualquier punto, independientemente del país, sistema informático o entorno en el que se encuentre el usuario.

Todos estos factores han conducido a la necesidad de plantear un nuevo marco global para las comunicaciones móviles que cumpla los requisitos que la nueva sociedad de la información demanda.

En este sentido, el año 2000 ha sido de especial relevancia para la futura puesta en marcha de los nuevos sistemas de tercera generación. Ha sido el año en el que se han establecido los primeros estándares técnicos y se han adjudicado las primeras licencias para operadores en los principales países europeos. Se prevé que para principios de 2002, o incluso antes en algunos países como España, las primeras redes de tercera generación tengan completada una primera fase de puesta en marcha y los primeros terminales de usuario empiecen a dar servicio.

Los sistemas de tercera generación están siendo diseñados específicamente para las comunicaciones multimedia. Con ellos las comunicaciones entre personas se verán sustancialmente mejoradas respecto a los sistemas anteriores. Esta mejora se dará gracias a la posibilidad de incluir en las transmisiones algunos elementos nuevos como imágenes de alta calidad y vídeo, así como por el aumento sustancial de la tasa de transmisión de datos en los accesos a la información y servicios de redes tanto públicas como privadas. Todo esto, junto con la continua evolución de los sistemas de segunda generación actuales, creará un sinfín de nuevas oportunidades de negocio no sólo para los fabricantes de equipos de telecomunicaciones y las operadoras, sino también para los proveedores de contenidos y de aplicaciones que usan la red.

Desde el punto de vista técnico, la tecnología llamada CDMA de banda ancha o WCDMA (*Wideband CDMA*) [3], ha sido la que los foros de estandarización han adoptado como interfaz aire para la tercera generación de comunicaciones móviles. Sus especificaciones han sido definidas por el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) [4], que es el resultado de la unión de los equipos de estandarización de Europa, Japón, Korea, los EEUU y China. Sin embargo, en los EEUU han propiciado la creación de su propio foro de estandarización, el llamado 3GPP2. En la Figura 5 se muestra el ámbito de actuación del 3GPP. En este seno, los sistemas de tercera generación se engloban en las siglas UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y la tecnología WCDMA usada en el interfaz aire es denominada como UTRA (*UMTS Terrestrial Radio Access*) [5]. Esta tecnología tiene dos modos de operación: el FDD (*Frequency Division Duplex*) donde los enlaces ascendente y descendente se separan en el dominio de la frecuencia, y el TDD (*Time Division Duplex*) donde la misma separación se hace en el dominio del tiempo. La Figura 6 muestra una representación gráfica de estos modos de operación.

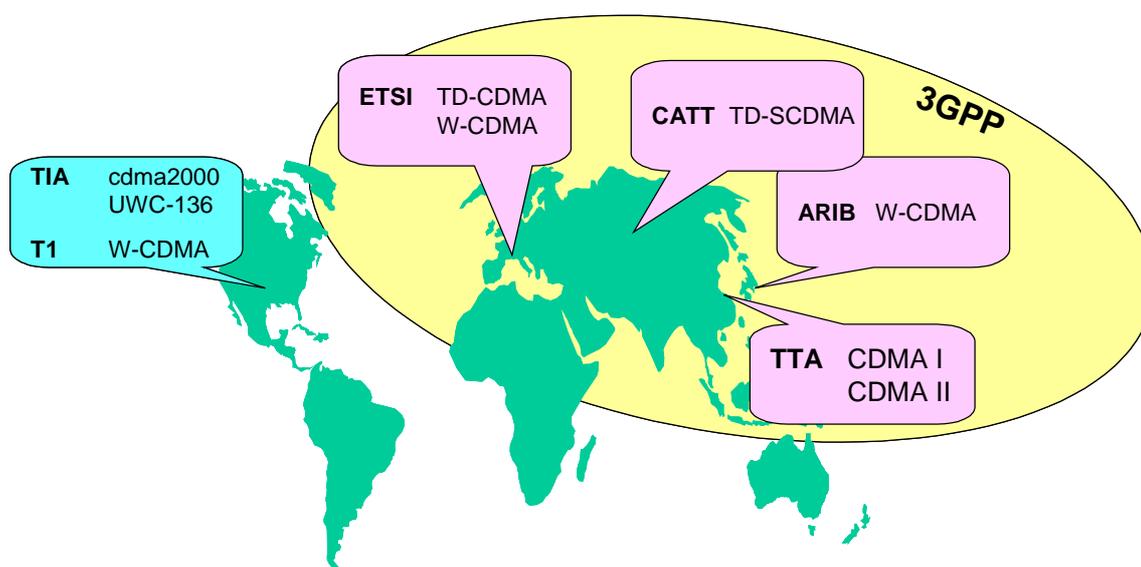


Figura 5. Ámbito de actuación del 3GPP

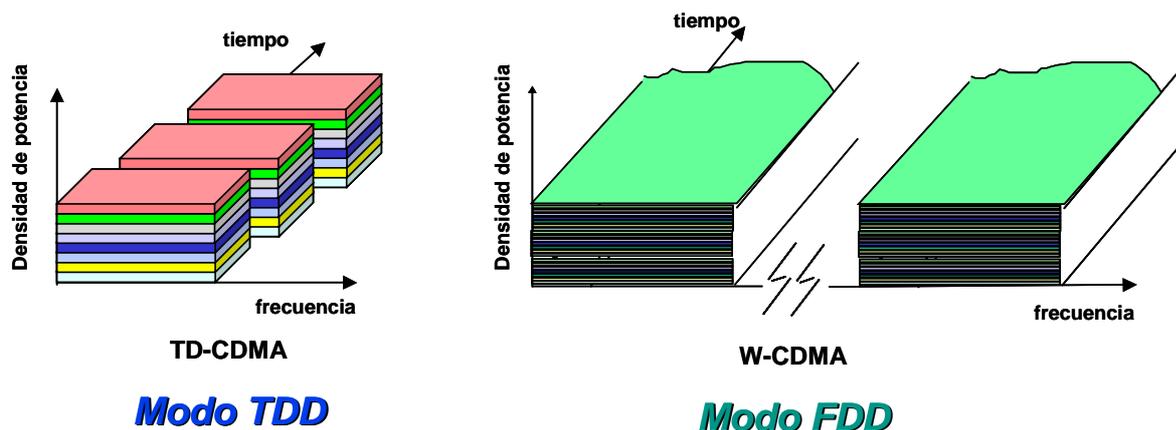


Figura 6. Modos de operación de WCDMA

Desde el punto de vista del usuario, los sistemas de tercera generación se han concebido como un sistema global, que comprenda tanto los sistemas terrestres como los asistidos por satélite. El objetivo es conseguir sistemas de comunicaciones personales integrales, donde un mismo terminal de usuario pueda desplazarse y conectarse sucesivamente a una red local inalámbrica o fija, pasar a un sistema picocelular en interiores o exteriores, y de ahí ir a una red macrocelular pública, e incluso transferir la comunicación de modo transparente a los sistemas existentes de segunda generación. La Figura 7 muestra un diagrama explicativo de este concepto. Un segundo objetivo de estos sistemas es conseguir un entorno uniforme para el usuario, que no varíe según el sistema utilizado o su localización. Es el llamado *Virtual Home Environment* (VHE). Se pretende que todos los parámetros de uso del terminal sean totalmente independientes de la tecnología y que la red sea una entidad transparente al usuario.

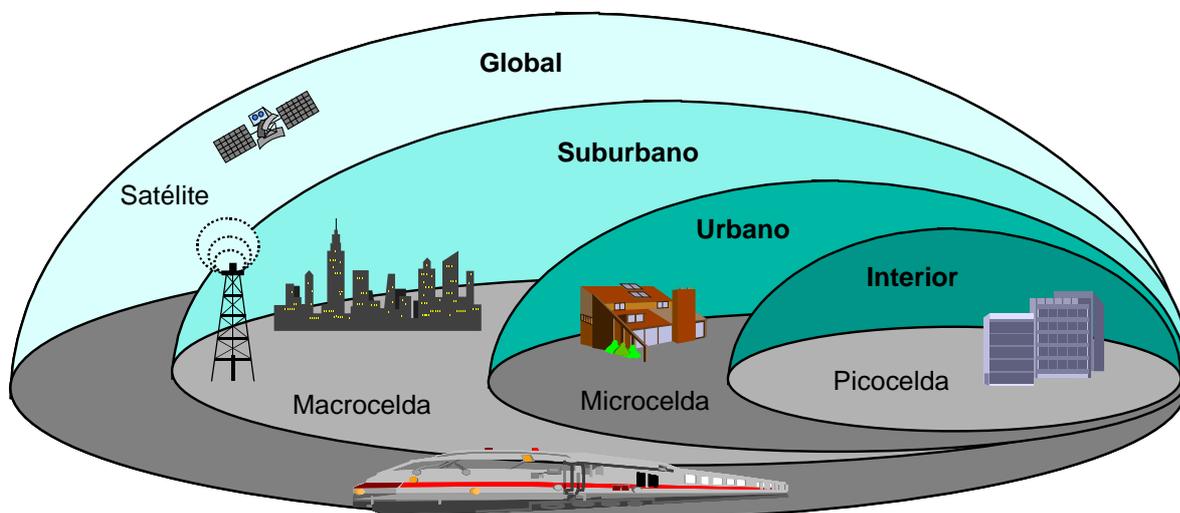


Figura 7. Cobertura global de los sistemas de comunicaciones de tercera generación

1.2.2 Proceso de estandarización de las comunicaciones móviles de tercera generación. La elección del interfaz aire.

En Europa, la investigación sobre las especificaciones del estándar para el nuevo acceso radio se inició con proyectos como RACE [6], CODIT [7] y FRAMES [8] realizados bajo el auspicio de la Unión Europea a principios de los años 90 [9]. Por su parte, las grandes compañías de telecomunicaciones también iniciaron en esas fechas sus propias investigaciones en el mismo campo. Estos proyectos produjeron los primeros sistemas piloto

para evaluar las capacidades de los enlaces radio y generaron la base para la necesaria comprensión del sistema, previa a la definición de los estándares. Las propuestas para el UMTS *Terrestrial Radio Access*, conocido como UTRA, se agruparon en cinco grandes bloques por la ETSI, en 1997. Los grupos formados fueron:

- *Wideband* CDMA (WCDMA)
- *Wideband* TDMA (WTDMA)
- TDMA/CDMA
- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- ODMA (Opportunity Driven Multiple Access)

Todas estas tecnologías fueron evaluadas en base a los requerimientos de sistema definidos en la norma del ITU-R llamada IMT-2000 [10]. A continuación se detallan sucintamente las características más importantes de cada propuesta.

1.2.2.1 WCDMA (Wideband CDMA)

El concepto de WCDMA se desarrolló a partir de las propuestas de algunas compañías de telecomunicaciones como Fujitsu, NEC y Panasonic, además de los trabajos realizados en el proyecto FRAMES/FMA2. El nivel físico adoptado para en enlace ascendente fue prácticamente idéntico al propuesto en FRAMES, mientras que para el enlace descendente se utilizaron otras propuestas de las compañías de telecomunicaciones. Las principales características del sistema son:

- Operación con un ancho de banda de 5 MHz
- Integración en la capa física de diferentes velocidades de transmisión con una sola portadora.
- Factor de reuso de frecuencias igual a la unidad.

También se consideraron algunas ventajas adicionales optativas:

- Uso de técnicas de diversidad en transmisión.
- Uso de antenas adaptativas.
- Soporte para utilizar sistemas receptores avanzados.

La gran flexibilidad de la capa física de WCDMA hizo que esta propuesta de acceso radio recibiera un gran apoyo por parte de todos los comités técnicos.

1.2.2.2 WTDMA (Wideband TDMA)

La propuesta WTDMA se formó a partir del estudio de sistema del proyecto FRAMES que no incluía el ensanchamiento espectral. El sistema básico está basado en un acceso TDMA con 1'6 MHz de separación entre portadoras. La alta capacidad se obtiene al usar una banda ancha junto con el promediado de las interferencias sobre el ancho de banda de cada operador.

También se utiliza un mecanismo de fraccionamiento de la carga y de saltos en frecuencia (*frequency hopping*) para mejorar la calidad de transmisión. Las características principales del sistema son:

- Uso de ecualización de canal con secuencias de entrenamiento en cada ráfaga TDMA.
- Promediado de interferencias y *frequency hopping*.
- Enlaces adaptativos.
- Dos tipos básicos de ráfagas, de 1/16 y 1/64 fracciones de ráfaga para tasas altas y bajas de transmisión.
- Factores de reuso de frecuencias pequeños.

Mientras que las mejoras opcionales son:

- Eliminación de la interferencia intercelular.
- Uso de antenas adaptativas.
- Modo de operación con duplexado en tiempo (TDD).
- Ecualizadores más sencillos para entornos con valores grandes del *delay spread*.

La principal limitación de WTDMA estriba en la pequeña distancia de cobertura de las estaciones base respecto a los sistemas de banda estrecha. Esto es debido a que en un modo de operación tipo TDMA, la duración mínima del slot temporal es un 1/64 del tiempo de una trama, lo que resulta en unas potencias de transmisión de pico muy elevadas o bien en unas pequeñas potencias medias de transmisión.

1.2.2.3 TDMA/CDMA

Esta propuesta también se basó en los trabajos desarrollados en el proyecto FRAMES, y resultó en un sistema híbrido TDMA/CDMA con 1'6 MHz de separación entre portadoras. Sus características más importantes son:

- Estructura de ráfagas TDMA con secuencias de entrenamiento para la estimación de canal colocadas en mitad de las mismas (*midambles*).
- Técnica CDMA aplicada en sobre la estructura TDMA para proporcionar flexibilidad adicional.
- Reducción de la interferencia intracelular gracias a la detección multiusuario para los usuarios dentro del mismo slot de tiempo que transmiten con la misma portadora.
- Factor de reuso de frecuencias igual a 3.

Junto con las mejoras opcionales:

- *Frequency hopping*.

- Cancelación de interferencias intercelulares.
- Uso de antenas adaptativas.
- Modo de operación con duplexado en tiempo (TDD)
- Asignación dinámica de canales (DCA).

Esta propuesta generó numerosos debates técnicos durante el proceso de selección, sobretodo debido a la complejidad que implica en los equipos receptores.

1.2.2.4 OFDMA

La propuesta OFDMA, basada en la técnica de transmisión que lleva el mismo nombre, fue propuesta basada principalmente en los trabajos realizados en las compañías Telia, Sony y Lucent. El concepto del sistema se perfiló también con las discusiones de otros foros técnicos, como el grupo de estandarización japonés ARIB. Sus principales características son:

- Operación con *frequency hopping* lento, TDMA y multiplexado OFDM.
- Bandas de frecuencia de 100 KHz para las señales OFDM como recurso básico de transmisión.
- Adaptación de velocidades de transmisión a partir de la asignación múltiple de bandas para la creación de señales de banda ancha.
- Diversidad en transmisión a través de la división de la información en diferentes bandas sobre la misma portadora.

Las mejoras opcionales soportadas son:

- Otras técnicas de diversidad en transmisión.
- Detección multiusuario para la cancelación de interferencias.
- Uso de antenas adaptativas.

El principal punto débil de la implementación práctica del sistema está en el diseño de los amplificadores para el enlace ascendente. Esto es debido a las variaciones de la envolvente de la señal, que complica la obtención de amplificadores lineales eficientes.

1.2.2.5 ODMA

La compañía Vodafone propuso la técnica llamada *Opportunity Driven Multiple Access* (ODMA), básicamente consistente en un protocolo de acceso, más que en una técnica de multiplexado propiamente dicha. Esta técnica fue más tarde incorporada a las propuestas WCDMA y la TDMA/CDMA y dejó de ser considerada como una propuesta independiente.

Brevemente podemos describir esta técnica como un sistema mediante el cual los usuarios que están fuera de cobertura utilizan otros usuarios como repetidores para alcanzar una cierta estación base. Este modo de operación está pensado para el modo de duplexado TDD en el que las frecuencias de transmisión y recepción son las mismas. El uso de esta técnica en un

entorno FDD requeriría que los terminales tuvieran equipos de transmisión duplicados. Este requisito hace por tanto poco atractivo el uso de ODMA en entornos FDD.

1.2.2.6 El sistema seleccionado

En enero de 1998 el ETSI decidió tomar WCDMA como estándar para el interfaz radio en las comunicaciones de tercera generación. Tal y como se ha citado, el trabajo detallado de estandarización ha sido llevado a cabo desde entonces como parte del proceso del 3GPP bajo el nombre de UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*). El primer conjunto completo de especificaciones técnicas para UMTS se completó a finales de 1999. Al acceso radio de UMTS es conocido como UTRA (*UMTS Terrestrial Radio Access* o *Universal Terrestrial Radio Access*).

Las primeras redes comerciales tienen prevista su puesta en marcha en Japón durante el año 2001. En Europa y Asia este inicio está previsto para principios del 2002 (excepto en España donde el gobierno ha obligado a las operadoras a tener los primeros servicios listos para agosto de 2001). Estas previsiones se refieren al modo de operación FDD. Se espera que el modo TDD se ponga en marcha con cierta posterioridad. En Japón incluso no está clara la puesta en marcha de este último modo, debido a la no disponibilidad del espectro de frecuencias previsto para el mismo.

Desde que en julio de 1991 se pusiera en marcha la primera red GSM en Finlandia, muchos países han alcanzado cuotas de mercado por encima del 50% de la población para los servicios de voz. La tercera generación de las comunicaciones móviles tiene el reto de hacer llegar a esa población todo un nuevo universo de servicios con la misma flexibilidad y utilidad. En la Tabla 1 se describe el calendario de desarrollo del estándar UMTS.

Tabla 1. Calendario de desarrollo de UMTS

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Primera visión de UMTS revisada										
Investigación: ACTS										
UMTS Forum: primer informe										
Primera asignación de espectro										
Decisión de la UE para inicio UMTS										
Definición condiciones licencias nacionales										
Asignación de licencias nacionales										
Estándares del ITU										
Estudios básicos sobre estándares										
Elabor. primer estándar detallado UMTS										
Desarrollo del sistema UMTS										
Sistemas piloto										
Planificación y puesta en marcha UMTS										
Uso comercial de UMTS										

En la actualidad, se han suscitado innumerables polémicas sobre el método de concesión de licencias de UMTS que los gobiernos de los países de la UE han desarrollado en los últimos meses. Los ingresos que han generado los distintos estados de los países miembros han sido de cuantías muy diversas. Este hecho también ha alimentado la polémica. Algunos expertos opinan que ciertos países han cobrado demasiado como canon y ello repercutirá en los futuros precios de los servicios. Por el contrario, otros creen que ciertos países, como España, han obtenido muchos menos ingresos para las arcas del estado de los que podrían haber conseguido.

1.2.3 Evolución del interfaz aire. Nuevos requisitos para la tercera generación

Las comunicaciones de segunda generación se han diseñado básicamente para dar servicios de transmisión de voz en sistemas macro-celulares. Para entender las diferencias con los sistemas de tercera generación, debemos describir en primer lugar los requerimientos que se le exigen a estas nuevas comunicaciones:

- Velocidades de transmisión de hasta 2 Mbps.
- Velocidades de transmisión variables en función de las necesidades de las aplicaciones y los usuarios.
- Multiplexación de diferentes servicios con tasas y calidades diferentes en una misma conexión.
- Capacidad de definición de restricciones de retardo máximo en la transmisión de la información en función de las necesidades de cada aplicación.
- Tasas de error en la transmisión digital variables según las necesidades de cada aplicación.
- Compatibilidad con los sistemas de segunda generación para poder coexistir con ellos.
- Capacidad de gestión eficiente de tráfico asimétrico entre los enlaces ascendente y descendente.
- Alta eficiencia espectral.
- Coexistencia de los modos de operación FDD y TDD.

En la Tabla 2 se listan las principales diferencias entre el sistema UMTS y GSM, que constituye el estándar actual de facto de los sistemas de segunda generación. En esta comparación se consideran únicamente los parámetros relacionados con el interfaz aire. El estándar GSM también define algunos aspectos sobre los servicios y la red de transporte que serán utilizados también por los sistemas de tercera generación. Es decir, se pretende que al menos inicialmente el interfaz aire UTRA utilice la plataforma GSM en el nivel de transporte y de red.

Observando las diferencias del interfaz aire, se comprueba que el ancho de banda utilizado es mucho mayor en UMTS. Los 5 MHz utilizados son necesarios para poder dar soporte a las altas tasas de transmisión requeridas. En UMTS se incluyen técnicas de diversidad en transmisión para mejorar la capacidad del enlace descendente y poder incluir asimetrías entre los enlaces ascendente y descendente. Por el contrario, los sistemas de segunda generación no incluyen estas técnicas de diversidad en transmisión.

Tabla 2

	UMTS	GSM
Espaciado entre portadoras	5 MHz	200 KHz
Factor de reuso de frecuencias	1	1-18
Frecuencia del control de potencia	1500 Hz	2 Hz
Control de calidad	Algoritmos RRM	Planificación de frecuencias
Diversidad en frecuencia	El sistema de banda ancha Permite tener diversidad multicamino y usar un receptor RAKE	Frequency Hopping
Transmisión de datos en modo paquete	Gestión basada en la carga	GPRS
Diversidad por transmisión en enlace descendente	Incluida	No incluida en el estándar aunque puede ser añadida

Por otro lado, la mezcla de diferentes tasas, servicios y calidades de transmisión, hace que los sistemas de tercera generación deban incorporar algoritmos de gestión de los recursos radio (*Radio Resource Management*) avanzados. Estos algoritmos deben ser capaces de garantizar las calidades requeridas al mismo tiempo que maximizan la eficiencia global del sistema.

La experiencia sobre los sistemas de segunda generación ha sido importante a la hora del diseño de los nuevos sistemas. Sin embargo, para poder explotar al máximo todas las capacidades de UMTS es necesario un conocimiento exhaustivo de sus especificidades tanto de la capa física como de la planificación del resto de la red.

1.2.4 Asignación de espectro

La Figura 8 muestra un gráfico de la asignación de espectro para los sistemas de tercera generación en los grandes bloques geo-económicos. Se indica con las siglas IMT-2000 al conjunto de estándares de tercera generación. En Europa, UMTS es la implementación concreta del sistema de tercera generación. Recordemos que el 3GPP, que trabaja en la estandarización de UMTS, engloba a todos los bloques de trabajo de los países más avanzados excepto a los EEUU, que tienen su propio grupo de trabajo, el 3GPP2.

Las bandas para UTRA son de 1900 a 1980 MHz, de 2010 a 2025 MHz y de 2110 a 2170 MHz. Las asignaciones marcadas como MSS en la banda de los 2 GHz son para servicios vía satélite.

De acuerdo con la decisión de la UE, una banda de al menos 80 MHz deberá estar disponible en Europa para los operadores de UMTS/IMT-2000 en el inicio de 2002, y para el año 2005 la banda disponible deberá alcanzar los 155 MHz, sujeta a las demandas del mercado.

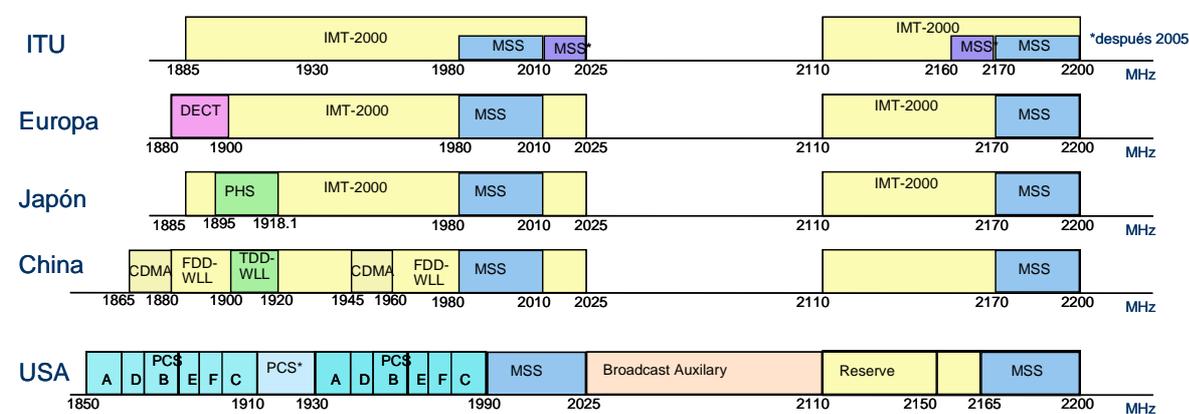


Figura 8. Asignación de espectro para las comunicaciones móviles de tercera generación

1.2.5 La evolución futura del estándar UMTS

Una vez terminadas las primeras especificaciones completas para el interfaz radio de UMTS, la llamada *Release-99*, los trabajos de estandarización se centran ahora en especificar nuevas prestaciones para el sistema, así como realizar las necesarias correcciones a la primera versión del estándar. Normalmente estas correcciones surgen en la fase de realización práctica tanto de los sistemas piloto como de los primeros equipos comerciales. Se han desarrollado varios sistemas de prueba desde 1995, pero únicamente la implementación en un entorno real, bien urbano bien rural, con usuarios reales será la que permitirá afinar las especificaciones convenientemente.

Durante el año 2000 se han realizado los estudios de cómo integrar el nuevo enlace radio con la red GSM que actualmente está operativa. Este desarrollo permitirá a los operadores cierta flexibilidad en la puesta en marcha de los sistemas de tercera generación en función de los requerimientos y demandas del mercado.

Por otro lado, se espera que los avances en el desarrollo tecnológico permitirán en un futuro próximo disponer de terminales multimodo y multibanda que puedan funcionar con un amplio abanico de sistemas comerciales y que sean capaces de aprovechar la tecnología más adecuada del entorno en el que se encuentren operativos. En este sentido, los esfuerzos de estandarización global que permitan tener un sistema predominante a nivel planetario están topando con enormes dificultades tanto técnicas como de asignación de espectro. Este hecho está potenciando más si cabe la investigación en sistemas de compatibilidad por programación software: la tecnología llamada *Software Radio*.

1.2.6 Nuevos servicios y aplicaciones

Una característica fundamental de las comunicaciones móviles de tercera generación es la mayor tasa de transmisión de información respecto a sus antecesoras. Este aumento de la capacidad de transmisión facilita la aparición de nuevos servicios que antes no podían ser utilizados, como video-telefonía, o la descarga rápida de ficheros. El acceso rápido y móvil a Internet será con seguridad en el futuro próximo uno de los pilares fundamentales de la llamada Sociedad de la Información.

En los inicios, casi toda la información que viajaba en los sistemas de comunicaciones móviles era tráfico de voz. Sin embargo, la demanda de transmisión de datos está creciendo de manera muy intensa. El éxito de la tercera generación de móviles dependerá en gran medida de los servicios de datos que pueda ofrecer. Es difícil predecir cuándo el tráfico de datos superará en importancia al de voz, pero en cualquier caso parece claro que su volumen está experimentando un crecimiento imparable.

Por otro lado, al mismo tiempo que se produce la transición del tráfico de voz al de datos, también se está produciendo una transición de las transmisiones en modo circuito a transmisiones en modo paquete. Las fuentes de información digitales tienen una naturaleza generalmente discontinua y racheada que se adapta mucho mejor a este tipo de transmisiones.

Sin embargo, en los inicios de la puesta en marcha de los sistemas de tercera generación, éstos no ofrecerán todos los servicios previstos. Por tanto, aquellos servicios con necesidades estrictas de retardo, como la telefonía o la video telefonía, se basarán en transmisiones en modo circuito. Más adelante será posible que estas mismas aplicaciones, junto con otras

muchas, puedan ser servidas con transmisiones en modo paquete, lo que redundará en un mejor aprovechamiento de los recursos.

Los sistemas de tercera generación presentan una nueva característica sustancial respecto a los de segunda generación: deberán permitir la negociación entre el usuario y la operadora de las características de la conexión que se llevará a cabo. Estas características podrán incluir parámetros como el caudal efectivo garantizado, el retardo máximo tolerado de transmisión o la tasa de error de los paquetes de información. Para que los sistemas de tercera generación tengan éxito en el futuro, será crucial que puedan ofrecer un abanico lo más extenso posible de diferentes servicios y aplicaciones. Por tanto no es conveniente ni adecuado que el diseño de sistemas concretos como UMTS estén enfocados a la optimización de un determinado servicio concreto. Por el contrario, el diseño deberá ser lo más flexible posible y permitir que puedan desarrollarse con facilidad nuevas aplicaciones, algunas de las cuales quizás ahora aún no podemos ni imaginar.

1.2.7 Clases de servicio

En general, las aplicaciones y los servicios pueden dividirse en diferentes grupos, según su consideración. Cada uno de los flujos de información que deben transmitirse tendrán sus propias características, pero pueden agruparse según su afinidad.

En los sistemas de tercera generación se definen cuatro clases genéricas de servicio, o tipos de conexión [48]:

- Conversacional
- De flujo continuo (*streaming*)
- Interactivos
- De fondo (*background*)

En general, en las dos primeras clases se consideran los servicios llamados de tiempo real, mientras que en las dos últimas están los servicios no en tiempo real. En la Tabla 3 se resumen las características principales de las cuatro clases de servicio.

Tabla 3

Clase de servicio	Características	Ejemplos de aplicaciones
Conversacional	Retardo máximo estricto y pequeño. Variación del retardo (<i>jitter</i>) pequeña y estricta	Voz, Vídeo telefonía, Videojuegos
<i>Streaming</i>	Variación del retardo (<i>jitter</i>) pequeña y estricta	Distribución de vídeo
Interactiva	Retardo máximo acotado pero amplio. Fiabilidad e integridad de los datos transmitidos.	Navegación Web, Juegos en red
<i>Background</i>	Retardo máximo no acotado. Fiabilidad e integridad de los datos transmitidos.	Correo electrónico, Descarga de ficheros

Inicialmente, los sistemas de tercera generación ofrecerán servicios en tiempo real utilizando transmisiones en modo circuito, pero se pretende que el diseño de sistemas de gestión eficiente de los recursos radio permita que en un futuro próximo estos servicios puedan ser soportados por transmisiones en modo paquete. En este sentido, la presente tesis doctoral pretende aportar propuestas innovadoras tanto a nivel de protocolos de acceso al medio (capa

MAC) como en los sistemas de gestión del interfaz aire (*Radio Resource Management*) que permitan alcanzar este objetivo.

1.2.7.1 Clase conversacional

La aplicación más utilizada de la clase conversacional es el servicio de voz. El auge del Internet y del mundo multimedia potenciará más si cabe la necesidad de este tipo de aplicaciones. La telefonía sobre IP está teniendo una importancia creciente, en buena parte por el descenso que supone en el coste de las comunicaciones.

Las transmisiones de este tipo se caracterizan por ser prácticamente simétricas y requerir unos retardo de transmisión extremo a extremo muy pequeños. El valor de este retardo máximo viene limitado por la percepción humana. Evaluaciones subjetivas indican que para que se pueda llevar una conversación de un modo aceptable el retardo extremo a extremo no debe ser mayor de 400 ms. El no cumplimiento de esta estricta condición implica que la calidad de la transmisión no es suficiente para cumplir el cometido de la aplicación.

1.2.7.2 Clase streaming

Las transmisiones de flujo continuo o *streaming* son aquellas en las que se transfiere una información multimedia de modo unidireccional y de manera que pueda ser procesada como un flujo estable de datos. El incremento de la demanda de este tipo de servicios, como los de descarga de ficheros multimedia para ser vistos en tiempo real, está ocasionando que cada vez más usuarios no dispongan de capacidad de transmisión suficiente para alcanzar la calidad final mínima requerida. Por tanto, cada vez se hace más necesario arbitrar mecanismos que permitan asegurar a un usuario la calidad de transmisión necesaria para este cometido.

El objetivo de las transmisiones debe ser que el programa encargado de recibir y presentar la información multimedia pueda comenzar antes de recibir toda la información que desea el usuario final. Básicamente este tipo de aplicaciones implican la transmisión de secuencias de vídeo y audio en tiempo real. Las transmisiones son marcadamente asimétricas y ello condiciona en gran medida el diseño de las comunicaciones. Otra característica importante de este tipo de servicios es que toleran en mayor medida las variaciones del retardo de transmisión (*jitter*) que las conversacionales. Esto es gracias a que puede resultar sencillo suavizar estos cambios usando técnicas de almacenado o *buffering*.

La distribución de vídeo bajo demanda es con certeza una de las aplicaciones más importantes que basarán su funcionamiento en este tipo de servicios.

1.2.7.3 Clase interactiva

Este tipo de conexiones se aplican en situaciones en las que un usuario final está solicitando una cierta información de un equipo remoto, normalmente un servidor. Ejemplos de interacción humana son la navegación web, las consultas con bases de datos, controles de acceso, banca electrónica, etc.

Puesto que siempre hay una entidad esperando la respuesta a la petición cursada, es necesario que el tiempo de retardo máximo esté acotado. Por otro lado, la información transferida se corresponde con datos que deben ser fidedignos con los originales. Por ello, se hace necesario que el sistema garantice la integridad y fiabilidad de las transmisiones.

Existen además dos nuevos servicios, dentro de esta clase interactiva, que se espera que tengan un auge importante con la entrada de la tercera generación de las comunicaciones móviles:

- Servicios dependientes de la localización.
- Juegos de ordenador (*on-line gaming*).

Los servicios dependientes de la localización son aquellos que hacen que la información disponible para el usuario varíe en función del lugar geográfico en el que se encuentre. Ejemplos de estos servicios serían la localización de los restaurantes, hoteles o gasolineras más cercanos al usuario en un momento dado. Otros servicios de este tipo son la tarificación variable en función de la localización, la descarga de ficheros de información en modo pasivo (por ejemplo, solicitar información sobre una ciudad a la que se va a viajar o se está viajando), descarga de mapas de carreteras de la zona de paso, etc.

De cara a la implementación de estos servicios es necesario arbitrar técnicas de localización de los usuarios móviles. Por ejemplo, en la versión 99 (*Release 99*) de UMTS se definen tres diferentes maneras para realizar esta medida, todas ellas complementarias entre sí. Estas técnicas permiten localizar a un usuario con una precisión de unos 50 m.

Los juegos de ordenador son también un campo del ocio que puede extenderse en gran medida con el soporte de las comunicaciones de tercera generación. Sin embargo, dependiendo de la naturaleza del juego, es posible que las transmisiones deban considerarse del tipo conversacional para que el funcionamiento sea el adecuado, debido a que algunos de ellos requieren de restricciones de retardo muy estrictas.

1.2.7.4 Clase *Background*

El correo electrónico, el envío de mensajes cortos (SMS) y de postales electrónicas, la descarga de información de bases de datos o la lectura de medidas remotas son ejemplos típicos de aplicaciones de tipo *background*. El retardo de transmisión de los datos puede ser del orden de segundos, decenas de segundos o incluso minutos. De hecho, en realidad todo el tráfico de Internet actual funciona con esta filosofía, llamada *best effort*, que quiere decir que el sistema hace lo que puede para transmitir la información con el menor retardo posible, pero sin garantizar ningún valor acotado.

Aunque el retardo no es una restricción en estos casos, la fiabilidad e integridad de los datos siguen siendo un requisito insoslayable del sistema para estas conexiones.

1.3 Motivación y objetivos de la tesis

Una vez descrito el contexto actual de las comunicaciones móviles y el marco previsto para su futuro a corto y medio plazo, en este punto vamos a describir las motivaciones y objetivos concretos de la presente tesis doctoral.

Para que las futuras comunicaciones móviles de tercera generación cumplan sus requisitos marcados (ver 1.2.3) es necesario que se creen nuevas estrategias para los algoritmos de funcionamiento de algunos de los componentes principales del sistema. Hasta este punto hemos destacado los cambios, respecto a los sistemas de segunda generación, que es necesario realizar en la capa física. Sin embargo, para poder cumplir los citados requerimientos, es necesario introducir también cambios en las capas superiores del sistema.

En particular, tanto el control de acceso al medio (MAC) como la gestión de los recursos radio (RRM) son dos piezas clave en el diseño de los sistemas de tercera generación. La investigación sobre estos campos ha adquirido una relevancia muy significativa en los últimos años, debido fundamentalmente a la inminencia de la puesta en marcha de los primeros sistemas comerciales UMTS. La elaboración y el estudio de nuevas propuestas aplicables en este ámbito son, por tanto, de gran importancia por su posible aplicabilidad inmediata en el diseño de los nuevos sistemas de comunicaciones móviles.

Por otro lado, la naturaleza de la información transmitida por las redes de comunicaciones ha sufrido una evolución incesante. La cantidad de información transmitida en modo paquete, asimétrica y racheada, es cada vez más importante. Incluso el tráfico de voz está empezando a encaminarse por redes basadas en el protocolo IP (voz sobre IP) y convirtiéndose también en un flujo discontinuo de datos. Ya la primera versión del estándar UMTS incluye los canales físicos necesarios para poder realizar transmisiones por canal común en modo paquete. Por todo ello, es especialmente interesante centrar los esfuerzos de investigación en estrategias que tengan en cuenta este nuevo modo de transmisión.

Con este marco de referencia, el presente estudio se centra en la definición de nuevas propuestas tanto para la capa de acceso al medio (MAC) como para la capa de gestión de recursos radio (RRM) en sistemas genéricos basados en el acceso CDMA. Todas las propuestas definidas y estudiadas se han realizado con el objetivo de conseguir dotar a las transmisiones de información de una alta eficiencia en la utilización de los recursos disponibles y poder disponer de la posibilidad de garantizar una cierta calidad de servicio. Se considerará en todo momento el diseño para transmisiones realizadas en modo paquete. Se han llevado a cabo simulaciones por ordenador que han validado los modelos matemáticos propuestos y han permitido optimizar los algoritmos para algunas condiciones de trabajo.

Más en concreto, el presente trabajo tiene dos pilares fundamentales. Por un lado, se ha realizado la definición de una propuesta innovadora de un protocolo de acceso al medio (MAC), preparado para un sistema CDMA con transmisiones en modo paquete. La eficiencia de transmisión del protocolo se acerca al óptimo teórico y su estabilidad se mantiene para cualquier carga de tráfico ofrecida, incluso si ésta supera la capacidad de transmisión del canal durante ciertos períodos de tiempo. Además, la realización práctica del protocolo resulta sencilla y efectiva. El protocolo se ha diseñado y estudiado en un amplio abanico de escenarios relevantes. Se ha desarrollado un modelo matemático del mismo, validado después con simulaciones por ordenador. Complementariamente, se han realizado otros estudios para completar el análisis de la propuesta en todas sus posibles vertientes. Se ha estudiado la robustez de su funcionamiento frente a errores en los canales de control, se ha realizado un trabajo de optimización variando las condiciones de tráfico del sistema y también se ha llevado a cabo un estudio de su respuesta en un entorno celular, de cara a aprovechar sus características en la mejora de la gestión de los trasposos o *handovers*.

Por otro lado, se ha definido un nuevo algoritmo de gestión de recursos radio, capaz de garantizar una cierta calidad de servicio para las conexiones, y que se basa en la utilización del nuevo protocolo MAC propuesto. De este modo, se ha realizado y estudiado una nueva propuesta completa de sistema donde se mejoran sustancialmente las prestaciones de los sistemas existentes hasta la fecha.

De forma esquemática, los objetivos de la presente tesis doctoral pueden resumirse del siguiente modo:

- Definir un nuevo protocolo de acceso al medio (MAC) que mejore de modo sustancial los existentes hasta el momento, y que esté preparado para operar en un entorno con acceso CDMA y transmisiones en modo paquete. Definir un modelo matemático del protocolo y su algoritmo de funcionamiento.
- Estudiar con detalle el protocolo propuesto. Realizar simulaciones por ordenador que validen tanto el algoritmo del protocolo como su modelo. Variar las condiciones de trabajo para verificar que mantiene sus prestaciones ventajosas en todo momento. Estudiar la respuesta del protocolo en presencia de un canal real, que genera errores en la transmisión de la información de control. Estudiar el protocolo en un entorno celular y comprobar las ventajas que ofrece en la gestión de los traspasos.
- Definir un nuevo algoritmo de gestión de los recursos radio que, basado en un sistema que utilice el protocolo anterior, pueda permitir ofrecer transmisiones de calidad garantizada para diferentes tipos de servicio.
- Analizar el sistema global propuesto y comprobar su adecuación para poder ser propuesto como candidato a ser usado en futuros sistemas comerciales de tercera generación, en particular en UMTS.

1.4 Contenidos

A continuación se detalla la estructura de la presente tesis doctoral, junto con una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos.

En el capítulo 2 se hace una descripción detallada de los elementos del entorno de trabajo en el que se va a desarrollar todo el estudio. En este capítulo se describen los conceptos básicos del modo de acceso CDMA y los demás elementos de la capa física que serán utilizados. Por otro lado, en este mismo capítulo se realiza una visión del estado del arte en cuanto a protocolos de acceso al medio y algoritmos de gestión.

En el capítulo 3 se realiza la descripción detallada del nuevo protocolo de acceso al medio propuesto, su modelo matemático y las simulaciones realizadas. Se realizan comparaciones con otros protocolos existentes en condiciones equivalentes de trabajo y se introduce el estudio de su comportamiento en entornos de tráfico multimedia. Por otro lado, se analiza en profundidad un problema específico del protocolo propuesto: el sistema de detección de secuencias de petición de acceso. Para ello se propone un esquema de circuito receptor y se calculan las probabilidades de error en la detección de los estados de los minislots de acceso a partir de las probabilidades de detección y falsa alarma de los filtros empleados. Se describen asimismo las modificaciones necesarias para mantener la robustez del protocolo en presencia de errores en la detección de los estados de los minislots.

En el capítulo 4 se analizan en detalle los parámetros del funcionamiento del protocolo y se describen las modificaciones necesarias para optimizar su rendimiento cuando las condiciones de trabajo son adversas. Se analizan con detalle las modificaciones propuestas y se muestran los resultados obtenidos. Estos resultados muestran que con los cambios es posible mantener las excelentes prestaciones del protocolo para cualquier tipo de tráfico de entrada.

En el capítulo 5 se estudia el comportamiento del protocolo de acceso en un entorno celular. En particular, el estudio se centra en tratar de aprovechar las características del protocolo para

mejorar los criterios de traspaso y mejorar la cobertura del sistema, que en los sistemas CDMA es dependiente de la carga de tráfico de cada célula.

En el capítulo 6 se aborda el problema de dotar de calidad de servicio a las transmisiones realizadas, basadas en el protocolo de acceso propuesto. Para ello se realiza la definición de un nuevo algoritmo de gestión de recursos radio. Este algoritmo permite tener un número indeterminado de clases de servicio con características diferentes de transmisión a las que se les garantiza una cierta calidad en sus transmisiones.

Finalmente, el capítulo 7 está dedicado a las conclusiones generales y a la descripción de las líneas futuras de investigación que pueden seguirse a partir del presente trabajo. También se incluye en este capítulo final una breve referencia técnica a la posible adecuación de las ideas presentadas en esta tesis para ser incluidas en el estándar UMTS de comunicaciones móviles de tercera generación. En este sentido, se ha incluido una breve descripción de las características más relevantes del interfaz radio UTRA.

1.5 Publicaciones relacionadas

Todo el trabajo realizado en esta tesis doctoral ha sido publicado en diversos congresos, tanto nacionales como internacionales, así como en revistas internacionales de reconocido prestigio. A continuación se detallan todas las referencias de trabajos publicados que tienen relación con la presente tesis doctoral:

Congresos Nacionales:

- Luis G. Alonso, Ramón Agustí, “Caracterización basada en OOD de la llegada de paquetes al canal en sistemas de comunicaciones móviles”, URSI'98, pp. 239-240. Pamplona, septiembre 1998.
- Luis G. Alonso, Jordi Pérez, Ramón Agustí, Oriol Sallent, “Técnicas de transmisión por paquetes alternativas a S-ALOHA basadas en CDMA para sistemas de comunicaciones móviles”, Telecom I+D'99, Barcelona-Madrid, noviembre 1999.
- Luis G. Alonso, Ramon Agustí, Oriol Sallent, “Gestión Distribuida con Calidad de Servicio Garantizada para Sistemas de Transmisión por Paquetes en Entornos CDMA”, Telecom I+D'2000, Barcelona-Madrid, noviembre 2000.

Congresos Internacionales:

- Luis G. Alonso, Ramón Agustí, Oriol Sallent, “A Near-Optimum Medium Access Protocol Based on the Distributed Queueing Random Access Protocol (DQRAP) for a CDMA Third Generation Mobile Communication System”, PIMRC'99, pp. 1300-1304, Osaka, septiembre 1999.
- Luis G. Alonso, Ramon Agustí, Oriol Sallent, “A New Medium Access Protocol Based on Distributed Queues for a CDMA Environment”, VTC'99 Fall, pp. 1175-1179, Amsterdam, septiembre 1999.
- Giulio Govannini, Luis G. Alonso, Ramon Agustí, “Proposal Of DQRAP/CDMA MAC Protocol Optimization”, aceptado para publicación en VTC'2001, Isla de Rhoda, Grecia, mayo 2001.

Otras reuniones científicas:

- Luis G. Alonso, Ramon Agustí, Oriol Sallent, “A Novel MAC Protocol Based on Distributed Queues for CDMA Communication Systems”, COST-262 Meeting, Barcelona, noviembre 1999.

Revistas Internacionales:

- Luis G. Alonso, Jordi Pérez, Ramon Agustí, “Average Block Error Probability in the Reverse Link of a Packet DS/CDMA System under Rayleigh Fading Channel Conditions”, IEEE Communication Letters, Vol. 4, No. 4, pp. 116-118, abril 2000.
- Luis G. Alonso, Ramon Agusti, Oriol Sallent, “A Near-Optimum MAC Protocol Based on the Distributed Queueing Random Access Protocol (DQRAP) for a CDMA Mobile Communication System”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 9, pp. 1701-1718, septiembre 2000.