

MÓVILES 4G

Por D. Rouffet, S. Kerboeuf, L. Cai, V. Capdevielle

Este texto es una versión editada del artículo “Móviles 4G”, publicado en la *Revista de Telecomunicaciones Alcatel* del 2^{do} trimestre de 2005. La Redacción de esta revista nos ha cedido amablemente los derechos para su publicación en *Tono*.

La voz fue la impulsora del móvil de segunda generación y tuvo un éxito considerable. Hoy, los servicios de video y TV están impulsando el despliegue de la tercera generación (3G). Y en el futuro, los datos de alta velocidad y a bajo coste impulsarán la cuarta generación (4G) pues emerge como comunicación de corto alcance. Otro conductor será la ubicuidad de servicios y aplicaciones, con un elevado grado de personalización y sincronización entre los diferentes dispositivos del usuario. Al mismo tiempo, es probable que la red de acceso radio evolucione desde una arquitectura centralizada a una distribuida.

Evolución de los servicios

La evolución de 3G a 4G estará impulsada por servicios que ofrecen mejor calidad —por ejemplo, video y sonido— debido a un mayor ancho de banda, a más sofisticación en la asociación de una gran cantidad de información, y a la personalización mejorada. La convergencia con servicios de otras redes —empresas, fijas— tendrá lugar con la alta velocidad de la sesión. Se requerirá una conexión siempre activa y un modelo de ingresos basado en una cuota fija mensual. Se espera que el impacto en la capacidad de la red sea importante. La transmisión máquina a máquina afectará a dos

tipos básicos de equipo: sensores —que miden parámetros— y etiquetas —que generalmente es equipo de lectura /escritura—.

Se espera que los usuarios requieran altas velocidades, similares a las de las redes fijas, para aplicaciones de datos y de emisión, y que el uso de los terminales móviles —ordenadores personales, agendas personales digitales, portátiles— crezca rápidamente a medida que sean más amigables.

El video fluido de alta calidad y la reactividad de la red son requisitos de usuario importantes. Los requisitos claves para el diseño de la infraestructura incluyen: respuesta rápida, alta velocidad de sesión, gran capacidad, bajas tarifas de usuario, rápido retorno de la inversión para los operadores, inversión que está en línea con el crecimiento de la demanda y sencillos terminales autónomos. La infraestructura será mucho más distribuida que en los actuales despliegues, al facilitar la introducción de una nueva fuente de tráfico local: máquina a máquina. La figura 1 muestra una idea de la posible evolución de los servicios; la mayoría son similares.

Dimensionar los planes

Un sencillo cálculo ilustra el orden de magnitud. El plan de diseño en términos de prestaciones radioeléctricas es alcanzar una capacidad escalable de 50 a 500 bit/s/Hz/km² —incluye capacidad para uso en interiores—, como se muestra en la figura 2. Como comparación, el mejor rendimiento esperado de 3G se encuentra alrededor de 10 bit/s/Hz/km² usando HSDPA —*High Speed Downlink Packet Access*—, MIMO —*Entrada Múltiple/Salida Múltiple*—, etc. Ninguna tecnología actual es capaz de suministrar estas prestaciones.

Dimensionar los objetivos

Sobre la base de diferentes análisis de tráfico, la WWI —*Wireless World Initiative*— ha hecho públicas las cifras de prestaciones, objetivo de la interfaz aire. Se ha alcanzado un consenso en torno a velocidades de pico de 100 Mbit/s en situaciones móviles y de 1 Gbit/s en situaciones nómadas y peatonales, al menos como plan. En un espectro de 10 MHz, se ha alcanzado una velocidad de portadora de 20 Mbit/s cuando el usuario se mueve a alta velocidad, y de 40 Mbit/s en uso nómada. Estos valores se duplicarán cuando se introduzca MIMO. Entonces, la velocidad estaría asociada con una cantidad de espectro. Para uso móvil, un buen objetivo son unas prestaciones de red de 5 bit/s/Hz, elevándose a 8 bit/s/Hz en uso nómada.



Figura 1 Visión de la evolución de los servicios

Números de abonados/km ²	10000	10000
Uso pico	20 %	20 %
Eficiencia espacial	30 %	20 %
Diferentes eficiencias (ej. MAC)	40 %	30 %
Velocidad media de servicios (Kbit/s/km ²)	128	1000
Capacidad requerida (Gbit/s/km ²)	2,3	33,33
Ancho de banda disponible (MHz)	2,13	100
Prestaciones de radio requeridas bit/s/Hz/km ²	42,7	333,3

Figura 2 Ejemplos de dimensionado

Enfoque de multitecnología

Muchas tecnologías están compitiendo en el camino hacia 4G, como se puede ver en la figura 3. Son posibles tres vías, incluso si son más o menos especializadas.

La primera es la vía basada en 3G, en la que el CDMA —Acceso Múltiple por División de Código— será empujado progresivamente hasta un punto en el que los fabricantes de terminales se entregarán. Cuando se alcance este punto, se necesitará otra tecnología para realizar los aumentos en capacidad y velocidad requeridos.

La segunda vía es la LAN de radio. Se espera que el despliegue generalizado de WiFi empiece en 2005 para PCs, ordenadores portátiles y PDAs. En las empresas, la voz podrá empezar a transportarse por VoWLAN —Voz sobre LAN Inalámbrica—. No obs-

tante, no está claro cuál será la siguiente tecnología con éxito. Alcanzar un consenso en una tecnología de 200 Mbit/s, y más, será una tarea larga, con demasiadas soluciones propietarias a ofrecer.

Una tercera vía es IEEE 802.16e y 802.20, que son más sencillos que 3G para unas prestaciones equivalentes. Una evolución de la red central hacia una NGN —Red de Próxima Generación— de banda ancha facilitará la introducción de nuevas tecnologías de red de acceso a través de pasarelas de acceso estándar, basadas en ETSI-TISPAN, UIT-T, 3GPP, CCSA —China Communication Standards Association— y otros estándares.

¿Cómo puede un operador suministrar a un gran número de usuarios altas velocidades de sesión usando su infraestructura? Se necesitan, al menos, dos tecnologías. La primera —llamada *parent coverage*— se dedica a gran cobertura y a servicios de tiempo real. Las tecnologías tradiciona-

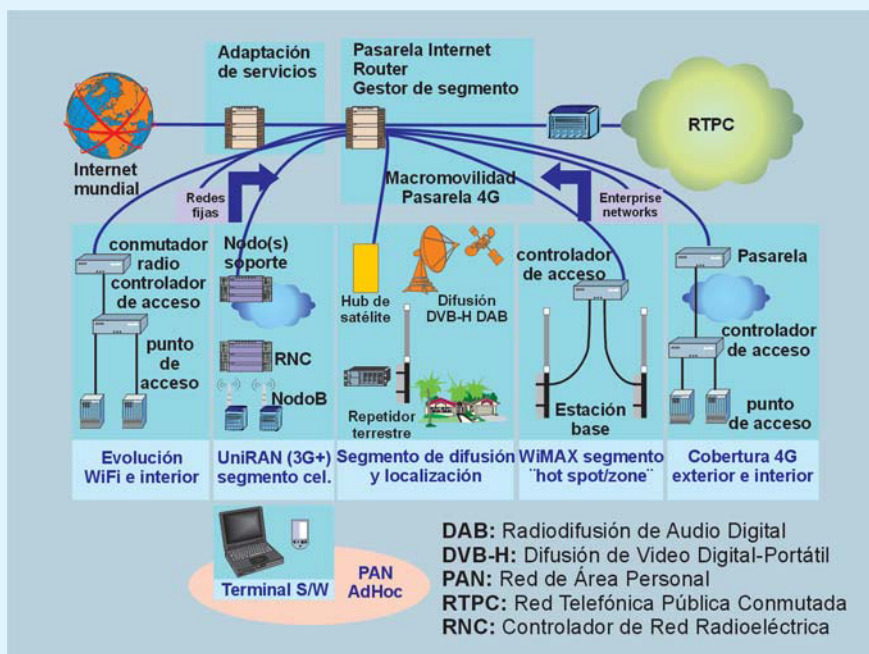


Figura 3 Arquitectura de superposición múltiple

les, como 2G/3G, y sus evoluciones se complementarán por WiFi y WiMAX. Se necesita un segundo conjunto de tecnologías para aumentar la capacidad, y se puede diseñar sin limitaciones en la continuidad de cobertura. Esto se conoce como cobertura picocelda. Sólo el uso de las dos tecnologías puede lograr ambos objetivos (Figura 4). La transferencia entre *parent coverage* y cobertura picocelda es diferente de la de un proceso clásico de itinerancia, pero similar a la transferencia clásica. *Parent coverage* se puede usar también como respaldón cuando el suministro de servicios en la picocelda se hace demasiado difícil.

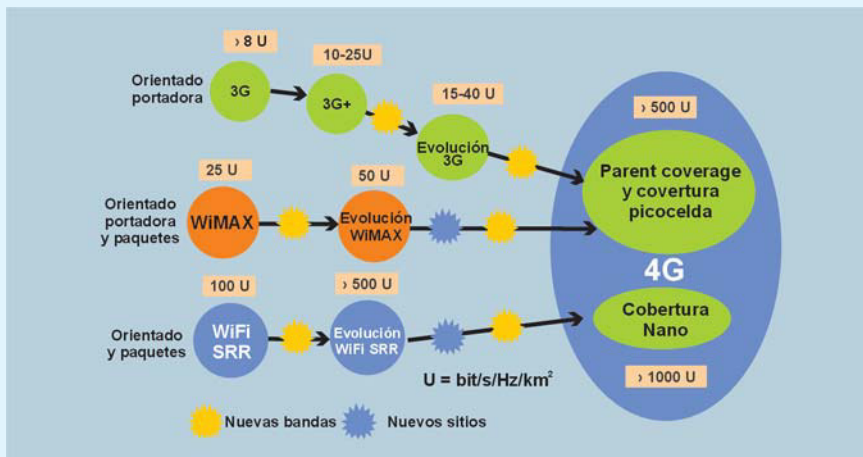


Figura 4 Tendencias de las prestaciones de cobertura

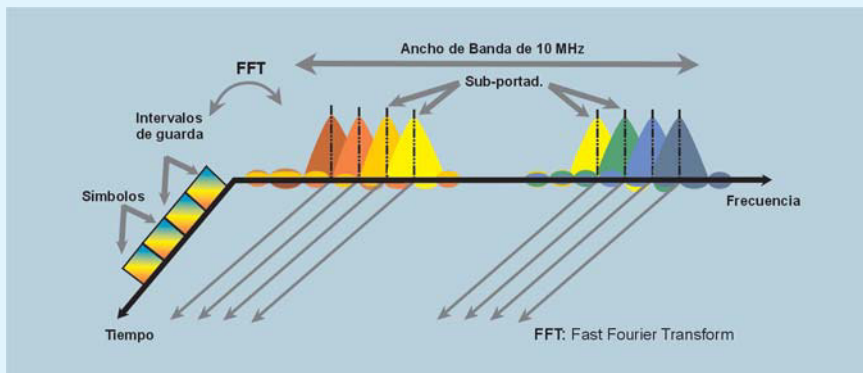


Figura 5 Principios de OFDM

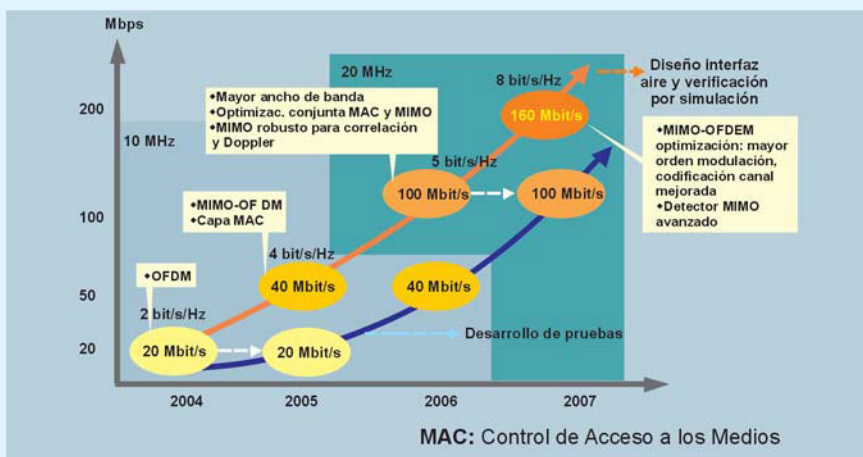


Figura 6 Hoja de ruta de prestaciones del banco de prueba de Alcatel

Tecnologías claves de 4G

Algunas de las tecnologías claves requeridas para 4G se describen brevemente a continuación:

OFDMA

OFDM —Multiplexión por División Ortogonal de Frecuencia— no sólo proporciona ventajas para las prestaciones de la capa física, sino también proporciona un marco para mejorar las prestaciones de la capa 2 al proponer un grado adicional de libertad. Al usar OFDM es posible explotar el campo del tiempo, el campo del espacio, el de frecuencias, e incluso, el campo de código para optimizar el uso del canal radioeléctrico. Esto asegura una transmisión muy sólida en entornos multicaminos con reducida complejidad del receptor.

Como se muestra en la figura 5, la señal se divide en subportadoras ortogonales, en cada una de las cuales la señal es de “banda estrecha” —unos pocos kHz— y, por lo tanto, inmune a los efectos multicaminos, suministra un intervalo de seguridad que se inserta entre cada símbolo OFDM. OFDM también proporciona una ganancia de diversidad de frecuencias, con la mejora del rendimiento de la capa física. Es compatible con otras tecnologías de mejora, como las antenas inteligentes y MIMO.

La modulación OFDM se puede emplear como tecnología de acceso múltiple —Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA)—. En este caso, cada símbolo OFDM puede transmitir información a/desde varios usuarios a través de un conjunto diferente de subportadoras (subcanales).

Esto no sólo proporciona flexibilidad adicional para la asignación de recursos —con el aumento de la capacidad—, sino que también permite la optimización intercapa del uso del enlace radio-eléctrico.

Equipo de radio definido por programa

SDR —Equipo de Radio Definido por Programa— se beneficia de la gran potencia de proceso actual para desarrollar terminales y estaciones base multibanda y multiestándar. Aunque en el futuro los terminales adaptarán el interfaz a la tecnología de acceso radio disponible, actualmente lo hace la infraestructura. Se esperan de SDR varias ganancias de infraestructura. Para aumentar la capacidad de red en un momento determinado, por ejemplo, durante un evento deportivo, un operador reconfiguraría su red y añadiría varios módems a una BTS —Estación Transceptora de Base— determinada. SDR hace esta reconfiguración sencilla. En el contexto de los sistemas 4G, SDR se convertirá en un habilitador de agregación de —pico/micro— celdas multiestándar. Para un fabricante, esto puede ser una ayuda potente para suministrar equipo multibanda y multiestándar con costes y esfuerzos de desarrollo reducidos mediante tratamiento multicanal simultáneo.

Entrada múltiple/salida múltiple

MIMO utiliza multiplexión de señal entre múltiples antenas de transmisión —multiplexión del espacio— y tiempo o frecuencia. Es muy adecuado para OFDM, pues es posible procesar símbolos independientes del tiempo tan pronto la forma de onda de OFDM se diseñe correctamente para el canal. Este aspecto de OFDM simplifica mucho el tratamiento. La señal transmitida por m antenas se recibe por n antenas. El tratamiento de las señales recibidas puede proporcionar varias mejoras de las prestaciones: alcance, calidad de la señal recibida y eficiencia del espectro. En principio, MIMO es más eficiente cuando se reciben

señales de múltiples caminos. Las prestaciones en los despliegues celulares todavía están en investigaciones y simulaciones (Figura 6). No obstante, generalmente, se admite que la ganancia en la eficiencia del espectro está relacionada directamente con el número mínimo de antenas en el enlace.

Optimización entre capas

La interacción más obvia es la existente entre MIMO y la capa MAC. Se han identificado otras interacciones que se muestran en la figura 7.



Figura 7 Interacción de capas y optimización asociada

Transferencia y movilidad

Las tecnologías de transferencias basadas en tecnología IP móvil se han considerado para voz y datos. Las técnicas de IP móvil son lentas pero se pueden acelerar con métodos clásicos —jerárquico, IP móvil rápido—. Estos métodos son aplicables a los datos y probablemente también a la voz. En redes de frecuencia única, es necesario volver a considerar los métodos de transferencia. Se pueden usar varias técnicas cuando la relación portadora-interferencia es negativa, por ejemplo, VSF OFDM, repetición de bits, pero el inconveniente de estas técnicas es la capacidad. En OFDM existe la misma alternativa que en CDMA, que es utilizar la macrodiversidad. En el caso de OFDM, MIMO permite tratamiento de macrodiversidad con ganancias en las prestaciones.

No obstante, la instalación de la macrodiversidad implica que el tratamiento MIMO se centralice y que las transmisiones son síncronas. Esto no es tan complejo como en CDMA, pero esta técnica sólo se utilizará en situaciones en las que el espectro es muy escaso.

Caché y picoceldas

La memoria en la red y en los terminales facilita la entrega de servicios. En sistemas celulares, esto aumenta las capacidades del planificador MAC, porque facilita el suministro de servicios en tiempo real. Los recursos sólo se pueden asignar a los datos cuando las condiciones radioeléctricas son favorables. Este método puede duplicar la capacidad de un sistema celular clásico.

En cobertura picocelular, los servicios de gran velocidad —no en tiempo real— se pueden entregar incluso cuando se interrumpe la recepción/transmisión durante unos pocos segundos. En consecuencia, la zona de cobertura, dentro de la cual se pueden recibir/transmitir datos, es posible diseñar sin otras restricciones que la limitación de interferencia. La entrega

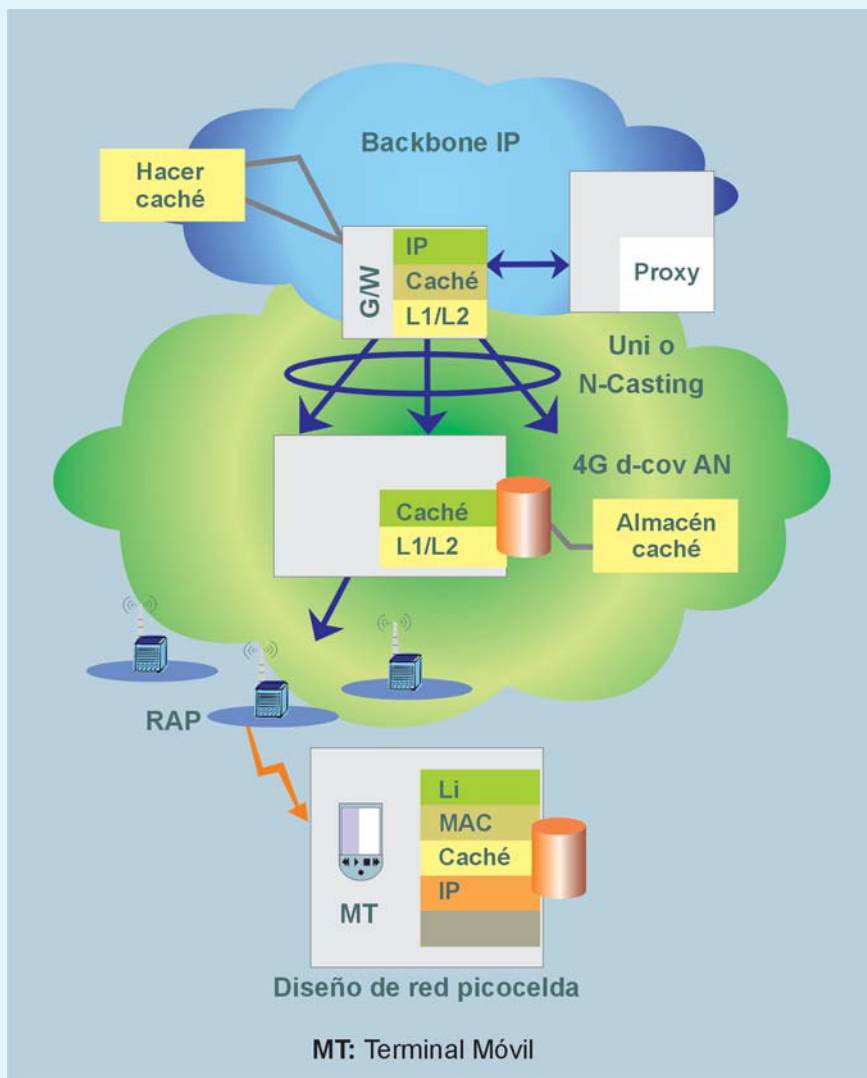


Figura 8 Diseño de redes de picoceldas

de datos es preferente en lugares donde la velocidad es un máximo. Entre estas áreas, la cobertura no se utiliza la mayor parte del tiempo, se crea una aparente discontinuidad. En estas áreas, los contenidos se envían al caché del terminal a alta velocidad y se leen a la velocidad del servicio. Las coberturas son discontinuas. Y sus ventajas, especialmente cuando se diseña con tecnología caché, son alta eficiencia del espectro, gran escalabilidad —de 50 a 500 bit/s/Hz—, alta capacidad y bajo coste. Se necesita una arqui-

tectura específica para introducir memoria caché en la red.

Un ejemplo se muestra en la figura 8. A la entrada de la red de acceso, se crean y almacenan líneas de caché en el destino de un terminal. Cuando un terminal entra en un área donde es posible una transferencia, simplemente pregunta por la línea de caché que sigue a la última recibida. Se usa un protocolo sencillo, sólido y fiable entre el terminal y caché para cada servicio suministrado en este tipo de cobertura.

Suministro de servicios multimedia, adaptación de servicio y transmisión sólida

La codificación de audio y video es escalable. Por ejemplo, un flujo de video se divide en tres flujos que se pueden transportar de forma independiente: uno, flujo de capa base (30 Kbit/s), que es un flujo sólido pero de calidad limitada, por ejemplo, 5 imágenes/s y dos flujos de mejora —50 Kbit/s y 200 Kbit/s—. El primer flujo proporciona disponibilidad, los otros dos flujos calidad y definición. En una situación de emisión, el terminal tendrá tres cachés. En cobertura picocelular, la *parent coverage* establece el diálogo de servicio y el arranque de servicios —con la capa base—. Tan pronto como el terminal entra en la cobertura de picocelda, se rellenan los cachés de terminal, empieza con el caché base. Actualmente, las transmisiones de video y de audio se transmiten sin error y sin pérdida de paquetes. No obstante, es posible permitir tasas de error de unos 10^{-5} y pérdidas de paquetes de alrededor de 10^{-2} . Las imágenes codificadas aún contienen bastante redundancia para corrección de errores. Es posible ganar cerca de 10 dB en la transmisión con un incremento razonable en la complejidad. Con el empleo de las tecnologías descritas, la transmisión de multimedia puede proporcionar una experiencia de usuario de buena calidad.

Cobertura

La cobertura se logra con la adición de nuevas tecnologías —posiblemente en modo solapamiento— y la mejora progresiva de la densidad. Por ejemplo, en un

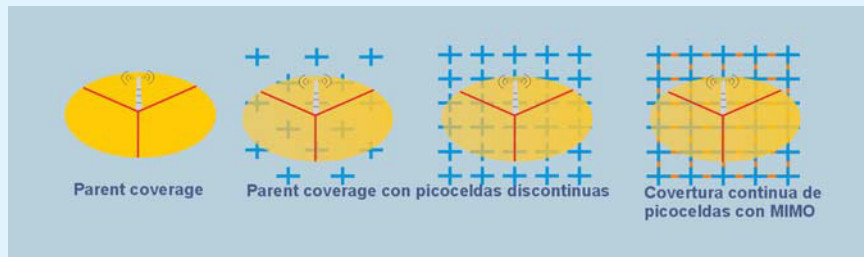


Figura 9 Ejemplo de despliegue en zonas de tráfico denso

despliegue WiMAX, primero se despliega la *parent coverage*; luego se hace más densa con las picoceldas discontinuas; después la picocelda es aún más densa pero todavía de forma discontinua. Por último, la cobertura picocelda se hace continua a través del uso de MIMO o mediante el despliegue de otra cobertura picocelda en una banda de frecuencia diferente (Figura 9).

El rendimiento de la *parent coverage* puede variar de 20 bit/s/Hz/km², mientras que la tecnología picocelda puede alcanzar de 100 a 500 bit/s/Hz/km², en dependencia de la complejidad del hardware y del software del terminal. Estas prestaciones sólo se refieren a la cobertura en exteriores —todavía no se han resuelto todos los problemas asociados con la cobertura en interiores—. No obstante, se puede obtener cobertura en interiores mediante:

- ♦ Penetración directa: sólo es posible en bandas de baja frecuencia —apreciablemente por debajo de 1 GHz— y necesita un exceso de potencia, que puede provocar importantes problemas de interferencias.
- ♦ Radio de corto alcance en interiores conectada a la red fija.

- ♦ Conexión a través de un repetidor a un punto de acceso picocelular.

Integración en una NGN de banda ancha

El mayor interés está ahora en el despliegue de una arquitectura que realiza la convergencia entre redes fijas y móviles —ITU-T Broadband NGN y ETSI-TISPAN—.

Esta arquitectura genérica integra todos los habilitadores de servicios, por ejemplo, IMS, selección de red, soporte intermedio para suministradores de aplicaciones, y ofrece una interfaz única con los suministradores de servicios de aplicaciones.

Conclusión

La provisión de velocidades de datos de megabit/s a miles de terminales móviles y radioeléctricas por kilómetro cuadrado genera varios retos. Algunas tecnologías claves permiten la introducción progresiva de estas redes sin arriesgar las inversiones existentes. Se necesitan tecnologías no separadoras para obtener alta capacidad a bajo coste, pero se puede hacer todavía de forma progresiva. Los habilitadores claves son:

- ♦ Espectro suficiente, con mecanismos de compartición asociados.
 - ♦ Cobertura con dos tecnologías: *parent* —2G, 3G, WiMAX— para suministros en tiempo real, y picoceldas discontinuas para entregar altas velocidades.
 - ♦ Tecnología caché en red y terminales.
 - ♦ OFDM y MIMO.
 - ♦ Movilidad IP.
 - ♦ Arquitectura distribuida multi-tecnología.
 - ♦ Convergencia fijo-móvil —para servicio de interiores—.
 - ♦ Mecanismos de selección de red.
- Muchas otras facilidades, como la transmisión sólida y la optimización intercapa, contribuirán a optimizar las prestaciones, que puede alcanzar entre 100 y 500 bit/s/Hz/km². La arquitectura de IP total distribuida se puede desplegar con el uso de dos productos básicos: estaciones base y controladores asociados. La complejidad del terminal depende del número de tecnologías con las que puede trabajar. El mínimo de tecnologías es dos: una para cobertura radio y, otra, para uso de corto alcance, por ejemplo, PANs. No obstante, la presencia de redes heredadas las aumentará de seis a siete.