



Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería de
Telecomunicación

SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES

- SEGUNDA, TERCERA Y CUARTA
GENERACIÓN -



Universidad
Politécnica
de Cartagena

**JUAN PASCUAL GARCÍA
JOSÉ MARÍA MOLINA GARCÍA-PARDO
LEANDRO JUAN LLÁCER**

SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES

**SEGUNDA, TERCERA Y CUARTA
GENERACIÓN**

Juan Pascual García
José María Molina García-Pardo
Leandro Juan Llácer

Profesores del Departamento de Tecnologías
de la Información y las Comunicaciones (TIC)
Universidad Politécnica de Cartagena

PRIMERA EDICIÓN, 2014

Todos los nombres propios de programas, sistemas operativos y equipos hardware que se referencian en este libro son marcas registradas de sus respectivas compañías u organizaciones.

Limitación de responsabilidades:

La información contenida en este libro ha sido exhaustivamente revisada. Sin embargo, ni la editorial ni los autores garantizan la exactitud o corrección de la información publicada. Por lo tanto, no serán responsables de cualquier error, omisión o daño ocasionados por el uso de esta información.

© 2014, Juan Pascual García,
José María Molina García-Pardo,
Leandro Juan Llácer

© 2014 Universidad Politécnica de Cartagena

Servicio de Documentación
Plaza del Hospital, 1
30202 Cartagena
968325908
ediciones@upct.es

Primera Edición, 2014

ISBN: 978-84-16325-03-0

Depósito legal: MU-1.352-2014

Queda rigurosamente prohibida, sin la autorización escrita de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 División celular.	1
1.1.1 Geometría celular.	4
1.1.2 Flexibilidad de los sistemas celulares: técnicas para aumentar la capacidad del sistema.	10
1.1.3 Transferencia de llamadas o “handover”.	12
1.2 Técnicas de duplexado.	14
1.3 Técnicas de acceso al medio.	15
1.3.1 Acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA).	15
1.3.2 Acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA).	17
1.3.3. Acceso múltiple por división en el código (CDMA).	19
Bibliografía	24
Capítulo 2. El Sistema GSM.	25
2.1 Introducción.	25
2.2 Estructura de la red de GSM.	32
2.2.1 Subsistema de usuario.	34
2.2.2 Subsistema de Estaciones Base (“Base Station Subsystem”, BSS).	36
2.2.3 Subsistema de la red de Conmutación (“Network Switching Subsystem”, NSS).	36
2.3 Nivel físico de GSM: interfaz radio (canales físicos).	38
2.4 Canales lógicos.	44
2.5 Tipos de ráfagas.	48
2.6 Combinaciones de canales lógicos.	55
2.7 Protocolos en el enlace radio.	61
2.7.1 Sincronización con la red.	61
2.7.2 Actualización de la localización.	62
2.7.3 Establecimiento de llamadas.	66
2.8 Sistemas para mejora de GSM: evolución de GSM.	68
2.8.1 “High Speed Circuit Switched Data” (HSCSD).	69
2.8.2 “General Packet Radio Service” (GPRS).	71
2.8.3 “Adaptive Multi Rate” (AMR).	74
2.8.4 “Enhanced Data Rates for GSM Evolution” (EDGE).	75
Glosario de GSM	77
Bibliografía	81

Capítulo 3. El Sistema TETRA.	83
3.1 Introducción.	83
3.2 Estructura de la red de Tetra.	85
3.3 Nivel físico de Tetra: interfaz radio (canales físicos).	87
3.4 Canales lógicos.	93
3.5 Tipos de canales físicos y de ráfagas. Codificación de canal.	96
3.6 Modos de transmisión y control.	100
3.7 Correspondencia entre los canales lógicos y los canales físicos.	101
3.8 TETRA 2.	104
3.9 Ejemplos de implantación	104
Glosario de TETRA	106
Bibliografía	108
Capítulo 4. UMTS.	109
4.1. Introducción a los sistemas 3G.	109
4.2. Arquitectura UMTS.	115
4.3 Protocolos UMTS.	129
4.4 Planificación UMTS.	130
4.5 Servicios y Aplicaciones.	132
4.6 CDMA 2000	135
Glosario de UMTS	140
Bibliografía	142
Capítulo 5. El Sistema LTE.	143
5.1 Introducción.	143
5.2 Estructura de la red de LTE.	149
5.3 Nivel físico de LTE: interfaz radio.	158
5.3.1 Bandas de frecuencia en LTE.	159
5.3.2 Técnica de acceso al medio, duplexado y modulaciones empleadas.	163
5.3.3 La técnica MIMO.	175
5.3.4 Tablas resumen.	180
5.4 Canales, protocolos y protocolos de enlace radio de LTE.	182
5.5 Planificación en LTE.	190
5.6 LTE-Advanced.	196
Glosario de LTE	198
Bibliografía	201

Capítulo 1. Introducción

1.1 División celular.

Los sistemas de comunicaciones móviles poseen una serie de características que los diferencian de otros sistemas de comunicaciones que emplean ondas electromagnéticas no guiadas. En este capítulo se explican las características más destacadas de los sistemas de comunicaciones móviles. Los conceptos mostrados en los siguientes apartados servirán para entender cómo funcionan los sistemas explicados en los capítulos posteriores. Una de las propiedades fundamentales de todos los sistemas que han sido diseñados en los últimos cuarenta años es el empleo de la división celular del área de servicio. Como se mencionó en [Sistemas de Comunicaciones Móviles] esta es una de las técnicas fundamentales para conseguir que el número de usuarios sea elevado al mismo que se conserva la calidad en la comunicación. Desde la creación de los sistemas de comunicaciones móviles, a mediados de los años 40 del siglo XX, uno de los objetivos fundamentales de los diseñadores de estos sistemas fue precisamente el de aumentar su número de usuarios. La división celular surgió a principios de los años 70 y contribuyó en gran medida a la expansión de los sistemas de comunicaciones móviles.

Para mostrar los beneficios de la división celular recurriremos a un ejemplo. Supongamos que un sistema de telefonía móvil quiere prestar servicio en la ciudad de Cartagena. El sistema utiliza una frecuencia para el enlace ascendente y otra frecuencia para el descendente. Si el sistema posee 70 radiocanales, tendremos 35 canales dúplex completos para dar servicio a otros tantos usuarios. Para dar servicio a los usuarios se puede utilizar una única estación base situada en el emplazamiento adecuado de modo que su área de cobertura contenga toda el área de servicio (ver Figura 5.1). Nuestro sistema solo podría ofrecer un servicio simultáneo para 35 usuarios en una población de unas 200000 personas. Si queremos ofrecer un servicio de calidad, por ejemplo con una probabilidad de bloqueo reducida, el sistema debería poseer muy pocos usuarios. Si por el contrario el sistema admite muchos usuarios, la probabilidad de bloqueo sería muy elevada. Una solución consistiría en aumentar el número de radiocanales, pero el ancho de banda disponible siempre es limitado por lo que resultaría una solución impracticable o muy cara.

Para incrementar el número de canales por unidad de superficie, y así por unidad de población o por persona, solo queda la opción de reducir el área en la que se emplean los radiocanales disponibles [Wireless Communications]. En lugar de utilizar un único transmisor de gran potencia, se pueden usar 44 transmisores cuyo área de cobertura sea pequeña tal como se aprecia en la Figura 1.2. Ahora en todo el área de servicio tenemos $44 \cdot 35 = 1540$ canales dúplex en lugar de los 35 originales. Podemos pensar que hemos conseguido aumentar en gran medida la capacidad del sistema. Sin embargo, esta primera solución celular es inviable. El uso de las mismas frecuencias en células

adyacentes provocaría muchas interferencias, sobre todo en la frontera entre células. La calidad del sistema sería muy baja. La clave para aplicar la división celular radica en la reutilización las frecuencias en células suficientemente alejadas.

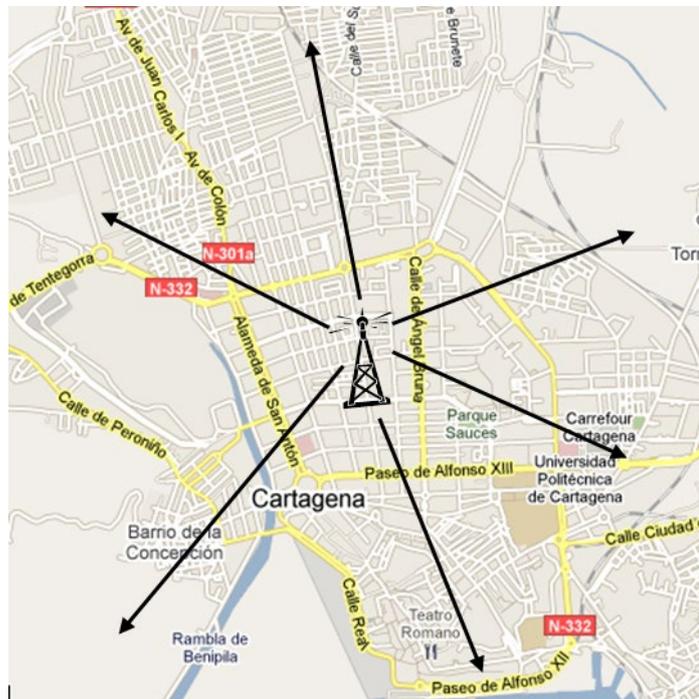


Figura 1.1. Sistema de comunicaciones móviles con un sólo transmisor que cubre toda el área deseada [Mapa obtenido en diciembre de 2014 de <https://maps.google.es>].

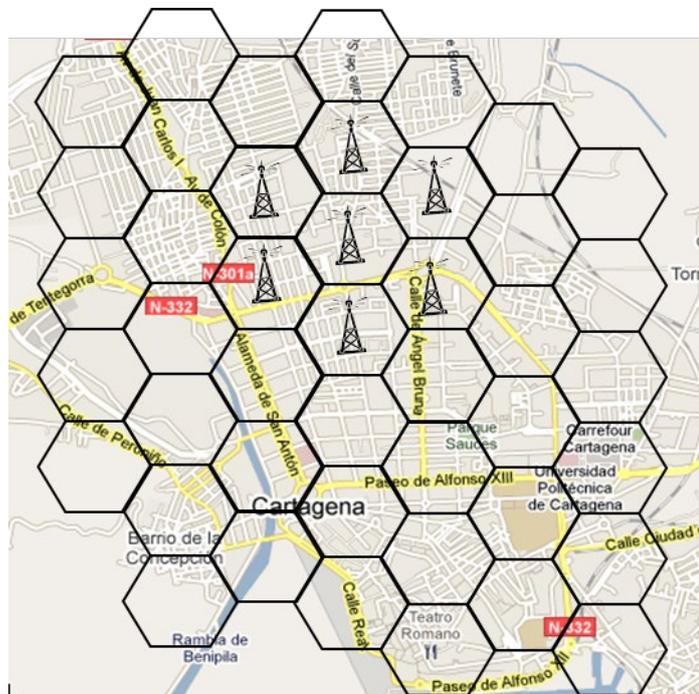


Figura 1.2. Sistema celular de comunicaciones móviles. Se utilizan gran número de transmisores con menor potencia [Mapa obtenido en diciembre de 2014 de <https://maps.google.es>].

Introducción

Antes de proseguir con la explicación de cómo se reutilizan las frecuencias en las células, hay que realizar un inciso para justificar por qué se eligen células hexagonales. Aunque la cobertura de cada célula es aproximadamente circular, si se emplean antenas omnidireccionales y el entorno es homogéneo, en la fase de planificación del sistema se asignan a las células una forma poligonal. De esta forma no hay solapes entre células, es decir, no quedan zonas en el mapa con frecuencias de dos células adyacentes. Con coberturas circulares sí existirían esas zonas de solape por lo que la planificación y diseño inicial del sistema sería más difícil. Solo hay tres figuras poligonales que permitan cubrir una zona o área sin solapes: el cuadrado, el triángulo y el hexágono. De estos tres polígonos el hexágono es el que posee mayor área interna para un radio determinado. Por lo tanto, el hexágono es el polígono que minimiza el número de unidades necesarias para cubrir una zona, es decir, minimiza el número de células para dar servicio a esa zona. Siempre es deseable minimizar el número de células [Comunicaciones Móviles 02].

Una vez dividida una zona en células hexagonales, para conseguir una reutilización de frecuencias aceptable, las células se agrupan en conjuntos que usan todos los canales dúplex disponibles. Si en el ejemplo mostrado empleamos grupos de 7 células (ver Figura 1.2), entonces cada célula contendrá 5 canales dúplex (35 canales dúplex por grupo). La capacidad del sistema disminuye, pero ahora, la distancia que separa a dos células que emplean las mismas frecuencias es tal que las interferencias serán inapreciables. Con la primera división celular, la célula B de la Figura 1.3 hubiera tenido las mismas frecuencias que la A, D y C de su grupo por lo que las interferencias serían elevadas. Las células que emplean el mismo conjunto de frecuencias o de recursos del sistema se denominan células cocanal. Al número de células por grupo se le denomina patrón celular.

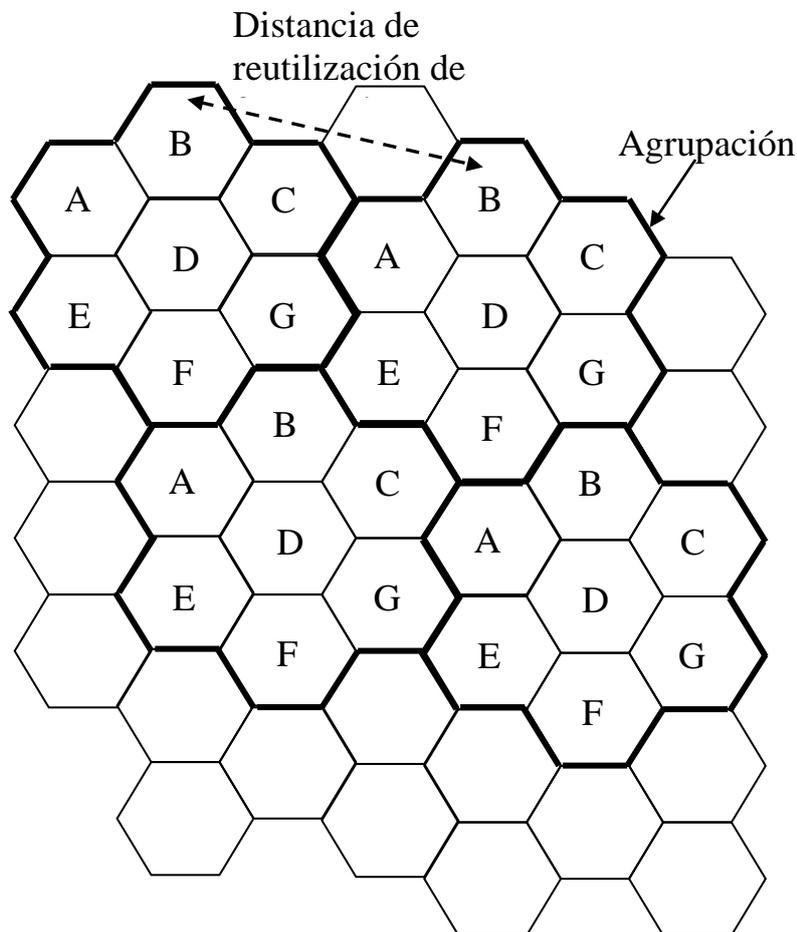


Figura 1.3. Agrupación de células. Hay siete células por agrupación. Las células con la misma letra son cocanal.

Se podría pensar que la división celular sólo comporta ventajas. Si tenemos un sistema en el que existen muchas interferencias para un patrón dado, sólo tendríamos que aumentar el patrón celular hasta reducir las interferencias cocanal por debajo del límite fijado. Sin embargo, esta reducción de interferencias se produce a costa de una disminución del tráfico que se puede cursar en cada célula y por tanto en el sistema de comunicaciones móviles.

Pensemos por ejemplo en un sistema que emplea un patrón celular de 4: existen 4 células por grupo. Al número de canales de un patrón se le designa con la letra k , por tanto en este caso $k=4$. Supongamos que el sistema dispone de 20 canales full dúplex (20 radiocanales en el sentido ascendente y 20 en el descendente). De este modo, cada célula dispondría de 5 canales dúplex, es decir, se podrían cursar 5 llamadas al mismo tiempo. Los sistemas de comunicaciones móviles suelen ser de tipo Erlang-B, debido a que si una llamada no encuentra un canal libre se descarta, no entra en ninguna cola y abandona el sistema hasta el siguiente intento. Si el objetivo de calidad en el servicio es alcanzar una probabilidad de bloqueo de 0.05%, con 5 canales dúplex se podrían cursar hasta 0.64 Erlangs de tráfico. Supongamos que con un patrón de 4 células existen demasiadas interferencias. Las células cocanal se deberán alejar más unas de otras, por lo que el patrón celular deberá aumentar. Supongamos que las interferencias quedan por debajo del límite con un patrón igual a 7. Ahora cada célula dispondrá de tan solo 3 canales, excepto una célula que tendrá 2. Con 3 canales dúplex y una probabilidad de bloqueo de 0.05% tan solo se puede cursar un máximo de 0.15 Erlangs. Las interferencias se han reducido a costa de reducir el tráfico que se puede cursar tanto en cada célula como en el sistema global. Es decir, se ha reducido la capacidad del sistema. Hay que tener en cuenta que no se ha cambiado, aumentado o disminuido, el número de células, éstas tan solo se han reagrupado de una forma diferente. De forma análoga, si se desea aumentar la capacidad disminuyendo el número de células por grupo, se observará un aumento en las interferencias cocanal que puede provocar que el sistema sea inviable. En el apartado 1.1.3 se explicarán diversos procedimientos para aumentar la capacidad manteniendo un mismo nivel de interferencias.

Finalmente, se muestra una clasificación de las células dependiendo de su tamaño. Esta clasificación será importante en uno de los mecanismos para aumentar la capacidad del sistema:

- **Macro células:** son células de entre 1 y 20 km de radio. Se emplean en entornos rurales y en algunos urbanos.
- **Micro células:** son células de menos de 1 km. Se utilizan en entornos en los que existe cierta concentración de usuarios (centro de las ciudades, estaciones de medios de transporte, aeropuertos).
- **Nanocélulas y picocélulas:** son células restringidas al interior de un edificio o incluso a partes de un edificio.

1.1.1 Geometría celular.

Un punto clave en la división celular radica en la determinación del tamaño de cada célula y de cuál es la distancia entre células cocanal para un patrón celular dado. Además, cabe preguntarse si se puede emplear cualquier agrupación celular. La respuesta es negativa ya que solo existe una serie de patrones celulares posibles. En este apartado se muestra cómo calcular los mencionados datos y propiedades de un sistema celular.

Introducción

Si se quiere saber cuántas células caben en el área de servicio del sistema se deberá conocer el área de una célula. Si R es el radio de la célula hexagonal, el área de la célula será:

$$S = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2}$$

Ecuación 1

Una vez fijado el radio de la célula, la geometría celular, junto con los datos de tráfico deseado, proporciona los datos necesarios para calcular las interferencias, el tamaño de la agrupación y la distancia de reutilización D . Una mayor distancia de reutilización de frecuencias implica una disminución de las interferencias. Por lo tanto, es necesario calcular dicha distancia. Para ello se recurre a un sistema de coordenadas oblicuas cuyos ejes denominados u y v forman un ángulo α de 60° entre sí (ver Figura 1.4). Las estaciones base se ubican en el centro de cada célula, cada uno de estos centros se denomina nodo y poseen unas coordenadas que son múltiplos enteros de la distancia entre estaciones base [Comunicaciones Móviles 02]. A la distancia entre estaciones base se le denomina paso de retícula y se le asigna la letra d tal como se aprecia en la Figura 1.4.

Si se desea conocer la distancia entre dos estaciones base tan solo hay que fijar el origen de coordenadas ($u=0, v=0$) en una de las dos estaciones base y calcular las coordenadas de la estación base cocanal en el sistema de coordenadas. Por ejemplo, en la Figura 1.4, la distancia de reutilización D es un vector que tiene como coordenadas $[d_1, d_2]$. La coordenada d_1 es igual a dos veces el paso de retícula d , $d_1=2$, mientras que la coordenada d_2 es igual a un solo paso de retícula, $d_2=1$. Ahora bien, para evaluar el módulo del vector D no se puede aplicar directamente la fórmula de la distancia euclídea ya que los ejes no son ortogonales. En lugar de ello, hay que aplicar el teorema del coseno, de esta forma se obtiene:

$$D^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cos(120^\circ) = d_1^2 + d_2^2 + d_1d_2$$

Ecuación 2

Como hemos mencionado, cada coordenada es múltiplo de la distancia d . Si asignamos unas coordenadas generales $[m, n]$ a la estación base se obtiene:

$$D^2 = (m^2 + n^2 + m \cdot n) \cdot d^2$$

Ecuación 3

La distancia d o paso de retícula se puede obtener a partir del radio de la célula que es un parámetro conocido. Si se observa la Figura 1.4 se aprecia que los lados del hexágono son perpendiculares a los ejes y que la apotema es igual a $d/2$. La apotema de un hexágono se expresa, en función del radio R del círculo circunscrito, como:

$$R = \frac{d}{\sqrt{3}}$$

Ecuación 4

Por tanto, a partir de R se puede evaluar la distancia de reutilización D siempre que se conozcan las coordenadas $[m, n]$. Como se observa en la Ecuación 3 sólo son

posibles una serie de distancias D ya que m y n son números enteros. De modo más preciso, sólo serán posibles las distancias que cumplan la siguiente relación:

$$\left(\frac{D}{d}\right)^2 = (m^2 + n^2 + m \cdot n) = N$$

Ecuación 5

, donde N es un número entero. A los valores de N se les denomina números rómbicos ya que las estaciones base cocanal, situadas todas ellas a una distancia D desde la célula de referencia, forman un rombo de lado D . A este rombo se le denomina rombo cocanal.

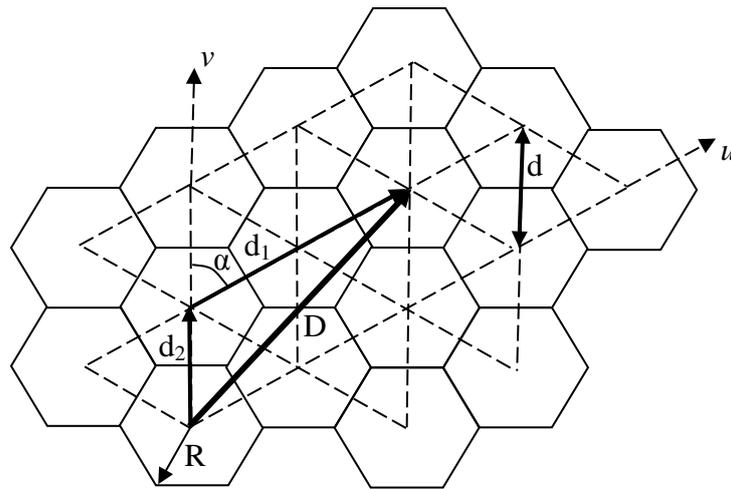


Figura 1.4. Retícula triangular de posibles ubicaciones de estaciones base en una estructura celular hexagonal.

La traslación repetitiva del rombo cocanal genera la repetición de la agrupación o patrón celular tal como se aprecia en la Figura 1.5. En esta Figura se pueden observar cuatro agrupaciones celulares pertenecientes a un patrón celular $k=7$. Aunque es un tanto difícil de apreciar, el área del rombo cocanal es igual al área de cada agrupación. Esta propiedad es cierta para cualquier patrón celular. El cálculo del área del rombo cocanal conduce a una expresión de D muy sencilla. El área de un rombo de lado D es:

$$A_{rombo} = \frac{\sqrt{3}D^2}{2}$$

Ecuación 6

Si introducimos la Ecuación 5 en la Ecuación 6, se obtiene:

$$A_{rombo} = N \frac{\sqrt{3}d^2}{2}$$

Ecuación 7

Introducción

Es decir, que el área del rombo cocanal es igual a N rombos elementales de lado d. Ahora bien, si introducimos en la Ecuación 1 el valor de R en función de la apotema d, se obtiene:

$$S = \frac{3\sqrt{3}R^2}{2} = \frac{\sqrt{3}d^2}{2}$$

Ecuación 8

Si se compara la Ecuación 8 y la Ecuación 7 se observa que el área del rombo cocanal es igual a N veces el área del hexágono. Por lo tanto, como en cada agrupación existen k células se llega a la conclusión de que el patrón celular es igual al número rómbico [Comunicaciones Móviles 02].

Como ya se ha comentado, solo son posibles unos valores de, aquellos que cumplen la Ecuación 3. En la Tabla 1.1 se muestran los valores de N más comunes, es decir, los patrones celulares posibles más comunes:

m	n	k=N
0	2	4
1	1	3
1	2	7
1	3	13
-1	2	3
-1	3	7
2	2	12
0	3	9

Tabla 1.1. Números rómbicos: patrones celulares [Comunicaciones Móviles 02].

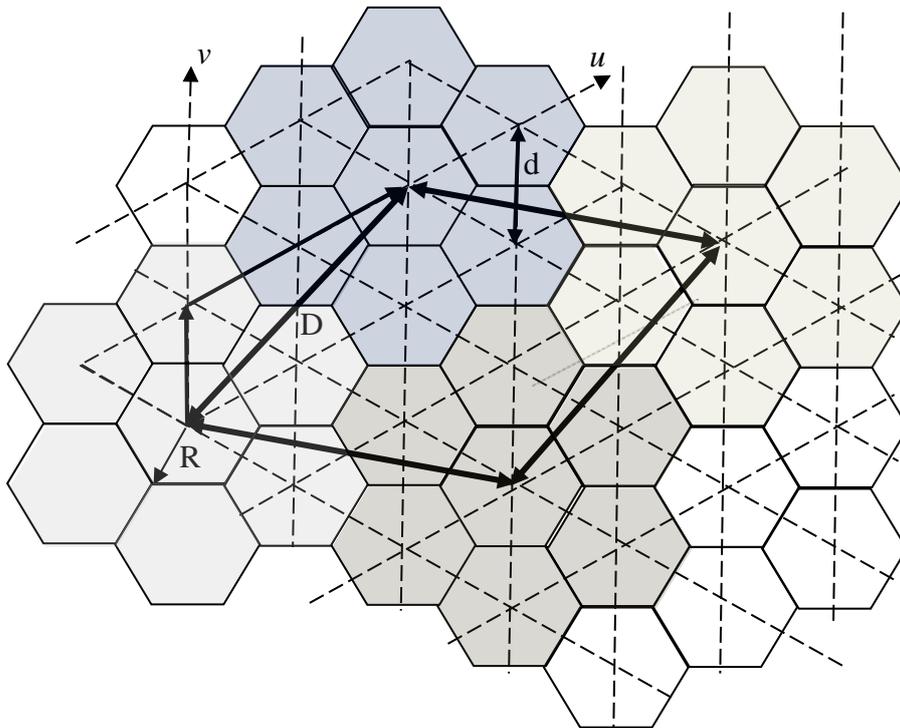


Figura 1.5. Rombo cocanal. Se han dibujado cuatro agrupaciones de 7 células. El área de cada agrupación es igual al área del rombo cocanal.

Cuando se elige el patrón celular y el radio de la célula se puede calcular directamente la distancia de reutilización D sin recurrir a las coordenadas $[m,n]$. En efecto, si introducimos la Ecuación 4 en la Ecuación 5, se llega a la siguiente expresión:

$$D^2 = 3R^2k$$

Ecuación 9

Ahora bien, sabiendo la distancia de reutilización D , ¿se puede estimar directamente el grado de interferencias cocanal, aunque sea sólo cualitativamente? La respuesta es negativa. Por ejemplo, si D es muy grande, puede que sea debido a que R es a su vez muy grande. En este caso, la onda interferente recorrería un camino muy largo y llegaría con poca potencia. Sin embargo, para los móviles más susceptibles de quedar afectados por la interferencia, es decir, para aquellos situados en la frontera de la célula, la onda deseada también quedaría atenuada ya que R es grande. La relación entre la potencia deseada y la potencia de interferencias, llamada relación portadora a interferencia, tendría un valor pequeño ya que las interferencias serían significativas. Por lo tanto, es necesario utilizar un parámetro que relacione la distancia D y el radio R . Este parámetro es el factor de reutilización q :

$$q = \frac{D}{R} = \sqrt{3k}$$

Ecuación 10

Este parámetro sí se relaciona claramente con las interferencias cocanal. Lógicamente si incrementamos el número de células por agrupación k , el factor q aumentará. Así, las interferencias serán cada vez menores (mayor distancia D entre células interferentes para cualquier radio R). Sin embargo, cuanto más disminuamos las interferencias mediante el aumento de D , más disminuirá la capacidad del sistema ya que el número de canales por célula disminuirá. Por el contrario, si aumentamos mucho la capacidad degradaremos la calidad del servicio ya que aumentarán las interferencias.

En el desarrollo anterior se ha obtenido la expresión de la distancia de reutilización a partir del patrón celular. Éste se calcula durante la fase de planificación; el patrón celular debe tener un valor mínimo para que las interferencias cocanal tengan un nivel máximo. Por tanto es necesario evaluar las interferencias cocanal, es decir, la relación portadora a interferencia. A continuación se muestra dicho cálculo. Con el objetivo de simplificar los cálculos se realizarán las siguientes suposiciones:

- Todos los transmisores radian la misma potencia.
- Todas las antenas están a la misma altura.
- Las condiciones de propagación son las mismas en toda el área cubierta (terreno homogéneo).
- Todas las antenas son omnidireccionales.

Las anteriores consideraciones afectan a la potencia recibida por el móvil, tanto de la estación base como de las estaciones base interferentes. En primer lugar, hay que determinar cuántas estaciones base interferentes existen. En la Figura 1.6 y la Figura 1.7 se muestran las estaciones base cocanal más cercanas a una dada para un patrón $k=4$ y $k=7$. Para cualquier patrón celular, las células interferentes más cercanas son siempre seis; estas células pertenecen a otras tantas agrupaciones adyacentes. Las estaciones base cocanal situadas más allá de esas seis células más cercanas no se consideran en el

Introducción

cálculo de la señal interferente. Se asume que la distancia de las células lejanas es tal que la potencia de la señal interferente de estas células es tan pequeña que se puede despreciar.

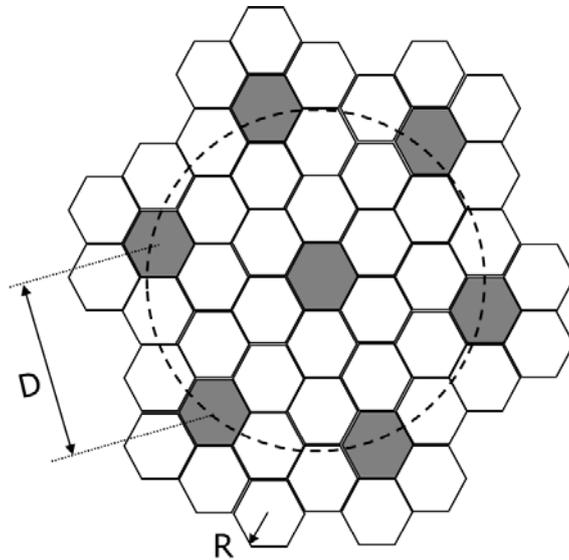


Figura 1.6. Células interferentes más cercanas a una dada para un patrón celular $k=7$.

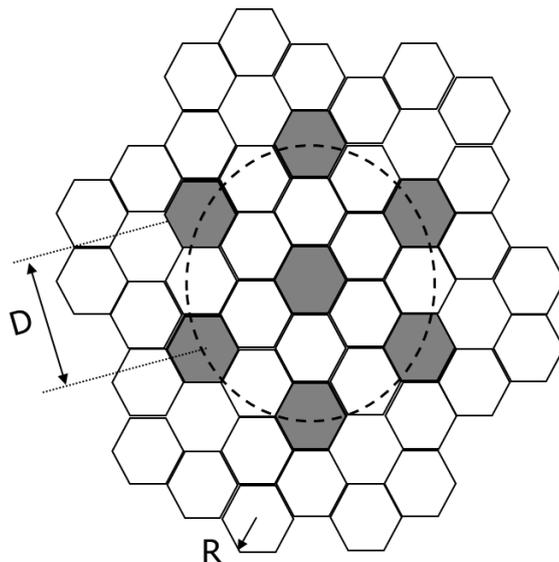


Figura 1.7. Células interferentes más cercanas a una dada para un patrón celular $k=4$.

La relación portadora a interferencia se calcula sobre el peor caso: aquel en el que el móvil que sufre la interferencia se encuentra en la frontera de su célula, a una distancia R de la estación base. Como se considera que las condiciones de propagación son las mismas en toda el área cubierta, tanto la señal deseada como las interferentes se atenúan con la distancia en una misma medida marcada por la constante de propagación γ . Como solo se toman en cuenta las seis células cercanas, la relación buscada es:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{j=1}^6 I_j} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_{j=1}^6 D_j^{-\gamma}}$$

Ecuación 11

Cualquier constante que afecte a la potencia del numerador afecta a la potencia del denominador en la misma medida debido a las suposiciones previas. Como todas las células interferentes se encuentran a una misma distancia D, la expresión de la Ecuación 11 se convierte en:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{6D^{-\gamma}} = \frac{1}{6} \frac{D^{\gamma}}{R^{\gamma}} = \frac{1}{6} q^{\gamma} = \frac{1}{6} (\sqrt{3k})^{\gamma}$$

Ecuación 12

Como se observa en la ecuación anterior, la relación portadora a interferencia solo depende del patrón celular. Si se reduce o se aumenta el tamaño de la célula pero no se cambia el patrón celular, la relación C/I permanecerá constante. Así, si se aumenta el patrón celular mejorará (aumentará) la relación (C/I), esto es, disminuirán las interferencias. En este caso, como se vio en el ejemplo de tráfico, el tráfico cursado disminuirá. En sentido contrario, si el patrón celular se reduce, la relación C/I disminuirá pero el tráfico que se puede servir aumentará. Como se deduce de estas relaciones, existe una relación de compromiso entre interferencias y tráfico cursado.

1.1.2 Flexibilidad de los sistemas celulares: técnicas para aumentar la capacidad del sistema.

La relación de compromiso entre el tráfico que se puede cursar y las interferencias máximas admisibles puede conducir al diseño de un sistema bien con poca capacidad o bien con poca calidad, (en cuanto a calidad de la señal o en cuanto a probabilidad de bloqueo). Existen diversas técnicas para aumentar la capacidad al mismo tiempo que se mantienen las interferencias en el sistema. Estas técnicas permiten diseñar sistemas mejores o en el caso de un sistema ya implantado, posibilitan su adaptación a situaciones de incremento en la demanda de servicio. Entre las técnicas más empleadas cabe citar:

Fragmentación celular

Una célula se puede saturar debido a un aumento en la demanda de servicios en su zona de cobertura. Para incrementar la capacidad se puede fragmentar la célula en otras células de menos tamaño. Por ejemplo si el radio de la célula se reduce a la mitad, su superficie se reducirá en una cuarta parte y por lo tanto el tráfico por unidad de superficie aumentará cuatro veces. Al reducir el radio de la célula, es necesario reducir la potencia de transmisión anterior ya que si se mantiene las interferencias entre células aumentarían. Esta reducción no afecta a la potencia de la señal deseada debido a que los móviles de la frontera se encuentran ahora más cerca de la estación base. El proceso de fragmentación debe llevarse a cabo de forma gradual y de manera localizada en donde sea necesario. En un mismo sistema y área pueden coexistir células de tamaño muy distinto, por ejemplo, macrocélulas en las afueras de una ciudad y microcélulas en el centro. Asimismo, una macrocélula puede ser dividida en varias microcélulas. La reducción del tamaño celular también se emplea en la fase de planificación inicial. Es un método utilizado para incrementar la capacidad del sistema sin que sea necesaria la

disminución del patrón celular. La subdivisión celular o reducción del tamaño celular tiene desventajas como la de aumentar el número de trasposos de llamadas entre células. Cuando un móvil se desplaza de una célula a otra debe cambiar de canal para que la llamada no se corte. Cuanto menor sea el tamaño de las células, más probabilidad existirá de que exista un trasposo de llamada. En el apartado 1.1.3. se explicará con más detalle cuándo se producen los trasposos de llamadas. La reducción del radio celular también aumenta el número de estaciones base, que además deben ser ubicadas con mayor cuidado. Estos dos factores incrementan los costes del servicio, aunque también el aumento de tráfico servido permitirá aumentar los ingresos.

Sectorización

En general se considera que cada célula está rodeada de seis células interferentes con las que comparte frecuencias. Un enfoque para aumentar la capacidad, distinto del anterior, consiste en reducir el número de células interferentes. Así, el patrón celular podrá ser disminuido sin temor a incrementar la cantidad de interferencias que degraden la señal recibida. Para conseguir este objetivo se sustituyen las antenas omnidireccionales por antenas que radien en sectores específicos de la célula. Las sectorizaciones más habituales son las de 120° y las de 60° que dividen a cada célula en 3 y 6 sectores como se aprecia en la Figura 1.8.

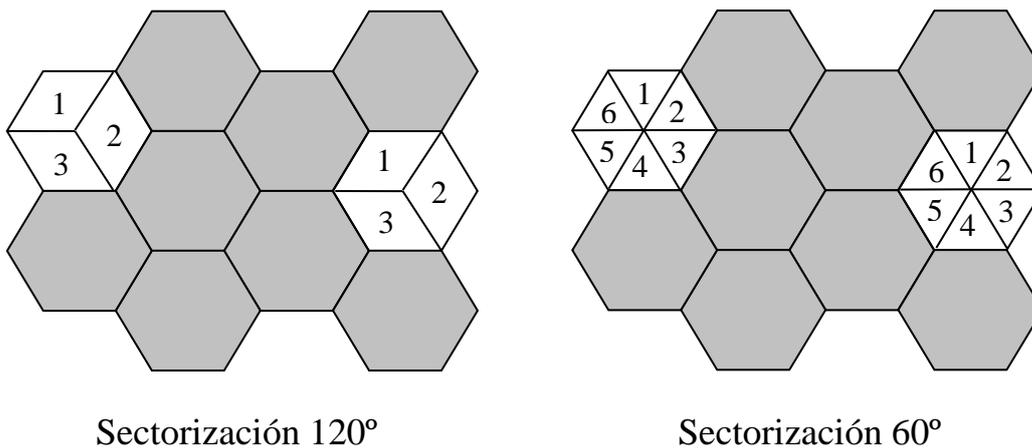


Figura 1.8. Tipos de sectorización más comunes.

Con la sectorización de 120° o sectorización triple se consigue que el número de estaciones interferentes se reduzca por tres, tal como se aprecia en la Figura 1.9 para un caso particular con patrón $k=7$. Con la sectorización de 60° o sectorización séxtuple las interferencias se reducen a un sexto de las iniciales. De este modo, si s es el número de sectores por célula, con la sectorización la nueva relación portadora a interferencia es:

$$\frac{C}{I} = \frac{s}{6} q^\gamma = \frac{s}{6} (\sqrt{3k})^\gamma$$

Ecuación 13

La relación C/I mejora en la misma proporción que el número de sectores. Si en ausencia de sectorización se debía emplear un determinado patrón k , ahora con la

sectorización se podrá reducir manteniendo la relación C/I por encima del nivel mínimo exigido.

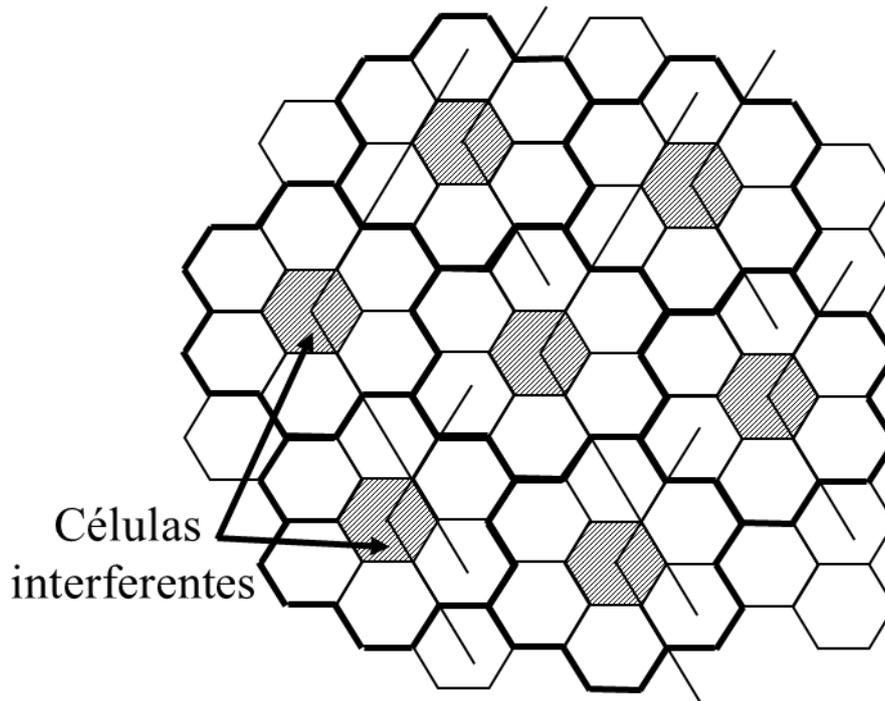


Figura 1.9. Células interferentes para un patrón celular $k=7$ y una sectorización de triple. La célula central sólo recibe interferencias de las dos células señaladas

El aumento de la capacidad del sistema mediante la sectorización es provocado justamente por la reducción del patrón celular. La sectorización por sí misma solo reduce las interferencias cocanal. El patrón celular que incluye una determinada sectorización se designa con el número de células por agrupación k seguido del número de sectores por agrupación $S=k \cdot s$. Así, existen patrones de sectorización triple de tipo 3/9, 4/12, 7/21, etc. o patrones con sectorización séxtuple de tipo 3/18, 4/24, etc.

1.1.3 Transferencia de llamadas o "handover".

Como se explicó en el apartado anterior cuando un móvil pasa de una célula a otra célula vecina se debe aplicar un procedimiento de conmutación o transferencia de la llamada. Este proceso se denomina traspaso de llamada ("handover" o "handoff" en inglés). El "handover" es necesario ya que, tal como se ha mostrado en la técnica de división celular, dos células vecinas no comparten frecuencias. Si un usuario posee una frecuencia determinada y, fruto de su movimiento, cambia de célula, no podrá seguir utilizando la misma frecuencia. Esa frecuencia no se encuentra disponible en la nueva célula adyacente. Así, se deberá asignar una nueva frecuencia a la llamada.

Este mecanismo es una parte muy importante del funcionamiento de cualquier sistema de comunicaciones móviles. De hecho, en algunos algoritmos de asignación de canales se da prioridad a las peticiones de "handover" respecto a las nuevas peticiones de llamada cuando ambas compiten por un canal libre [Rappaport]. Se deben conseguir dos objetivos:

- El éxito de todos los "handover" realizados.
- La minimización del número de "handover".

En los primeros sistemas de telefonía móvil celular el encargado de gestionar el proceso de “handover” era una entidad de red que se encuentra por encima de la estación base. Conforme los sistemas de telefonía móvil han progresado las tareas de traspaso de llamadas se gestionan cada vez más cerca de las estaciones base, llegando incluso a gestionarse en ellas mismas. La decisión de asignar o no una nueva frecuencia de otra célula se basa en la medición de la potencia recibida. En ciertos sistemas como por ejemplo el sistema de primera generación TACS, la única potencia tomada en cuenta era la recibida en la estación base. En otros sistemas, como el sistema de segunda generación GSM, se toma en consideración tanto la potencia recibida en el móvil como en la estación base.

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de transferencia de llamada en un sistema que utiliza únicamente la potencia recibida en la estación base. El valor P_{\min} es el umbral de potencia por debajo del cual la calidad de la comunicación oral no es aceptable. El umbral de potencia a partir del cual empieza el proceso de “handover” se denomina P_{handover} y es siempre superior a P_{\min} en una cantidad M . El móvil se encuentra en la célula A. Cuando la potencia recibida en A sea menor que P_{handover} se inicia en la entidad de gestión el proceso de transferencia hacia la célula vecina B. De entre todas las células vecinas a A, se selecciona la célula B ya que en ella la potencia recibida es elevada. El valor M es fundamental para alcanzar los objetivos del “handover”. Si M es un valor elevado, entonces se realizarán muchas peticiones innecesarias. Se solicitarán “handovers” cuando todavía estemos dentro de la célula, en ubicaciones con suficiente potencia recibida, muy por encima de P_{\min} . Si M toma un valor pequeño, entonces la llamada se transferirá demasiado tarde y probablemente antes de que ocurra la conmutación a la otra célula se habrá perdido la llamada por falta de potencia recibida. En ocasiones hay desvanecimientos de la potencia recibida muy profundos pero que duran muy poco tiempo. Para evitar que en estas situaciones se produzcan procesos de “handover” innecesarios, la potencia recibida se monitoriza durante un cierto intervalo de tiempo. Es decir, la potencia recibida de la celda actual (la A en el ejemplo) deberá ser menor que P_{handover} durante un periodo de tiempo suficiente.

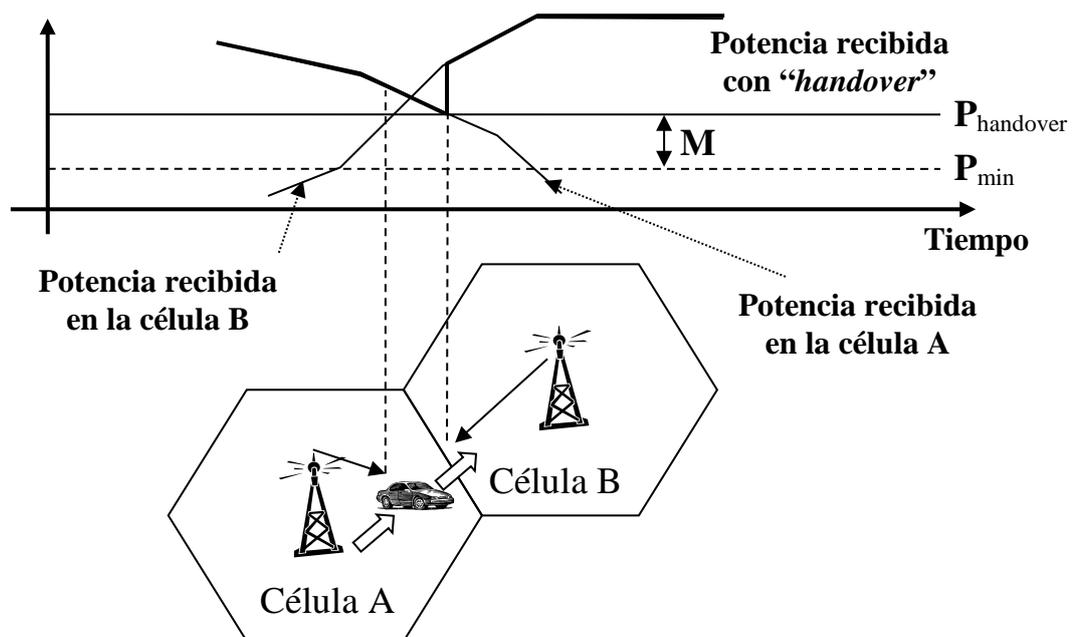


Figura 10. Proceso de “handover”.

1.2 Técnicas de duplexado.

Los usuarios del sistema de comunicaciones móviles deben transmitir y recibir hacia y desde una estación base respectivamente. Existen así dos canales, uno de transmisión desde el móvil llamado canal ascendente y uno de recepción del móvil llamado canal descendente. Esta duplicación de canales se puede llevar a cabo en el dominio de la frecuencia (FDD, “*Frequency Division Duplexing*” según las siglas inglesas) o en el dominio del tiempo (TDD “*Time Division Duplexing*” según las siglas inglesas).

Tal como se aprecia en la Figura 1.11 en FDD se opera en una banda de frecuencia para el canal ascendente y en otra para el canal descendente. Esto permite que la transmisión y recepción sea simultánea gracias al uso de un duplexor. Por ello, a estos canales se les denomina dúplex. Un duplexor es un conjunto de filtros que permite la separación de la comunicación de una banda de la otra.

En TDD hay unos periodos de tiempo reservados para transmitir y otros para recibir. En cada instante de tiempo se utiliza una única banda de frecuencia. Por esta razón el receptor móvil es más simple que en el canal dúplex ya que no necesita de duplexor alguno. En la Figura 1.12 se muestra un esquema de esta técnica de duplexado.

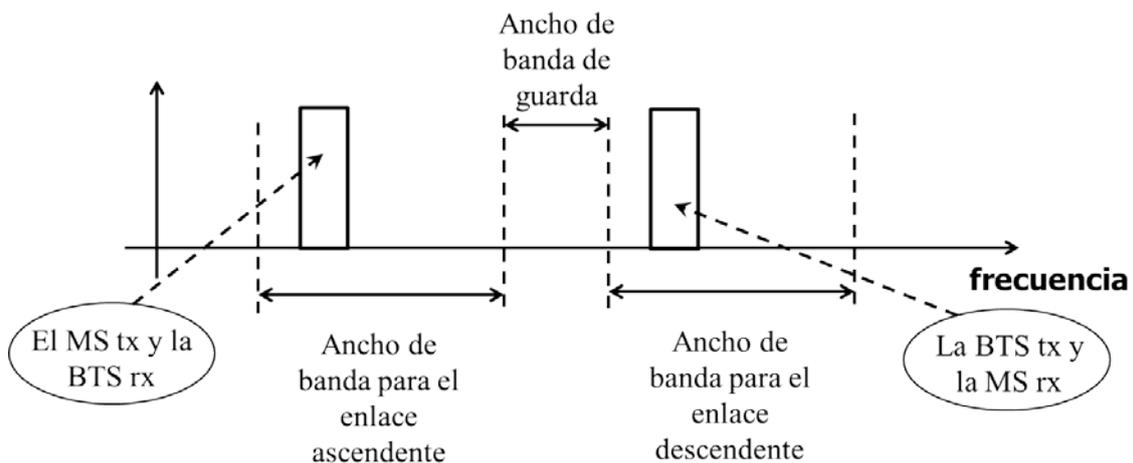


Figura 1.11. Esquema de duplexado en frecuencia o FDD.

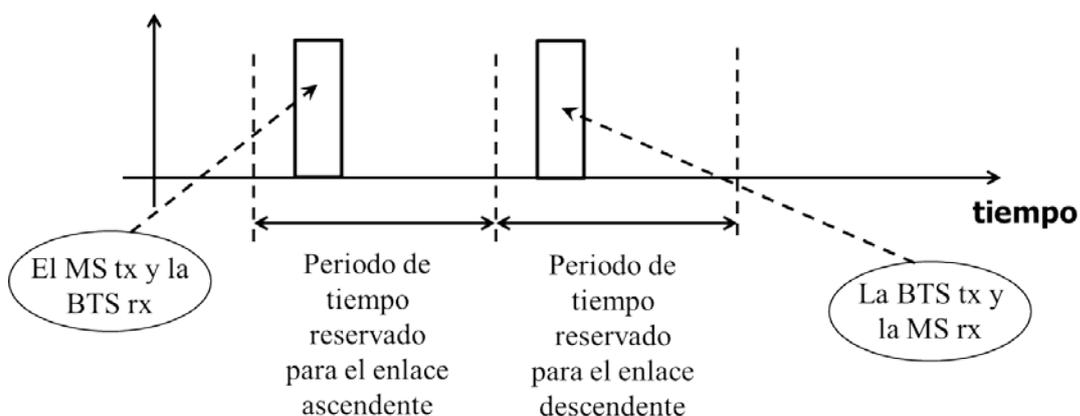


Figura 1.12. Esquema de duplexado en el tiempo o TDD.

1.3 Técnicas de acceso al medio.

Los recursos con los que se cuenta para llevar a cabo la comunicación son escasos. El ancho de banda, el tiempo reservado o los códigos que se emplean son limitados. Las técnicas de acceso al medio permiten compartir a varios usuarios estos recursos escasos. Además, el acceso debe ser asegurar una diferenciación clara entre unos usuarios y otros. Por tanto, el objetivo final de estas técnicas es alojar el máximo número posible de usuarios sin que la calidad del servicio se degrade por debajo de cierto límite.

La forma más natural de dividir diferenciar a unos usuarios de otros consiste en asignar a cada uno de ellos una porción de dicho espectro. A esta forma de asignación se el denomina Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA, "*Frequency Division Multiple Access*" según las siglas inglesas). Esta fue la técnica utilizada en todos los sistemas de comunicaciones móviles hasta los sistemas de 1ª generación. Una forma equivalente de división permite que cada usuario acceda a todo el espectro disponible pero solamente en determinados periodos de tiempo. Esta otra forma de asignación se llama Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA, "*Time Division Multiple Access*" según las siglas inglesas). Esta técnica fue utilizada por primera vez en elguno de los sistemas de 2º generación.

Existe una tercera técnica de acceso denominada Acceso Múltiple por División en Código (CDMA, "*Code Division Multiple Access*" según las siglas inglesas). En CDMA cada usuario emplea un código propio todo el tiempo en todo espectro completo. Las tres técnicas de acceso pueden utilizar bien FDD o bienTDD para acceder a los canales ascendente y descendente.

1.3.1 Acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA).

En FDMA el ancho de banda o espectro disponible se divide en canales de frecuencia no solapados. Cuando un usuario desea acceder al servicio se le asigna un ancho de banda único y exclusivo. Como se aprecia en la Figura 1.13 el único eje que queda dividido es el de frecuencia.

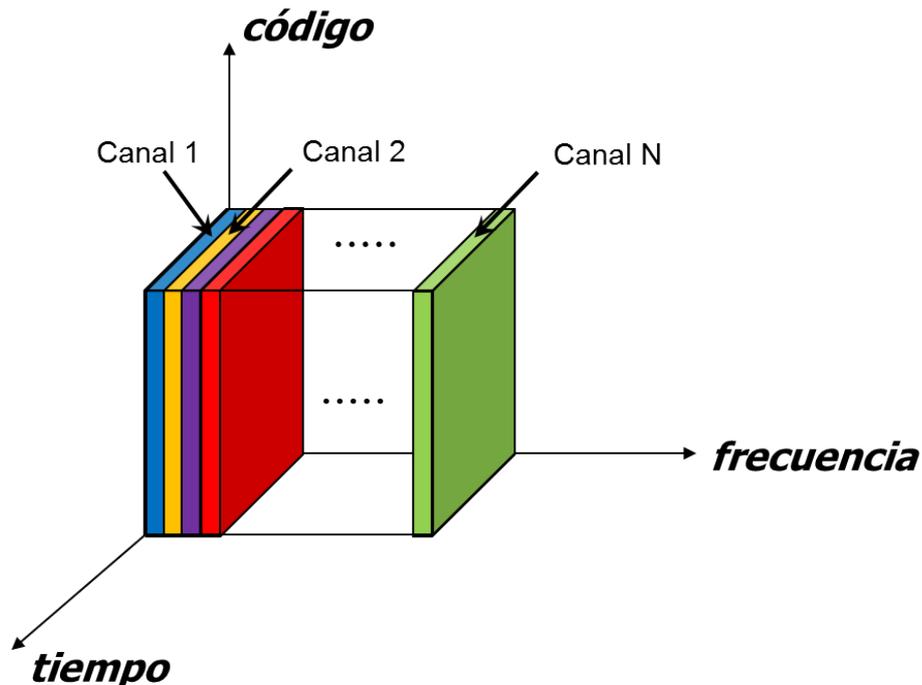


Figura 1.13. Acceso de varios usuarios mediante la técnica FDMA.

Si se utiliza FDD, a cada sentido de la comunicación se le debe asignar una banda o canal de frecuencia diferente. En general, los canales de frecuencia ascendentes estarán concentrados en una parte de la banda total, separados del grupo de canales descendentes que se encuentran asimismo concentrados

En la Figura 1.14 se muestra un ejemplo genérico de un sistema FDMA/FDD. Existe un mismo número N de canales ascendentes y descendentes en los que se divide el ancho de banda total del sistema B_{total} . Cada canal está separado por un ancho de banda Δf de los canales adyacentes. Este ancho de banda es mayor que el ancho de banda de transmisión y recepción. Este diseño permite que entre cada par de canales adyacentes aparezca una banda vacía, llamada banda de guarda (B_{dc}), que facilita el diseño de los filtros y disminuye las interferencias entre canales adyacentes. En cada extremo de la banda completa también existe una banda de guarda (B_d) para paliar las interferencias con otros sistemas cercanos en frecuencia [Comunicaciones Móviles 0.]. Podemos agrupar los canales en parejas de canales ascendentes y descendentes. Cada canal de la pareja esta separada un ancho de banda B constante, como se ve en la Figura 1.14.

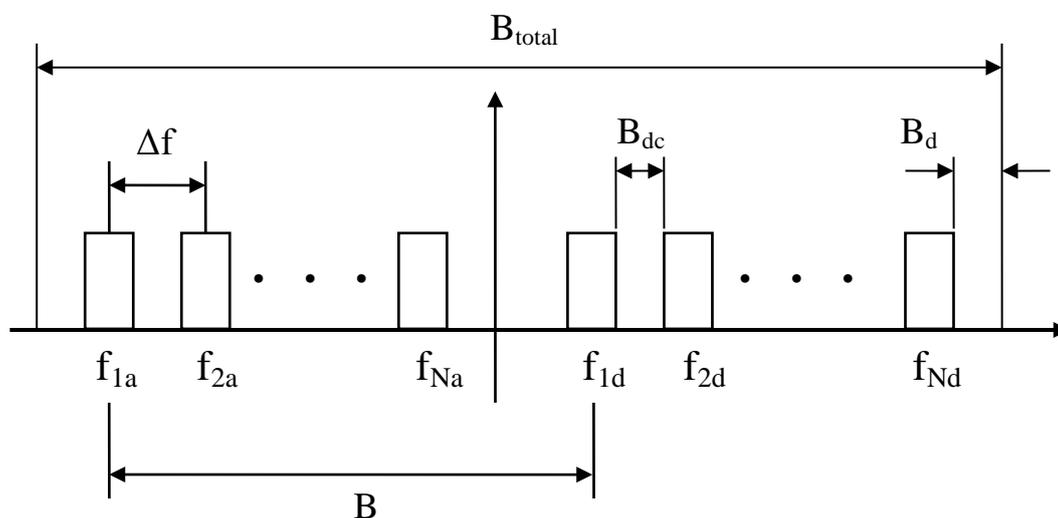


Figura 1.14. Canales de frecuencia en el sistema FDMA/FDD. Los canales de la izquierda están reservados para el enlace ascendente y los de la derecha para el enlace descendente.

El AMPS americano del año 1983 es un ejemplo de sistema FDMA/FDD. En este sistema existen $N=416$ canales situados en la banda de 850 MHz. Además, la separación entre parejas de canales es de 45 MHz, la separación entre canales (Δf) es de 30 KHz y la banda de guarda de los extremos (B_d) es de 10 KHz.

La técnica TDD de duplicación de los canales de transmisión y recepción también se puede aplicar a un sistema FDMA. En este caso, no existen canales de frecuencia fijos para los enlaces ascendentes o descendentes sino que cualquier canal de frecuencia puede servir para ambos enlaces. En unos instantes de tiempo un canal determinado servirá como enlace ascendente y en otros instantes como enlace descendente. Los sistemas de telefonía fija inalámbrica CT-2 y DECT son ejemplos de este tipo de esquema.

Los sistemas FDMA, tanto FDD como TDD, poseen una serie de ventajas y desventajas. Entre las desventajas podemos citar:

- Si un canal de frecuencia no es usado, no puede ser aprovechado por otros usuarios para incrementar su ancho de banda, es por tanto, un recurso desperdiciado.
- En FDMA se utilizan en canales radio de banda estrecha en los que el ancho de banda de coherencia es mayor que el ancho de banda total asignado al sistema de comunicaciones. Este hecho permite la división del ancho de banda total en canales de frecuencias. Si el canal radio es de banda ancha no es posible aplicar la técnica de FDMA.
- Las estaciones móviles (MS) requieren de un duplexor por lo que el bloque de radiofrecuencia (RF) del equipo es más caro y complejo que en un móvil TDMA.

Las ventajas de este sistema son:

- El tiempo de símbolo es largo en comparación con el ensanchamiento del retardo del canal. Este hecho provoca que la interferencia entre símbolos sea baja y por tanto que apenas se requiera el uso de ecualización.
- Si se elige como método de duplexado FDD, apenas se necesita sincronización ya que la transmisión es continua. Esto además implica menos bits de control que en otros sistemas como TDMA.
- Aunque las estaciones móviles necesitan de un duplexor si se utiliza FDD, en general los móviles FDMA son más simples que los móviles de sistemas basados en TDMA.

1.3.2 Acceso múltiple por división en el tiempo (TDMA).

En un sistema TDMA el tiempo es dividido en intervalos. Cada uno de los intervalos se asigna a un usuario. Por ello, si existen N usuarios, el tiempo se divide en N intervalos como vemos en la Figura 1.15. El conjunto total de intervalos se irá sucediendo en el tiempo de forma periódica, de modo que se forma una estructura temporal que se denomina trama TDMA. Debido a que el usuario solo puede transmitir (y recibir) información cada cierto tiempo, dicho usuario deberá acumular la información que genere hasta que llegue el intervalo asignado. Así, los sistemas TDMA transmiten mediante un sistema de almacenamiento y ráfaga. El almacenamiento solo puede hacerse en forma de bits, por lo que un sistema TDMA sólo puede utilizar datos y modulaciones digitales. Sin embargo, los sistemas TDMA pueden utilizarse tanto en canales de banda estrecha como en canales de banda ancha. En estos últimos el ancho de banda de cada canal o del sistema es mayor que el ancho de banda de coherencia del canal radio.

En la Figura 1.16 se muestra un ejemplo genérico de trama TDMA. En este sistema la sincronización entre los diferentes usuarios es de vital importancia para que cada uno transmita o reciba en el intervalo adecuado. Por ello, existe un periodo denominado preámbulo que contiene la información de control y sincronismo. Además, cada intervalo contiene su propia información de sincronismo. Los bits de guarda de cada intervalo facilitan la sincronización. En un sistema TDMA se puede utilizar tanto la técnica de duplexado TDD como la técnica FDD para diferenciar los enlaces ascendentes de los descendentes.

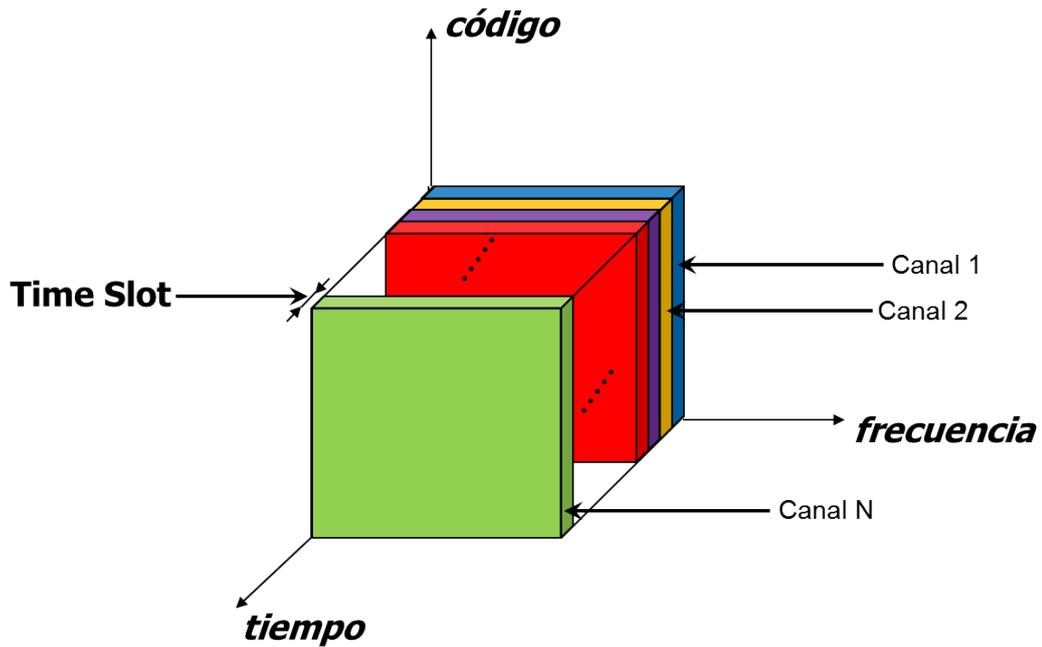


Figura 1.15. Acceso de varios usuarios mediante la técnica TDMA.

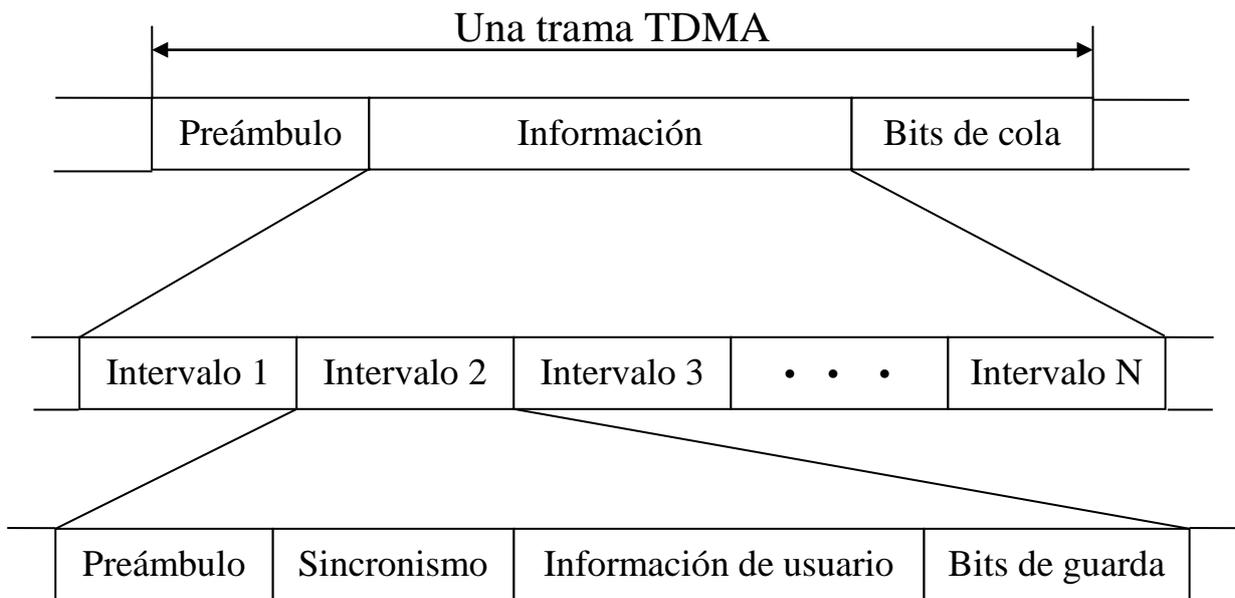


Figura 1.16. Estructura de una trama TDMA.

Los sistemas TDMA poseen una serie de desventajas y ventajas sobre otros sistemas [Comunicaciones Móviles 01]. Por un lado, las desventajas son:

- La velocidad de transmisión de datos (bits) es alta en comparación con FDMA, lo que obliga a utilizar técnicas de ecualización del canal.
- Los tiempos de guarda son necesarios para mejorar la sincronización pero reducen la tasa de transmisión por lo que deben ser minimizados. Si no se utilizasen se debería aumentar el ancho de banda.

- En general, se requieren una gran cantidad de bits para lograr la sincronización.

Por otro lado, las ventajas de este sistema son:

- La transmisión de datos se realiza en ráfagas, lo que disminuye el consumo de energía. Además, en las comunicaciones de voz, al no transmitir en periodos de silencio se consigue una reducción de las interferencias así como de la potencia consumida.
- La discontinuidad de las transmisiones permite al móvil sondear el canal durante aquellos intervalos en los que no transmite ni recibe. Este hecho facilita el proceso de “*handover*” mediante un sistema conocido como MAHO (“*Mobile Assisted Handover*”). Gracias a esta característica se pueden implantar células más pequeñas con la consiguiente mejora en la capacidad.
- Si utilizamos TDD no es necesario un duplexor lo que simplifica los equipos.
- El ancho de banda efectivo asignado a cada usuario puede ser variable ya que basta con asignar más o menos intervalos a cada usuario.

1.3.3. Acceso múltiple por división en el código (CDMA).

La técnica de acceso múltiple por división en el código se basa en la aplicación de una segunda modulación a la señal ya modulada digitalmente. Esta segunda modulación produce un ensanchamiento del ancho de banda de la señal transmitida. Justamente, este ensanchamiento constituye la diferencia fundamental de esta técnica de acceso respecto a TDMA y FDMA. El aumento en el ancho de banda empleado no supone realmente un desperdicio. Esto es debido a que la técnica de espectro ensanchado posibilita que varios usuarios puedan utilizar todo ese ancho de banda durante un mismo periodo de tiempo simultáneamente. La diferenciación entre un usuario y otro es posible debido a que el ensanchamiento en un usuario es llevado a cabo con un código único asignado únicamente a ese usuario. Como se aprecia en la Figura 1.17 el eje del código queda dividido entre los usuarios, quedando inalterados el eje temporal y el eje frecuencial. En CDMA, al igual que en TDMA y FDMA, se puede utilizar tanto FDD como TDD.

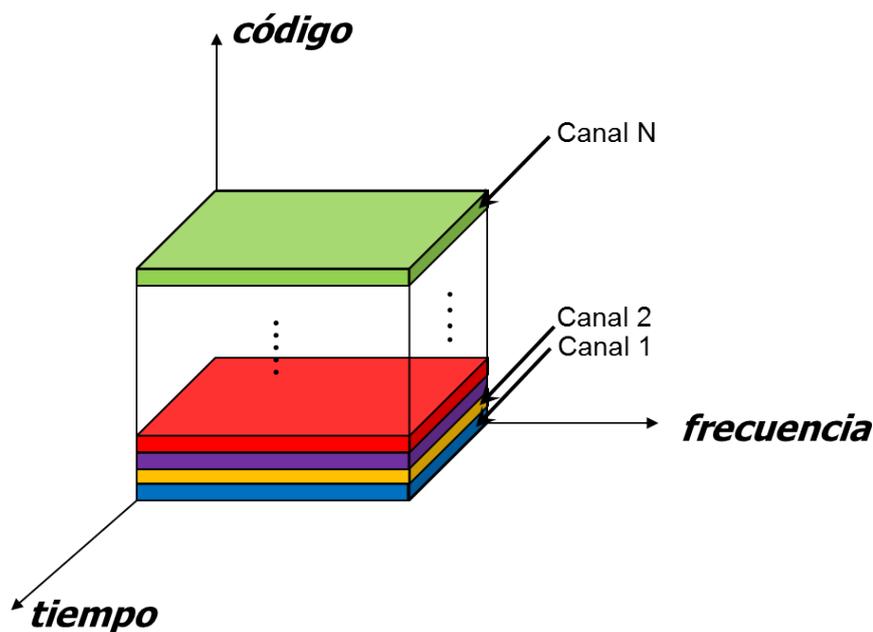


Figura 1.17. Acceso de varios usuarios mediante la técnica CDMA

El efecto del ensanchamiento del espectro se muestra en la Figura 1.18. La señal modulada, de ancho de banda B_s y potencia P , es ensanchada de forma que se obtiene una señal, de ancho de banda B_{ss} . La potencia de la señal ensanchada sigue siendo P , pero ahora esta potencia se distribuye a lo largo de un ancho de banda mayor que el original, por lo que la potencia por hertzio disminuye en gran medida. Puede parecer que este hecho provocará cierta debilidad frente al ruido, pero como veremos ocurre justo lo contrario.

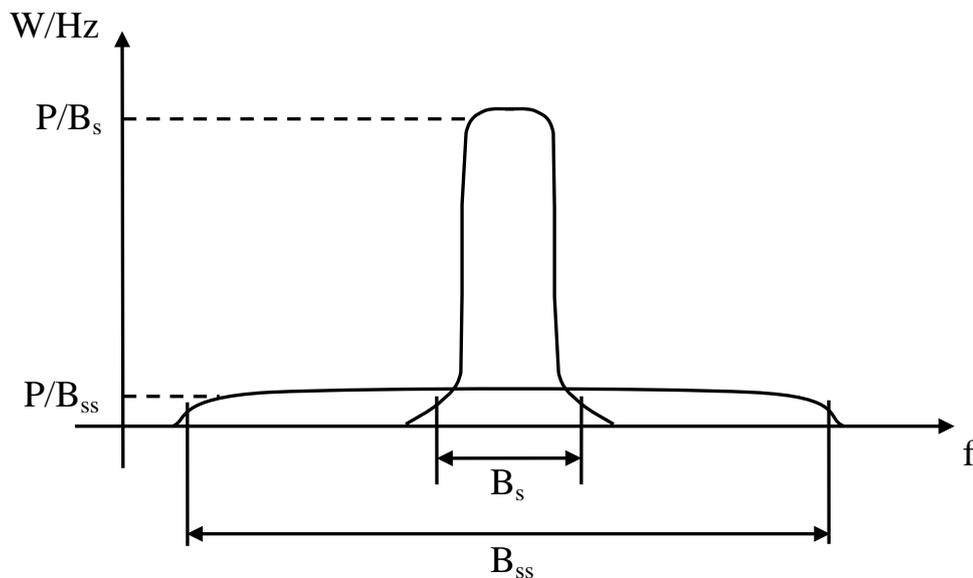


Figura 1.18. Espectro ensanchado (B_{ss}) de una señal de ancho de banda (B_s) de en la técnica CDMA.

Existen dos formas de ensanchar el espectro:

- Salto en frecuencia: consiste en cambiar la frecuencia de la portadora de la señal modulada de un modo aleatorio.
- Secuencia directa: consiste en multiplicar la señal modulada por una señal de ruido pseudo-aleatorio.

El método empleado en CDMA es el de secuencia directa. La clave de la secuencia directa radica en que la señal de ruido pseudo-aleatorio (PA) tiene un periodo de bit T_c mucho más pequeño que el periodo de la señal original T . Como se observa en la Figura 1.19, la multiplicación de las dos señales produce una señal de periodo igual a T_c . De forma matemática la operación realizada en el transmisor i -ésimo para ensanchar la señal es:

$$S_i(t) = PA_i(t) \cdot A \cdot d(t) \cos(\omega_0 t + \theta)$$

Ecuación 14

donde $PA_i(t)$ es la señal de ruido pseudo-aleatorio, A es la amplitud de la señal modulada y $d(t)=\pm 1$ es la señal moduladora de periodo T .

En frecuencia el ancho de banda de la señal original es aproximadamente:

$$B_s \approx \frac{1}{T}$$

Ecuación 15

El ancho de banda de la señal de ruido PA es mayor ya que es aproximadamente:

$$B_{PA} \approx \frac{1}{T_c}$$

Ecuación 16

Al multiplicar en el dominio del tiempo las dos señales, en el dominio de la frecuencia se produce una convolución. La duración total de dos señales convolucionadas es aproximadamente igual a la suma de ambas, por tanto, el ancho de banda de la señal multiplicada B_{ss} es aproximadamente igual al ancho de banda de la señal PA, $B_{PA} (1/T_c)$. El ancho de banda B_{ss} es mucho mayor que B_s , que se desprecia.

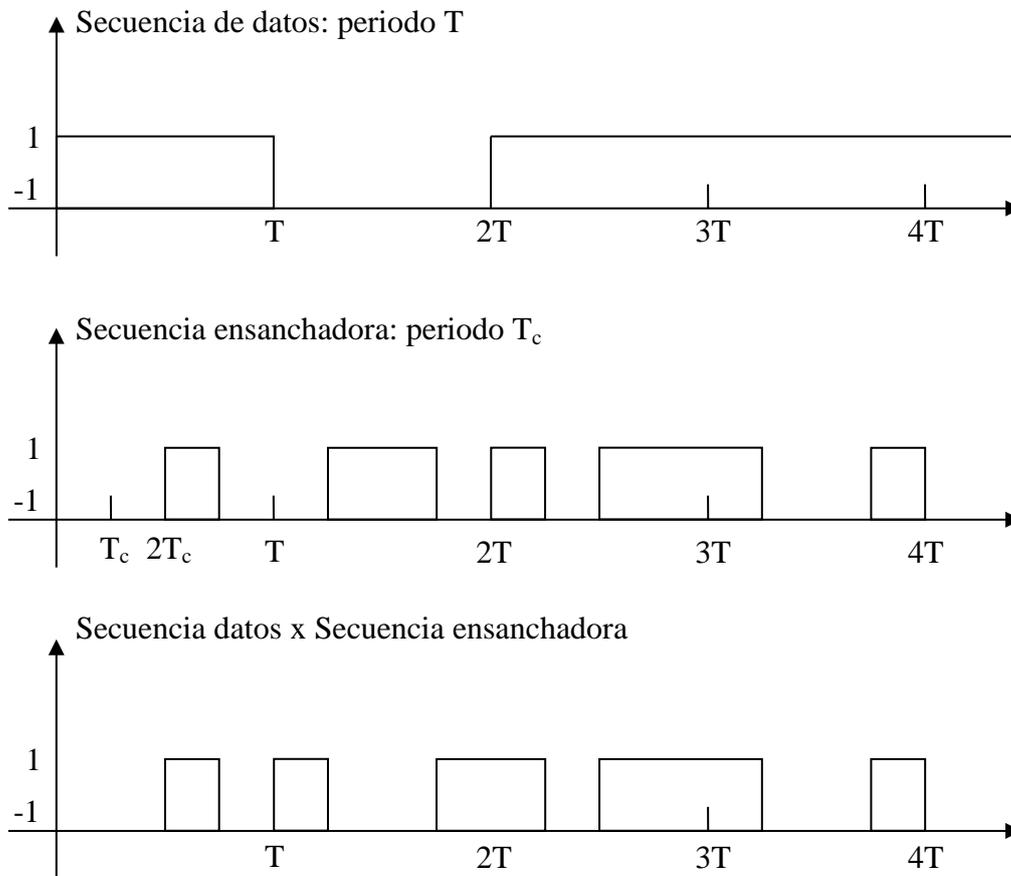


Figura 1.19. Formas de onda usadas para generar una señal ensanchada por secuencia directa.

Para recuperar la señal original modulada, en el receptor se debe multiplicar la señal recibida por el mismo código con el que se generó la señal ensanchada. Esta multiplicación provee además una gran robustez frente a las interferencias de banda estrecha. En la Figura 1.20 se muestra todo el proceso. En principio se tiene una señal modulada de forma digital de ancho de banda B_s y potencia P . Después del ensanchado la señal tiene la misma potencia P en un ancho de banda B_{ss} . A continuación esta señal se transmite a través el canal radio en el que aparece una señal interferente de ancho de banda B_I y potencia I . Ambas señales llegan al receptor formando la señal entrante. Para obtener la señal original en el receptor se multiplica la señal entrante por el mismo código pseudo-aleatorio del transmisor. Si se observa la señal fruto de la multiplicación en la Figura 1.19, se aprecia que, si la multiplicamos por la secuencia ensanchadora, se

obtiene la secuencia original de datos. Así, se recupera la señal original con su ancho de banda B_s (paso cuarto de la Figura 1.20). En cambio, la señal interferente, al ser multiplicada por la secuencia ensanchadora, es ensanchada en frecuencia por lo que su potencia I se distribuye en un ancho de banda B_{ss} . Finalmente, la señal original es seleccionada mediante un filtro paso banda que elimina casi toda la interferencia que se encuentra ensanchada. La densidad espectral de potencia final de interferencia es $I' = I \cdot (B_s / B_{ss})$, en lugar de la densidad original del punto 3 que era I / B_I . Por ello, la potencia interferente queda dividida por un término que se denomina ganancia de proceso G :

$$\frac{B_{ss}}{B_s} = \frac{T}{T_c} = G$$

Ecuación 17

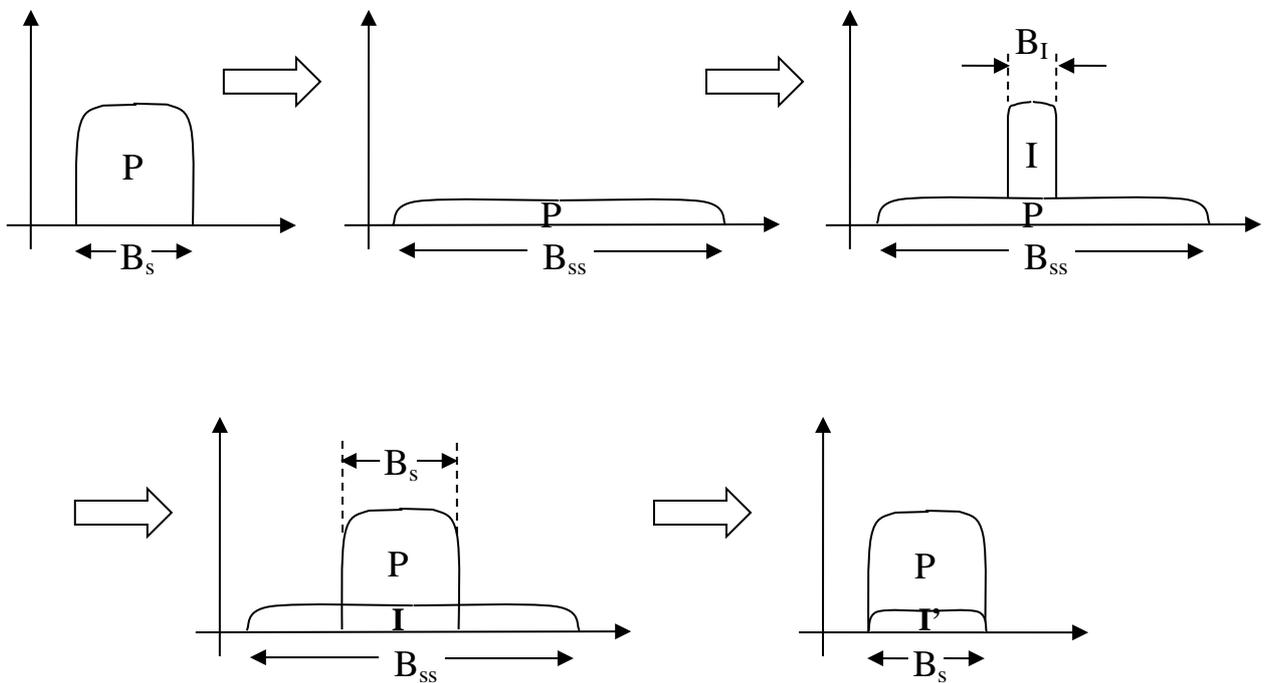


Figura 1.20. Procedimiento para recuperar la señal ensanchada. Reducción de la potencia interferente.

De forma precisa, en el receptor se debe aplicar la siguiente operación de multiplicación y correlación para recuperar la señal original:

$$\frac{2}{T} \int_0^T P A_i(t) \cos(\omega_0 t + \theta) S_i(t) dt = A \cdot d(t)$$

Ecuación 18

La operación de la Ecuación 18 además de rechazar las señales interferentes, también rechaza el ruido aditivo y a otras señales ensanchadas provenientes de los otros usuarios con los que comparte espectro y tiempo. Hay que tener en cuenta que cada usuario emplea un código diferente a los del resto de usuarios. Todos los códigos de ruido pseudo-aleatorio son ortogonales entre sí. Es decir, la multiplicación en el dominio del tiempo de una señal ensanchada por un código diferente al empleado en su

operación de ensanchamiento, produce una señal prácticamente nula. Un usuario recibe la señal ensanchada deseada y las señales del resto de usuarios. Estas señales no se desensanchan al ser multiplicadas por el código sino que dan lugar a señales prácticamente nulas en cualquier instante de tiempo. Como es imposible que sean nulas de forma completa se asemejan a una señal de ruido. En CDMA, para un usuario receptor las señales provenientes del resto de usuarios son consideradas como ruido. Este hecho limita el número de usuarios del sistema. Cuantos más usuarios existan más ruido aparecerá en la recepción de cada usuario.

Por lo tanto, para conseguir el funcionamiento correcto del sistema se deben cumplir ciertas condiciones [Comunicaciones Móviles 01]:

- La autocorrelación de la secuencia de ruido PA debe ser muy pequeña, salvo cuando el desplazamiento temporal es nulo, $t=0$.
- La correlación cruzada de dos secuencias diferentes $PA_i(t)$ y $PA_j(t)$ debe ser muy baja. Deben ser secuencias ortogonales o cuasi-ortogonales. De este modo, cuando lleguen a un receptor varias señales ensanchadas de otros usuarios serán rechazadas.

Al igual que los sistemas anteriores, el sistema CDMA posee una serie de desventajas y ventajas. Entre las desventajas encontramos:

- Cada usuario es visto como ruido de banda ancha por el resto. Este hecho limita el número de usuarios del sistema. Además, los usuarios más cercanos a la estación base pueden producir una potencia de ruido que “ahogue” las señales de móviles más lejanos. Este problema se conoce como “problema cerca-lejos”. Para mitigarlo es necesario aplicar un control de potencia en los móviles.
- Si las secuencias PA no son exactamente ortogonales aparecerán interferencias intrasistema.

Entre sus ventajas se puede citar:

- El límite de la capacidad es “suave”, no brusco. El incremento del número de usuarios aumenta el ruido de modo lineal, de modo que las prestaciones se degradan poco a poco. No existe un límite rígido para el número de usuarios.
- Es muy robusto frente a ruido e interferencias.
- Dado que todas las células CDMA son cocanal, un usuario puede ser controlado desde varias estaciones base. Este hecho permite que se elija la mejor señal en cada momento. Este mecanismo se denomina “*handover* suave” ya que se establece la conexión con la nueva estación base antes de romper la conexión con la antigua.

Bibliografía

[Sistemas de Comunicaciones Móviles] Pascual García, J., Molina García-Pardo, J.M., Juan Llácer, L., *Sistemas de Comunicaciones Móviles Caracterización del Canal Móvil*, Universidad Politécnica de Caratgena, 2010, ISBN 978-84-96997-54-7.

[Wireless Communications] Rappaport, Theodore S., *Wireless Communications principles and practice*, Second Edition, Prentice Hall, ISBN 0130422320.

[Comunicaciones Móviles 01] Cardona Marcet, N., Flores Asenjo, S., Reig Pascual, J., Rubio Arjona, L., Fraile Muñoz, R., *Comunicaciones Móviles*, SPUPV, 97.090.

[Comunicaciones Móviles 02] Hernando Rábanos, J. M., *Comunicaciones Móviles*, Centro de Estudios Ramón Areces, 2004, ISBN 9788480046350.

Capítulo 2. El Sistema GSM.

2.1 Introducción.

Los primeros sistemas modernos de comunicaciones móviles comenzaron a instalarse a principios de los años setenta del siglo XX. Su principal novedad con respecto a los sistemas anteriores residió en la utilización de la técnica de la división celular. Dicha técnica permitió un gran aumento de la capacidad, es decir, del número de usuarios y abonados. A este grupo de sistemas de comunicaciones móviles se le denominó como Generación 0. En los años ochenta surgieron los sistemas de primera generación (Generación 1). Los nuevos sistemas no presentaban grandes diferencias respecto a los sistemas pertenecientes a la generación cero; utilizaban la técnica de división celular y al igual que todos los sistemas aparecidos desde los años treinta y cuarenta empleaban una modulación analógica en frecuencia (FM). Una de las pocas diferencias apreciables radicaba en la diversidad de estos sistemas. Numerosos países desarrollaron sistemas propios de telefonía móvil celular de tipo analógico. Cada sistema sistema generalmente era ofrecido por el operador principal de telecomunicaciones y era apoyado por una o varias compañías de bandera del sector de las telecomunicaciones del país en cuestión. Así, por ejemplo podemos citar el sistema NMT (450 y 900) escandinavo, el TACS británico (ambos se utilizaron en España), el AMPS estadounidense, el sistema C (450 y 900) alemán, el Radiocom francés o el RTMS italiano. Casi todos estos sistemas empleaban la técnica de acceso al medio FDMA combinada con el método de duplexado en frecuencia (FDD). La banda de frecuencias utilizada se situaba en los 400 MHz y en la banda superior a esta de 800-900 MHz.

A finales de la década de los ochenta se comprobó que los sistemas analógicos de primera generación no serían capaces de satisfacer la demanda de servicios de comunicaciones móviles de las siguientes décadas. Era necesario aplicar mejoras basadas en nuevas tecnologías que permitieran el aumento de la calidad y de la capacidad. Entre estas novedades cabe mencionar el uso de microcélulas, de células sectorizadas y de anchos de banda mayores. Sin embargo, las mejoras no fueron suficientes para aumentar la capacidad de los sistemas en la medida requerida. Se hizo necesaria la total digitalización de los sistemas de comunicaciones móviles. A estos nuevos sistemas celulares y digitales se les denominó sistemas de segunda generación.

Las ventajas de un sistema digital frente a uno analógico son muy variadas. A continuación destacamos algunas por orden de importancia:

- Calidad en la señal de audio: la voz digitalizada es recompuesta de manera fidedigna en el receptor. El ruido y las interferencias de los sistemas analógicos quedaban reducidos en gran medida.

- Robustez frente a la interferencia co-canal y de canal adyacente: esta cualidad permite aumentar la eficiencia espectral ya que la distancia de reutilización se puede disminuir.
- Transmisión conjunta de voz y datos: algunos sistemas analógicos como TACS contaban con canales digitales pero estos canales solo estaban dedicados a tareas de control. En los sistemas digitales todos los canales son digitales. Aparecen los canales de datos de usuario que además pueden ser integrados con los canales que portan la voz digitalizada. Además, existen diferentes canales de datos dependiendo de su tasa binaria.
- Técnicas de control de errores y mecanismos de ecualización: esta es otra de las innovaciones que posibilita el incremento de la calidad de la señal de voz y datos digitalizados; la utilización de códigos de tipo CRC permite la detección e incluso corrección de bits erróneos. El envío de secuencias de bits conocidas por los dos extremos de la comunicación permite la estimación del comportamiento del canal.
- Nuevas técnicas de acceso al medio: en los sistemas analógicos la implantación de las técnicas de acceso al medio TDMA y CDMA era muy difícil. Estas técnicas permiten la simplificación de los circuitos de radiofrecuencia de modo que el consumo de la batería del móvil se reduce.
- Técnicas avanzadas de cifrado: en un sistema digital es mucho más sencillo la aplicación de técnicas de cifrado que protegen la confidencialidad de la comunicación. Además, la identidad del usuario es protegida y es difícil de suplantar.
- Servicios suplementarios de alto nivel: son servicios del tipo desvío de llamada o de restricción de llamadas. Estos servicios ya existían en la red de telefonía fija (digitalizada como la RDSI o analógica) pero no en los sistemas de primera generación de comunicaciones móviles.
- Señalización digital: más que una ventaja constituye una necesidad, como ocurre por ejemplo en la técnica de acceso al medio TDMA. En esta técnica es necesaria la generación de una trama temporal señalizada mediante canales de control digitales. La señalización digital posee ventajas secundarias como el aumento de la seguridad respecto al fraude o como el establecimiento de forma sencilla del control de potencia del móvil. Hay que añadir que, en un principio, los sistemas de comunicación de segunda generación usaban conmutación de circuitos. Gracias a la señalización digital se pudo introducir la conmutación de paquetes en los sistemas de comunicaciones móviles. Esta innovación es el elemento fundamental de la transición desde los sistemas de segunda generación hacia los sistemas de tercera generación.

La digitalización también poseía ciertas desventajas o inconvenientes respecto a un sistema analógico. Sin embargo, la mayor parte de estas desventajas no eran intrínsecas al sistema digital, sino que se referían en cierta medida al desarrollo tecnológico del momento en el que estandarizaron y aparecieron los sistemas de segunda generación. El resto de desventajas se solucionaban con alguna de las ventajas e innovaciones mencionadas anteriormente. Entre las desventajas podemos citar:

- Retardo adicional en la transmisión: es provocado por las técnicas de procesamiento a la que es sometida la señal. Para que el retardo en la comunicación no sea molesto los procesadores digitales de señal deben trabajar a una velocidad mínima. Este inconveniente es compensado ampliamente por las ventajas que supone la digitalización de la señal y la utilización de complejos canales de

señalización. La aparición de terminales móviles digitales accesibles al gran público solo pudo darse a finales de los años ochenta y principios de los años noventa. En esa época aparecieron procesadores suficientemente veloces. El aumento en la integración de circuitos ha sido constante y ya a mediados de los años noventa el retardo en la transmisión no suponía ningún problema.

- Sensibilidad a la propagación multicamino: los símbolos digitales pueden sufrir interferencia entre símbolos (ISI). Este problema ha empeorado progresivamente ya que la demanda de canales de mayor velocidad binaria ha aumentado desde la aparición de estos sistemas. No obstante, las técnicas de equalización del canal y de corrección de errores de bit han paliado los efectos negativos de la propagación multicamino.
- Necesidad de redundancia: junto con los datos útiles de usuario es necesario transmitir una serie de datos de control y de información redundante. Sin embargo, estos datos proporcionan beneficios como la corrección de errores o la confidencialidad de la comunicación por lo que sus ventajas compensan sus inconvenientes.

En Europa esta transición poseyó además una característica particular: se diseñó un estándar único europeo en lugar de una multitud de sistemas propios en cada país. Una mayoría de países europeos estaban integrados en una Comunidad Económica Europea y pronto se formaría una unión política. Las fronteras entre los países europeos prácticamente dejaban de existir por lo que la existencia de varios sistemas de comunicaciones móviles incompatibles entre sí carecía de sentido. Si la digitalización trajo consigo mayor calidad y capacidad la creación de un estándar también produjo ventajas al sistema europeo de segunda generación. Los fabricantes ahora podían vender sus equipos en muchos más países con la consiguiente reducción de costes tanto en los móviles como en la infraestructura. El sistema era más atractivo para los usuarios ya que podían emplear su terminal móvil en varios países. Las compañías obtenían nuevos clientes o fidelizaban con mayor facilidad los ya existentes.

Este sistema de segunda generación europeo se denominó GSM. El comienzo del estándar data del año 1982 con la creación dentro de la CEPT (“Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications”) de un grupo de trabajo francés conocido con el nombre de “Group Special Mobile”, de ahí las siglas del estándar [GSM and Personal Communications, página 67]. Desde su inicio el GSM agrupaba a administraciones, operadores públicos y fabricantes de equipos con el fin de crear un estándar europeo. En 1988 se fundó el ETSI (“European Telecommunications Standards Institute”) que continuó el trabajo de definición del nuevo estándar a partir del año siguiente. En ese momento el GSM cambió el significado de sus siglas por la definitivas “Global System for Mobile Communication”. El ETSI es una organización independiente (en la medida que es posible) soportada por la industria de las telecomunicaciones. Sus miembros y contribuidores son fabricantes (el 60% del ETSI), operadores públicos y privados, administraciones públicas, asociaciones de usuarios y órganos de investigación. Finalmente, el sistema GSM estuvo operativo en el verano de 1992 tras un retraso de un año respecto al plan previsto. Había superado una larga fase de definición del estándar y fase de pruebas en las que influyeron tanto las dificultades técnicas como las diferencias entre los distintos grupos de presión.

Desde su puesta en servicio el estándar GSM ha seguido una evolución y desarrollo dividido en varias fases. Dichas fases están caracterizadas por los teleservicios, servicios portadores y servicios suplementarios que ofrecen. A continuación se explican

y enumeran las fases y servicios ofrecidos en cada fase [GSM and Personal Communications].

- GSM fase 1 (1991-1994): en esta fase se ofrecían los servicios básicos (teleservicios y servicios portadores) y algunos suplementarios. En esta fase ya se incluyó el teleservicio de mensajes cortos (SMS o “Short Message Services”) que es uno de los servicios distintivos del sistema GSM.
- GSM fase 2 (1994-1995): en esta fase se introdujeron numerosos servicios suplementarios y algunos servicios portadores y teleservicios.
- GSM fase 2+ (1995 en adelante): se aplicaron sucesivas mejoras sobre el sistema GSM para alcanzar mayores tasas de transmisión de datos en los servicios portadores. En estas mejoras destacan dos principalmente. El sistema HSCSD (“High speed circuit-switched data”), el cual permitió un gran aumento en las tasas de transmisión, y sobre todo el sistema GRPS (“General Packet radio service”) con el que se introdujo la conmutación de paquetes en GSM. Este tipo de conmutación supuso el primer paso en la transición hacia los sistemas de tercera generación.

En la Tabla 2.1, Tabla 2.2 y Tabla 2.3 se detallan los servicios de cada una de las fases del desarrollo del sistema GSM.

Categoría	Servicio	Comentarios
Teleservicios	Telefonía	Voz de ratio completo (“full rate”) a 13 kbps
	Llamadas de emergencia	Llamadas al número “112”: número del servicio de emergencias locales
	Mensajes cortos (SMS) punto a punto	Mensajes alfanuméricos intercambiados entre dos usuarios individuales a través de un centro de servicios dedicado
	Mensajes cortos (SMS) punto a multipunto (“cell broadcast”)	Información alfanumérica destinada a todos los móviles dentro de una célula pero no durante una conversación o conexión de datos
	Videotexto	
	Transmisión de teletexto	
	Telefax	
Servicios Portadores	Datos asíncronos	300- 9600 bps transparentes y no transparentes
	Datos síncronos	2400-9600 bps transparentes
	Acceso a paquetes asíncronos	300-9600 bps
	Voz y datos alternativos	
	Voz seguida de datos	

Servicios Suplementarios	Desvío de llamada	Consiste en traspasar la llamada a un segundo número cuando el usuario no está o no contesta. Disponible para todo tipo de llamadas
	Llamadas prohibidas	Permite prohibir cierto tipo de llamadas. Por ejemplo, todas las llamadas internacionales, todas las llamadas entrantes o todas las llamadas entrantes si se está haciendo una operación de "roaming"

Tabla 2.2. Servicios del sistema GSM Fase 1.

Categoría	Servicio	Comentarios
Teleservicios	Telefonía	Voz de ratio medio ("half rate") a 6.5 kbps. De aplicación opcional
	Codec de voz de ratio completo mejorado ("enhanced full-rate")	De aplicación opcional
Servicios Suplementarios	Identificación de la llamada (línea) entrante	Presentación y restricción de la llamada entrante mediante la muestra del identidad del usuario que efectúa la llamada entrante
	Identificación de la llamada (línea) conectada	Presentación y restricción de la llamada saliente mediante la muestra del identidad del usuario que es llamado
	Llamada en espera	Durante una llamada activa, se informa al usuario de una segunda llamada entrante y le permite contestarla
	Llamada congelada	Mantiene congelada una llamada activa mientras se contesta o se inicia una segunda llamada
	Comunicación en grupo	Permite dialogar hasta con cinco usuarios simultáneamente
	Grupo cerrado de usuarios	Establece grupos de usuarios con acceso

		limitado
	Informe de gasto	Muestra en cada momento el coste de la llamada
	Servicios de datos suplementarios no estructurados	
	Prohibiciones del operador	Restricción a un usuario por parte del operador de diferentes servicios o tipos de llamadas

Tabla 2.3. Servicios del sistema GSM Fase 2

Categoría	Servicio	Comentarios
Teleservicios	Servicio de telefonía a grupos	Servicios de llamadas de voz a grupos y de grupos completos (tipo "broadcast")
	Mejoras sobre mensajes cortos (SMS)	Extensión del alfabeto e incremento de la capacidad
Servicios Portadores	"High Sped Circuit Switched data (HSCSD)	Combinación de hasta cuatro ranuras temporales en una misma comunicación o canal lógico
	Paquetes de datos en canales de señalización	Reutilización de recursos de señalización para tráfico de paquetes de datos
	Tasa de transmisión de datos de usuario de 14.4 kbps	
Servicios Suplementarios	Transferencia explícita de llamada	
	eMLPP ("enhanced multilevel precedence and preemption service)	Define una prioridad para ciertas llamaas
Características mejoradas en la SIM	Prohibición de números llamantes	Prohíbe las llamadas de ciertos números
	Personalización del equipo o estación móvil (ME)	Permite la restricción en el uso del móvil para ciertas SIM
	Servicio de números preprogramados	Servicios de números preprogramados en la SIM, protegidos de ser borrados por el usuario
Características mejoradas en la red	Identidad de la red y tiempo de la zona	Descarga de información de la red y datos a la estación móvil (MS)
	CAMEL- Fase1	El servicio CAMEL permite a los usuarios en

		otra red diferente a la que están suscritos (“roaming”) disfrutar de los mismos servicios que en su red
	Bucle local radio (RLL: “Radio local loop”)	Extensión de GSM a redes fijas
	Soporte de enrutamiento óptimo	Reduce la carga debida a un enrutamiento óptimo

Tabla 2.4. Servicios del sistema GSM Fase 2+

El GSM ha tenido un gran éxito no sólo en Europa sino en todo el mundo siendo durante muchos años el sistema de comunicaciones móviles más usado y extendido mundialmente. En la Figura 2.1 podemos observar que el crecimiento del sistema GSM y los sistemas fruto de su evolución (GPRS, 3G) ha sido prácticamente exponencial. Podemos destacar cinco claves que han provocado este éxito [GSM and Personal Communications, página 70]:

- Aunque el desarrollo y puesta a punto de GSM duró una década llegó a tiempo para aprovechar la liberalización de las telecomunicaciones en Europa. Esta nueva regulación permitió la aparición de nuevos operadores que encontraron en el sistema GSM el estándar ideal para extender sus servicios de comunicaciones móviles primero por Europa y luego por el resto del mundo. A principios de los años noventa el GSM era el único sistema, por lo menos en Europa, capaz de satisfacer las necesidades de seguridad y servicios que demandaban los usuarios. El GSM se adelantó a otros competidores en un momento crucial.
- La segunda clave está relacionada con la anterior: una vez se adopta un sistema de forma mayoritaria el valor de dicho sistema aumenta. Distintas razones apoyan esta afirmación: las economías de escala posibilitan el abaratamiento de los equipos, los usuarios, que tienen miedo a los cambios, permanecen fieles al sistema ya que es más fácil que no incluya riesgos imprevistos.
- Una de las claves fundamentales para su expansión residió en su capacidad de “roaming”. Esta propiedad permite a un usuario conectarse a la red GSM de otro operador distinto al que está suscrito. Es un servicio muy útil cuando un usuario se encuentra en el extranjero. Este servicio era imprescindible en GSM debido a la gran cantidad de viajes entre países europeos que realizaban los propios usuarios europeos. En los sistemas estadounidenses esta característica se instaló más tarde que en GSM lo cual favoreció la expansión de este sistema en todo el mundo.
- El sistema GSM es un estándar completo y abierto. Al definir no solo la parte radio (RF) sino toda la arquitectura y sus interrelaciones, los operadores podían estar seguros de que el sistema entero había sido probado y que podría funcionar sin dificultades. Asimismo, los fabricantes encontraron economías de escala que hacía más competitiva la elaboración de equipos de GSM.
- El sistema GSM ha incorporado nuevas bandas de frecuencia y ha sido capaz de realizar los cambios oportunos en el estándar para adaptarse a los cambios en el espectro. Entre las bandas adicionales al espectro original reservado para GSM citamos los 10 MHz que dieron lugar al GSM extendido (E-GSM, “Extended GSM”) y las bandas situadas en los 1800 MHz y 1900 MHz.

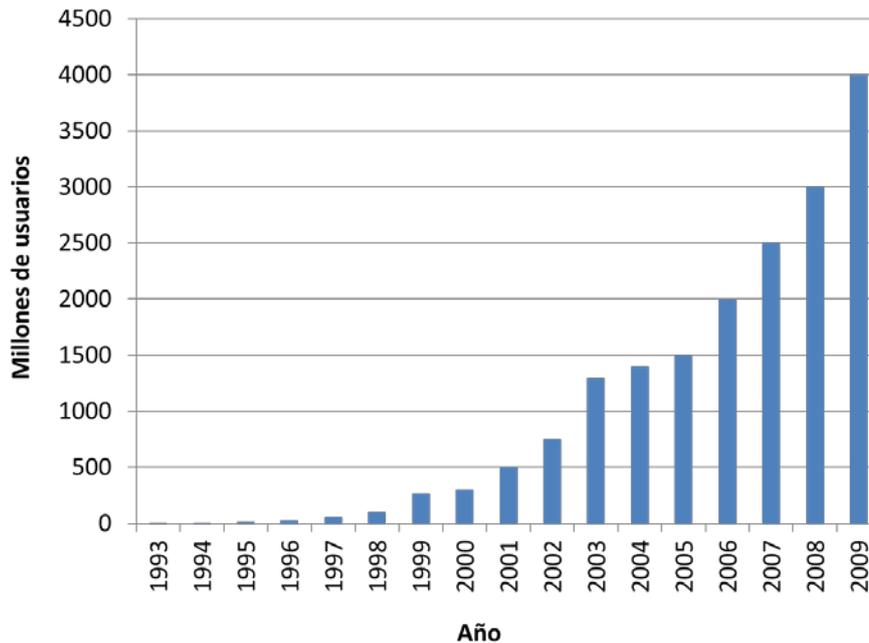


Figura 2.21. Número de usuarios de GSM desde 1993.

2.2 Estructura de la red de GSM.

La estructura de la red del sistema GSM es una estructura de tipo jerárquico en la que los diferentes elementos están conectados mediante interfaces definidos en el estándar. En la Figura 2.2 se muestran los diferentes elementos y sus interfaces.

A continuación se enumeran los elementos de la estructura y se muestra el significado de las siglas:

- 1) Estación móvil (MS, “Mobile Station Equipment”): es el dispositivo móvil con el que el usuario se conecta a la red a través del interfaz Um. Este interfaz describe el enlace radio entre la MS y el siguiente elemento de la red, el BTS.
- 2) Estación Base (BTS, “Base Transceiver Station”): son los equipos de radiofrecuencia, antenas y los equipos electrónicos que dan servicio a una célula o a varias células (célula sectorizada). La palabra “transceiver” hace referencia a la capacidad de la BTS de transmitir y de recibir. Se conecta con el interfaz Um con la MS y mediante el interfaz A-bis con el BSC.
- 3) Controlador de estaciones base (BSC, “Base Station Controller”): como su propio nombre indica controla varias estaciones base. Se conecta a sus BTS mediante el interfaz A-bis y su MSC a través del interfaz A.
- 4) Área de localización (LA, “Location Area”): no es propiamente un elemento sino una agrupación de BSC, pero lo mencionamos debido a su importancia en la búsqueda de MS como veremos más adelante.
- 5) Centro de conmutación de servicios móviles (MSC, “Mobile Service Switching Center”): es el encargado de realizar casi todas las funciones de conmutación. Es un elemento con múltiples conexiones. Se conecta con sus BSC a través del interfaz A. Además se conecta con el SMS-GMSC a través del interfaz E, al HLR (si posee uno) mediante el interfaz C y a su VLR mediante el interfaz B.
- 6) Registro de localización local (HLR, “Home Location Register”): es una base de datos que contiene información de todos los usuarios abonados de la red móvil. Se conecta mediante el interfaz D al VLR y mediante el interfaz C al SMS-GMSC. Puede existir uno o varios HLR en una red GSM.

- 7) Registro de localización de visitantes (VLR, “Visited o Visitor Location Register”): es una base de datos que contiene información sobre los abonados que se encuentran actualmente en alguna de las LA que forman parte del MSC al que está asociado el VLR. Se conecta con otros VLR mediante el interfaz G y con su MSC mediante el interfaz B.
- 8) Puerta de Enlace o Pasarela-Centro de conmutación de servicios móviles (“SMS-GMSC” Gateway Mobile Service Switching Center): es un MSC especial que se encarga de la comunicación con la red de telefonía fija (PSTN “Public Switching Telephone Network”). También se encarga de la gestión de los SMS. Se conecta a los MSC a través del interfaz E.
- 9) Centro de operación y mantenimiento (OMC, “Operation and Maintenance Center”): se encarga de las operaciones de mantenimiento y realiza tareas de gestión. Posee conexiones con todos los elementos de la red jerárquica.
- 10) Registro de identificación de registros (EIR, “Equipment Identity Register”): es una base de datos que guarda información sobre los equipos móviles de los abonados a la red.
- 11) Centro de Autenticación (AUC, “Authentication Center”): es una base de datos que también posee equipos para realizar cálculos de autenticación de los usuarios abonados a la red.

A continuación se describen cada uno de los subsistemas que forman la red. Asimismo, se explican con detalle las funciones y propiedades de cada uno de los elementos de la red.

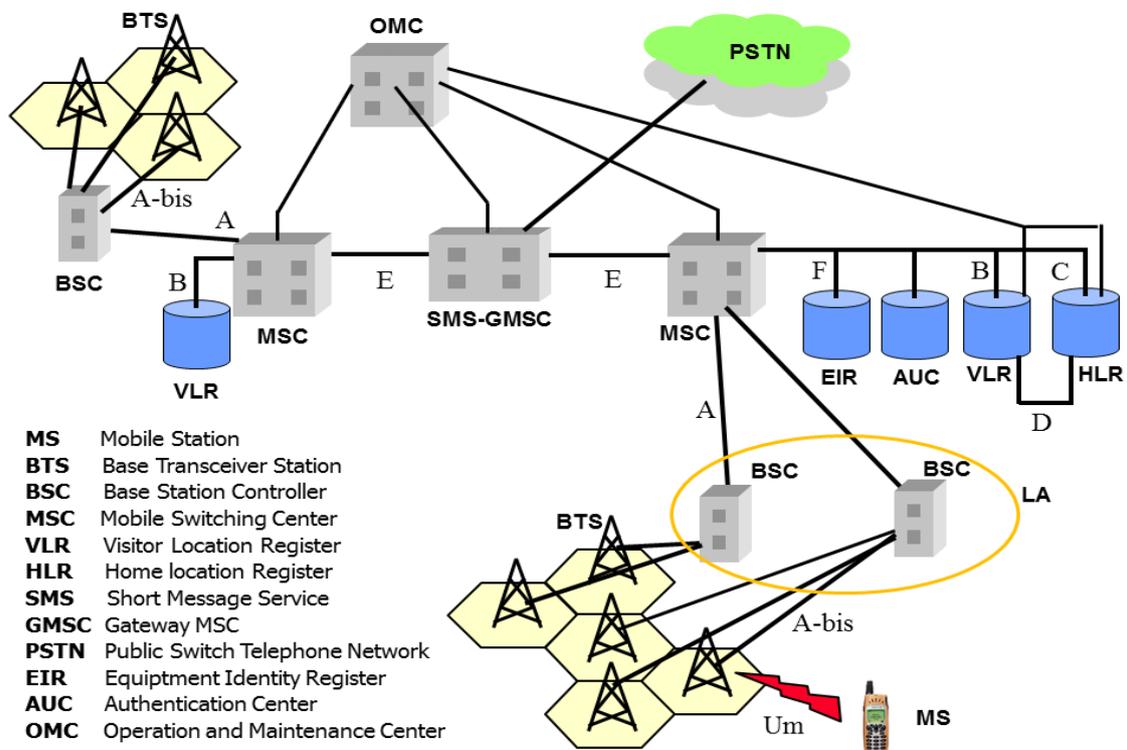


Figura 2.22. Estructura de la red GSM [GSM Switching, Services and Protocols]. En algunos textos el AuC se coloca conectado al HLR, sin conexión directa con el MSC [GSM, cdmaOne and 3G Systems, Comunicaciones Móviles 02].

2.2.1 Subsistema de usuario.

El subsistema de usuario de GSM está formado por dos entidades, la MS y la SIM (“Subscriber Identity Module” o Módulo de Identidad del Suscriptor). GSM distingue entre el usuario, los números de teléfonos que posee y el equipo desde el que se accede al servicio. Esta distinción permitió al sistema GSM poseer una mayor seguridad en las comunicaciones y en la identificación de abonados que otros sistemas coetáneos. El usuario queda definido por la SIM. Una SIM puede ser empleada en distintos dispositivos MS. Además una SIM puede tener asociados varios números telefónicos (MSISDN). En los siguientes puntos se detallan las características de los elementos que componen el subsistema de usuario.

- Como ya se ha mencionado la MS es la estación móvil o equipo mediante el cual el usuario se conecta a la red GSM. Existe una clasificación según la potencia transmitida, en la que los números más altos corresponden a menores potencias. El equipo móvil posee un número identificativo, el IMEI (“International Mobile Equipment Identity” o Identidad Internacional del Equipo Móvil). La red GSM guarda en la base de datos EIR todos los IMEI de las MS de los abonados. En el EIR existen hasta tres listas de equipos: la lista blanca de equipos válidos, la lista negra de equipos robados y la lista gris, esta lista es opcional e indica las estaciones obsoletas o cuyo funcionamiento no es correcto. La red antes de establecer la llamada comprueba que el IMEI pertenece a un móvil que no esté en la lista negra. Las listas anteriores se intercambian entre operadores. En el apartado 2.4. y en el 2.7.1. se explicará con detalle qué es la operación de registro de un usuario en la red. La MS debe enviar el IMEI a la red cada vez que se registra en la red, también se puede solicitar periódicamente.
- El MSISDN (“Mobile Station International ISDN” o Número RDSI Internacional de la Estación Móvil) es el número de teléfono tradicional del tipo RDSI que posee el usuario para llamar y ser llamado. Está formado por tres códigos o números: el “Country Code” (CC, código del País, 3 cifras), el “National Destination Code” (NDC, Código de Nacional de Destino, 2-3 cifras) y el “Subscriber Number” (SN, Número de Suscriptor, hasta 10 cifras) (ver Figura 2.3. Estructura del número MSISDN.). Un único usuario puede tener varios números de teléfono para distintos servicios (voz, datos, etc.).
- El usuario está identificado por la SIM (“Subscriber Identity Module” o Módulo de Identidad de Usuario). La SIM es una tarjeta inteligente (“Smart-card”) que contiene un procesador y una memoria. El procesador es necesario ya que la SIM realiza tareas de cifrado requeridas para autenticación y encriptado (desencriptado) del tráfico transmitido (recibido). La memoria sirve para guardar al número que identifica al usuario, el IMSI (“International Mobile Subscriber Identity” o Identidad Internacional del Suscriptor Móvil). Un usuario debe poseer una SIM con un IMSI correcto en un equipo con un IMEI correcto. Hay que tener en cuenta que, aunque tienen un formato similar tal como se aprecia en la Figura 2.4, el IMSI no es el MSISDN. El IMSI posee la siguiente estructura:
 - o MCC: “Mobile Country Code” (3 cifras)
 - o MNC: “Mobile Network Code” (2 cifras)
 - o MSIN: “Mobile Subscriber Identification Number” (hasta 10 cifras).

El IMSI es secreto mientras que el MSISDN es público. Por esta razón, el IMSI se intenta transmitir lo menos posible vía radio. En general solo se transmite por líneas

fijas, más seguras. Para evitar transmitir el IMSI y a la vez identificar a un móvil llamado o que desea llamar, se emplea un número llamado TMSI (“Temporary Mobile Subscriber Identity” o Identidad Temporal del Suscriptor Móvil). Cuando se asigna el TMSI a la estación móvil, ésta lo guarda en la SIM. Si el TMSI de la SIM no concuerda con el TMSI de la red GSM se puede solicitar la transmisión del IMSI, siendo esta una de las pocas ocasiones en la que esto ocurre. El TMSI solo tiene un significado local, en el área de localización (LA) donde se ubique en ese momento el móvil. Cada usuario debe conocer en qué Área de Localización se encuentra. Este dato es el número LAI (“Location Area Identity” o Identidad del Área de Localización) y también se guarda en el SIM. El LAI consta de CC, MNC y LAC tal como se aprecia en la Figura 2.5. El LAC siempre contiene 16 dígitos.

Como el IMSI es secreto para que nadie pueda suplantar a un usuario mediante la utilización de otra tarjeta con el mismo IMSI. La SIM también contiene claves (Ki, Kc) que permiten identificar al usuario ante la red y cifrar el tráfico respectivamente. Además, también permite guardar números de teléfono (tipo RDSI) en una agenda, mensajes e información sobre tarifas.

Para que nadie pueda acceder al contenido de la SIM ni utilizar la MS donde está insertada, la SIM posee un número de acceso PIN y otro, el PUK, por si fallamos al introducir el PIN.

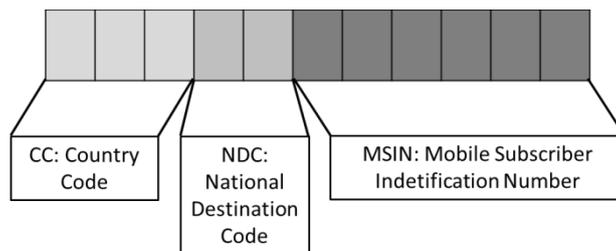


Figura 2.23. Estructura del número MSISDN.

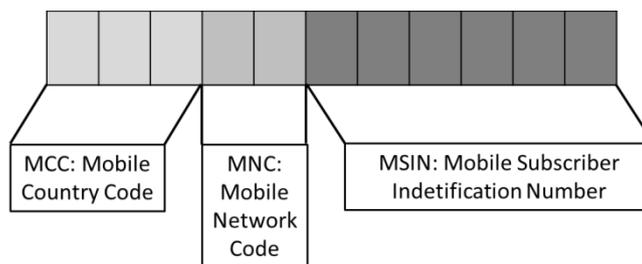


Figura 2.24. Estructura del número IMSI

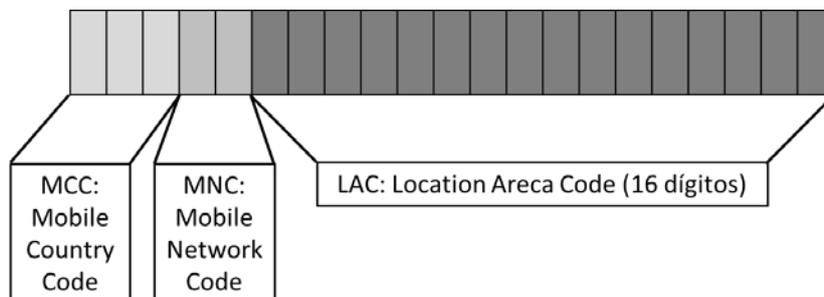


Figura 2.25. Estructura del número LAI

2.2.2 Subsistema de Estaciones Base (“Base Station Subsystem”, BSS).

El subsistema BSS está formado por las estaciones base (BTS) y los controladores de estaciones base (BSC).

- BTS: contienen las antenas que transmiten y reciben hacia y desde las estaciones móviles, es decir, forman las células en las que se divide el territorio. Proporciona entre 1 y 16 canales radio (“cell allocation”) para establecer la comunicación. La BTS se encarga de la modulación y demodulación de las señales recibidas y de la introducción de códigos de corrección de errores (tareas de capa 1 de OSI para los canales de tráfico). Apenas realiza tareas de señalización y control; con la tecnología disponible cuando se diseñó GSM no se podían integrar estas labores sin aumentar mucho el tamaño de los equipos de las BTS. La inteligencia de la red se encuentra en niveles superiores. Cada BSC se identifica mediante un número llamado “Base Transceiver Station Identity Code” (BSIC). Una BTS puede controlar una o varias células. Cada célula se identifica con un número propio llamado “Cell Identity” (CI). Junto con el número LAI y CI forma el “Global Cell Identity” que define a la célula de forma internacional.
- BSC: realiza parte del control y de las tareas de señalización. Una BSC controla varias BTS. Entre estas tareas se encuentra la de “handover”: asignación de un nuevo canal si el móvil cambia de BTS (célula) durante una llamada. Si las dos BTS, destino y origen, se encuentran controladas por la misma BSC, ésta se encarga de la labor de “handover”. Varias BSS forman un Área de Localización.

2.2.3 Subsistema de la red de Conmutación (“Network Switching Subsystem”, NSS).

Este subsistema está formado por los MSC, el GMSC, el OMC y los registros VLR, HLR, AUC y EIR. Este subsistema guarda todos los datos y está formado por los elementos necesarios para el enrutamiento de llamadas y provisión del servicio.

- MSC: como su nombre indica se encarga de la conmutación y enrutamiento de las llamadas. Es el centro neurálgico de búsqueda de un móvil cuando es llamado. Asimismo, es el centro de encaminamiento de las llamadas provenientes de un móvil. Además, debido a que es un conmutador instalado en una red de comunicaciones móviles, el MSC se debe encargar de la administración de recursos radio, por ejemplo, cuando, debido a la movilidad de una MS, se realice un proceso de “handover” entre BTSs pertenecientes a diferentes BSCs será el MSC el encargado de llevarlo a cabo. El MSC se encarga de reasignar frecuencias a las BTS de sus áreas de localización para cubrir periodos de alta demanda. También se encarga de la actualización de la posición de las MS según la indicación de las propias estaciones móviles. Esta última operación será explicada con más detalle en un punto posterior. En una red GSM existen varios MSC. Cada MSC posee su propio VLR como se observa en la Figura 2.2. Para encaminar una llamada es necesario que el VLR genere el número MSRN (“Mobile Station Roaming Number”).
- GMSC: es un MSC cuya misión es la de conectar a la red móvil con la red de telefonía fija (PSTN o RDSI). Por lo tanto lleva a cabo tareas de enrutamiento pero no realiza tareas de gestión de recursos radio como ocurre con los MSC. A

ella se conectan varios MSC. También pueden existir varios GMSCs. Las conexiones con las redes internacionales fijas o móviles se llevan a cabo a través de los Centros de Conmutación Internacionales (ISC, “International Switching Center”) del respectivo país.

- OMC: Este es un elemento diferente de los anteriores. Se encarga de las operaciones o tareas de mantenimiento, seguridad, análisis de rendimiento, gestión de fallos y alarmas y operación comercial (tarificación, recogida de estadísticas). Este elemento en ocasiones se segrega de los MSC en la división de la red y forma un subsistema propio, el Subsistema de Mantenimiento y Operación (OMSS , “Operation and Maintenance Subsystem”) en conjunción con el EIR y el AUC. El OMC está conectado a los BSC, MSC y a las bases de datos. Para cada elemento existen OMCs especializados.
- HLR: almacena la identidad y localización de todos los usuarios abonados a la red GSM. Cuando un abonado se da de alta en la red se abre una entrada permanente para ese usuario. Esta entrada solo se borra cuando el usuario se da de baja. Los números MSISDN de los abonados de la red también poseen entradas en el HLR. Cada usuario posee una serie de datos propios permanentes y de datos temporales. El HLR guarda todos los datos permanentes y los más importantes de entre los temporales. A continuación se listan los datos guardados en el HLR.
 - A) Permanentes: IMSI, MSISDN, servicios suplementarios contratados (por ejemplo restricción de llamadas, restricciones de roaming), identificación de los SMS-GMSC que tienen mensajes para el usuario, clave de autenticación (clave Ki).
 - B) Temporales, la mayoría de estos datos se modifican cuando se realiza una llamada entrante o saliente o cuando el móvil cambia de área de localización. Entre ellos el HLR guarda los siguientes: área de localización actual (LAI o LAC), el VLR actual o el MSRN actual, la clave de sesión Kc para cifrado, el número RAND/SRES que sirve para autenticar, los mensajes SMS en espera de envío y los datos de restricción de roaming.
- VLR: cada MSC posee una base de datos de este tipo. Cuando un móvil entra en una de las LA de un MSC debe comunicar este hecho a la red GSM. En ese momento se le abre una entrada en el VLR del MSC. Al contrario que en el HLR las entradas en el VLR son temporales, aparecen y desaparecen. Durante el tiempo en el que una entrada está abierta, el VLR guarda tanto datos temporales como permanentes. Los datos temporales los genera o proporciona el propio VLR. Los datos permanentes son una copia de los datos permanentes que se encuentran en el HLR. De este modo si esa información es requerida, se puede encontrar fácilmente sin tener que recurrir al HLR. Los datos más importantes que guarda el VLR son:
 - A) Permanentes: IMSI, MSISDN, servicios suplementarios contratados.
 - B) Temporales: distinguimos entre los generados por el propio VLR como el TMSI y el MSRN y los que el VLR recoge de otros elementos como el LAI (LAC), la clave de sesión Kc (cifrado) y el número RAND/SRES (autenticación).
- AUC: es el centro de autenticación y está conectado a un MSC. Posee el IMSI y la clave Ki. Esta clave es única para cada usuario y está asociada a un IMSI. Este centro se encarga de generar la clave Kc para cifrado y el número RAND/SRES para autenticación. La clave Kc y la clave Ki nunca se

transmiten vía radio. Para generar todos las claves y números cuenta con tres algoritmos de cifrado:

- A) El algoritmo A3 para autenticación.
- B) El algoritmo A5 para cifrado y descifrado.
- C) El algoritmo A8 para la generación de la clave de cifrado Kc.

2.3 Nivel físico de GSM: interfaz radio (canales físicos).

En todo sistema de comunicaciones móviles hay que especificar en primer lugar las bandas de frecuencia que ocupa. Las primeras versiones de GSM ocuparon una parte del espectro situada en torno a los 900 MHz (GSM-900): se trata de la banda de 890-915 MHz para el ascendente y la banda de 935-960 MHz para el enlace descendente. Como se observa la separación entre los dos canales de radiofrecuencia (RF) que forman el canal “full-duplex” es de 45 MHz. Las dos bandas de frecuencia están divididas en 125 canales de 200 KHz numerados desde el 0 hasta el 124. El primer canal se llama canal 0 y se usa como banda de guarda entre GSM y otros servicios o sistemas de comunicaciones móviles situados en frecuencias más bajas. En la Ecuación 2.1 se muestra la fórmula empleada para calcular la frecuencia del canal “full-duplex” en el enlace ascendente y descendente. El número n se denomina ARFCN (“Absolute Radio Frequency Number”):

$$F_{asc}(n) = 890 + 0,2n \text{ MHz} \quad 0 \leq n \leq 124$$

$$F_{desc}(n) = F_{asc}(n) + 45 \text{ MHz}$$

Ecuación 2.19

Debido al éxito de GSM la banda inicial se saturó, por lo que fue necesario habilitar nuevas bandas para dar cabida a los nuevos usuarios. En primer lugar se añadieron 10 MHz más de ancho de banda a la banda original de GSM-900. Este nuevo ancho de banda permitió la aparición de 50 nuevos canales “full-duplex” (50 canales RF en cada enlace); a esta mejora de GSM se le denominó GSM extendido o E-GSM (“Extended GSM”). Los nuevos 10 MHz se ubican en la parte inferior adyacente a la primera banda de GSM: 880-890 MHz para el enlace ascendente y 925-935 MHz para el enlace descendente. En la Ecuación 2.2 se muestra la fórmula para la banda extra de E-GSM:

$$F_{asc}(n) = 890 + 0,2(n - 1024) \text{ MHz} \quad 974 \leq n \leq 1023$$

$$F_{desc}(n) = F_{asc}(n) + 45 \text{ MHz}$$

Ecuación 2.20

El canal 0 (890.0 MHz) de la primera banda sí se utiliza en E-GSM debido a que ya no es limítrofe a ningún otro sistema. La banda de guarda en E-GSM corresponde al canal 974 (880.0 MHz).

Dos bandas más, de alta frecuencia, se habilitaron para aumentar la capacidad de las redes GSM existentes y posibilitar la entrada de nuevos operadores. Estas bandas se ubicaron en la zona del espectro de 1800-1900 MHz. La primera banda ocupa 75 MHz para el enlace ascendente, desde 1710 MHz a 1785 MHz, y otros 75 MHz para el enlace descendente, desde 1805 MHz hasta 1880 MHz. Esta banda permite un total de 375 canales “full-duplex”. La banda ubicada en 1900 MHz posee 60 MHz para el enlace ascendente (1850 MHz-1910 MHz) y otros 60 MHz para el enlace descendente (1930

MHz-1990 MHz). Esta banda permite la existencia de 300 canales “full-duplex”. Las ecuaciones para calcular las frecuencias inferiores de cada uno de los canales de 200 KHz son las siguientes:

Banda 1800 MHz (DCS-1800)

$$F_{asc}(n) = 1710 + 0,2(n - 511) \text{ MHz} \quad 511 \leq n \leq 885$$

$$F_{desc}(n) = F_{asc}(n) + 95 \text{ MHz}$$

Banda 1900 MHz (PCS-1900)

$$F_{asc}(n) = 1850 + 0,2(n - 511) \text{ MHz} \quad 511 \leq n \leq 810$$

$$F_{desc}(n) = F_{asc}(n) + 80 \text{ MHz}$$

Ecuación 2.21

En España se utilizó la banda de GSM-900, la banda del GSM extendido y parte de la banda de 1800 MHz. En la siguiente tabla se aprecian los diferentes módulos de frecuencias asignados a las compañías que obtuvieron licencias para ofrecer GSM.

Banda UN-41 Banda de 900 MHz				
Bloque	Enlace Ascendente	Enlace Descendente	Operador	Operador original
2x10 MHz	880,1-890,1 MHz	925,1-935,1 MHz	Orange	Amena
2x10 MHz	890,1-900,1 MHz	935,1-945,1 MHz	Movistar	Movistar
2x4,8MHz	900,1-904,9 MHz	945,1-949,9 MHz	Movistar	Movistar
2x10 MHz	904,9-914,9 MHz	949,9-959,9 MHz	Vodafone	Airtel

Tabla 2.5. Bandas de frecuencias correspondientes a GSM-900 y E-GSM [Registro Público de Concesiones de Telecomunicaciones]

Banda UN-140 Banda de 1800 MHz				
Bloque	Enlace Ascendente	Enlace Descendente	Operador	Operador original
2x20 MHz	1710,1-1730,1 MHz	1805,1-1825,1 MHz	Movistar	Movistar
2x20 MHz	1730,1-1750,1 MHz	1825,1-1845,1 MHz	Vodafone	Vodafone
2x5 MHz	1750,1-1755,1 MHz	1845,1-1850,1 MHz	Yoigo	Xfera
2x5 MHz	1755,1-1760,1 MHz	1850,1-1855,1 MHz	Yoigo	Xfera
2x4,8 MHz	1760,1-1764,1 MHz	1855,1-1859,9 MHz	Yoigo	Xfera
2x20 MHz	1764,9-1784,9 MHz	1859,9-1879,9 MHz	Orange	Orange

Tabla 2.6. Bandas de frecuencias correspondientes a DCS-1800 [Registro Público de Concesiones de Telecomunicaciones]

Como hemos visto en la distribución de frecuencias, existe una serie de canales para el enlace ascendente y otra serie de canales para el enlace descendente. Este hecho implica que la técnica de duplexado es de tipo FDD, es decir, duplexado en frecuencia. Queda por definir cómo se diferencian unos usuarios de otros, es decir, hay que definir la técnica de acceso al medio. En los sistemas de primera generación un usuario poseía un canal “full-dúplex” propio, por lo que la técnica de acceso al medio era de tipo FDMA. En el sistema de segunda generación GSM cambia la técnica de acceso al medio ya que un usuario se distingue del resto por el tiempo que ocupa el canal “full-dúplex”. Ahora la técnica de acceso al medio es TDMA. Cada canal RF es dividido en 8

ranuras temporales diferentes (“slots”) numerados del 0 al 7 que dan lugar a la denominada trama TDMA. En la Figura 2.6 se muestra la estructura temporal de la trama TDMA, cada ranura posee una duración de $577 \mu\text{s}$ por lo que la trama dura 4.615 ms .

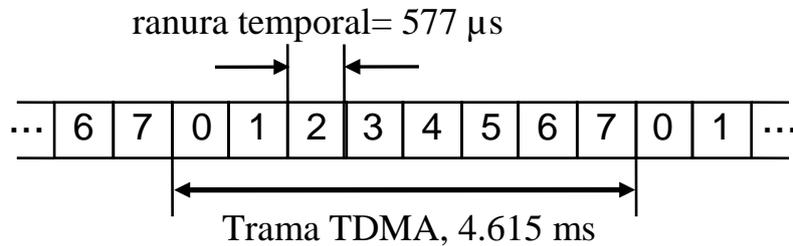


Figura 2.26. Trama TDMA de GSM

Cada una de las ranuras se asigna a un usuario. Por ejemplo, si se asigna el “slot” 1 a un usuario solo podrá transmitir y recibir tráfico durante ese “slot” particular. Es una transmisión a ráfagas, por eso a la señal transmitida durante una ranura se le denomina ráfaga (“burst”). El resto del tiempo tiene prohibido cualquier transmisión ya que colisionaría con otro usuario. A lo largo de este periodo no permanece totalmente desocupado ya que realiza otras tareas como la de explorar en busca de mejores estaciones base. Un usuario podría en principio transmitir y recibir al mismo tiempo durante la ranura asignada ya que existe un canal RF para cada enlace de la comunicación. Sin embargo, para evitar la utilización de un duplexor en el equipo móvil se optó separar la transmisión y la recepción una cantidad igual a 3 ranuras temporales. De este modo, tal como se observa en la Figura 2.7, cuando la BTS transmite la MS solo recibe y viceversa. El usuario que toma la ranura 0 recibe a través del canal RF f_1 y espera 3 ranuras para realizar su transmisión a través del canal RF f_2 .

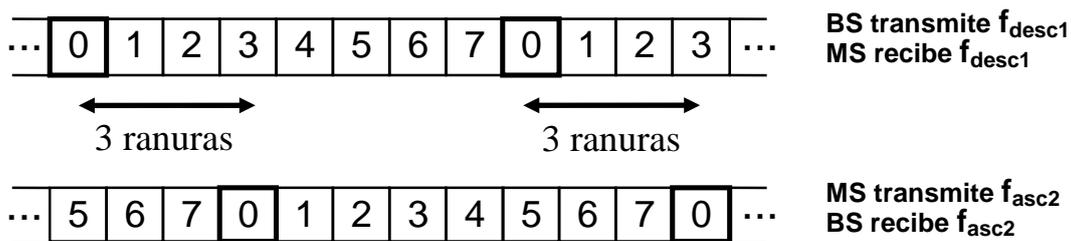


Figura 2.27. Desfase de 3 ranuras entre el enlace ascendente y el descendente

Como hemos mencionado la MS carece de duplexor. No obstante, la BTS sí necesita este tipo de dispositivos ya que ésta sí debe transmitir y recibir durante una misma ranura temporal en los dos canales RF que componen el canal “full-duplex”. Como se aprecia en la Figura 2.7, la ranura 3 del enlace descendente coincide con la ranura 0 del enlace ascendente. Por lo tanto, la BTS puede transmitir tráfico a un usuario en la ranura 3 de la trama descendente y recibir tráfico desde otro usuario en la ranura 0 de la trama ascendente. En la Figura 2.8, se muestra un ejemplo de este caso.

En la ranura 3, la BTS transmite tráfico hacia el usuario situado más arriba mientras que en ese mismo periodo de tiempo la BTS recibe tráfico desde el usuario que se ubica en la parte inferior. Como las dos comunicaciones utilizan los dos canales RF distintos de la pareja que forma el canal “full-duplex”, la BTS necesita separar las comunicaciones en frecuencia.

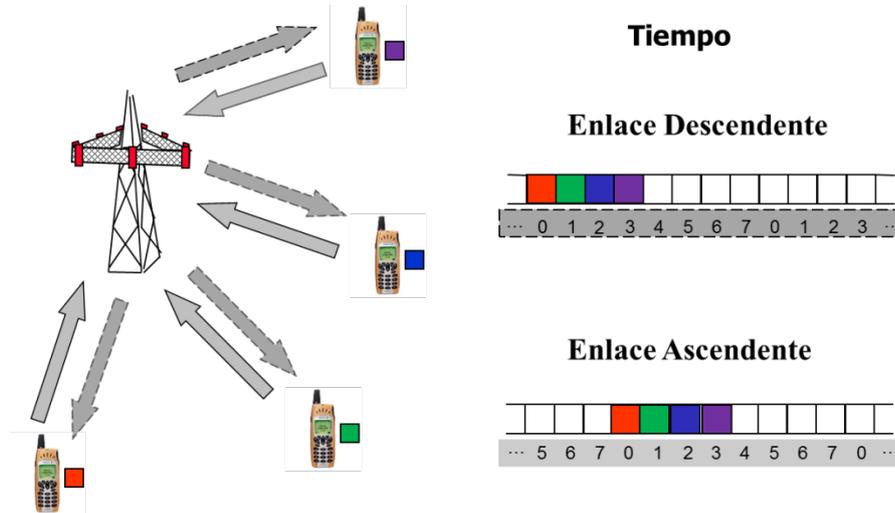


Figura 2.28. Ejemplo de transmisión y recepción en la trama TDMA

En la Figura 2.9 se muestran de forma completa cómo se utilizan los recursos disponibles (tiempo y frecuencia) en un sistema TDMA/FDD como GSM. Hay que remarcar que todos los canales RF en el ancho de banda empleado contienen una trama TDMA. A la combinación de una frecuencia de transmisión y una ranura temporal se le denomina canal físico.

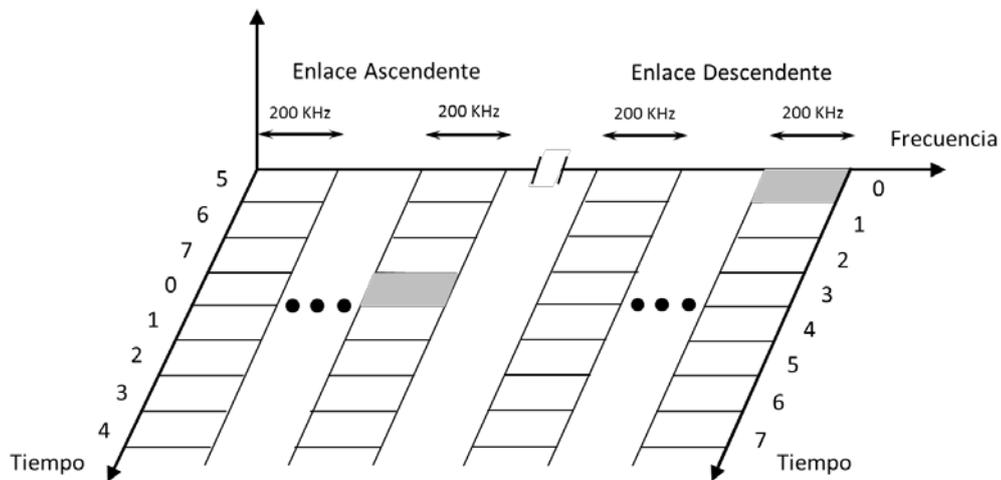


Figura 2.29. TDMA/FDD en el sistema GSM. En gris se muestra la transmisión y recepción de un usuario durante una ranura.

La utilización de la técnica TDMA permite de forma natural la omisión de transmisión cuando el usuario de GSM no habla durante una conversación. Este modo que se denomina transmisión discontinua (DTX o “discontinuous transmission”) es más difícil de implantar en otras técnicas de acceso al medio como FDMA. En TDMA simplemente hay que dejar de transmitir en la ranura (ráfaga) asignada cuando se detecta un silencio. La razón principal para emplear este modo es la de ahorrar energía de la batería. Para evitar la transmisión durante los periodos de silencio la estación

móvil de GSM está dotada de un detector de actividad de voz (VAD o “voice activity detection”); este detector discrimina entre la voz que se desea transmitir con ruido de fondo sobre el que prevalece y ruido en ausencia de voz. Si el VAD falla en la detección de la voz entonces se perderán instantes válidos de la conversación, si por el contrario el VAD detecta como voz periodos de ruido la efectividad del DTX se reducirá. Como se aprecia, el rendimiento del DTX depende en buena medida del VAD.

En el extremo que habla, el ruido de fondo que se escuchaba junto con la voz desaparece cada vez que, debido al DTX, la transmisión se apaga en el extremo que escucha (el que no habla). Cuando se diseñó GSM se observó que esta conmutación entre voz con ruido, ruido de fondo y ausencias de ruido era muy molesta. Además, un tiempo suficiente sin ruido de fondo podía llevar a entender al extremo que habla que el otro extremo no estaba escuchando. Para corregir este efecto se transmite una señal de ruido sintético denominada ruido de confort (“comfort noise”) cada vez que el transmisor se apaga. Para que funcione el ruido de confort debe estar bien adaptado, ser similar, al ruido de fondo del transmisor que se desconecta. De este modo, no se percibe el cambio debido a la transmisión discontinua ya que siempre hay un ruido de fondo: el real cuando hay voz y el ficticio cuando se deja de hablar y por tanto se apaga la transmisión. Los periodos de ausencia total de sonido son ahora rellenados por el ruido sintético [GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G-UMTS].

La trama TDMA aporta ventajas como la DTX pero requiere una adecuada sincronización entre los dos extremos de la comunicación. Esta sincronización consume una cierta cantidad de bits y necesita varias tareas de procesado digital. Sin la sincronización entre las estaciones móviles de la célula y la estación base las transmisiones de las estaciones base interferirían unas con otras. La trama TDMA en sentido ascendente es generada por las MS a partir de la trama TDMA en sentido descendente. Por lo tanto, es la BTS la que ordena y genera toda la estructura temporal a la que deben adaptarse la MS. Hay que tener en cuenta que las MS se encuentran a diferentes distancias de la BTS y por tanto poseen distintos retardos. Por ello la BTS debe ajustar la sincronización con cada una de las MS de forma individual. Este proceso de adaptación temporal toma el nombre de alineación de trama adaptativa (“adaptive frame alignment”). Existen varios métodos para sincronizar dos extremos, en GSM se creó por una técnica que emplea un parámetro denominado avance temporal (TA o “timing advance”). El TA codifica el tiempo que la MS debe adelantar su transmisión para que no interfiera en la ráfaga adyacente. Este adelanto es igual al tiempo de ida y vuelta de la transmisión desde la MS hasta la BTS. Es necesario codificar el tiempo de ida y vuelta por la forma en la que se produce el intercambio de tráfico entre la BTS y la MS en GSM. Si se observa la Figura 2.7 la BTS transmite al MS y éste espera tres ranuras, a partir de esa recepción, para producir su transmisión hacia la BTS. En la transmisión del enlace descendente aparece el retardo debido al tiempo de ida. Así, la decisión de transmitir en el enlace ascendente se produce con un retardo igual al tiempo de ida. Pero además la transmisión desde la MS tarda un tiempo en llegar a la BTS: este es el tiempo de vuelta. Cuando la señal llega a la BTS acumula los dos retardos, el de ida y el de vuelta. Por ello, la MS debe adelantar su transmisión un tiempo igual a esos dos retardos para no interferir en la siguiente ranura en la que llega la ráfaga de otro usuario. En GSM no hay modo de calcular por separado los dos retardos, de forma que se suponen iguales. Esta es una suposición válida ya que entre una recepción y una transmisión tan solo transcurren 1.73 ms. No obstante, el avance temporal debe corregirse cada cierto tiempo ya que el móvil se desplaza dentro de la célula y por tanto cambiará su retardo.

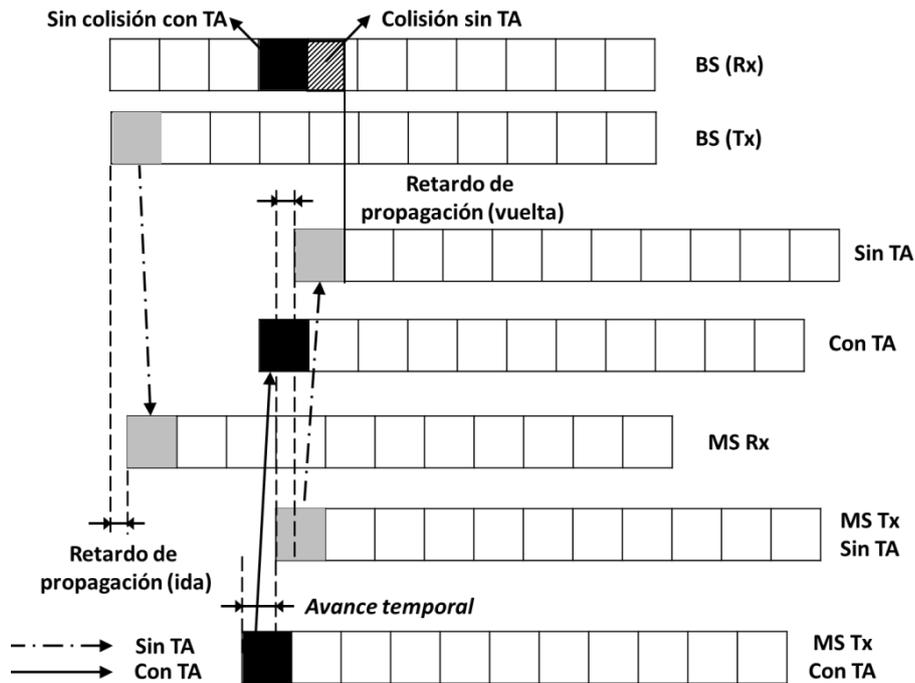


Figura 2.30. Funcionamiento del avance temporal [GSM, GPRS and EDGE Performance - Evolution Towards 3G-UMTS].

En la Figura 2.10 se muestra un ejemplo de comunicación entre una MS y la BTS con TA y sin TA. [GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution Towards 3G-UMTS]. La MS recibe desde la BTS y se dispone a transmitir tres ranuras después. En la operación sin TA en la Figura 2.10 se muestra que la MS no adelanta su transmisión. Por esta razón, al transmitir hacia la BTS su transmisión provoca una colisión con la ranura adyacente (parte rayada en la trama BTS (Rx)). Esta colisión posee una duración igual al tiempo de ida más el tiempo de vuelta. Con TA, la MS, tras la recepción de una ráfaga desde la BTS, sabe que tiene que adelantar su transmisión en una cantidad igual al TA. De esta forma, la ráfaga que transmite la MS llega dentro de la trama temporal de recepción que genera la BTS, como se observa en la parte superior de la Figura 2.10. Obviamente, antes de transmitir una ráfaga de tráfico la MS debe conocer la cantidad de avance temporal requerido. Antes de cualquier transmisión de tráfico se desarrolla una fase inicial durante la que, entre otras labores, la BTS calcula el TA adecuado para la MS en cuestión. En esta fase, la MS envía una ráfaga especial distinta de la ráfaga de tráfico. La recepción de dicha ráfaga en la BTS permite a ésta calcular el TA. Posteriormente, se explicará con más detalle qué pasos se siguen en esta fase inicial.

Aunque el TA es un método apropiado de sincronización, no es un método perfecto ya que siempre existe un cierto error en el cálculo del TA. Por lo tanto, incluso con el uso del TA puede existir un cierto solapamiento entre ráfagas adyacentes si no se aplicasen medidas adicionales de protección. Estas medidas son básicamente dos: los periodos de guarda y la atenuación de la potencia transmitida. Los periodos de guarda se insertan en el inicio y en el final de cada ráfaga. En estos periodos de guarda no se transmite información. De esta forma, en GSM, incluso con TA, se permiten ciertos desplazamientos temporales en las ráfagas ya que hasta cierto límite solo producirán un solapamiento entre dos periodos de guarda sin que los datos valiosos resulten afectados. El otro mecanismo de protección consiste en la atenuación de la potencia transmitida fuera del periodo que ocupa la transmisión de datos útiles. Este periodo abarca los periodos de guarda. Como se ve en la Figura 2.11 la diferencia de potencia entre la parte útil y los periodos de guarda es de 70 dB.

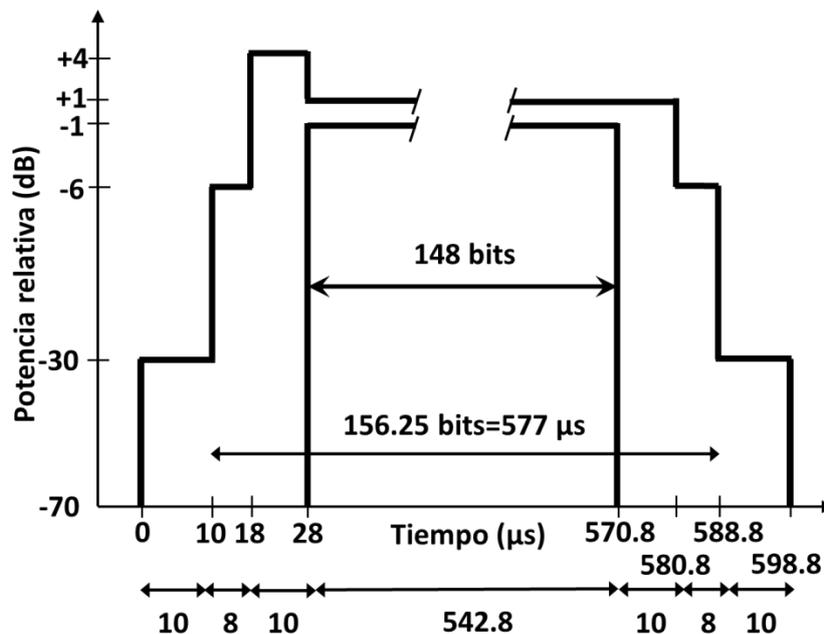


Figura 2.31. Plantilla de potencia para la ráfaga de tráfico [GSM, CDMAOne and 3G, Capítulo 2].

2.4 Canales lógicos.

Como hemos visto, un canal físico siempre es una combinación de una frecuencia de transmisión con un ancho de banda de 200 KHz y una ranura temporal de 577 μ s. Ahora bien, la información que transporta un canal físico es muy variada. En unas ocasiones transportará información de tráfico del usuario y en otros casos transportará información de señalización y mantenimiento de la red. El modo en el que la información se estructura da lugar a una serie de canales lógicos [Comunicaciones Móviles 01]. Como veremos más adelante, existen ciertas limitaciones sobre qué canales físicos puede tomar un canal lógico.

Antes de explicar cada uno de los canales lógicos se van a mostrar las principales tareas de mantenimiento y señalización que estos llevan a cabo. A estas tareas se les denomina protocolos de la red GSM. Los protocolos más importantes son:

- Sincronización con la red. Cuando la MS se enciende debe detectar desde qué estaciones base está recibiendo señal para engancharse a aquella de la reciba más potencia. Aunque la MS se encuentre en reposo (“stand-by”) debe estar continuamente leyendo datos de la red GSM. Estos datos le permitirán, entre otras cosas, darse cuenta de la recepción de una llamada. El proceso de sincronización a la red es totalmente pasivo. Hay tres fases en la sincronización a la red: sintonización de la frecuencia, sincronización temporal y lectura de la información de la red.
- Actualización de la localización o de los registros de localización. La red siempre debe conocer en qué ubicación se encuentra un móvil para poder enviarle comunicaciones por ejemplo una llamada. En GSM el área de localización (LA) es el elemento estructural en el que la red busca a un móvil. En GSM, es la propia MS la que informa a la red de que ha cambiado de LA. Existen tres situaciones en las que la MS actualiza sus registros de localización:

- Al encenderse. Después de sincronizarse con la red, la MS ya tiene conocimiento del LA en el que se encuentra y entonces procede a comunicar que está activado y cual es su LA actual.
- Al moverse a un nuevo área de localización estando en reposo. El móvil que se encuentra enganchado a una BTS, estudia la potencia que detecta de las células vecinas. Si recibe más potencia desde otra célula se enganchará a esa célula mediante un proceso de sincronización. Si la nueva célula pertenece a otro LA, deberá comunicar este cambio a la red.
- Forzado por la red. Por ejemplo en ciertos “hand-overs”. Durante una llamada en curso la MS también puede detectar el cambio en el área de localización.
- Establecimiento de llamadas. Existen dos protocolos diferentes: el de llamada o comunicación de datos originada en la MS y el de llamada (o datos) destinada a la MS.

En el apartado 2.7 se explicarán con detalle las tareas llevadas a cabo en estos protocolos, su orden y los canales lógicos involucrados en cada protocolo. Según el tipo de canal se empleará en uno u otro protocolo. El tipo de canal depende en primer lugar de qué información transporta. Los canales lógicos que transportan tráfico de voz o datos de un usuario se llaman canales lógicos de tráfico. Los canales lógicos que transportan información de señalización y de mantenimiento se denominan canales lógicos de control.

Los canales de tráfico son:

- TCH/FS: “Traffic Channel full-rate speech”. Este canal transmite voz codificada con una tasa de transmisión neta de 13 kbps. La tasa bruta es de 22.8 Kbps.
- TCH/HS: “Traffic Channel half-rate speech”. Este canal transmite voz codificada con una tasa de transmisión neta de 6.5 Kbps. La tasa bruta es de 11.4 Kbps. Este canal permite prácticamente doblar el número de usuarios del sistema.
- TCH/F9.6/F4.8/F2.4: son los canales “full-rate” para transmisión de datos. Los números se refieren a las tasas de transmisión netas (9.6 Kbps, 4.8 Kbps, 2.4 Kbps). Las tasas brutas son: 12, 6 y 3.6 Kbps. Cada canal emplea un tipo diferente de codificación de canal.
- TCH/H4.8/H2.4: son los canales “half-rate” para transmisión de datos. Transmiten la misma información con la mitad de tasa de transmisión que los canales de datos “full-rate”. Para lograrlo emplean otro tipo de codificación, por ejemplo, contienen menos redundancia.

Los canales de control presentan una clasificación más compleja debido a la variedad de tareas que llevan a cabo. Por ello, estos canales se agrupan en:

- Canales de Difusión (BCH o “Broadcast Channels”).
- Canales de Control Común (CCCH o “Common Control Channels”).
- Canales Dedicados y Asociados de Control (DCCH o “Dedicated Control Channel” y ACCH o “Associated Control Channels”).

Los canales de difusión son unidireccionales en el sentido descendente, es decir, siempre son emitidos desde la BTS hacia todos las MS de la célula. Estos canales son empleados por la MS para sincronizarse a la red. Existe un canal físico particular llamado canal base que siempre va a estar ocupado por estos canales lógicos. El canal físico base está constituido por la ranura 0 de la frecuencia portadora más baja de entre todas las disponibles en la célula. Existen tres tipos de canales BCH:

- 1) FCCH: “Frequency Correction Channel”. Este canal permite a la MS detectar la frecuencia portadora de los canales de difusión. Para ello, la ráfaga empleada por este canal posee un pico de potencia en una frecuencia situada 67.7 KHz por encima de la frecuencia portadora del canal. Cuando la MS detecta el pico de potencia puede sintonizarse al canal físico donde se encuentran todos los canales de difusión.
- 2) SCH: “Synchronization Channel”. Envía información temporal sobre la trama. La trama TDMA de ocho ranuras se inserta en una estructura de orden superior denominada multitrama. A su vez, la multitrama se inserta en la supertrama. Finalmente, las supertramas forman la hipertrama. Para que la MS localice la trama temporal de señalización, de la que está obteniendo datos, el SCH envía el “Reduced Frame Number” (RFN). De este número se obtiene el contador de supertrama en la hipertrama (T1), el contador de la multitrama de señalización en la supertrama (T2) y el contador de multitrama de tráfico en la supertrama (T3). También se envían una serie de contadores para posibilitar la sincronización a nivel de bit. Finalmente, también envía algún dato de red como el BSIC.
- 3) BCCH: “Broadcast Control Channel”. Informa a los móviles sobre ciertos parámetros específicos de la red. Entre los datos e información que transmite encontramos:
 - a. LAC: “Location Area Code”: este dato es muy importante ya que como veremos posteriormente la MS debe detectar si ha cambiado de LA debido al movimiento de la MS. Cuando la MS está en reposo, no realiza ninguna transmisión ni recepción de tráfico, puede detectar este hecho leyendo el BCCH.
 - b. MNC: “Mobile Network Code”.
 - c. CI: “Cell Identity”.
 - d. BSIC: “Base Station Identity Code”.
 - e. Configuración radio de la propia célula y de las vecinas: con esta información la MS puede sintonizar los canales base de las células limítrofes. Si recibe más potencia desde el canal base de otra célula, se enganchará a esa nueva célula, es decir, pasará a leer los datos e información que transmite esa nueva célula.
 - f. Información adicional de sincronización.
 - g. Máxima potencia admisible: dentro de la célula existe un límite de potencia en las transmisiones desde las MS. La MS debe respetar este límite ya que de superarlo podría provocar interferencias en las ranuras adyacentes que ocupen otros usuarios.

Los canales de control común son tres canales unidireccionales, dos en el sentido descendente y uno en el ascendente. Este tipo de canales se emplean para iniciar un enlace dedicado entre la MS y la BTS. Los enlaces dedicados sirven para el establecimiento de llamadas y para el intercambio de cualquier tipo de información entre la MS y la red (actualización de la localización de la MS). Al igual que los canales de difusión los canales CCCH siempre aparecen al menos en el canal base. Los canales CCCH son:

- 1) RACH: “Random (o Reverse) Access Channel”. Se envía en el enlace ascendente. Es utilizado por la MS para solicitar un enlace dedicado a la red. El tipo de acceso a la red para esta solicitud es de tipo Aloha, por lo que pueden existir colisiones con las solicitudes de otros usuarios.

- 2) PCH: "Paging Channel". Se envía en el enlace descendente. Es usado por la estación base para avisar a un móvil en particular antes de establecer un enlace dedicado para una llamada entrante hacia la MS. El móvil contesta a este canal con un RACH. También sirve para enviar mensajes a todos los móviles.
- 3) AGCH: "Access Grant Channel". Se envía en el enlace descendente. Mediante este canal la estación base contesta a la recepción de un RACH proveniente de un móvil. Este canal contiene la primera corrección temporal (avance temporal o TA) que recibe el móvil. En GSM el TA se codifica en 6 bits que indican el número de bits que se tiene que adelantar el móvil en su transmisión. Esto posibilita 64 valores de TA, desde 0 hasta 63. El valor de 0 significa que la MS no debe adelantar su transmisión. Como en GSM el periodo de bit es igual a $3,69\mu\text{s}$, el máximo valor de TA significa que la MS debe adelantar su transmisión un tiempo igual a $63 \times 3,69\mu\text{s} = 232,47\mu\text{s}$. Como el TA indica el retardo de ida y de vuelta, el retardo máximo entre la BTS y la MS debe ser igual a la mitad del valor $232,47\mu\text{s}$, es decir, $116,34 \mu\text{s}$. Este retardo máximo limita el radio de la célula a un valor de $116,34 \mu\text{s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 35 \text{ km}$. Como se aprecia, el tamaño de la célula en GSM está fijado por el TA.

Los canales de control dedicado y asociado son bidireccionales. Como ya se ha comentado estos canales se encargan del intercambio de información de control entre la BTS y la MS. La información de control se debe intercambiar antes y durante la realización de una llamada o comunicación de datos. La información de control también se intercambia cuando la MS actualiza su localización. El canal dedicado de control es un canal independiente mientras que los canales asociados se llaman así ya que están asociados a otro canal. El canal dedicado se explica a continuación:

- 1) SDCCH: "Stand Alone Control Channel". Es el canal más importante para el intercambio de información de control. Entre sus tareas se incluyen:
 - a. Solicitud de actualización de la localización.
 - b. Solicitud y respuesta de autenticación.
 - c. Solicitud y respuesta de cifrado de datos de identificación (TMSI) y de cifrado de tráfico.
 - d. Envío desde la BTS del TMSI.
 - e. Aviso sobre el enrutamiento de una llamada saliente desde la MS.
 - f. Asignación de un canal de tráfico.
 - g. Confirmación de las acciones anteriores.

Los canales de control asociado son dos:

- 1) SACCH: "Slow Associated Control Channel". Siempre aparecen asociados a un canal dedicado SDCCH o a un canal de tráfico TCH. Portan poca información pero de carácter muy importante. En el enlace descendente la BTS envía:
 - a. El avance temporal (TA) para que la MS pueda corregir el retardo de propagación durante una llamada en curso o durante el envío de señalización.
 - b. La BTS se mantiene identificada mediante el envío del CI, del BSIC y del LAC. Es el mismo tipo de información de identificación que se transmite a través del BCCH. Gracias a la recepción del LAC el móvil puede detectar el cambio de área de localización.
 - c. La corrección del nivel de potencia. Si la MS se acerca a la estación base, durante un intercambio de tráfico, deberá disminuir su potencia de transmisión para evitar la interferencia en las ranuras adyacentes. Si por el contrario se aleja deberá aumentar su potencia.

En el enlace ascendente la MS envía:

- a. Información a la BTS sobre las medias de potencia de las células vecinas. Así ayuda a tomar decisiones sobre procesos de “handover”. A este proceso se la llama “Mobile Assisted Hand-Over (MAHO).
 - b. Informa sobre su corrección de tiempo actual, es decir, sobre el TA.
 - c. Informa sobre su nivel de potencia.
 - d. Transmite el “Silence Descriptor” (SID). Se utiliza en el otro extremo de la comunicación para simular el ruido de confort (“comfort noise”).
- 2) FACCH: “Fast Associated Control Channel”. Contiene la misma información que el SACCH. También están asociados al canal dedicado y a los canales de tráfico. La diferencia con los anteriores radica en que los FACCH se emplean en procesos de urgencia como los “handovers” inmediatos. En ocasiones, cuando se debe intercambiar mucha información de control, roban total o parcialmente los canales de tráfico. Cuando esto ocurre algunos o todos los canales de tráfico durante un cierto periodo se convierten en FACCH.

2.5 Tipos de ráfagas.

La información que transportan los canales lógicos requiere un formato determinado para que pueda ser decodificada en el extremo receptor. Esta necesidad da lugar a diferentes tipos de ráfagas. Existen canales lógicos que poseen su propia ráfaga especial. Las ráfagas de GSM son:

- Ráfaga normal (NB o “normal burst”). Es la ráfaga más común en GSM ya que es empleada por los canales de tráfico (TCH), los canales de control dedicado y asociado (DCCH, SACCH y FACCH), el canal de difusión BCCH y los canales de control común PACH, AGCH. En la Figura 2.12 se muestran los campos que componen esta ráfaga.

Esta ráfaga empieza y termina con una secuencia fija de 3 bits (“tail bits”) cuyo valor es (000). Estas secuencias permiten al decodificador identificar la zona de datos útiles. Después de los bits de cola del fin de la ráfaga hay una banda de guarda de 8.25 bits en la que comienza el descenso de potencia mostrado en la Figura 2.11.

Los bits S o bits de “flag” indican al decodificador si los dos bloques de 57 bits cada uno de datos codificados corresponden a bits de datos de usuario, o a bits de señalización. La secuencia de entrenamiento es un grupo de bits conocido por la BTS y la MS y sirve para realizar tareas de ecualización del canal. Mediante la ecualización se compensan y revierten los efectos producidos en la señal transmitida por el efecto multicamino. La duración de la ráfaga es de 546,12 μ s o 148 bits que se transmiten en la zona de la ranura temporal en la que no existe atenuación, como se ve en la Figura 2.11.

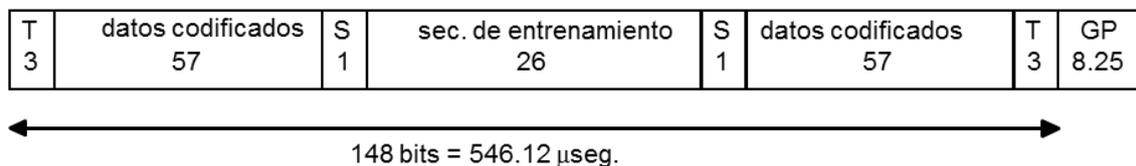


Figura 2.32. Estructura de la ráfaga normal.

La razón por la que se transmiten dos bloques de 57 bits en cada ráfaga de tráfico se debe al modo en el que se digitaliza y codifica la voz en GSM. Los pasos que se siguen en esta codificación se muestran en la Figura 2.13. El usuario genera tráfico de voz o de datos. Si el tráfico es de voz primero se digitaliza en el codificador de voz y luego atraviesa una etapa de codificación de canal. En este bloque se añaden bits que permiten la detección y corrección de errores. Si los datos de usuario no son de voz como ya

están digitalizados pasan directamente al codificador de canal. Los bits resultantes de la codificación de los datos deben someterse a una operación de entrelazado de bits. El entrelazado permite que los desvanecimientos en el canal no afecten a muchos bits consecutivos.

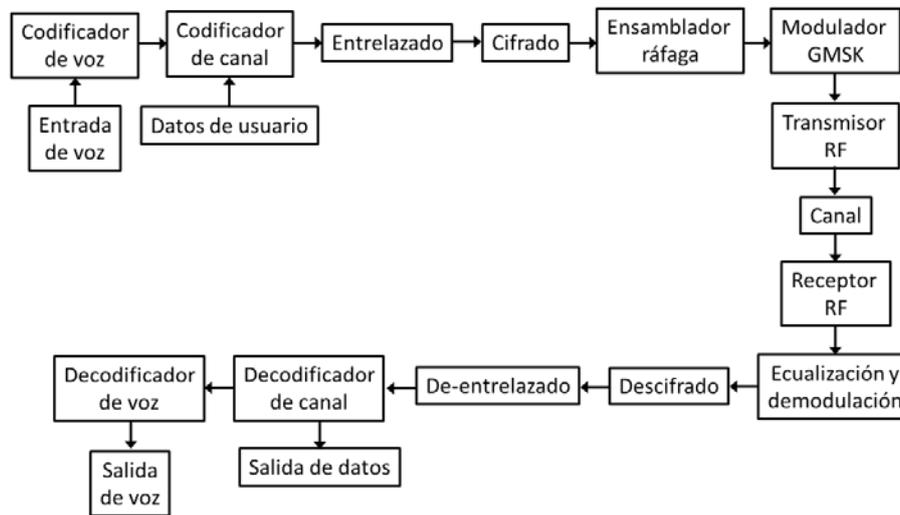


Figura 2.33. Diagrama de bloques del transmisor y del receptor en GSM.

A continuación, en la Figura 2.14, se exhiben las operaciones realizadas en cada uno de los tres primeros bloques del transmisor. La voz es digitalizada en GSM mediante un codificador paramétrico. Este tipo de codificadores utilizan filtros que imitan al aparato fonador de la persona que está hablando. El codificador consta de un bloque de excitación que simula el comportamiento de los pulmones, un predictor a largo plazo que simula a las cuerdas vocales y un predictor a corto que simula el tracto vocal. Cada bloque posee unos parámetros que son ajustados para que la voz generada sea lo más parecida posible a la voz original. Si las dos voces no se parecen lo suficiente se recalculan los parámetros hasta tener éxito. Este modo de digitalizar la voz es muy eficiente ya que solo emplea 13 Kbps, 260 bits cada 20 ms, como se observa en la Figura 2.14. Los bits fruto de la codificación paramétrica se distribuyen en diferentes ramas. A la mayor parte de los bits se les aplica un código convolucional cíclico que posibilitará en el receptor la detección y corrección de errores. Finalmente, los bits se agrupan formando una secuencia de 456 bits. Estos 456 bits se transmiten cada 20 ms, es decir, la tasa bruta de transmisión es de 22.8 Kbps que es la tasa del canal lógico de tráfico “full rate” TCH/FS. Como la duración de la trama de GSM es de 4.615 ms, en 20ms da tiempo a transmitir 4 ráfagas, por lo que en cada ráfaga se pueden transmitir $456/4=114$ bits, es decir, dos bloques de 57 bits.

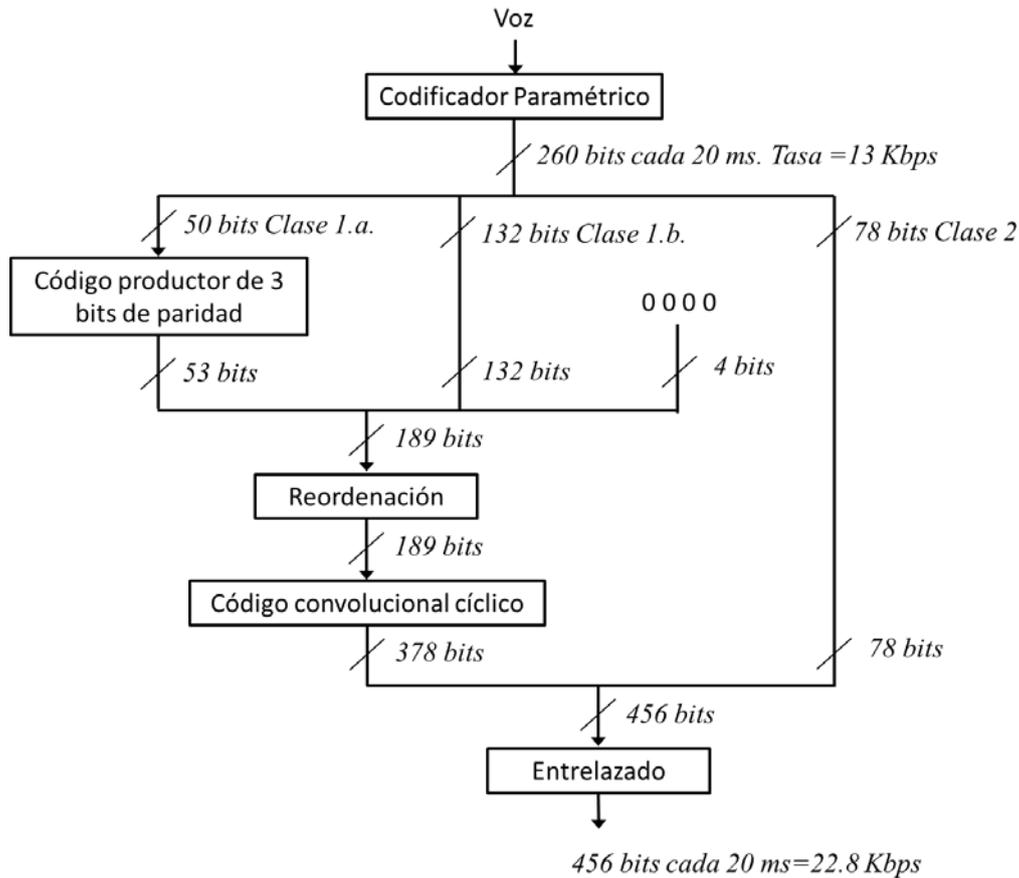


Figura 2.34. Codificación de canal y entrelazado en GSM.

El último elemento de la Figura 2.14 realiza la tarea de entrelazado. Como se aprecia, el número de bits a la entrada del entrelazado es el mismo que a la salida. La misión del entrelazado es la de reorganizar los bits resultantes de la codificación de canal de modo que los 456 bits de cada grupo no se transmitan consecutivamente. Obviamente, existe un orden preestablecido en la reordenación de los bits conocido por el transmisor y el receptor, de este modo el receptor puede recomponer los datos transmitidos. En la Figura 2.15 se muestra la reorganización que se lleva a cabo en la operación de entrelazado. Cada bloque de 456 bits se separa en 8 palabras código de 57 bits. Cada una de estas palabras de 57 bits contiene bits que no son consecutivos, por lo que en cada uno de estos grupos existe una primera reordenación. Como ya se ha explicado, una ráfaga contiene dos bloques de 57 bits. Sin embargo, como se observa en la Figura 2.15, cada ráfaga contiene dos bloques de 57 bits provenientes de bloques de 456 bits diferentes. Los bits pares de una ráfaga contienen bits procedentes de un bloque de 456 bits y los bits impares de esa misma ráfaga los de otro bloque de 456 bits. Esta organización de bloques da lugar a un entrelazado diagonal; se denomina de este modo ya que las 4 primeras palabras código de 57 bits de un bloque n-ésimo se encuentran en una posición diagonal respecto a las 4 últimas palabras de ese mismo bloque n-ésimo [GSM Switching, Services and Protocols, Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II].

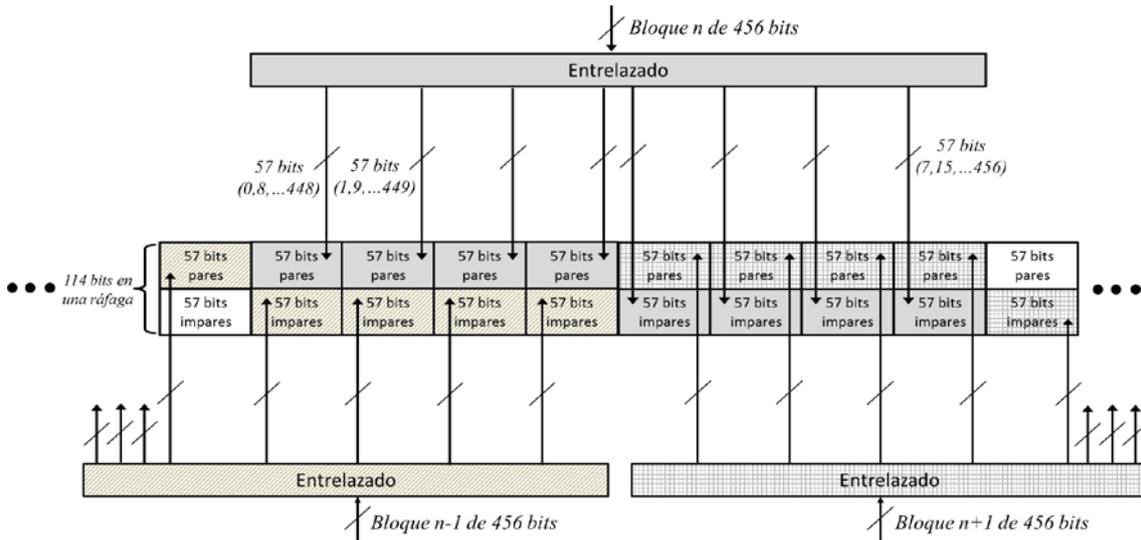


Figura 2.35. Operación de entrelazado.

Por último, existe un mapeo especial entre los 57 bits de cada palabra y el bloque de 57 bits de la ráfaga. Sin ahondar en el procedimiento, simplemente se muestra en la Figura 2.16 como ejemplo el mapeo de la primera palabra código de 57 bits en el primer campo de 57 bits del conjunto de 4 ráfagas consecutivas [GSM Switching, Services and Protocols].

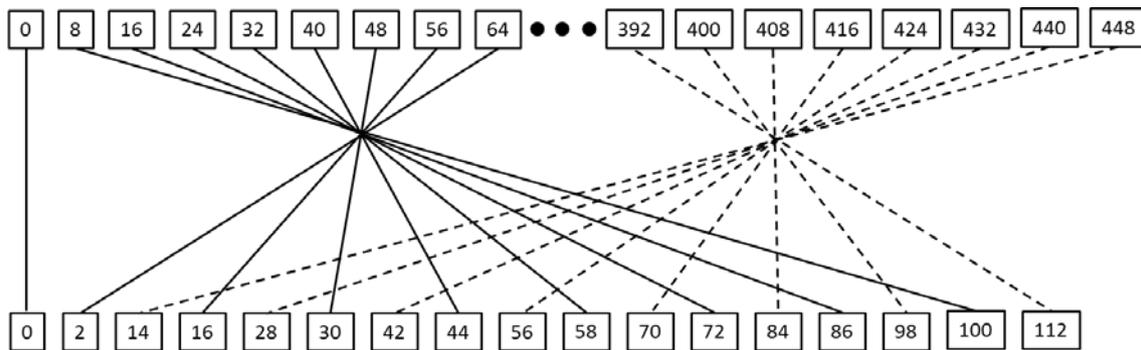


Figura 2.36. Mapeo de la primera palabra código de 57 bits.

La razón para aplicar la operación de entrelazado a los bits codificados radica en la existencia de profundos desvanecimientos de la señal en el canal radio. Estos desvanecimientos atenúan la señal transmitida hasta en 40 dB durante periodos que, aunque puedan parecer pequeños, implicarían la aparición de muchos bits erróneos en una misma ráfaga. Las técnicas de codificación del canal, como la basada en códigos de convolución, son eficientes con errores aislados: solo pueden corregir pocos errores en muchas palabras código pero no muchos errores en una misma palabra código. Por tanto, un desvanecimiento produciría, sin el entrelazado, la contaminación de una o varias palabras código. La operación de entrelazado distribuye los bits consecutivos de cada bloque de 456 bits en diferentes posiciones temporales. Las palabras códigos no se transmiten de forma consecutiva y los bits de cada palabra tampoco se transmiten de forma consecutiva. De este modo, un desvanecimiento no afectará a un grupo grande de bits consecutivos en el bloque de 456 bits. Al reconstruir el orden original en el receptor, los bits erróneos quedarán distribuidos de forma separada y podrán ser corregidos. En la Figura 2.17 se muestran los beneficios de aplicar el entrelazado. En el

ejemplo existe un desvanecimiento que provoca bits erróneos a lo largo de un campo de 57 bits de una ráfaga normal y parte del campo siguiente de la misma ráfaga. Gracias al entrelazado diagonal, los bits erróneos aparecen en palabras código no consecutivas. En efecto, los bits afectados pertenecen a la quinta palabra código de un bloque y a la primera palabra código del bloque siguiente. Además del entrelazado diagonal el mapeo especial mostrado en la Figura 2.16 permite que los bits erróneos queden separados dentro de cada palabra código. Como se aprecia en la Figura 2.17 el bit 0 erróneo del campo de 57 bits es el bit 0 del bloque n, pero el segundo bit par o bit 2 no corresponde al bit 2 del bloque n sino al bit 64 del bloque. De este modo, si existe un número de bits erróneos pares consecutivos en el campo de 57 bits, no significa que exista el mismo número de bits consecutivos erróneos en la palabra código y por tanto en el bloque al que pertenece.

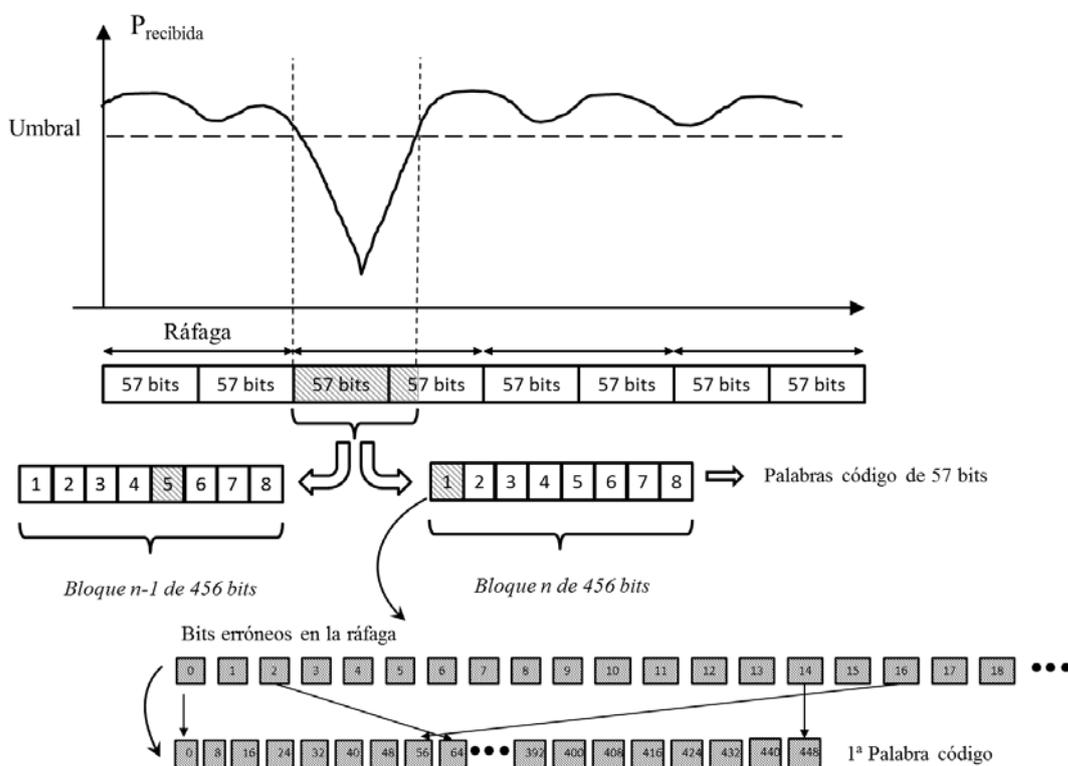


Figura 2.37. Ejemplo de entrelazado. Los bits erróneos están marcados con líneas diagonales.

En el dominio de la frecuencia también existen desvanecimientos del canal, es decir, el canal es selectivo en frecuencia. Estos desvanecimientos afectan en mayor medida a unos canales RF que a otros, por tanto, la señal de los usuarios de una trama TDMA puede resultar mucho más degradada que la señal de otra trama TDMA. Para aquellos usuarios que se desplacen lentamente, por ejemplo los peatones, este puede ser un grave problema ya que permanecerán en la zona con desvanecimiento en frecuencia durante un periodo prolongado. Este hecho se agrava especialmente en las zonas de baja calidad de la transmisión como en el borde de la célula o áreas de altas interferencias. Para evitar que un usuario se vea afectado profundamente por un desvanecimiento frecuencial, se aplica la técnica de salto en frecuencia (“frequency hopping”). Cuando se emplea esta técnica el usuario no usa siempre la misma pareja de canales RF sino que cambia periódicamente de pareja de canales RF. De este modo, un desvanecimiento selectivo en una determinada zona del espectro solo le afectará cuando tome el canal RF que se encuentra en dicha zona espectral. Gracias a esta técnica se consigue mejorar la SNR desde los 9 dB hasta los 11 dB. Una segunda ventaja del salto en frecuencia radica

que la posible reducción de la interferencia cocanal. En efecto, si existe salto en frecuencia la interferencia cocanal solo ocurre en aquellos instantes de tiempo en los que coinciden las dos frecuencias: deseada e interferente.

Existen dos métodos para aplicar el salto en frecuencia. En el primero existen n frecuencias disponibles y el cambio es fijo. Un móvil determinado primero salta a la frecuencia 1, luego a la 2 y así sucesivamente hasta la n . Esta secuencia se repite de forma cíclica. Con este método se maximiza la diversidad en frecuencia ya que el periodo de repetición de una frecuencia es máximo. A cambio no se consigue ninguna reducción de la interferencia cocanal ya que la configuración de frecuencias interferentes no cambia. En el segundo método de salto en frecuencia el salto se efectúa de forma aleatoria. Ahora, el periodo de repetición se acorta ya que existe la posibilidad de que antes de n saltos hayamos empleado dos veces la misma frecuencia. Sin embargo, ahora sí se reduce la interferencia cocanal.

En la Figura 2.18 se muestra un ejemplo de aplicación del salto en frecuencia para el usuario 1 de una trama TDMA mediante el método de salto aleatorio. Como se observa en la figura, el usuario sigue empleando la misma ranura pero en cada trama TDMA cambia de frecuencia tanto en transmisión como en recepción. El cambio de ráfaga solo afecta a la frecuencia. Como la trama TDMA dura 4.615 ms, una MS cambiará de frecuencias 217 veces por segundo. Aunque parezca un valor grande, en GSM el salto en frecuencia es de tipo lento (“slow frequency hopping”). Esta denominación es debida a que en las técnicas de espectro ensanchado producido por salto en frecuencia, el salto es mucho más rápido [GSM Switching, Services and Protocols]. Mientras que el entrelazado es obligatorio, el salto en frecuencia es opcional, no siempre se aplica.

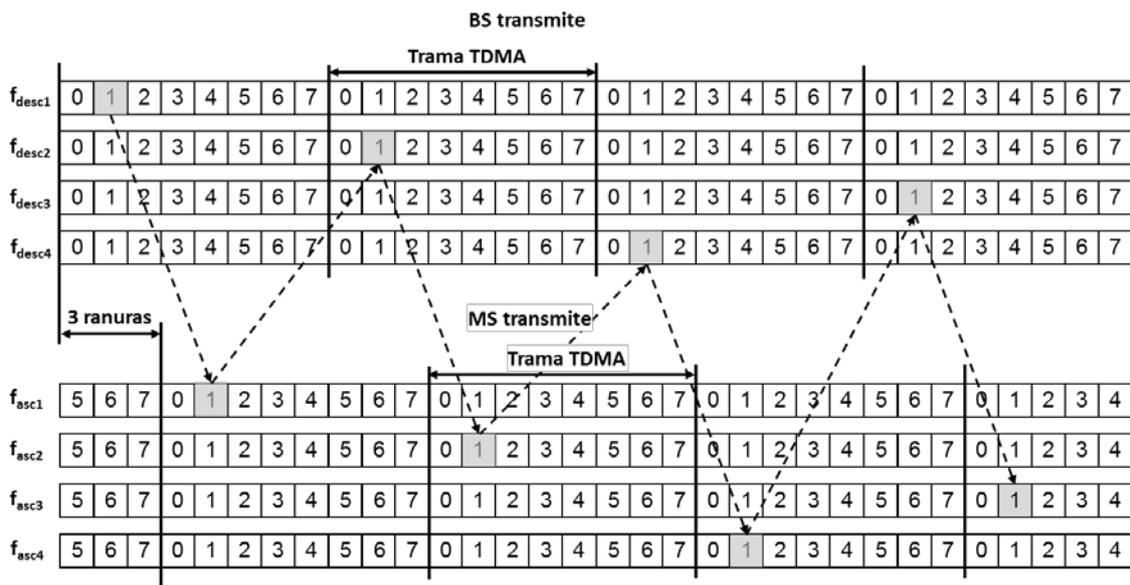


Figura 2.38. Ejemplo de salto en frecuencia para un usuario que ocupa la ranura 1 de la trama TDMA. En la célula existe cuatro pares de canales RF.

- Ráfaga de acceso aleatorio (AB o “random access burst”). Es la ráfaga empleada por el canal lógico RACH. El RACH solo puede emplear esta ráfaga. Por ello, es la ráfaga empleada por la MS por primera vez para acceder a la red. En la Figura 2.19 se muestran los campos que componen esta ráfaga. En comparación con la ráfaga normal se aprecia que el tiempo de guarda ocupa un número de bits mucho mayor en la ráfaga de acceso aleatorio. La razón radica en el desconocimiento por parte del móvil del retardo de propagación cuando

envía una solicitud de acceso aleatorio. Si se utilizase una ráfaga con una duración similar a la de una ráfaga normal existiría una gran probabilidad de solapamiento con la siguiente ranura, que recordemos, puede estar siendo empleado por otro usuario. El tiempo de guarda tiene un valor de 68,25 bits para evitar el solapamiento con otras ranuras incluso en los límites de la célula. Como el bit en GSM posee una duración de $3,69\mu\text{s}$, el periodo de guarda equivale a una distancia de $68,25 \text{ bits} \times 3,69\mu\text{s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 75,5 \text{ km}$. Al igual que con el TA el valor anterior contiene la distancia de ida y de vuelta por lo que la MS puede encontrarse a $75,5 \text{ km}/2 = 37,75 \text{ km}$. Hay que tener en cuenta que el móvil envía el RACH en un instante que depende de una transmisión anterior desde la BTS de tipo difusión (“broadcast”). Esta transmisión llega con un retardo de ida y el envío del RACH llega con el retardo de vuelta, que suponemos igual al de ida. Como el radio máximo de la célula en GSM fijado por el TA es de 35 km, la ráfaga de acceso aleatorio provee un tiempo de guarda suficiente.



Figura 2.39. Estructura de la ráfaga de acceso aleatorio.

- Ráfaga de sincronización (SB o “synchronization burst”). Es la ráfaga empleada por el canal lógico SCH. Este canal lógico solo emplea esta ráfaga. En la Figura 2.20 se muestran los campos que componen esta ráfaga. La secuencia de sincronismo y los datos codificados contienen, entre otros datos de sincronización, el “Reduced Frame Number” (RFN). Esta ráfaga es decodificada por la MS durante la operación de sincronización a la red. Como el móvil todavía no ha enviado ninguna transmisión hacia la BTS, ésta no conoce el TA. Por lo tanto, esta ráfaga no indica ningún TA.



Figura 2.40. Estructura de la ráfaga de sincronización.

- Ráfaga de corrección en frecuencia (FB o “frequency correction burst”). Es la ráfaga empleada de forma unívoca por el canal lógico FCCH. Su estructura se muestra en la Figura 2.21. Todos los bits de esta ráfaga, incluidos los seis de las colas, poseen un valor de 0. De este modo, con la modulación GMSK empleada por GSM, aparece una portadora no modulada con una frecuencia igual a $1625/24 \text{ KHz} = 67,7 \text{ KHz}$ por encima de la frecuencia central del canal RF. Mediante el examen de esta ráfaga el canal se puede resincronizar en frecuencia periódicamente.



Figura 2.41. Estructura de la ráfaga de corrección en frecuencia.

- "Dummy burst" (DB). Esta ráfaga no está asociada a ningún canal lógico en particular. Se transmite cuando no se envía ninguna otra ráfaga. Es una ráfaga de relleno y sirve por ejemplo para realizar mediciones de potencia. Su estructura es igual a la de la ráfaga normal.

2.6 Combinaciones de canales lógicos.

Los canales lógicos y sus ráfagas asociadas no se transmiten de forma desordenada sino que se combinan en un determinado orden prefijado. Existen siete combinaciones de canales lógicos numeradas desde el I hasta el VII. Las tres primeras combinaciones contienen los canales de tráfico y sus canales asociados de control. Las restantes contienen exclusivamente canales de señalización. Cada combinación se emite desde la BTS y desde la MS en una ranura determinada. Por ejemplo, una combinación I de tráfico podría utilizar la ranura 3 de una trama TDMA tal como se aprecia en la Figura 2.22. La serie de ranuras número 3 de las tramas consecutivas forman una estructura temporal conocida como multitrama. Por lo tanto, cada combinación es también una multitrama. A su vez las multitramas se agrupan en una entidad de orden superior llamada supertrama. Finalmente, la supertrama forma parte de la hipertrama.

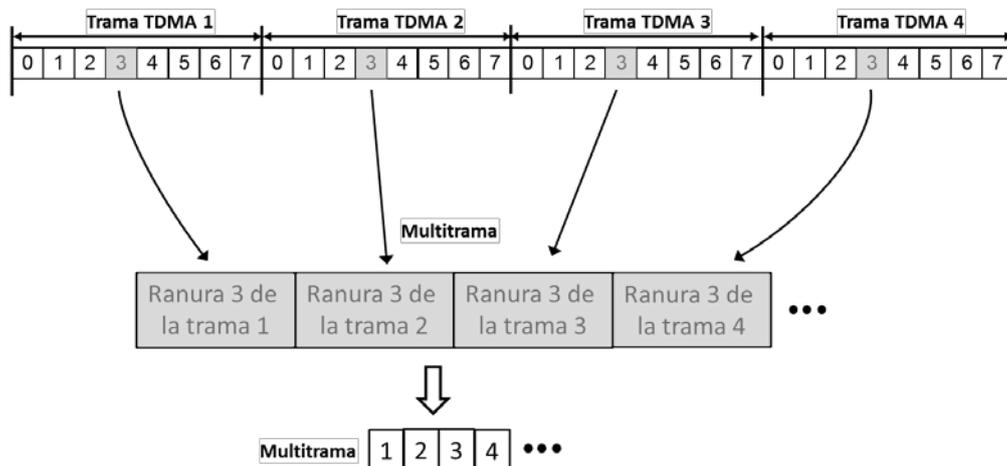


Figura 2.42. Formación de una multitrama.

En la Figura 2.23 se observa la estructura jerárquica formada a partir de las tramas. Las multitramas de datos de tráfico están formadas por 26 tramas. Las multitramas de datos de señalización están compuestas por 51 tramas. En la estructura jerárquica se entiende por tramas, no a 8 ranuras consecutivas, sino a una misma ranura perteneciente a una serie de 26 o 51 tramas según el tipo de datos. Las multitramas de tráfico duran 120 ms mientras que las multitramas de señalización duran 235,38 ms. Sin embargo, las supertramas tanto de tráfico como de señalización poseen una duración de 6,12 segundos. Esto es debido a que las supertramas de datos contienen 51 multitramas y las de señalización constan de 26 multitramas. La hipertrama contiene 2048 supertramas y se repite cada 53.760 segundos.

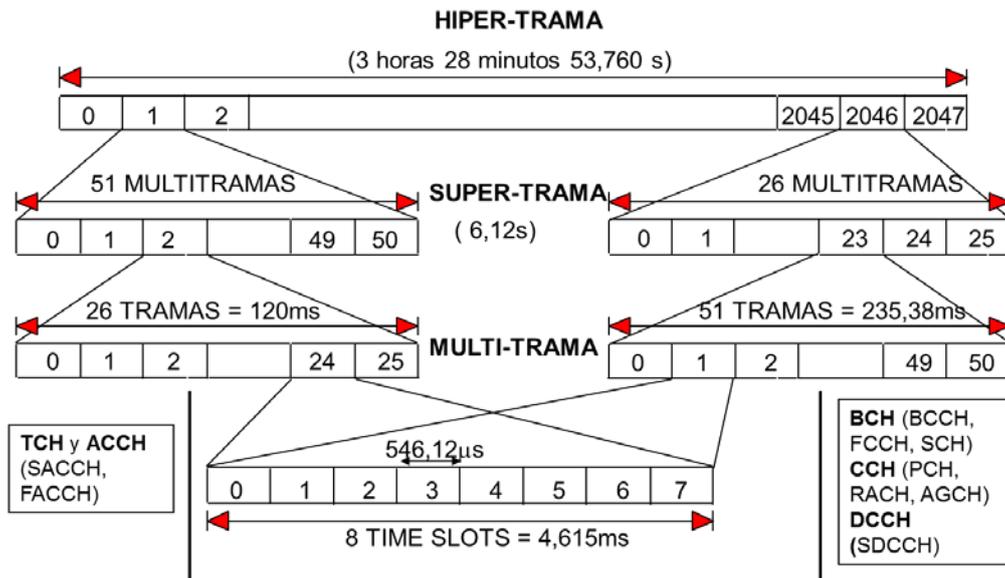


Figura 2.43. Estructura jerárquica de tramas.

Una vez explicada la estructura jerárquica temporal de GSM se da paso a la explicación de las combinaciones o multitramas que se incluyen en dicha jerarquía:

- **Combinación I.** Es una combinación de canales de tráfico. Los 12 primeros canales son canales lógicos de tráfico “full-rate” (TCH/FS) o de datos TCH/Fxx. A continuación aparece un canal de control asociado a los canales de tráfico (SACCH). Luego aparecen 12 canales más de tráfico. La última trama es de reposo o “idle” y contiene una ráfaga “dummy”. Este último canal sirve para que el móvil realice diversas tareas como la monitorización de la potencia proveniente de células adyacentes y de su propia célula. Si fuera necesario llevar a cabo labores de señalización urgente, uno o varios canales de tráfico podrían ser sustituidos por canales FACCH. La estructura de la combinación se muestra en la Figura 2.24. Esta combinación tiene la misma estructura en el enlace ascendente y en el descendente. Cada conversación simultánea debe utilizar una combinación de este tipo a no ser que emplee alguna de las dos siguientes combinaciones.

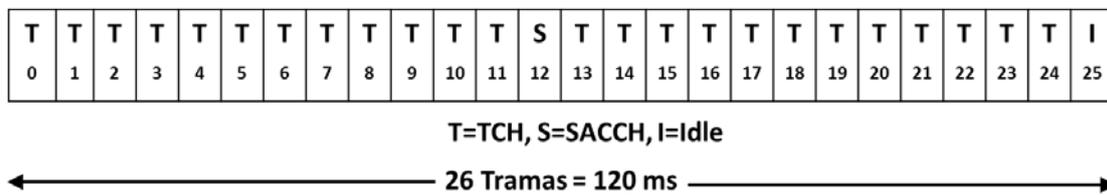


Figura 2.44. Estructura de la combinación I.

- **Combinación II y III.** Son las otras dos combinaciones de tráfico. Si en lugar de utilizar en la combinación I canales de “full-rate” se emplean canales lógicos de tráfico “half-rate” (TCH/HS o TCH/Hxx) se genera la combinación III. En esta combinación pueden existir dos conversaciones simultáneas en la misma multitrama, de este modo, doblamos la capacidad de la célula. Su estructura se muestra en la Figura 2.25. Ahora desaparece el canal “idle” para tener dos canales SACCH, uno para cada usuario (uno para los canales T y el otro para

los canales t). Si sólo se emplea uno de los canales de tráfico, bien el T o el t, entonces la combinación es de tipo II. Esta combinación ofrece la misma capacidad que la combinación I. al igual que en la primera combinación, estas dos combinaciones poseen la misma secuencia de canales tanto en el enlace ascendente como en el descendente. Del mismo modo, si se requiere llevar a cabo tareas de señalización urgentes los canales de tráfico pueden ser sustituidos por canales FACCH.

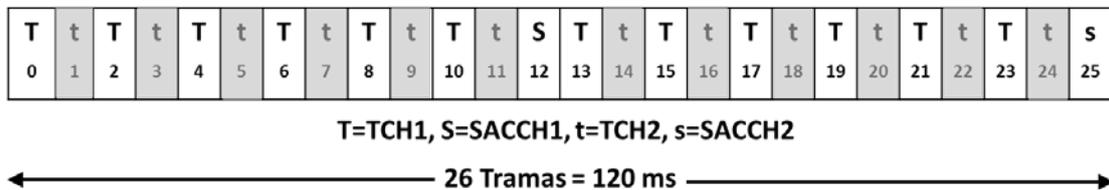


Figura 2.45. Estructura de la combinación III y de la combinación II.

- Combinación IV. Esta combinación al igual que las tres siguientes es una combinación compuesta completamente por canales de control y señalización. Posee la particularidad de que siempre se transmite en la ranura 0 de cada trama TDMA de la pareja de canales RF más bajos de todos los disponibles en la célula (portadora 0). Por su importancia al conjunto ranura 0 más la portadora 0 se le denomina canal base. Si existe en una célula, sólo puede existir una combinación de este tipo en esa célula. Esta combinación posee estructuras diferentes en el enlace descendente y ascendente tal como se observa en la Figura 2.26.

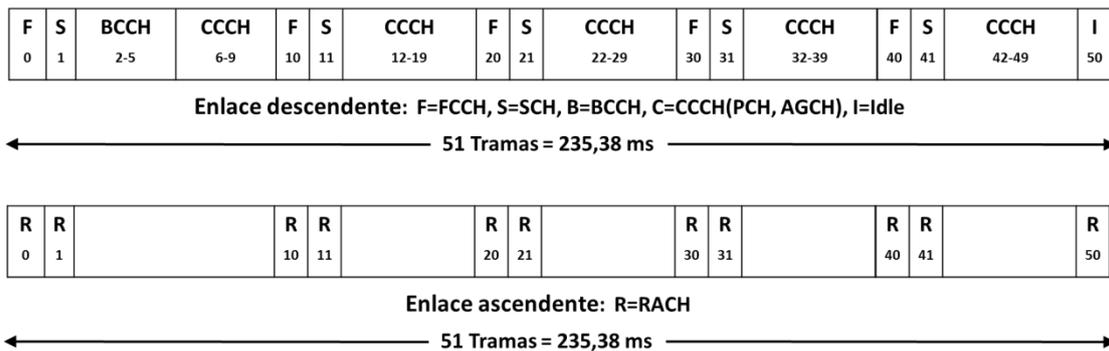


Figura 2.46. Estructura de la combinación IV.

En el enlace descendente se transmiten los canales de difusión (BCH) en el orden siguiente: FCCH, SCH y BCCH. Este orden posibilita que los móviles de la célula se sincronicen a la red. El resto de canales son de control común (CCCH): PCH y AGCH. Estos canales permiten llamar a los móviles y responder a sus peticiones de acceso respectivamente. La ranura utilizada por uno de estos canales no está fijada, aunque sí se debe enviar dentro de alguno de los grupos de ranuras reservados a los canales CCCH. El número de canales PCH y AGCH tampoco está fijado, solo existe un número máximo de canales CCCH. Entre cada grupo de canales CCCH se transmite una pareja de canales FCCH y SCH para que los móviles puedan resincronizarse y resintonizarse por si esto fuera necesario. El último canal es de tipo "idle". Es importante que el canal

base presente un nivel de potencia mínimo de forma continua en el enlace descendente para que cualquier MS pueda detectarlo. Si la BTS no se comunica con ningún móvil entonces las ranuras dedicadas a los canales CCCH estarían vacíos. Para evitar estos vacíos en la potencia emitida, cuando no hay CCCH que emitir se transmiten canales lógicos 'idle' ("dummy bursts").

En el enlace ascendente tan solo aparecen canales de tipo RACH para que el móvil pueda solicitar una comunicación con la red, es decir, para solicitar un enlace dedicado. Esta combinación está diseñada para células de tráfico moderado y alto en las que se requiere un número elevado de canales de tipo CCCH. Estos canales permiten el establecimiento de llamadas y comunicaciones de datos.

- Combinación V. Del mismo modo que la combinación IV también se transmite en el canal base (ranura 0 y portadora 0). En una célula esta combinación y la anterior son excluyentes, es decir, o existe una o la otra pero no las dos. Solo puede existir una combinación de tipo V en una célula. En la Figura 2.27 se observa la estructura en el enlace descendente y ascendente de la combinación V. Esta combinación está diseñada para células con poco tráfico en las que solo son necesarias una o dos parejas de canales RF. Al existir poco tráfico todas las labores de control se pueden concentrar en una única combinación como la V. Por ello, esta combinación debe contar con todos los canales lógicos necesarios para todas las tareas de señalización y control. A los canales de difusión necesarios para la sincronización de los móviles a la red se suman los canales de control dedicado DCCH y sus asociados ACCH. Así, en la Figura 2.27 se observa que hasta la trama 21 la combinación V y la IV son iguales pero entre la 22 y la 50 en la combinación V aparecen 4 grupos de 4 canales SDCCH cada uno y 2 grupos de 4 canales SACCH cada uno. Los otros 2 grupos de 4 canales SACCH necesarios para el control de los grupos SDCCH 2 y SDCCH 3 aparecen en la segunda versión de la multitrama. Las dos versiones de la multitrama se van alternando en el tiempo. En el enlace ascendente también existen dos versiones de la multitrama. La primera versión contiene los canales RACH para realizar peticiones de acceso a la red, 4 grupos de 4 canales SDCCH cada uno y 2 grupos de 4 canales SACCH cada uno. La segunda versión es igual a la primera excepto en la aparición de 2 grupos nuevos de 4 canales SACCH, tal como también ocurre en el enlace descendente.

La ordenación de los canales SDCCH en el enlace ascendente puede parecer extraña pero obedece a una razón práctica. Supongamos que se asigna a un móvil el canal SDCCH de la trama 33 de la multitrama descendente, que es la segunda trama del SDCCH 2. La estación móvil deberá contestar a este canal por la segunda trama del grupo SDCCH 2 del enlace ascendente. Este canal se encuentra en la trama 48 de la multitrama ascendente. Como vemos existe una diferencia de 15 ranuras entre una pregunta desde la red y la contestación. Así ocurre entre cada par de canales SDCCH del enlace ascendente y descendente.

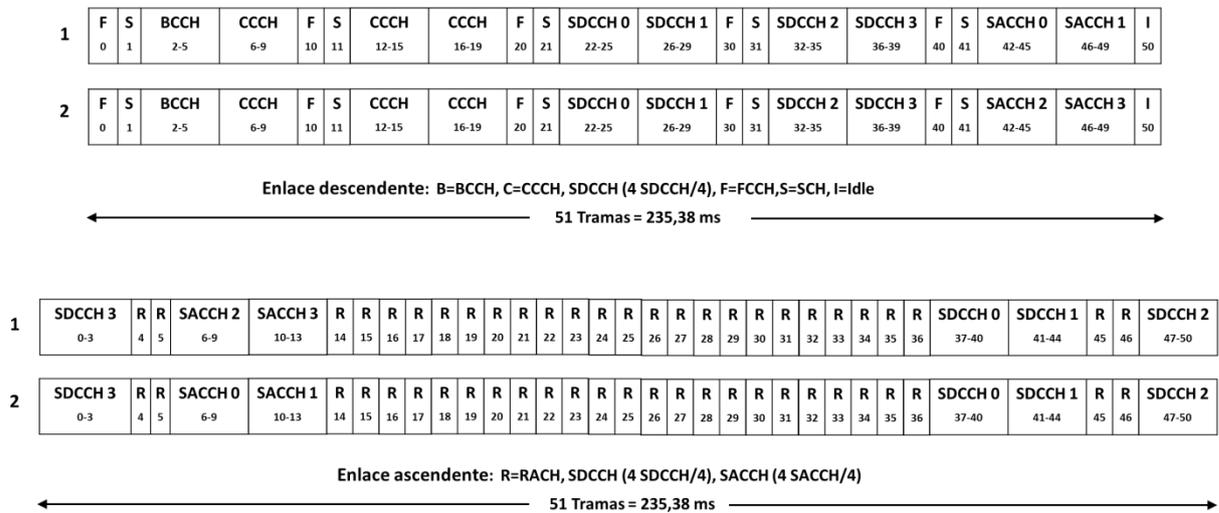


Figura 2.47. Estructura de la combinación V.

La pregunta puede implicar la realización de diversas tareas por lo que la mencionada separación permite que la MS tenga tiempo suficiente para poder responder. Del mismo modo existe una separación entre el SDCCH que emite un móvil y que puede implicar una pregunta a la red y el SDCCH por el que contesta la red. Si nos fijamos en el primer SDCCH del grupo 3 del enlace ascendente está situado en la trama 0, mientras que la el primer SDCCH del grupo 3 del enlace descendente se ubica en la trama 36. La separación es por tanto de 36 tramas, mucho mayor que antes ya que la red debe realizar muchas más tareas que el móvil y por ello requiere de más tiempo para contestar.

- Combinación VI. Esta combinación aparece en aquellas células en las que, por motivos de existencia de mucho tráfico, el número de canales de control común CCCH de la combinación IV es insuficiente. Es una combinación particular ya que solo existe en el enlace descendente y si aparece, siempre existe asociada a la combinación IV. Tiene la misma estructura que la combinación IV pero sin los canales FCCH y SCH. Pueden existir varias combinaciones VI en una misma célula. Generalmente emplea las ranuras 2, 4 y 6 (si fuese necesario) de la portadora 0. Si hacen falta más combinaciones VI se pueden transmitir en otras portadoras disponibles en la célula.
- Combinación VII. Como la combinación VI esta combinación se utiliza de modo voluntario cuando existe en la célula mucho tráfico. Si la combinación anterior otorgaba a la célula un mayor número de canales de control común, la combinación VI permite a la célula una mayor capacidad de señalización dedicada. Efectivamente, como se aprecia en la Figura 2.28, en esta combinación aparecen hasta 8 grupos de 4 canales dedicados SDCCH en cada uno. Siempre se utiliza con la combinación IV, se encuentre ésta sola o con una o varias combinaciones de tipo VI. Al igual que en la combinación V, que también posee canales dedicados, existe una separación de 15 ranuras entre un canal SDCCH del enlace descendente y su canal SDCCH correspondiente del enlace ascendente. También existe una separación de 36 ranuras entre el canal SDCCH con el que el móvil puede realizar una petición o pregunta a la red y el canal SDCCH del canal descendente a través del cual contesta la red. En la Figura 2.28 se observa que en cada versión de la multitrama aparecen canales SACCH asociados a la mitad de los canales SDCCH de la versión en cuestión. Sigue por

tanto un esquema similar al de la combinación V en tanto a lo que respecta a los canales dedicados. Por último, mencionar que la combinación VII siempre se transmite en una ranura 5 de las frecuencias portadoras disponibles en la célula. Si es necesario, se pueden habilitar varias combinaciones de tipo VII pero solo una por portadora.

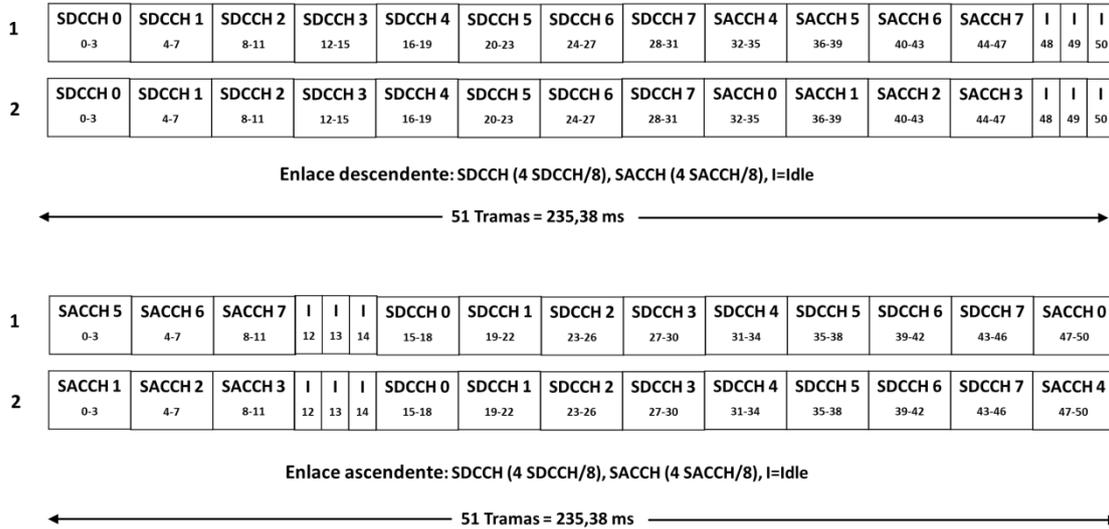


Figura 2.48. Estructura de la combinación VII.

Para finalizar este punto se mostrará un ejemplo de cómo se distribuyen diferentes combinaciones en tramas TDMA sucesivas a lo largo del tiempo. En la Figura 2.22 se mostró cómo una multitrama está compuesta por una misma ranura de sucesivas tramas. Por lo tanto, en cada ranura de una trama TDMA aparecerá un canal lógico perteneciente a una de las combinaciones que utilizan esa trama TDMA. En la Figura 2.29 se muestran los canales lógicos que aparecen en 52 tramas TDMA del enlace descendente cuando en esa trama TDMA existe una combinación de tipo IV, una combinación de tipo VII y seis combinaciones de tráfico tipo I. Cada columna indica una ranura de sucesivas tramas TDMA. Así, en la columna de la ranura 0 de cada trama TDMA es empleada por la combinación IV. Se observa que en la primera trama hay un canal de corrección en frecuencia (FCCH), en la segunda trama en la misma ranura 0, un canal de sincronización (SCH), luego cuatro canales BCCH y así sucesivamente, siguiendo el orden de canales mostrado en la Figura 2.26. Como se muestran 52 tramas TDMA se puede observar la combinación IV entera más el primer canal FCCH de la siguiente multitrama de esta combinación. Lo mismo ocurre con la combinación de señalización VII mostrada en la Figura 2.29: se muestra la primera multitrama y el primer canal lógico de la siguiente multitrama. La columna sexta de cada trama (ranura número 5) alberga los canales lógicos de la combinación VII. Como se aprecia, se van sucediendo los canales SDCCH hasta llegar a los canales de control asociados a estos. Se sigue así el orden mostrado en la Figura 2.28. El resto de ranuras contienen los canales lógicos de seis combinaciones de tráfico. Como se muestran 52 tramas TDMA se puede apreciar la evolución de dos multitramas para cada combinación de tráfico. En cada una de las ranuras número 1, 2, 3, 4, 6 y 7 de las 12 primeras tramas aparecen canales de tráfico TCH/FS. Luego aparecen los canales SACCH, uno para cada combinación de tráfico. A continuación, aparecen otras 12 tramas TDMA con canales de tráfico en las ranuras 1, 2, 3, 4, 6 y 7. Las seis multitramas de tráfico acaban con los canales "Idle" (I)

en la trama número 25 (que es la vigesimosexta). Este orden se repite desde la trama número 27 hasta la 51, última de las mostradas.

Número de trama	Número de trama	Número de trama	Número de trama
0	1	2	3
F T T T T SD T T	S T T T T SD T T	B T T T T SD T T	B T T T T SD T T
4	5	6	7
B T T T T SD T T	B T T T T SD T T	C T T T T SD T T	C T T T T SD T T
8	9	10	11
C T T T T SD T T	C T T T T SD T T	F T T T T SD T T	S T T T T SD T T
12	13	14	15
C SA SA SA SA SD SA SA	C T T T T SD T T	C T T T T SD T T	C T T T T SD T T
16	17	18	19
C T T T T SD T T	C T T T T SD T T	C T T T T SD T T	C T T T T SD T T
20	21	22	23
F T T T T SD T T	S T T T T SD T T	C T T T T SD T T	C T T T T SD T T
24	25	26	27
C T T T T SD T T	C I I I I SD I I	C T T T T SD T T	C T T T T SD T T
28	29	30	31
C T T T T SD T T	C T T T T SD T T	F T T T T SD T T	S T T T T SD T T
32	33	34	35
C T T T T SA T T	C T T T T SA T T	C T T T T SA T T	C T T T T SA T T
36	37	38	39
C T T T T SA T T	C T T T T SA T T	C SA SA SA SA SA SA SA	C T T T T SA T T
40	41	42	43
F T T T T SA T T	S T T T T SA T T	C T T T T SA T T	C T T T T SA T T
44	45	46	47
C T T T T SA T T	C T T T T SA T T	C T T T T SA T T	C T T T T SA T T
48	49	50	51
C T T T T I T T	C T T T T I T T	I T T T T I T T	F I I I I SD I I

F=FCCH, S=SCH, B=BCCH, C=CCCH, SD=SDCCH, SA=SACCH, T=TCH /FS, I=Idle

Figura 2.49. Ejemplo de la evolución temporal en el enlace descendente de una combinación IV (negrita), una combinación VII (cursiva) y seis combinaciones de tráfico de tipo I.

2.7 Protocolos en el enlace radio.

En el apartado 2.4 se explicó en qué consisten los tres protocolos del enlace radio en GSM. En la sincronización con la red, el móvil recién encendido lee diferentes parámetros de la red, entre ellos el área de localización. En la actualización de la localización el móvil detecta un cambio en el área de localización y procede a comunicar este cambio a la red. Esta tarea se lleva a cabo tras la sincronización con la red y siempre que se detecte posteriormente un cambio en la LA ya sea durante una llamada o en estado de reposo. Recordemos que la red GSM debe conocer en todo momento en qué LA se encuentran los móviles ya que es en la LA donde se busca al móvil llamado o destinatario de un SMS. En el protocolo de establecimiento de llamadas la estación móvil puede originar una llamada o recibir una llamada. A continuación describiremos los pasos y canales lógicos implicados en cada uno de los protocolos.

2.7.1 Sincronización con la red.

Los canales lógicos empleados en este protocolo son el FCCH, el SCH y el BCCH. Todos los procedimientos seguidos por la MS en este protocolo son pasivos. Por lo tanto, únicamente debe analizar y leer datos en el canal base ya esté ocupado por una combinación de tipo IV o V. Los procedimientos que la MS debe ejecutar son tres:

- Sintonización frecuencial con la red: en el apartado 2.6. se comentó que el canal base siempre emite algún tipo de canal lógico. De este modo el nivel de potencia media de la ranura que ocupa este canal (ranura 0) siempre es mayor que la potencia media de otras ranuras ocupadas por otras combinaciones. Así, la MS cuando se enciende lo primero que hace es buscar un canal con un nivel de potencia mínimo. Una vez detectado, busca en dicha ranura el canal lógico

FCCH. Como ya se explicó este canal posee un pico de potencia a una frecuencia de 67.7 KHz por encima de la frecuencia portadora del canal RF. Si la MS no encuentra al FCCH en esa ranura significa que no está ocupada por el canal base de una BTS y procede a la búsqueda de un canal base real.

- Sincronización temporal: una vez sintonizado la MS procede a sincronizarse a nivel de trama y de bit con la red. Esta tarea se lleva a cabo mediante la lectura de diferentes números y contadores del SCH. Como se ha visto en las combinaciones IV y V, este canal siempre se transmite después del FCCH por lo que para la MS es sencillo leer el SCH, solo tiene que detectar el FCCH y esperar a la ranura 0 de la siguiente trama. La lectura del RFN del SCH permite la obtención de los contadores T1, T2 y T3. Como ya se explicó estos contadores definen la posición de la trama en la estructura jerárquica de tramas. Esta información facilita el acceso al BCCH que será el siguiente paso a dar en el protocolo. La sincronización a nivel de bit se consigue con diferentes contadores relacionados entre sí y emitidos por el SCH [GSM Switching, Services and Protocols, Capítulo 5]:
 - o Contador de cuarto de bit obtenido del “Quarter Bit Number” (QN).
 - o Contador de bit obtenido del “Bit Number” (BN).
 - o Contador de ranura temporal contenido del “Time Slot Number” (TN).
- Información sobre la red: los parámetros de la red se leen del BCCH. Como se vio en el apartado 2.4. el BCCH contiene una serie de datos que caracterizan a la red y a la BTS a la que se va a enganchar la MS. Entre estos datos destacaban el nivel máximo de potencia permitido a las estaciones móviles, el MNC, el BSIC, el CI, la configuración radio de la propia célula y de las vecinas y como ya se ha dicho el LAC. Tras la obtención de los datos de la red el móvil procederá a su actualización de registro de localización debido a que ya conoce su área de localización. El móvil utilizará el conocimiento sobre las frecuencias de las células vecinas para escrutar el canal radio en busca de una célula vecina que ofrezca un mayor nivel de potencia. Recordemos que la MS se mueve y por tanto puede llegar a ser conveniente un cambio en la célula a la que está conectado. Este cambio, si no implica a su vez un cambio en el área de localización en la que se ubica la MS, es transparente para la red. Como se ha visto, la sincronización con la red es un proceso pasivo, la MS no envía ninguna información. La red solo conoce la existencia de la MS cuando está da a conocer su localización o su cambio de localización o cuando solicita el establecimiento de una llamada.

Estos tres procedimientos suelen durar de 2 a 5 segundos aunque en algunos casos la duración del protocolo se puede alargar hasta los 20 segundos [Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II]. La duración depende obviamente del diseño del móvil y también de si la última vez que estuvo conectado fue en la misma célula o en otra. Cuando un móvil se apaga guarda, entre otros datos, la frecuencia del canal base de la célula a la que estaba conectado y la localización de la célula. Si se enciende de nuevo en la misma célula ya posee la frecuencia del FCCH por lo que el proceso de sincronización se acelera. Por último decir que el móvil cuando se apaga guarda información de la red pero no comunica este hecho a la red GSM.

2.7.2 Actualización de la localización.

En el apartado 2.4. se comentaron las situaciones que provocan que el móvil tenga que actualizar su localización. En la Figura 2.30 se muestran los pasos seguidos para

que una MS actualice su registro de localización cuando se enciende. En las restantes situaciones el procedimiento es similar, especialmente aquel en el que el móvil en estado de reposo actualiza su localización por la detección de un cambio en la LA.

Canal Lógico	Móvil	Base	Comentarios
RACH	→		Solicitud de Canal dedicado
AGCH		←	Asignación de Canal dedicado
SDCCH	→		Solicitud de actualización de localización
SDCCH		←	Solicitud de Autenticación
SDCCH	→		Respuesta de Autenticación
SDCCH		←	Solicitud de transmitir en modo cifrado
SDCCH	→		Reconocimiento del modo cifrado
SDCCH		←	Confirmación de la actualización de localización. Asignación de TMSI
SDCCH	→		Reconocimiento de ambas cosas
SDCCH		←	Liberación del Canal dedicado

Figura 2.50. Tareas y canales lógicos utilizados en el protocolo de actualización de la localización.

El móvil, antes del inicio de este protocolo y después de encenderse, ha tenido que sincronizarse a la red. Por tanto, tal como se ha visto en el apartado anterior, habrá leído del BCCH el dato LAC y conoce así el Área de Localización en la que se encuentra.

El protocolo de actualización comienza con el envío por parte del móvil de un canal lógico RACH. Mediante este canal la MS solicita un canal dedicado SDCCH. Este canal lógico dedicado sirve para que el móvil y la red se intercambien información. La estación base responde a la petición de la MS con el envío de un AGCH. Este canal indica la concesión del SDCCH. Si la estación base no responde antes de un tiempo límite, el móvil volvería a realizar la solicitud mediante el envío de un nuevo RACH.

A partir de la recepción del AGCH en el móvil toda la información intercambiada se realiza a través del SDCCH concedido. El móvil indica a la red el motivo de su comunicación. A continuación se inicia un proceso muy importante para garantizar la seguridad y confidencialidad de las comunicaciones en GSM: el proceso de autenticación y cifrado. Como se observa en la Figura 2.30 la red solicita en primer lugar que el móvil se autentifique. En la Figura 2.31 se muestran las entidades involucradas en el proceso de autenticación. Asimismo, se muestran las variables y algoritmos que posee o genera cada entidad involucrada.

El proceso de autenticación comienza mediante la generación en el AuC del número aleatorio RAND. Además, el AuC genera el número SRES con el algoritmo A3, el RAND y la clave Ki asociada a la SIM del usuario. Si el AuC no posee la clave Ki del usuario la solicitará al HLR. La red guarda en el HLR los datos permanentes de todos los usuarios y por tanto conoce la clave Ki asociada a cada número de teléfono móvil. Hay que tener en cuenta que la clave Ki no se transmite nunca vía radio y que el móvil, al solicitar la actualización de localización, envía datos como su número TMSI actual o su número de teléfono MSIDSN. De este modo la red puede hallar su clave Ki y otras claves o datos como el IMSI.

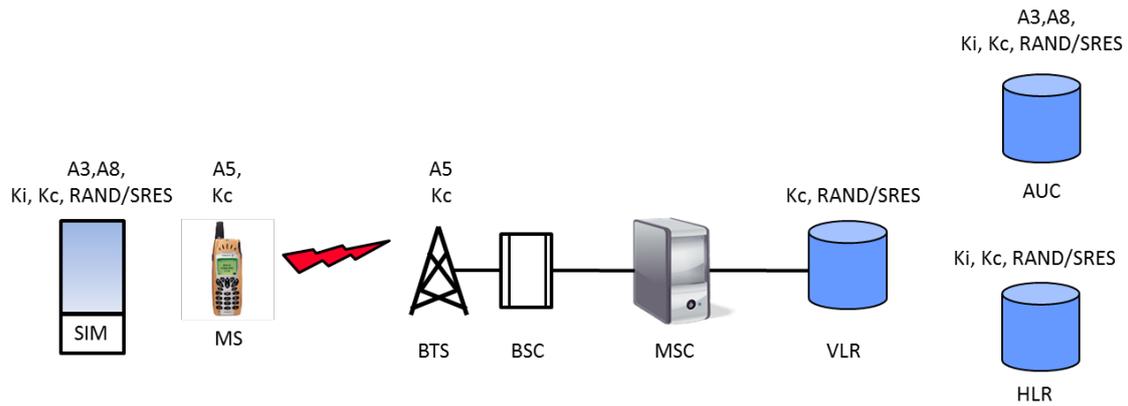


Figura 2.51. Entidades involucradas en el proceso de autenticación.

La pareja RAND/SRES son los números que permiten autenticarse al usuario (móvil). Como se aprecia en la Figura 2.32 el RAND se envía vía radio hasta el usuario (paso 1). En la SIM se lleva a cabo el mismo proceso efectuado en el AuC. Se genera el número SRES a partir del número RAND y de la clave Ki mediante el algoritmo A3 (paso 2). El móvil procede entonces al envío del SRES (paso 3). La red compara en la BSS el SRES guardado y transmitido con el SRES recibido desde el móvil. Si son iguales la autenticación es válida (paso 4). Si no son iguales, significa que el SRES fue generado con una clave Ki incorrecta, diferente de la empleada en el AuC, y por tanto no se puede identificar al usuario.

Como se observa en la Figura 2.30 después de la autenticación la red puede solicitar al usuario (móvil) que transmita en modo cifrado. A partir de ese momento toda comunicación estará cifrada mediante una clave llamada clave Kc. El proceso llevado a cabo para generar esta clave se muestra en la Figura 2.33. La clave Kc se genera mediante el algoritmo A8 y el número RAND tanto en la SIM como en la red. No hace falta comprobar que la clave Kc es la misma, debe serlo por fuerza ya que el número RAND es el mismo y la clave Ki es correcta como se comprobó en el proceso de autenticación anterior. Así, la clave Kc nunca se transmite vía radio.

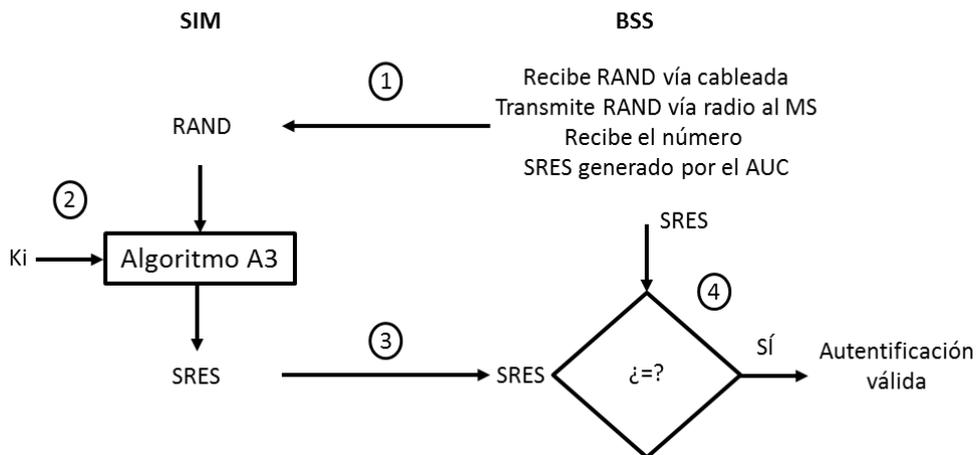


Figura 2.52. Proceso de autenticación.

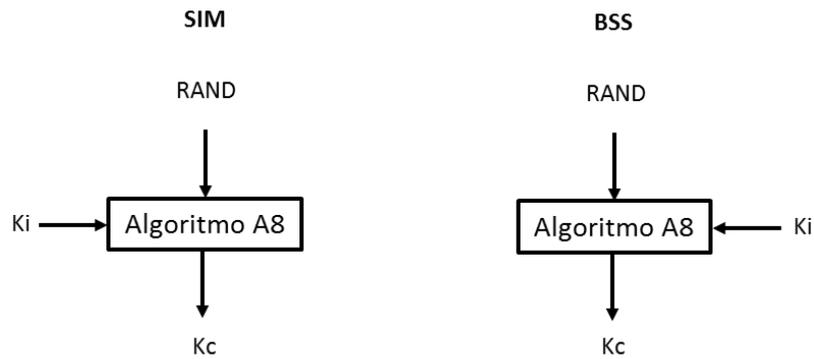


Figura 2.53. Proceso de generación de la clave Kc.

La solicitud de cifrado es opcional y no obligatoria al contrario que el proceso de la autenticación. No obstante es habitual que la red solicite el cifrado de toda comunicación. Cuando el móvil responde con el reconocimiento de que va a cifrar los datos que se envíen, la red confirma la actualización de la localización y procede al envío de un nuevo TMSI. Este número permitirá al usuario establecer llamadas posteriormente. El envío y recepción del TMSI y de cualquier dato cifrado se muestra en la Figura 2.34. Para cifrar se emplea el algoritmo A5 y la clave Kc. El TMSI cifrado se envía al móvil que lo descifra mediante el mismo algoritmo A5, contenido en el dispositivo móvil, y la clave Kc. Si en el futuro a red solicitase la identificación del móvil (no la autenticación) el móvil debería enviar el TMSI guardado y cifrado. Esta tarea corresponde a los pasos 2, 3 y 4 de la Figura 2.34. Para cifrar el tráfico, datos o voz codificada, se emplea asimismo el algoritmo A5 y la clave Kc. El protocolo de actualización, como se aprecia en la Figura 2.31, finaliza con el reconocimiento desde el móvil de la actualización de la localización y la asignación del TMSI y con la liberación del SDCCH puesto que ya no es necesario.

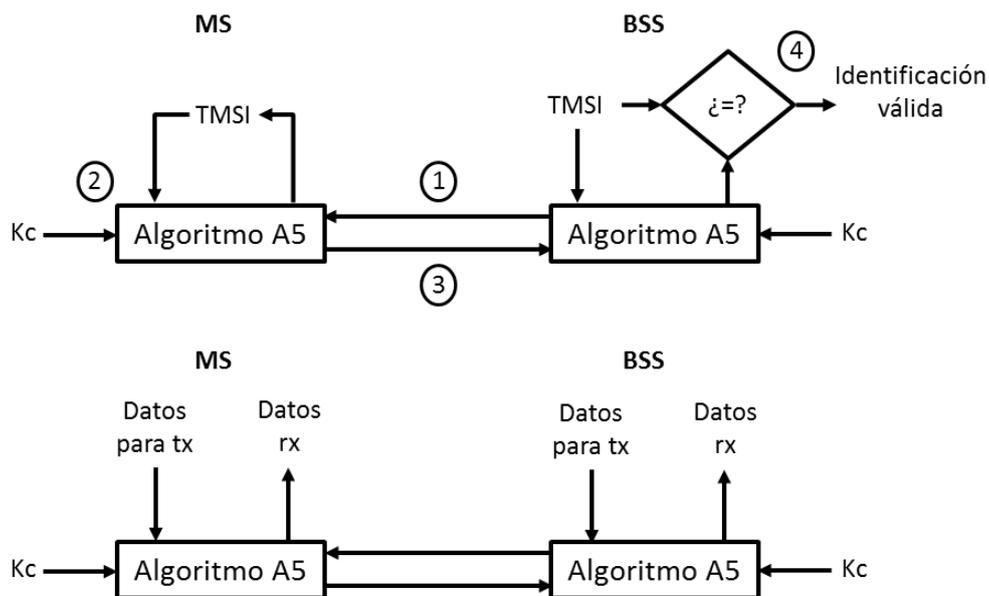


Figura 2.54. Envío y recepción del TMSI y de datos cifrados.

Para acabar este apartado se explicará cómo se actualizan los datos del usuario que ha solicitado la actualización en las bases de datos de la red. Para ello conviene mostrar un esquema de la estructura jerárquica de una red GSM. En la Figura 2.35 se observa que un MSC puede contener varias Áreas de Localización. Cada MSC posee un VLR que contiene los datos de todos los usuarios que se encuentran en las LA de ese MSC. Por simplicidad suponemos que existe un HLR en toda la red aunque pueden existir varias bases de datos de este tipo.

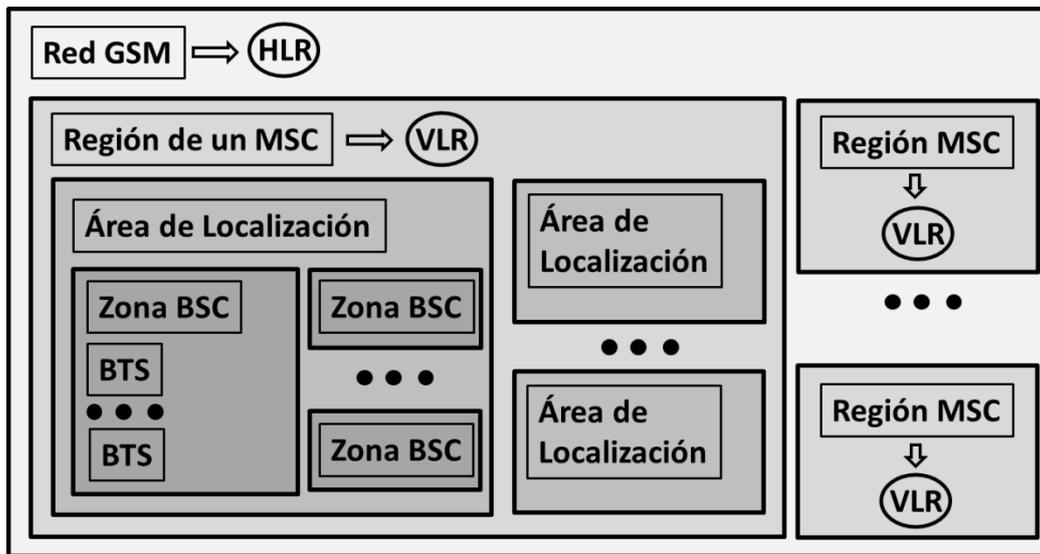


Figura 2.55. Esquema de la estructura jerárquica de una red GSM.

En la actualización de la localización pueden ocurrir dos casos: que el móvil se mueva de una LA a otra dentro de la misma región MSC o que cambie también de región MSC. En el primer caso la red detecta que el móvil que solicita la actualización ya posee una entrada en el VLR. Como el móvil indica la nueva LA, la red sabe que esa LA pertenece al mismo VLR en el que ya está registrado el móvil. En ese VLR y en el HLR de la red se actualizarán los datos de LA y de TMSI para ese móvil. Así, si es destinatario de una llamada se le podrá localizar. El segundo caso resulta algo más complejo. La red detecta que el móvil solicitante no está registrado en el VLR del MSC al que pertenece la LA. Por tanto, se le abre una entrada en ese VLR. Si el móvil se autentifica correctamente se le asigna un TMSI. El resto de datos que guarda el VLR se obtienen del AuC y del HLR. La red debe proceder al borrado de la entrada en el antiguo VLR ya que un usuario solo puede tener una entrada en un único VLR. El proceso finaliza con el cambio de los datos de VLR, LA y TMSI en la entrada permanente que el usuario posee en el HLR [Digital Mobile Communications and the TETRA System].

2.7.3 Establecimiento de llamadas.

Por establecimiento de llamadas se entiende tanto el establecimiento de las llamadas que tienen como destinatario a un móvil como las originadas en él. En la Figura 2.36 se muestran los pasos seguidos para cursar una llamada originada en un móvil.

Canal Lógico	Móvil	Base	Comentarios
RACH	→		Solicitud de Canal dedicado
AGCH	←		Asignación de Canal dedicado
SDCCH	→		Solicitud de establecimiento de llamada
SDCCH	←		Solicitud de Autenticación
SDCCH	→		Respuesta de Autenticación
SDCCH	←		Solicitud de transmitir en modo cifrado
SDCCH	→		Reconocimiento del modo cifrado
SDCCH	→		Indicación del número deseado
SDCCH	←		Procedimiento de llamada. Encaminamiento.
SDCCH	←		Asignación de canal de tráfico
FACCH	→		Asignación completa
FACCH	←		Indicación de llamada, si el usuario no está ocupado
FACCH	←		Conexión. El usuario llamado acepta la llamada
FACCH	→		Reconocimiento de conexión. Llamada activa
TCH	↔		Intercambio de información de voz

Figura 2.56. Tareas y canales lógicos utilizados en el protocolo de establecimiento de llamada originada en un móvil.

Las primeras tareas en este protocolo son similares a las efectuadas en la actualización de la localización. En efecto, en primer lugar el móvil solicita un SDCCH mediante el envío de un RACH y la estación base se lo concede a través de un AGCH. A continuación tiene lugar un proceso de autenticación y se solicita de transmisión en modo cifrado a través del canal SDCCH.

A partir de este momento aparecen una serie de procedimientos particulares de este protocolo. El móvil que llama indica el número MSISDN o ISDN con el que desea contactar y la red procede al encaminamiento de la llamada. Cuando la red confirma que la llamada es viable se concede al móvil que llama un canal de tráfico TCH. En este instante deja de emplearse el canal dedicado SDCCH. Sin embargo, todavía es necesario el intercambio de cierta información de señalización y control. Este intercambio se lleva a cabo mediante el canal SACCH o FACCH según la premura del protocolo. Como todavía no se está efectuando un intercambio de tráfico de voz no se puede decir que los SACCH o FACCH estén robando tramas de tráfico TCH aunque ocupen la ranura asignada al TCH asignado. La primera tarea del SACCH o FACCH es la de confirmar que el móvil ha tomado la ranura del TCH asignado. A continuación, la red indica al móvil llamante que el teléfono de destino está emitiendo el tono de llamada y el momento en el que el teléfono llamado descuelga. La última tarea del FACCH es indicar que el móvil llamante reconoce la conexión. A partir de este reconocimiento se procede al intercambio de información de voz a través del TCH.

En la Figura 2.37 se muestran las tareas llevadas a cabo en el protocolo de establecimiento de llamada dirigida al móvil. Los canales y procedimientos seguidos en este protocolo son similares a los del protocolo del móvil llamante. Una de las diferencias entre ambos protocolos radica en que este protocolo comienza con la detección de un PCH por el móvil llamado. Todos los móviles de la LA leen el PCH pero este canal solo contiene información de llamada para uno de los móviles. El móvil

llamado responde con un RACH para solicitar un SDCCH. Como siempre la red concede el SDCCH mediante un AGCH. El intercambio de información a través del SDCCH es igual al del protocolo de llamada originada excepto en que ahora se recibe información sobre la llamada entrante.

Canal Lógico	Móvil · Base	Comentarios
PCH	←	Búsqueda del Móvil
RACH	→	Solicitud de Canal dedicado
AGCH	←	Asignación de Canal dedicado
SDCCH	→	Respuesta a la búsqueda.
SDCCH	←	Solicitud de Autenticación
SDCCH	→	Respuesta de Autenticación
SDCCH	←	Solicitud de transmitir en modo cifrado
SDCCH	→	Reconocimiento del modo cifrado
SDCCH	←	Información sobre la llamada entrante
SDCCH	→	Confirmación
SDCCH	←	Asignación de canal de tráfico
FACCH	→	Reconocimiento. Asignación completa
FACCH	→	El timbre suena. Indicación de llamada al abonado que llama
FACCH	→	El usuario descuelga. Conexión
FACCH	←	Reconocimiento de conexión. Llamada activa
TCH	↔	Intercambio de información de voz

Figura 2.57. Tareas y canales lógicos utilizados en el protocolo de establecimiento de llamada dirigida a un móvil

Después del SDCCH se utiliza el FACCH de igual manera que en el protocolo anterior. La única diferencia estriba en que ahora el aviso de tono de llamada y de operación de descolgado se envía en lugar de ser recibida. Cuando se reconoce la conexión por parte de la red empieza el intercambio de información de voz a través del TCH asignado.

2.8 Sistemas para mejora de GSM: evolución de GSM.

Tal como se explicó en el apartado 2.1 el sistema GSM ha tenido un gran éxito en todo el mundo. En la Figura 2.1 se puede observar el enorme crecimiento que ha tenido el número de usuarios de GSM. Este crecimiento vino acompañado de una demanda de servicios añadidos y especialmente de un deseo de mayores tasas de transmisión en los servicios de datos. En el estándar GSM inicial la tasa máxima de transmisión de datos tanto en el enlace ascendente como en el descendente era de 9.6 Kbps. Esta tasa era suficiente para la demanda existente a principios de los años 90. Sin embargo, a finales de esa misma década muchos usuarios ya disfrutaban de acceso a redes de datos (internet) a través de la línea telefónica fija que permitían velocidades mucho mayores. Esos usuarios empezaron a desear servicios de datos similares a los que disfrutaban con su línea telefónica fija. El servicio de llamadas y de datos a baja velocidad en GSM se había convertido en algo habitual y era necesario aumentar, como mínimo, la tasa de

transmisión de datos. Para ello, a partir de la fase 2+ se aplicaron una serie de innovaciones que pasamos a describir en los apartados siguientes.

2.8.1 “High Speed Circuit Switched Data” (HSCSD).

El sistema HSCSD fue el primer sistema de mejora en GSM. Comenzó a operar a finales de los años 90 y poseía dos innovaciones clave:

- 1) Mejora el régimen binario de cada canal físico desde los 9.6 Kbps mencionados hasta una nueva tasa de 14.4 Kbps. Este incremento se produce gracias a una modificación en la codificación de canal.
- 2) Permite la agrupación de varios canales físicos en un único canal lógico asociado a un usuario. Es decir, desaparece la limitación de una única ranura temporal por usuario. Ahora un usuario puede utilizar teóricamente hasta 8 ranuras temporales para alcanzar una tasa de transmisión o de recepción máxima de 115 Kbps. No obstante, debido a que una conexión HSCSD solo puede ocupar un circuito de tasa de 64 Kbps en el interfaz A [GSM_CDMAOne and 3G], la tasa máxima es de 38.4 Kbps (4 x 9.6 Kbps) o de 57.6 Kbps (4 x 14.4 Kbps) [GSM/ EDGE Evolution and Performance]. Además, esta limitación viene impuesta por las características de la técnica de acceso. Si un móvil ocupase más de 4 ranuras debería poder transmitir y recibir al mismo tiempo. En principio los móviles GSM carecían de esta capacidad. Para que las MS pudieran ocupar más de 4 ranuras se desarrollaron los móviles de tipo 2 que sí pueden transmitir y recibir simultáneamente. Las ranuras ocupadas por un usuario deben ser consecutivas y pertenecer a la misma frecuencia portadora, al mismo radiocanal. Si se aplica la técnica de salto en frecuencia todos los TCH/F asignados utilizan la misma secuencia de salto. Todos los TCH/F también emplean la misma secuencia de entrenamiento para equalizar el canal. Si embargo, cada canal TCH/F mide su propio nivel de potencia recibida y su índice de calidad del enlace.

La asignación de varios canales físicos a un usuario se lleva a cabo de forma flexible, de modo que existe la posibilidad de elegir tanto esquemas simétricos como asimétricos, dependiendo de las necesidades de la aplicación. Un esquema simétrico, como por ejemplo uno del tipo 2+2 como el de la Figura 2.38, es adecuado para una videoconferencia en ambos sentidos. En cambio, un esquema asimétrico como uno del tipo 3+1 es apropiado para una comunicación de video en un sentido y voz en el otro sentido (ver Figura 2.38). En HSCSD se permiten incluso esquemas unidireccionales en contraposición a las anteriores que eran bidireccionales. En una comunicación unidireccional se utilizan una serie de canales físicos en un sentido y ningún canal en el otro sentido. Un ejemplo de este tipo de esquema sería una agrupación de canales 4+0. Son comunicaciones apropiadas para, por ejemplo, la lectura o envío de un gran fichero.

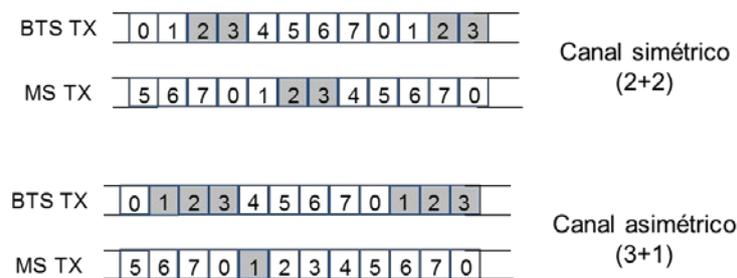


Figura 2.58. Canales simétricos y asimétricos en HSCSD

En la Tabla 2.6 se muestran las distintas combinaciones permitidas a los móviles de tipo 1 (aquellos que no pueden transmitir y recibir al mismo tiempo ya que no poseen duplexor) [GSM_CDMAOne and 3G]. Las columnas segunda y tercera indican el número máximo de ranuras que pueden ser empleadas en cada enlace. La columna Suma indica la cantidad total de ranuras que pueden ser empleadas en la comunicación. Por ejemplo, en la clase multiranura 12 se pueden utilizar en total 5 ranuras. Lo que significa que si la estación móvil recibe a lo largo de 3 ranuras, operación permitida ya que para esa clase el número máximo en el enlace descendente es de 4 ranuras, entonces solo podrá transmitir como máximo con 2 ranuras, operación también permitida ya que el número máximo en el enlace ascendente es de 4 ranuras.

Clase Multiranura	Número máximo de ranuras		
	Recepción	Transmisión	Suma
1	1	1	2
2	2	1	3
3	2	2	3
4	3	1	4
5	2	2	4
6	3	2	4
7	3	3	4
8	4	1	5
9	3	2	5
10	4	2	5
11	4	3	5
12	4	4	5

Tabla 2.7. Clases multiranura de las estaciones móviles de tipo 1 [GSM_CDMAOne and 3G].

A pesar de la flexibilidad alcanzada con la agrupación de canales hay que indicar que HSCSD es un sistema de conmutación de circuitos (“switched circuit”). La asignación de canales puede ser cambiada a lo largo de la llamada, pero siempre existe al menos algún TCH/F asignado en algún sentido de la comunicación haya o no datos que enviar en un determinado momento. Por esta razón, este sistema era apropiado para aplicaciones de datos en los que se requiere un régimen binario constante y un retardo de acceso mínimo.

En HSCSD, durante el establecimiento de la llamada el usuario especifica el número máximo de canales TCH/F que desea, las codificaciones soportadas y el régimen binario soportado. Durante la llamada es posible reconfigurar el número de canales asignados y la codificación empleada de acuerdo a un protocolo de reconfiguración [Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II].

Obviamente, no todo son ventajas en el sistema HSCSD. La asignación de recursos en la célula se complica:

- 1) El “handover” es mucho más complejo ya que en la nueva célula hay que comprobar si existe un número suficiente de ranuras temporales para mantener el nivel de calidad de servicio para el usuario que cambia de célula. De hecho, el cambio de célula puede implicar una degradación en la calidad de ese servicio.
- 2) La probabilidad de bloqueo para un usuario que demanda un servicio puede aumentar si no se incrementan el número de frecuencias en la célula.
- 3) Aumenta la variabilidad del tráfico ofrecido desde los usuarios a la red. El tráfico puede cambiar de un instante a otro en mucha mayor medida que antes.

Además, el tráfico ofrecido en una célula puede ser muy distinto al tráfico de una célula vecina.

2.8.2 “General Packet Radio Service” (GPRS).

Como se ha explicado en el apartado anterior HSCSD supuso una mejora en GSM para tratar de ofertar un servicio adecuado a las nuevas aplicaciones de datos. Sin embargo, solo era adecuado para aplicaciones de datos en las que el régimen binario fura constante. Muchas aplicaciones de datos generan un tráfico intermitente, compuesto por ráfagas de datos seguidas por periodos de inactividad. Una conexión de conmutación de circuitos no es apropiada para este tipo de aplicaciones ya que no permite un uso eficiente de los recursos radio. Incluso con un canal lógico unidireccional en HSCSD se reservan y se ocupan recursos que son infrautilizados durante los periodos de inactividad. Por lo tanto, para aprovechar los escasos recursos del interfaz radio había que cambiar la conexión desde una basada en conmutación de circuitos a una basada en la conmutación de paquetes. De esta manera, durante los periodos de inactividad los recursos radio pueden ser empleados por otros usuarios u otras aplicaciones. Por tanto, el sistema GPRS es apropiado para todas aquellas aplicaciones de datos en las que [Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II]:

- 1) Exista un tráfico intermitente, es decir, transmisiones consistentes en ráfagas de información. En una ráfaga de información el tiempo transcurrido entre dos ráfagas es mucho mayor que el tiempo empleado para transmitir la información de la ráfaga.
- 2) Existan transmisiones frecuentes de pequeñas cantidades de información. Se parece a una transmisión de ráfagas, aunque en una ráfaga la cantidad de información es mayor.
- 3) Existan transmisiones poco frecuentes de gran cantidad de información.

El sistema GPRS ofrecía dos tipos de conexión basada en conmutación de circuitos: las conexiones punto a punto y las conexiones punto a multipunto. Entre las aplicaciones punto a punto cabe destacar las de acceso a páginas web, lectura de correo electrónico, sesiones de ftp y servicios de telemetría. Ejemplos de conexiones punto a multipunto son todas aquellas en las que se difunde información para muchos usuarios como información de tiempo, del tráfico, etc.

Para poder ofrecer conmutación de paquetes no es necesario el cambio en el interfaz radio, al igual que en el cambio a HSCSD. Sin embargo, sí es necesario cambiar la red fija enrutamiento para poder gestionar los paquetes de datos. La red original GSM o la nueva GSM/HSCSD tan solo podían gestionar comunicaciones de circuitos conmutados. Por lo tanto, para poner en funcionamiento GPRS fue necesario añadir una serie de nuevos nodos de gestión de paquetes tal como se aprecia en la Figura 2.39. Estos nuevos nodos no sustituyen a los antiguos de GSM, sino que coexisten con ellos. De esta forma, el servicio de telefonía básica conmutada de GSM y los servicios de datos conmutados siguieron existiendo al mismo tiempo que se ofrecían nuevos servicios de paquetes conmutados. Los nuevos nodos mostrados en la Figura 2.39 son [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) PCU: “Packet Control Unit”. Tiene a su cargo el tratamiento (“handing”) de los paquetes de datos y de señalización. Realiza la inserción y extracción de tramas entre los enlaces A-bis asociados a los canales físicos de paquetes de datos. También control la asignación de recursos radio y efectúa tareas de control de flujo y retransmisiones de paquetes. Estas tareas tienen como objetivo el de asegurar la calidad de servicio negociada. Por último, en cooperación con el

BSC realiza las tareas de capa física como el control de potencia y el ajuste del avance temporal (“timing advance”).

- 2) SGSN: “Serving GPRS Support Node”. Realiza diversas funciones. Llevan a cabo la gestión de la movilidad y de la autenticación, por ello se conectan con el MSC, el HLR y el VLR. Gestiona las sesiones de datos. Esta gestión comprende varias tareas como la de encaminar los paquetes hacia el GGSN mediante la creación de un túnel, la solicitud de direcciones IP y la creación de enlaces lógicos temporales con las MS. También se encarga del transporte de los paquetes de datos hacia y desde la BTS/PCU y del cifrado y compresión de los datos de usuario.
- 3) GGSN: “Gateway GPRS Support Node”. Es la pasarela a las redes de datos como Internet o X/25. Realiza la asignación de direcciones IP a los móviles por sí mismo o con ayuda de un servidor DHCP. También genera los registros de tarificación. En general, se encarga de todas las tareas para hacer transparente a la red GPRS respecto a las redes de datos externas.
- 4) GPRS “Backbone”. Es una red de interconexión de los nodos y elementos de la red GPRS basada en conexiones IP.

Aunque pueda parecer una inversión excesiva para proveer nuevos servicios, hay que tener en cuenta que GPRS conservaba toda la estructura de interfaz radio intacta. No se cambiaron las estaciones base ni hubo que realizar estudios de planificación. Además, para los usuarios GPRS supuso un cambio ventajoso en la tarificación de los servicios de datos. En GSM o GSM/HSCSD cuando se accedía a una conexión de datos se pagaba por todo la duración de la conexión, se utilizase o no. Con GPRS solo se pagaba por el volumen de información transmitida y recibida. Gracias a que GPRS no ocupa los recursos radio durante los periodos de inactividad, estos no se facturan. Estas razones, convirtieron a GPRS en un éxito.

En una conexión de paquetes es necesario definir la calidad de servicio de la conexión (QoS). En GPRS se especifican hasta 4 niveles de calidad de servicio. Los tres primeros son de tipo predictivo, es decir, se puede asegurar un cierto valor medio para el tiempo de acceso y un retardo máximo para un tanto por ciento de las veces. El cuarto nivel no es predictivo ya que no se garantiza una cierta calidad (“best effort”). En este nivel no se garantiza un valor mínimo de tiempo de acceso, aunque siempre se intenta que dadas las condiciones de cana radio y de la red, sea el mínimo posible.

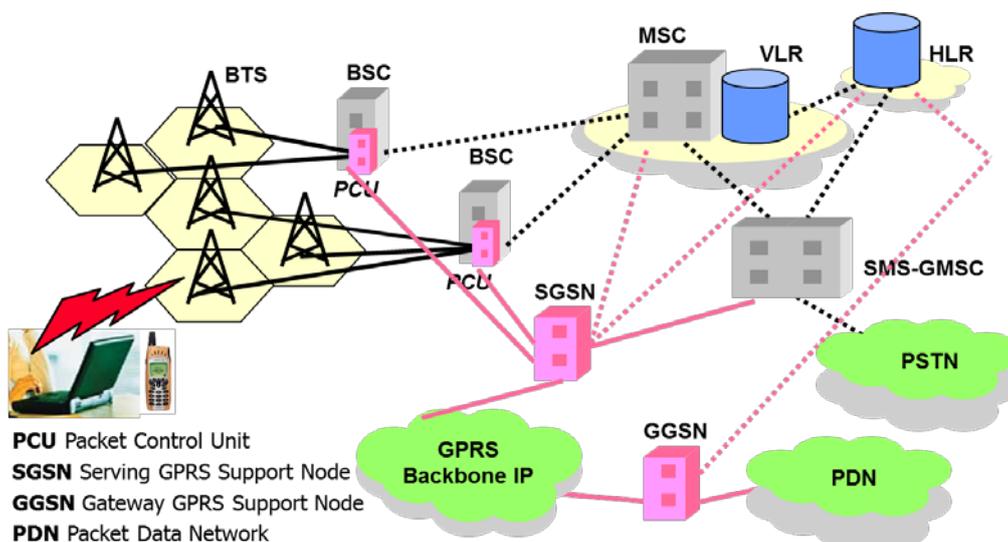


Figura 2.59. Red GPRS sobre la red GSM [GSM, cdmaOne and 3G Systems].

GPRS también incorpora las innovaciones de HSCSD. De hecho, permite el aumento en cada canal físico hasta un máximo de 20 Kbps en el caso de no emplear ningún código de corrección de errores FEC. También se pueden emplear la codificación de canal de HSCSD lo que permite alcanzar una tasa de transmisión de 14.4 Kbps [GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G-UMTS]. GPRS también posibilita la agrupación de varios canales físicos mediante la técnica multiranura. En este caso, un usuario puede tomar las 8 ranuras de un radiocanal, siempre que sea un móvil tipo 2. En este caso si además utiliza la máxima tasa de transmisión se pueden alcanzar velocidades teóricas de en torno a 170 Kbps.

Como se ha mencionado, GPRS utiliza los mismos canales físicos de GSM o GSM/HSCSD. A los canales físicos en GPRS se les llamó Canales de Datos de Paquetes (PDCH, "Packet Data Channel"). No obstante, la necesidad de tratar con paquetes de datos en lugar de establecer circuitos conmutados obligó a los diseñadores de GRPS a crear nuevos canales lógicos. Este nuevo conjunto de canales lógicos al igual que los de GSM se divide en canales de difusión, de control común y canales dedicados [GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G-UMTS].

Existe un único canal de difusión:

- 1) PBCCH, "Packet Broadcast Control Channel": es empleado para que la red difunda información del sistema específica sobre los canales de paquetes de datos. Puede ocupar uno o varios canales físicos según una regla predefinida, de igual modo en el BCCH de GSM.

Los Canales de Control Común de Paquetes (PCCCH, "Packet Common Control Channel") son:

- 1) PRACH, "Packet Random Access Channel": es empleado por la estación móvil para iniciar un envío de datos o de información de señalización en el sentido ascendente.
- 2) PPCH, "Packet Paging Channel": es empleado por la red para buscar a una MS con el objetivo de transferirle paquetes de datos.
- 3) PAGCH, "Packet Access Grant Channel": es utilizado durante el establecimiento de una transferencia de paquetes de datos para enviar a la MS los recursos físicos que se van a ocupar para llevar a cabo esa transferencia.
- 4) PNCH, "Packet Notification Channel": es usado por la red para enviar una notificación a un grupo de estaciones móviles antes de la transferencia de paquetes de tipo multipunto PTM-M ("point to multi-point-multicast packet transfer").

Cada uno de estos canales de control común pueden ocupar uno o varios canales físicos PDCH según una regla predefinida al igual que ocurría en GSM con sus homólogos. La MS obtiene a partir de información contenida en el PBCCH o en el BCCH qué canales físicos ocupan estos canales lógicos.

Existe un único canal de tráfico de paquetes:

- 1) PDTCH, "Packet Data Traffic Channel": es utilizado para las comunicaciones de datos en forma de paquetes. Es dedicado temporalmente a un usuario o conjunto de usuarios. Si se utiliza la técnica multiranura, una MS puede ocupar múltiples PDTCHs. Este canal lógico se divide en dos canales unidireccionales, el PDTCH/U para el enlace ascendente y el PDTCH/D para el enlace descendente. Cada PDTCH ocupa un único canal físico PDCH, si se emplea la técnica multiranura entonces una MS puede utilizar hasta 8 PDTCHs.

Los Canales Dedicados de Control de Paquetes son:

- 1) PACCH, "Packet Associated Control Channel": se emplea para el envío de información relacionada con una MS específica. Es un canal bidireccional. La

información de señalización que contiene es variada, así se emplea para tareas diversas como la comunicación de la asignación de recursos o para el acuse de recibo de información de control de potencia. El PACCH ocupa los mismos canales físicos que los PDTCHs a los que está asociado. No obstante, se envía también en el canal físico que porta a los PCCCH cuando la MS es sondeada para que responda a un mensaje inicial de asignación de recursos.

- 2) PTCCH/U, “Packet Timing Advance Control Channel Uplink”: se usa para transmitir ráfagas de acceso aleatorio con el objetivo de de estimar el avance temporal para una MS que se encuentre en el modo de transferencia de paquetes.
- 3) PTCCH/D, “Packet Timing Advance Control Channel Downlink”: se emplea para transmitir a varias MS la actualización de su avance temporal (cada una posee uno propio). Un PTCCH/D se empareja con varios PTCCH/Us. Los PTCCH/U y PTCCH/D ocupan uno o varios canales físicos según una regla predefinida.

2.8.3 “Adaptive Multi Rate” (AMR).

Los sistemas anteriores hicieron todavía más atractivo el sistema GSM. De este modo, el número de usuarios siguió creciendo tanto por las nuevas altas como por la fidelidad de los clientes de GSM que demandaban nuevos servicios de datos y que no migraron al nuevo sistema 3G UMTS. Este aumento de usuarios unido a la técnica multirranura, que incrementa la cantidad de recursos radio necesarios para cubrir la demanda, obligó a buscar soluciones para aprovechar el limitado ancho de banda de GSM. Aunque es cierto que las bandas originales de GSM fueron ampliadas con la banda extendida (E-GSM) y más tarde con la banda de 1800 MHz, esta adición fue insuficiente para cubrir toda la demanda. Por lo tanto, de modo paralelo al desarrollo de HSCSD y GPRS se generaron nuevas técnicas para aprovechar los recursos limitados de GSM.

La primera de estas técnicas es la conocida como “Adaptive Multi Rate” (ARM) o Multi-ratio adaptativo. Esta técnica no consiste en otra cosa que en el empleo de los canales TCH/HS de voz, es decir, de los canales “Half-rate”. Estos canales de voz requieren una ranura cada dos tramas. Si todos los canales de voz en una célula son HS, la capacidad de la célula se doblaría. Este aumento de capacidad se consigue a cambio de una degradación en la calidad del sonido escuchado. Los usuarios notan de modo subjetivo que la calidad empeora. La calidad de la voz también se degrada si empeoran las condiciones del canal radio, por tanto, los canales HS son más sensibles que los canales FS ante un empeoramiento en el canal. Por lo tanto, un canal HS solo puede ser empleado si se dan unas condiciones mínimas de calidad en el enlace radio. La técnica AMR gestiona de forma adaptativa el uso de los canales de voz de un tipo u otro. Mide las condiciones del canal radio y decide si se debe utilizar un canal FS o uno de tipo HS. En la Tabla 2.7 se muestra de forma sencilla las relaciones entre las condiciones del canal y la demanda de los usuarios para decidir qué canales de voz de deben usar.

	Poco tráfico	Mucho tráfico
Buen canal radio	HS/FS	HR
Mal canal radio	FS	FR/HR

Tabla 2.8. Decisiones en AMR [Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II].

Si hay poca demanda, es decir, poco tráfico, la primera opción será la de emplear un canal HS ya que este canal proporciona una calidad sonora mayor. Solo en el caso de que las condiciones del canal sean buenas o muy buenas se podrá emplear el canal HS. Si hay mucha demanda, la primera opción será la de usar un canal FS ya que así se podrá dar servicio a todos los usuarios. No obstante, si las condiciones del canal empeoran, entonces se deberán emplear canales FS ya que son los únicos capaces de alcanzar en esas condiciones una calidad aceptable.

Además de los canales HS, AMR incorporó, tanto para los canales HS como para los FS, nuevos tipos de codificación de canal. Estas codificaciones reducen la redundancia introducida y por tanto aprovechan mejor los recursos. De nuevo, el uso de unas codificaciones u otras depende de la calidad del canal radio. Ante un canal adverso se emplean las codificaciones que introducen más redundancia mientras que si el canal mejora se pueden usar las codificaciones con menos redundancia.

Como los cambios de tipo y de canal y de codificación dependen del canal es necesario estimar rápidamente las condiciones del canal. Si la estimación tarda más de lo necesario, entonces se tomará una decisión de cambio cuando no sea necesaria o cuando sea demasiado tarde. En general, los cambios de codificación para un mismo tipo de canal poseen una frecuencia de varios por segundo, los cambios de canal HS o FS tienen una frecuencia de uno cada varios segundos. Esta diferencia en la frecuencia se debe a que los cambios de canal implican una modificación en los recursos asignados al móvil [Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II].

2.8.4 “Enhanced Data Rates for GSM Evolution” (EDGE).

Si la técnica AMR se basa en el cambio en la codificación de canal y de voz, el sistema EDGE trata de mejorar el régimen binario de los canales físicos. Para que el sistema EDGE fuera compatible con GSM y sus sistemas de mejora, HSCSD y GPRS, no se cambió ni el ancho de banda de cada radiocanal (200 KHz), ni la estructura de la trama, ni la duración de cada ranura (577 μ s). El aumento del régimen binario fue posible gracias a un cambio en la modulación. En lugar de emplear la GMSK de GSM original se empleó una modulación 8-PSK. Esta modulación proporciona tres bits de información por símbolo en lugar del único bit por símbolo de la GMSK. Como la frecuencia de GSM de 271 ksímbolos/s se mantuvo, la utilización de la nueva modulación condujo a un aumento de la tasa de transmisión bruta desde los 22.8 Kbps hasta los 68.4 Kbps para cada ranura temporal [GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G-UMTS]. Con EDGE cada ranura contiene una carga de 342 bits en lugar de los 114 bits correspondientes a GSM. Del mismo modo que en la técnica AMR, el precio a pagar por el incremento en la tasa de transmisión consiste en una mayor sensibilidad al ruido y a las condiciones adversas del canal radio. Como se observa en la Figura 2.40 cuantos más niveles contiene una modulación más energía de bit de necesita para lograr un umbral mínimo de error de bit (BER). Otra desventaja radica en que es necesario emplear amplificadores altamente lineales ya que las modulaciones multinivel son menos robustas frente a las no lineales [Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II].

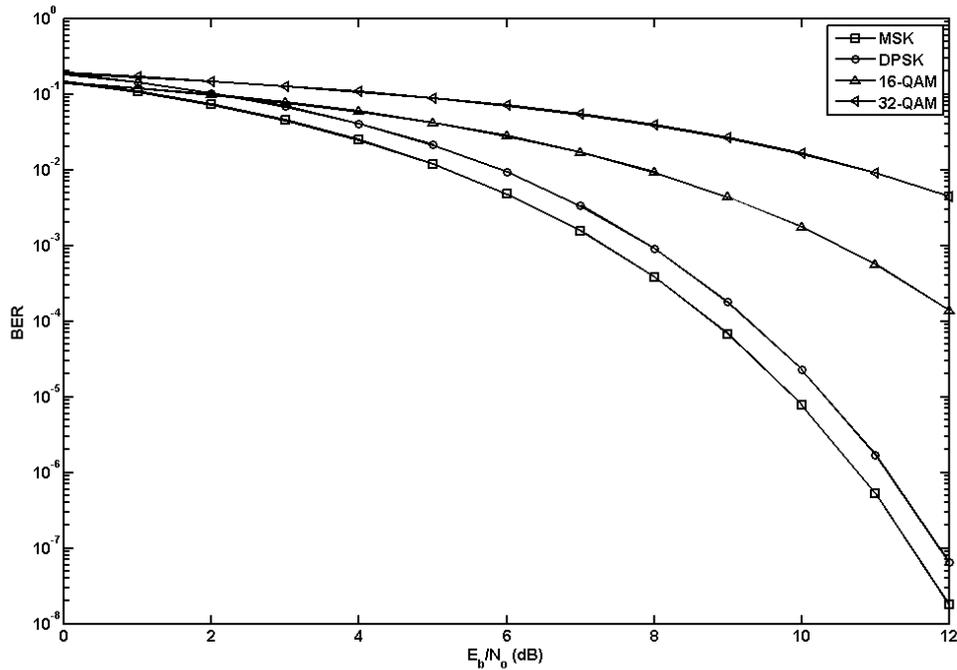


Figura 2.60. Ratio de error de bit (BER) para diferentes modulaciones multinivel.

Para solventar los problemas de la nueva modulación frente a la variabilidad del canal radio se aplicó un esquema de variación adaptativo como el de AMR. Ahora, se miden las condiciones del canal y solo si son favorables se emplea la nueva modulación. El problema de esta solución descansa en que el receptor debe ser capaz de reconocer la modulación de la señal que está recibiendo. La identificación de la modulación se lleva a cabo mediante dos mecanismos: una identificación ciega en la que no media ningún dato transmitido y la decodificación de un campo de la cabecera RLC/MAC que contiene información sobre el esquema de cambio de modulación y de código. La identificación ciega se basa en la detección de la rotación de fase que es diferente en 8-PSK y GMSK. En la secuencia de entrenamiento de la modulación GMSK la rotación de fase de un símbolo a otro es de $\pi/2$ mientras que en la secuencia de la 8-PSK es de $3\pi/8$ [GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G-UMTS].

EDGE supuso un gran avance en la evolución del sistema GSM. La combinación de EDGE con HSCSD dio lugar al sistema ECSD ("Enhanced Circuit-Switched Data). En este sistema la tasa máxima de transmisión se mantuvo en los 64 Kbps pero ahora cada ranura podía transportar el triple de bits. Así, un usuario podía llegar a la tasa de transmisión máxima sin recurrir a 4 ranuras lo que liberaba ranuras para otros usuarios. EDGE también se utilizó conjuntamente con GPRS dando lugar al sistema conocido como EGRPS. En este caso, como los móviles empleados eran de tipo 2 y no existía la limitación de 64 Kbps en el enlace A-bis, se pudo alcanzar la tasa máxima de 473 Kbps en el caso de un usuario al que se le otorgasen las 8 ranuras.

Glosario de GSM

- AB** “(Random) Access Burst
- ACCH** “Associated Control Channel”
- AGCH** “Access Grant Channel”
- AMR** “Adaptive Multi-Rate”
- ARFCN** “Absolute Radio Frequency Number”
- AUC** “Authentication Center”
- BCCH** “Broadcast Control Channel”
- BCH** “Broadcast Channel”
- BN** “Bit Number”
- BSC** “Base Station Controller”
- BSIC** “Base Station Identity Code”
- BTS** “Base Transceiver Station”
- CC** “Country Code”
- CCCH** “Common Control Channel”
- CI** “Cell Identity”
- DB** “Dummy Burst”
- DTX** “Discontinuous Transmission”
- E-GSM:** “Extended GSM”
- EDGE** “Enhanced Data Rates for GSM Evolution”
- EIR** “Equipment Identity Register”
- ETSI** “European Telecommunications Standards Institute”
- FACCH** “Fast Associated Control Channel”

- FB** “Frequency Correction Burst”
- FCCH** “Frequency Correction Channel”
- FDMA** “Frequency Division Multiple Access”
- GGSN** “Gateway GPRS Support Node”
- GMSC** “Gateway MSC”
- GMSK** “Gaussian Minimum Shift Keying”
- GPRS** “Gaussian Minimum Shift Keying”
- GSM** “General Packet Radio Service”
- HLR** “Home location Register”
- HSCSD** “High Speed Circuit Switched Data”
- IMEI** “International Mobile Equipment Identity”
- IMSI** “International Mobile Subscriber Identity”
- LA** “Location Area”
- LAC** “Location Area Code”
- LAI** “Location Area Identity”
- MS** “Mobile Station”
- MCC** “Mobile Country Code”
- MNC** “Mobile Network Code”
- MS** “Mobile Station”
- MSC** “Mobile Switching Center”
- MSK** “Minimum Shift Keying”
- MSIN** “Mobile Subscriber Identification Number”
- MSISDN** “Mobile Station International ISDN”
- NB** “Normal Burst”
- NDC** “National Country Code”

O16QAM “Offset 16-Quadrature Amplitude Modulation”

OMC “Operation and Maintenance Center”

PACCH “Packet Associated Control Channel”

PAGCH “Packet Access Grant Channel”

PBCCH “Packet Broadcast Control Channel”

PCU “Packet Control Unit”

PDCH “Packet Data Channel”

PDTCH “Packet Data Traffic Channel”

PNCH “Packet Notification Channel”

PPCH “Packet Paging Channel”

PRACH “Packet Random Access Channel”

PSK “Phase Shift Keying”

PSTN “Public Switch Telephone Network”

PTCCH “Packet Timing Advance Control Channel”

QN “Quarter Bit Number”

RACH “Random Access Channel”

RFN “Reduced Frame Number”

SACCH “Slow Associated Control Channel”

SB “Synchronization Burst”

SCH “Synchronization Channel”

SDCCH “Stand Alone Control Channel”

SGSN “Serving GPRS Support Node”

SN “Subscriber Number”

SIM “Subscriber Identity Module”

SMS “Short Message Service”

TA “Timing Advance”

TCH “Traffic Channel”

TDMA “Time Division Multiple Access”

TMSI “Temporary Mobile Subscriber Identity”

TN “Time slot Number”

VAD “Voice Activity Detection”

VLR “Visitor Location Register”

Bibliografía

[GSM and Personal Communications] Redl, Sigmund M., Weber Matthias K., Oliphant Malcolm W., *GSM and Personal Communications*, Artech House, 1998, ISBN 0-890006-957-3.

[GSM Switching, Services and Protocols] Eberspächer, J., Vögel H.-J., Bettstetter, C., *GSM Switching, Services and Protocols*, John Wiley and Sons, 2001, ISBN 0-471-49903-X.

[Registro Público de Concesiones de Telecomunicaciones]
<http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/espectro/registro/paginas/index.aspx>.

[GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G-UMTS] Halonen, T., Romero, J., Melero, J., *GSM, GPRS and EDGE Performance, Evolution towards 3G-UMTS*, John Wiley and Sons, 2003, ISBN 0-470-86694-2.

[GSM_CDMAOne and 3G] Steele, R., Lee, Ch-Ch., Gould, P., *GSM, CDMAOne and 3G*, John Wiley and Sons, 2001, ISBN 0 471 49185 3.

[Comunicaciones Móviles 01] Cardona Marcet, N., Flores Asenjo, S., Reig Pascual, J., Rubio Arjona, L., Fraile Muñoz, R., *Comunicaciones Móviles*, SPUPV, 97.090.

[Sistemas de Telefonía Móvil Digital, Tomo II] Coordinación: Cardona Marcet, *Sistemas de Telefonía Móvil Digital*, UPU-UPV, 2000.2071.

[GSM/ EDGE Evolution and Performance] Säily, M., Sébire, G., Riddington, E., *GSM/ EDGE Evolution and Performance*, John Wiley and Sons, 2011, ISBN 9780470746851.

[Digital Mobile Communications and the TETRA System] Dunlop, J., Demessie, G., James, I., *Digital Mobile Communications and the TETRA System*, John Wiley and Sons, 2000, ISBN 0-471-98792-1.

[Comunicaciones Móviles 02] Hernando Rábanos, J. M., *Comunicaciones Móviles*, Centro de Estudios Ramón Areces, 2004, ISBN 9788480046350.

Capítulo 3. El Sistema TETRA.

3.1 Introducción.

El sistema TETRA es un estándar creado por la ETSI para Redes Móviles Privadas de Acceso Público (PAMR según las siglas inglesas) y orientado a servicios de seguridad y emergencia públicos. Sus siglas provienen de “Terrestrial Trunked Radio”. La propuesta de creación de TETRA tuvo lugar en 1989 cuando la ETSI se plantó la necesidad de crear un estándar de PMR para servicios de seguridad europeo que superase a los sistemas nacionales de seguridad de primera generación. Esta propuesta se enmarcaba dentro de las iniciativas para crear sistemas de comunicaciones móviles europeos en todos los ámbitos, como el sistema GSM, que ya estaba cerca del comienzo de sus operaciones a finales de los ochenta. A principios de los años noventa el estándar ya estaba definido. Aunque existen diferencias entre GSM, que es un sistema de comunicaciones móviles propiamente y TETRA, que es una PAMR, existen entre ellos numerosas semejanzas debido a su común origen europeo. Entre las similitudes tecnológicas entre ambos sistemas podemos citar la utilización de una trama TDMA, la división celular, el ajuste de la temporización, la codificación convolucional con entrelazado, el control de potencia, etc.

El sistema TETRA comenzó sus operaciones algo más tarde que el sistema GSM. Un hecho fundamental para que TETRA pudiese empezar a operar ocurrió en 1995 cuando la OTAN entregó una serie de bandas de frecuencia que ya no necesitaba a las agencias de seguridad pública en Europa. Estas nuevas frecuencias correspondían a las bandas de 380-400 MHz y eran aptas para la implantación del sistema TETRA. Gracias a estas bandas aparecieron en 1997 las primeras redes TETRA. Desde entonces se han implantado redes TETRA para servicios de seguridad en muchos países, no sólo europeos. Además, no solo se ha empleado como PAMR en servicios de seguridad y emergencia sino que también se ha aplicado en servicios de transporte y distribución como una PMR tradicional. En el apartado 3.8 mostraremos algunos ejemplos de redes TETRA operativas en diferentes países.

TETRA es un sistema PAMR de segunda generación por lo que la señal de voz es digitalizada. También permite la transmisión de datos digitales. Gracias a la digitalización supera a los sistemas PMR o PAMR analógicos. Entre sus prestaciones podemos enumerar las siguientes [Comunicaciones Móviles 02]:

- Comunicaciones dúplex de voz y datos o semidúplex de voz junto con datos por el mismo equipo.
- Elevada calidad de la señal de voz en comparación con los sistemas analógicos.
- Seguridad en las comunicaciones.
- Aplicaciones de fax, telemedida y transmisión de video.
- Servicios suplementarios.

- Flexibilidad de configuraciones, desde un sistema monoemplazamiento para una aplicación local hasta redes multiemplazamiento más complejas que son de ámbito regional o nacional.
- Una gama amplia de interfaces y cabeceras para la conexión con redes telefónicas externas como la PSTN o la RDSI.
- Alta velocidad de transmisión de datos. Es elevada si la comparamos con la de otras PAMR o PMR. La velocidad de las primeras versiones de TETRA era similar a la de las primeras versiones de GSM. De la misma forma que en GSM, la velocidad se ha ido incrementando.
- Diseño específico para la transmisión optimizada de datos por paquetes.

Las prestaciones anteriores sirven para desarrollar una serie de servicios que enumeramos a continuación [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Teleservicios: llamadas para conversación en lenguaje claro o cifrado. Las llamadas pueden ser de tres tipos: individual (punto a punto), de grupo (punto a multipunto), de difusión (punto a multipunto, unidireccional).
- 2) Servicios portadores: comunicaciones bidireccionales de datos. Estas comunicaciones pueden ser al igual que las llamadas de tipo individual, de grupo o de difusión. Las comunicaciones de datos poseen diferentes niveles de protección y pueden ser cursadas de dos modos: mediante conmutación de circuitos y de paquetes. Las comunicaciones de conmutación de circuitos se clasifican según la protección en comunicaciones
 - a. Sin protección: 7.2, 14.4, 21.6 y 28.8 Kbps.
 - b. Con protección baja: 4.8, 9.6, 14.4 y 19.2 Kbps.
 - c. Con protección alta: 2.4, 4.8, 7.2 y 9.6 Kbps.

Las comunicaciones de conmutación de paquetes se clasifican en comunicaciones:

- a. Con conexión (circuitos virtuales).
 - b. Sin conexión (datagramas).
- 3) Servicios suplementarios. La variedad es muy amplia, se indican a continuación los más importantes:
 - a. Tipo PMR/PAMR:
 - Prioridad de acceso, emergencia.
 - Autorización de llamadas por el controlador.
 - Selección de área.
 - Escucha ambiente, escucha discreta.
 - Asignación dinámica de grupos.
 - b. Tipo Telefonía:
 - Re-encaminamiento de llamadas.
 - Prohibición de llamadas entrantes/salientes.
 - Llamada en espera.
 - Retención de llamada.
 - Presentación de números en llamada.
 - c. Servicios de seguridad:
 - Autenticación.
 - Confidencialidad e integridad de la comunicación.
 - Privacidad.
 - Monitorización autorizada.

3.2 Estructura de la red de Tetra.

La estructura de una PMR suele ser sencilla, no presenta una jerarquía de niveles en la que los niveles superiores poseen una inteligencia mayor que los niveles inferiores. Generalmente, en una PMR prácticamente todos los elementos de la red pertenecen al mismo nivel jerárquico. Esta situación cambia en cierta medida cuando la PMR tiene que dar servicio a muchos móviles del sistema como ocurre con las PAMR. En ese caso las PMR presentan cierta jerarquía para poder encaminar el tráfico generado por los dispositivos conectados a la red. No obstante, la estructura de la red PMR nunca alcanza el nivel de división jerárquica de un sistema de comunicaciones móviles como GSM o UMTS. Este es el caso del sistema TETRA. Su estructura de red es muy similar a la de GSM pero sin alcanzar el grado de división del sistema de comunicaciones móviles. En la Figura 3.1:

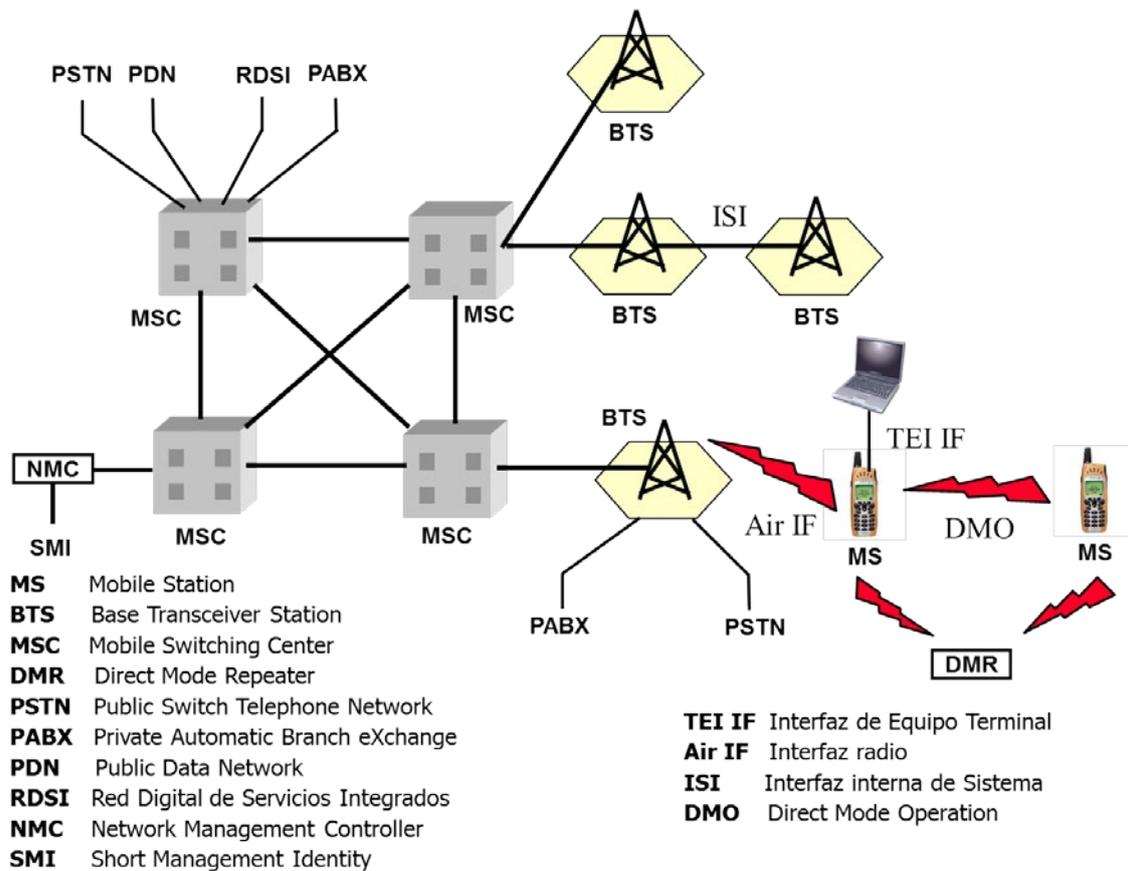


Figura 3.61. Estructura de la red de TETRA.

Las entidades que forman la estructura de una red TETRA son:

- 1) **MSC**: al igual que en GSM se encargan de la conmutación y enrutamiento de las llamadas. En la red TETRA los MSC se pueden conectar en forma de malla. Existe al menos un MSC que puede enlazar con otras redes como la Red Pública de Teléfonos (PSTN) o redes de datos como la PDN o la RDSI. Asimismo, el MSC encargado del enlace con otras redes se puede conectar a una PABX que es una central para gestionar llamadas internas. En TETRA los MSC controlan directamente a las BTS. La estructura de red es por tanto más sencilla que en GSM.
- 2) **BTS**: son las estaciones base. A diferencia de GSM las BTS sí se pueden conectar a redes externas como a la PSTN. También pueden estar conectadas a una PABX. Además, en TETRA existe la posibilidad de interconexión de BTS,

al contrario que en GSM. El interfaz empleado para comunicar dos BTS se denomina ISI. Las BTS se agrupan en zonas que pueden dar cabida hasta 100 estaciones base (áreas de localización). La interconexión de BTS es posible gracias a que el número de usuarios de una PMR o PAMR respecto de un sistema de comunicaciones móviles como GSM es pequeño. La interconexión aumenta la robustez frente a fallos y errores en el sistema ya que si una llamada no puede cursarse a través del MSC podrá hacerlo a través de otra BTS.

- 3) MS: estaciones móviles. Las MS en TETRA son similares a las de GSM con la salvedad de que son capaces de comunicarse directamente entre ellas sin intermediación de las BTS. A este modo se le llama Modo Directo (DMO, "Direct mode Operation"). En el apartado 3.2 se explica con más detalle este modo de funcionamiento y el resto de modos. El interfaz radio empleado por la MS para comunicarse con la BTS o con otra MS se denomina "Air IF". A la MS o al dispositivo que se conecta con la red TETRA se le puede conectar un Equipo Terminal (TEI). La comunicación entre la MS y el TEI tiene lugar a través del interfaz TEI IF.
- 4) DMR: es un dispositivo repetidor de la señal enviada desde una MS hasta otra MS. Este modo de comunicación a través de una DMR se denomina modo "DMO Repeater".
- 5) NMC: es el "Network Management Control" es decir el centro de gestión de red.
- 6) SMI: es el "Short Management Identity", almacena al identidad de los usuarios TETRA. También se le denomina SwMI ("Switching and Management Infrastructure")

La particular estructura de red de TETRA permite tres modalidades de servicios [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Modo V+D (Voz + Datos). Es el modo convencional de operación similar al de GSM. A diferencia de GSM la comunicación de voz puede no sólo dúplex sino también semidúplex y simplex. Al modo V+D también se le denomina como TMO o modo de Operación Troncal. El servicio de datos se lleva a cabo mediante conmutación de circuitos. Las comunicaciones pueden estar o no cifradas. En el caso de estar cifradas se puede elegir la codificación correspondiente. Aunque la comunicación no sea cifrada, los bits de información se transmiten de forma aleatoria de modo que se dificulta la interceptación y decodificación de los bits no cifrados.
- 2) Modo DMO. Es el modo directo propio de una PAMR. Como se observa en la Figura 3.1, consiste en una comunicación directa entre móviles sin que ésta pase por la red (modo "back-to-back"). El modo directo puede emplear la estación repetidora DMR que puede ser fija o puede estar montada en un vehículo ("DMO Repeater"). La comunicación en este modo no es full-dúplex.
- 3) Modo PDO. Es el modo de transmisión de datos mediante conmutación de paquetes de datos optimizados ("Packet Data Optimized"). Este modo permite el establecimiento de servicios como los de mensajería, correo electrónico, localización y gestión del tráfico de vehículos. Este modo también posibilita la transmisión de datos en general a una mayor velocidad que el modo de conmutación de circuitos.

El usuario TETRA está identificado de forma única en todo el dominio TETRA por el menos un TSI ("TETRA Subscriber Identity"). Éste es un número que está

compuesto por 48 bits y tres campos. Uno de estos campos es el número SSI (“Short Subscriber Identity”) que sirve para identificar al usuario dentro de una red TETRA. Los otros dos campos son el MCC que son las siglas de “Mobile Country Code” y el MNC (“Mobile Network Code”). En la Figura 3.2 se observan todos los campos que componen el TSI [TETRA Release 2].

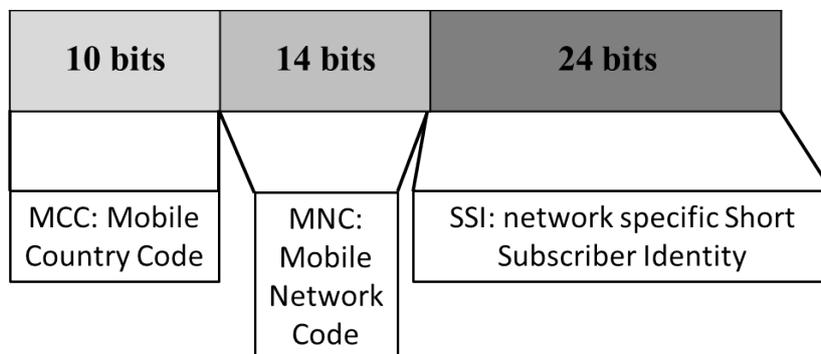


Figura 3.62. Estructura del número de identificación de usuario TSI.

Existen diferentes familias de TSIs. Cada familia contiene un ITSI (“Individual TSI”) y puede poseer un ATSI (“Alias TSI”) y algún GTSI (“Group TSI”). Cada MS contiene al menos una familia de TSIs. El ITSI es el número que identifica al terminal de usuario mientras que el GTSI identifica a varios terminales de usuario. El ATSI se guarda en el SwMI cuando una MS visita otra red. El ATSI también sirve, en la propia red, para llevar a cabo operaciones de red seguras. Las versiones reducidas de los anteriores TSI son respectivamente: el ISSI (“Individual Short Subscriber Identity”), el ASSI (“Alias Short Subscriber Identity”) y el GSSI (“Group Short Subscriber Identity”). También existe un número llamado USSI (“Un-exchanged Short Subscriber Identity”) que es empleado por una MS en otra red hasta que se le asigna un ASSI.

La identidad de usuario se puede transferir desde un equipo a otro, al contrario que la identidad de gestión TMI. El TMI no se puede transferir y además se guarda en una pieza particular del equipo de forma independiente respecto del TSI.

Finalmente, el TEI (“TETRA terminal equipment”) identifica de forma única al equipo TETRA. Contiene los números: “Type Approval Code”, “Final Assembly Code” y “Electronic Serial Number”.

3.3 Nivel físico de Tetra: interfaz radio (canales físicos).

Las bandas de frecuencia del sistema TETRA no están especificadas globalmente sino que dependen en cierta medida de la regulación local. En Europa existe una recomendación sobre las bandas empleadas en el sistema TETRA que se recoge en la Tabla 3.1 [CEPT]:

Enlace Ascendente	Enlace Descendente	Operador Operador original
380-390 MHz	390-400 MHz	Seguridad y emergencias
410-420 MHz	420-430 MHz	Sistemas civiles (aplicaciones comerciales)
450-460 MHz	460-470 MHz	
870-876 MHz	915-921 MHz	Otros

Tabla 3.9. Bandas de frecuencia de TETRA.

Los terminales móviles y estaciones base de TETRA pueden transmitir en las bandas anteriores con unas potencias máximas y mínimas. Al igual que en GSM, la

potencia transmitida permite la división de los terminales y estaciones base en un cierto número de clases. Concretamente, para la estaciones base se han establecido 10 clases de potencia, separadas por intervalos fijos de 2 dB [Comunicaciones Móviles 02]. Sus valores se muestran en la Tabla 3.2.

Clase de potencia	Potencia nominal por portadora	
	W	dBm
1	40	46
2	25	44
3	15	42
4	10	40
5	6,3	38
6	4	36
7	2,5	34
8	1,6	32
9	1	30
10	0,6	28

Tabla 3.10. Valores de potencia de las estaciones base.

Las estaciones móviles solo se dividen en cinco clases de potencia con intervalos de 5 dB, tal como se observa en la Tabla 3.3 [Comunicaciones Móviles 02].

Clase de potencia	Potencia nominal por portadora	
	W	dBm
1	30	45
2	10	40
3	3	35
4	1	30
5	0,3	25

Tabla 3.11. Valores de potencia de las estaciones móviles.

Como en todo sistema de comunicaciones móviles en el que existen varios usuarios dentro de una célula comunicándose con una estación base, es necesario que las MS ajusten su potencia transmitida. Existen dos tipos de control: el control en bucle abierto y en bucle cerrado. En el primer modo, el móvil ajusta su potencia en función del nivel de potencia recibido. No existe realimentación alguna desde la estación base. En el segundo modo, sí se emplea la realimentación ya que la estación móvil ajusta su potencia según las instrucciones recibidas desde la estación base. Estas instrucciones dependen de la calidad de la señal recibida por la estación base en el enlace ascendente. El control de potencia de la estación móvil varía entre los 15 y 45 dBm en pasos de 5 dB [Comunicaciones Móviles 02].

El transmisor se puede encontrar en uno de los tres estados siguientes [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Activo: el transmisor emite ráfagas, incrementa o reduce la potencia o realiza una linealización.
- 2) No activo: es un estado transitorio. Puede ser anterior o posterior a cualquier estado activo.
- 3) Inactivo: se da cuando no existe ninguna transmisión.

En la siguiente figura se muestran los tres estados de transmisión:

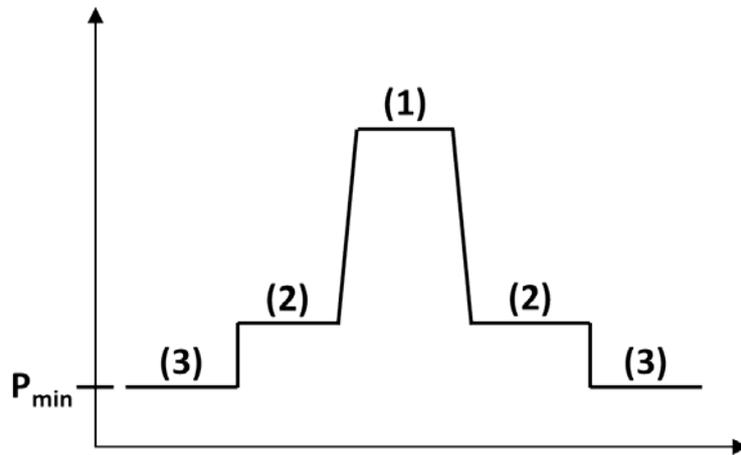


Figura 3.63. Estados de transmisión [Comunicaciones Móviles 02].

En el modo V+D o modo TMO de TETRA se emplea, al igual que en GSM, TDMA como técnica de acceso al medio. Sin embargo, en lugar de 8 ranuras temporales por portadora en TETRA se utilizan 4 ranuras temporales. La técnica de duplexado es FDD, por lo tanto TETRA es un sistema TDMA/FDD en su modo TMO. La separación entre la trama del enlace ascendente y la trama del descendente es de 2 ranuras. En la Figura 3.4 se aprecia la mencionada separación temporal, similar a la de GSM que era de 3 ranuras.

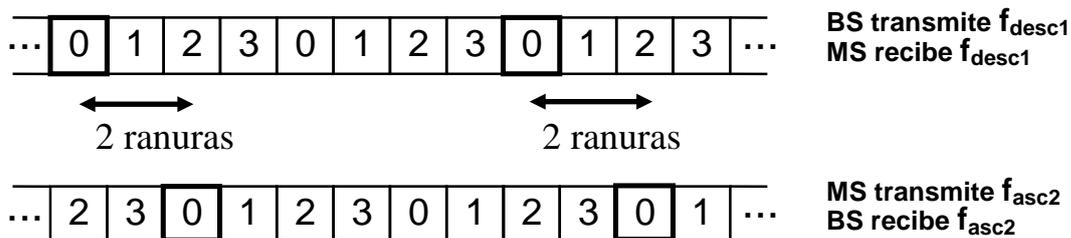


Figura 3.64. Desfase de una ranura entre el enlace ascendente y el descendente en las tramas TDMA de TETRA.

El ancho de banda del canal TETRA es de 25 KHz tal como se aprecia en la Figura 3.5. Es un ancho mucho menor que el de GSM que es de 200 KHz. No obstante, en TETRA la velocidad bruta para un usuario es de 9 Kbps si ocupa u solo “slot” y de 36 Kbps si ocupa los cuatro “slots”. Esto posibilita canales de datos con tasas netas máximas cercanas a los 30 Kbps. La razón estriba en que los 25 KHz se reparten entre cuatro usuarios en lugar de los 8 usuarios de GSM. Además, TETRA emplea una modulación $\pi/4$ DQPSK (“Differential Quaternary Phase Shift Keying”) que posibilita la transmisión de 2 bits por símbolo. El aprovechamiento del ancho de banda de 25 KHz con esta modulación es de 1.44 bits/s/Hz. En la primera versión de GSM, sin el sistema de mejora EDGE, se utilizaba la modulación GMSK que tan solo permite un bit por símbolo con un aprovechamiento de 1.35 bits/s/Hz. De este modo, TETRA utiliza el espectro disponible de una forma eficiente lo que le permite alcanzar unas tasas de transmisión de bits por segundo relativamente elevadas.

En la Figura 3.5 se muestra la estructura TDMA/FDD de TETRA. Se aprecia la separación temporal entre el enlace ascendente y el descendente. En Europa la separación entre la banda del enlace ascendente y la del enlace descendente es de 10

MHz en la banda general de los 400 MHz y de 45 MHz en la banda general de los 800 MHz [TETRA 2]. Estas separaciones pueden ser diferentes en los países que se encuentran fuera de la Unión Europea.

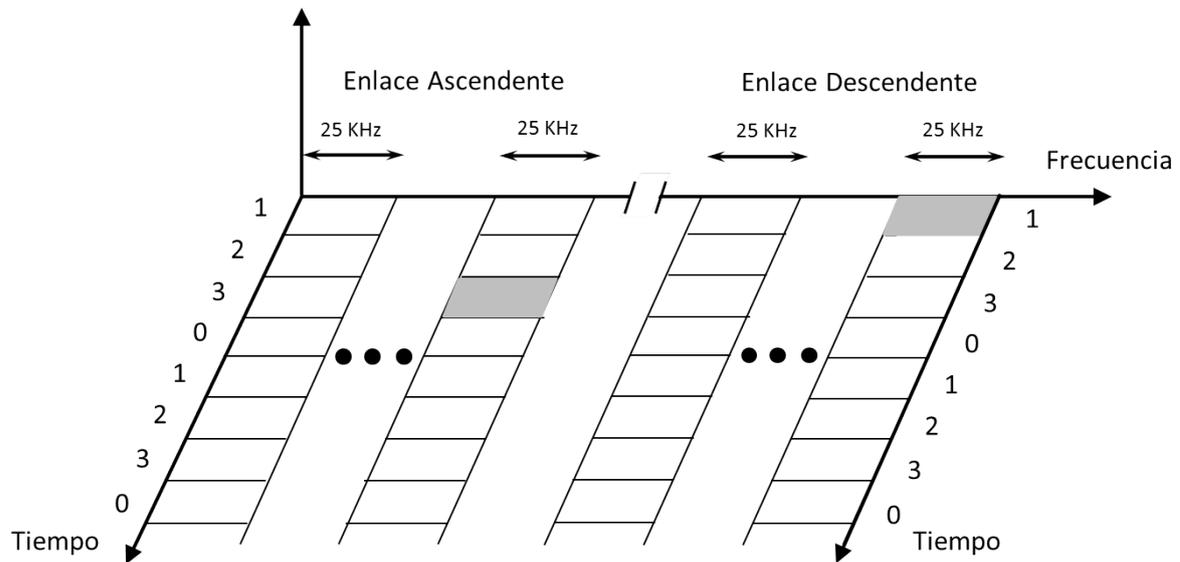


Figura 3.65. TDMA/FDD en el sistema TETRA. En gris se muestra la transmisión y recepción de un usuario durante una ranura.

La trama TDMA de TETRA tiene una duración de 56.7 ms. Como existen 4 ranuras cada ranura o “slot” de la trama TDMA dura 14.167 ms. Para una modulación de fase la ranura contiene hasta 255 símbolos cada uno con un periodo de 55.56 μ s. Como en el caso de GSM existe una estructura jerárquica de tramas. En TETRA cada multitrama contiene 18 tramas. No existen supertramas pero sí hipertramas que contienen 60 multitramas tal como se aprecia en la Figura 3.6. En las multitramas de tráfico, la última trama (la decimoctava) se reserva para control y señalización quedando las restantes 17 tramas para el intercambio de información [TETRA 2, Comunicaciones Móviles 02].

Cada ranura temporal (“time slot”) se divide en dos sub-ranuras (“sub-slots”) de duración 7.08 ms. Si se emplea la modulación $\pi/4$ DQPSK cada ranura contiene 510 bits y cada sub-ranura contiene 255 bits. Como la ranura temporal posee una duración de 14.67 ms en un segundo existen hasta 70.58 ranuras temporales. Cada ranura contiene 510 bits útiles, si multiplicamos 70.58 por 510 se obtiene la tasa máxima bruta de TETRA que es aproximadamente de 36 Kbps.

Como se ha comentado un usuario TETRA puede usar un canal físico que contenga más de una ranura del mismo modo que en el sistema de mejora HSCSD de GSM. Si un usuario ocupa más de una ranura el resto de ranuras pueden ser ocupadas por otros usuarios. Por ejemplo, si un usuario utiliza tres “slots” para transmitir información de una portadora para transmitir datos de alta velocidad, la mencionada portadora solo ofrecerá dos canales físicos: un canal formado por los tres “slots” agrupados y un segundo canal con la cuarta ranura. En TETRA también existe el avance temporal (“timing advance”) de GSM para que las transmisiones de las estaciones móviles no colisionen en la estación base.

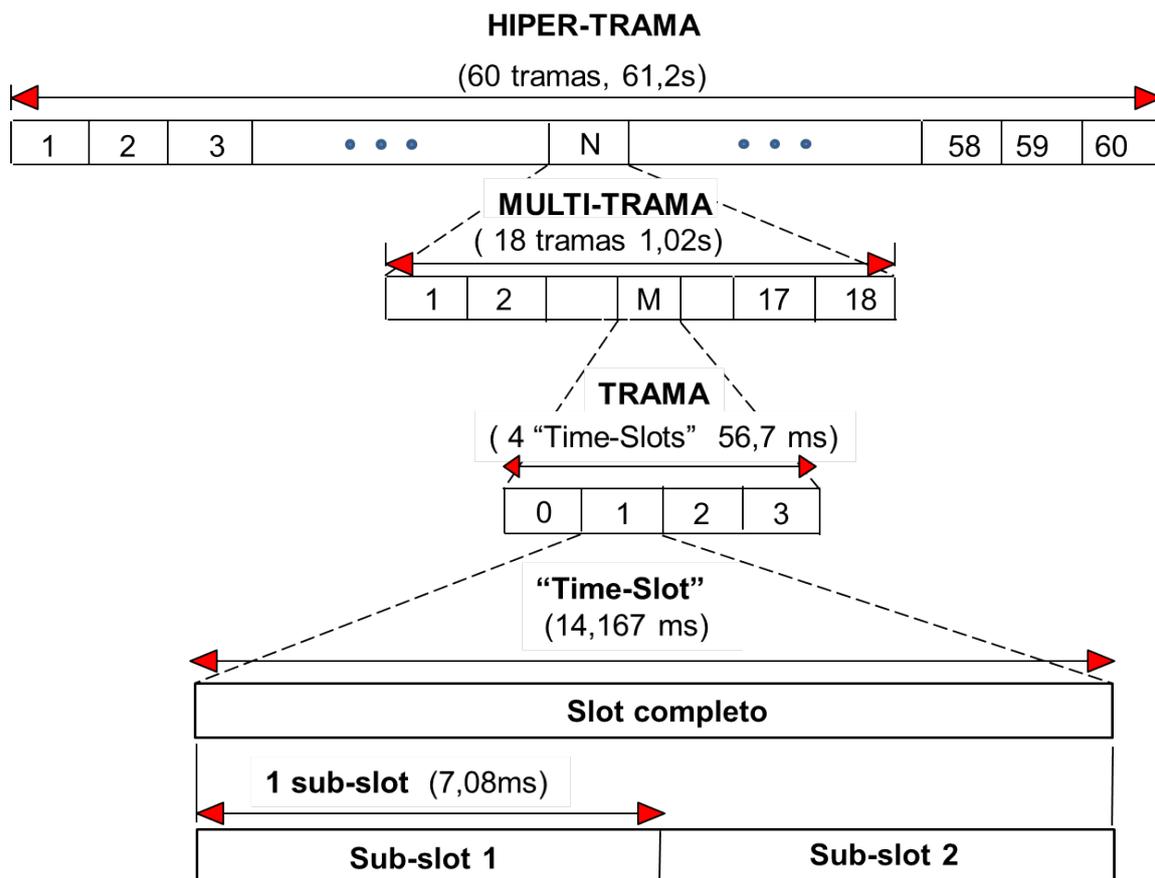


Figura 3.66. Estructura jerárquica de tramas en TETRA.

En la Figura 3.6 se puede observar que el "slot" de TETRA se divide en dos sub-slots. En la Figura 3.7 se muestra una visión más completa de la ranura temporal tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. La estructura de ranura de TETRA posee además fuertes restricciones que condicionan la cantidad de bits útiles. Por ejemplo, es necesaria la utilización de un periodo de tiempo inicial para llevar a cabo una rampa de potencia en el transmisor de la estación móvil. Este periodo inicial sirve también para para linealizar el amplificador de potencia de la MS. Debido a este periodo la capacidad en el enlace ascendente es ligeramente menor que la capacidad del enlace descendente. Así, la capacidad en el enlace ascendente, cuando se emplea la modulación $\pi/4$ DQPSK, es 30 bits menor que la capacidad el enlace descendente, incluso cuando se insertan en este último enlace secuencias extras de entrenamiento intermedio [TETRA 2].

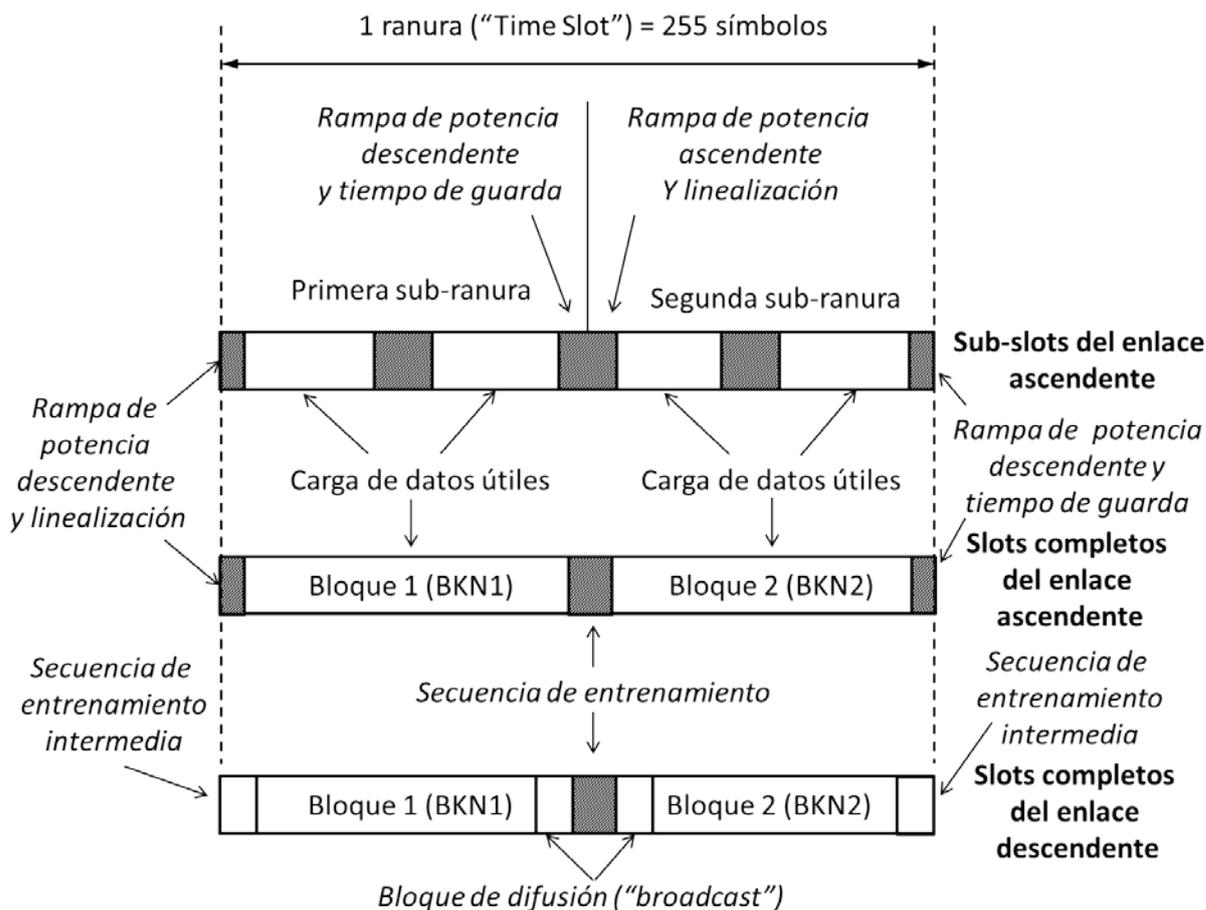


Figura 3.67. Estructura de ranura ("slot") temporal en TETRA.

La capacidad extra del enlace descendente se suele emplear para transmitir información de bajo nivel de la capa MAC. Esta información se transmite en los bloques de la ranura del canal descendente denominados bloques de difusión ("broadcast bloks"), tal como se aprecia en la Figura 3.7. Esta información sirve principalmente para dos propósitos [TETRA 2]:

- 1) En los canales de tráfico transmite el "marcador de uso" ("usage marker") que indica el destino buscado de la ranura descendente y el usuario del enlace ascendente. Esta característica hace al protocolo de comunicación más robusto ya que reduce la probabilidad de aparición de cruce de llamadas. Este fenómeno es causado por intermitencias en la cobertura de la célula, es decir, por zonas sin cobertura como las situadas bajo los puentes o dentro de túneles. En estas zonas la estación móvil pierde la cobertura y cuando la recupera descubre que su ranura ha sido asignada a otra estación móvil. Si no existiese un procedimiento como el "marcador de uso" la estación móvil que surge de la zona sin cobertura enviaría una ráfaga en su antigua ranura que colisionaría con la del nuevo usuario. Gracias al "marcador de uso" las MS transmisoras y receptoras pueden verificar continuamente si tienen derechos para acceder al canal.
- 2) En los canales de control y señalización la información es empleada para transmitir el acceso a elementos de control de acceso (código de acceso y longitud de trama de protocolo ALOHA). Se puede transmitir información independiente en cada bloque de difusión de cada sub-slot o se puede también transmitir una mezcla de tráfico en un sub-slot y señalización en el otro sub-slot.

3.4 Canales lógicos.

Las funciones de los canales lógicos de TETRA son similares a las de los definidos en GSM. Sin embargo, como la estructura de red es más sencilla que la de GSM y el número de usuarios y carga de tráfico es reducida, las labores que deben realizar los canales lógicos de TETRA son o bien más simples o bien son una versión simplificada de las de GSM.

Una de las tareas de la red consiste en difundir información de identificación y control desde la BTS a todas las estaciones móviles de cada célula. Entre los datos emitidos se encuentra la zona o área de localización (“Location Area” o LA). De la misma forma que en GSM, si una MS cambia de LA debe comunicar este hecho a la red ya que la LA es la zona de aviso, es decir, es la zona en la que se busca a las estaciones móviles cuando existe una llamada o comunicación. Dicho de otro modo, la MS puede moverse libremente dentro de una LA sin tener que actualizar su posición. Para simplificar la gestión de la movilidad, en TETRA se permite que una MS pueda estar registrada en varias áreas de localización. De este modo, el MS puede moverse entre esas LA sin necesidad de actualizar su posición. Esta capacidad de TETRA permite reducir el intercambio de información de control y señalización entre la MS y la red. Otros tipos de información que difunde la BTS son [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Identidades del sistema.
- 2) Información de temporización.
- 3) Organización de los canales de control e información sobre la carga del sistema.

Además de difundir información a todas las MS de la célula, la BTS debe intercambiar información de control especial con algunos móviles en particular. Por ejemplo, con todas aquellas estaciones móviles que deseen actualizar su posición, bien porque hayan cambiado de área de aviso o porque se hayan encendido. Para que la MS se registre en primer lugar debe sintonizar con la frecuencia portadora adecuada y sincronizarse con la trama TDMA que genera la BTS. Por tanto, en TETRA la sincronización está formada por las siguientes fases [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Adquisición por el receptor de la frecuencia (sintonización) y la temporización. Esta temporización corresponde a la adquisición de los contadores de ranura temporal, trama y multitrama. La MS ajusta sus contadores con la información recibida desde la BTS servidora.
- 2) Ajuste de la trama temporal para las transmisiones en el enlace ascendente (modo V+D). Este ajuste consiste en la obtención del avance temporal (“timing advance”). Como en GSM el avance temporal codifica el tiempo en que la MS debe adelantar su transmisión para que llegue en la ranura temporal adecuada y no colisione con la transmisión de otro usuario. Así, las ráfagas procedentes de las MS situadas a diferentes distancias e la BTS llegarán en orden a ésta minimizando las colisiones parciales en las ranuras temporales de la trama TDMA. Es el mismo ajuste adaptativo de la trama de GSM con la diferencia de que ahora solo hay como máximo cuatro usuarios por trama.
- 3) Ajuste de la base de tiempos de las MS (modo V+D).

Otra de las tareas que deben acometer la MS y la red es la del control del enlace radio que consiste en las siguientes tareas:

- 1) Control adaptativo de la potencia: la función de control de potencia se ejecuta en la MS en el acceso inicial y en la BTS subsiguientemente. Esta función es importante para reducir las interferencias y así prolongar la duración de la batería en los terminales móviles [Comunicaciones Móviles 02].
- 2) Selección de célula: la realiza la MS en su acceso inicial antes del registro.

- 3) Reselección de célula: una vez se ha inscrito en una célula, la Ms puede reelegir la célula ya sea en modo de reposo (“idle”) o en modo de intercambio de tráfico. Existen cuatro clases de reelección:
 - a. Libre, se utiliza cuando falla otra reelección.
 - b. Lenta, es obligatoria para todas las MS.
 - c. Rápida, es optativa y tiene la ventaja de una menor interrupción del servicio en el cambio de la célula en comparación con la lenta.
 - d. Traspaso con continuidad de la llamada (opcional) que va asociado a la reelección rápida.

Para llevar a cabo el control del enlace radio es necesario realizar mediciones de la intensidad, calidad y retardo de ida y vuelta de la señal. Los valores de intensidad medidos en el conector de la antena se codifican según la escala mostrada en la Tabla 3.4.

Intervalo de valores de potencia	Valor del parámetro de nivel de la señal
< -110	0
-100 a -109	1
-109 a -108	2
...	...
-49 a -48	62
>-48	63

Tabla 3.12. Valores de intensidad [comunicaciones Móviles 02].

Finalmente, como ocurre en GSM, en TETRA es necesario definir la función de traspaso de llamada. Cuando una comunicación está en curso o ya está establecida, la red puede ordenar a la MS que sintonice otro canal físico de la célula servidora o más comúnmente de otra célula. Hay varias causas que provocan el traspaso de llamada:

- 1) Nivel de señal recibida insuficiente.
- 2) Nivel de interferencia o de perturbación elevado.
- 3) Reparto de carga de tráfico.

Una vez explicadas las funciones que deben ejecutar los canales lógicos, vamos a pasar a explicar los diferentes canales lógicos en TETRA. Al igual que en GSM, los canales lógicos se dividen en: canales de tráfico y canales de control.

Canales de tráfico.

Son los canales TCH (“Traffic Channels”) se emplean para transmitir la información vocal y la información de los datos mediante la técnica de conmutación de circuitos. Así, los canales de tráfico se dividen a su vez en [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Canales vocales (TCH/S): sirven para transmitir voz únicamente.
- 2) Canales mixtos de voz y datos. Según su velocidad se han definido tres canales de este tipo:
 - a. TCH/7.2: velocidad neta 7.2 Kbps
 - b. TCH/4.8: velocidad neta 4.8 Kbps.
 - c. TCH/2.4: velocidad neta 2.4 Kbps.
- 3) Canales de datos que consiguen velocidades mayores que los canales anteriores gracias a la agrupación de varias ranuras temporales en un único canal físico. Se

pueden asignar a una comunicación hasta las cuatro ranuras de una frecuencia portadora. De este modo, las velocidades netas máximas alcanzadas son: $4 \cdot 2.4 = 9.6$ Kbps y $4 \cdot 7.2 = 28.8$ Kbps.

Canales de control.

En TETRA hay cinco clases de canales de control [Comunicaciones Móviles 02].

- 1) Canal de difusión. Se denomina el BCCH (“Broadcast Control Channel”). Es un canal únicamente descendente. Todas las MS toman información de control y señalización común y general de este canal. Se subdivide en dos clases de canales:
 - a. Canal de difusión de red o BNCH (“Broadcast Network Channel”), envía información sobre la red y sobre las identidades de las BTS.
 - b. Canal de difusión de sincronización o BSCH (“Broadcast Synchronization Channel”). A través de este canal se envían a las MS los datos para el ajuste de la frecuencia, la sincronización temporal y las secuencias de aleatorización.
- 2) Canal de linealización. Se denomina LCH (“Linearisation Channel”). Es un periodo de tiempo reservado a las estaciones base y a los móviles para la linealización de sus transmisores. Esta fase es indispensable para asegurar la limitación de las interferencias en los canales físicos adyacentes. Este canal se subdivide en dos clases de canales:
 - a. Canal de linealización común o CLCH (“Common Linearisation Channel”). Es común a todas las estaciones móviles, compartido por todas ellas.
 - b. Canal de linealización de estación base o BLCH (“Base Station Linearisation Channel”). Es el utilizado por las estaciones base.
- 3) Canal de señalización. Se denomina SCH (“Signalling Channel”). Este canal se emplea para enviar los mensajes de señalización común. Es por tanto un canal compartido por todas las MS de una célula. Además de la información común, este canal también es capaz de portar mensajes a una MS concreta o a un grupo de ellas. Cada BTS debe poseer al menos un SCH. El canal de señalización se subdivide en tres clases de canales según el tamaño de los mensajes que transporta:
 - a. Canal de señalización completo o SCH/F (“Full Size Signalling Channel”). Se trata de un canal bidireccional que transporta paquetes de datos de señalización que poseen el tamaño máximo permitido.
 - b. Canal de señalización descendente de tamaño mitad o SCH/HD (“Half Size Downlink Signalling Channel”). Es un canal unidireccional que se utiliza para cursar paquetes de datos de señalización cuyo tamaño es la mitad del paquete completo.
 - c. Canal de señalización descendente de tamaño mitad o SCH/HD (“Half Size Downlink Signalling Channel”). Posee las mismas características que el canal SCH/HU pero opera en el enlace descendente.
- 4) Canal de asignación de acceso o AACH (“Access Assignment Channel”). Es un canal del enlace descendente que indica la asignación de las ranuras temporales ascendente y descendente de cada canal físico.
- 5) Canal de sustitución o STCH (“Stealing Channel”). Este canal sirve para intercambiar la señalización urgente asociada a cada llamada. Por tanto, siempre está asociado a un canal de tráfico TCH. Se transmite por el mismo canal físico que el TCH al que está asociado. Al igual que en GSM, el STCH suprime

temporalmente los bits de información de la ráfaga de tráfico y los reemplaza por los bits de señalización. En el modo de funcionamiento semidúplex, el STCH es unidireccional, con el mismo sentido que el TCH al que está asociado.

3.5 Tipos de canales físicos y de ráfagas. Codificación de canal.

Una **canal físico** de TETRA, de la misma forma que en GSM, está constituido por una frecuencia portadora y una ranura temporal tal como se aprecia en la Figura 3.5. Existen tres clases de canales físicos:

- 1) Canal físico de control o CP (“Control Physical Channel”). El canal físico de control alberga exclusivamente a los canales lógicos de control. Se subdivide en dos canales:
 - a. Canal de control principal MCCH (“Main Control Channel”), siempre ocupa la primera ranura de alguna de las frecuencias portadoras disponibles en la célula.
 - b. Canal de control ampliado ECCH (“Extended Control Channel”), se utiliza en adición al principal cuando se necesita más capacidad de señalización que la que puede ofrecer el canal de control principal.
- 2) Canal físico de tráfico o TP (“Traffic Physical Channel”). Se dedica exclusivamente al TCH.
- 3) Canal físico no asignado o UP (“Unallocated Physical Channel”). Este canal se emplea para la transmisión de información de difusión y mensajes de relleno (“dummy messages”) y no está asignado a ninguna MS en particular.

Este canal físico Para asignar un canal físico a alguno de los tres canales físicos anteriores se emplea el canal lógico AACH. El AACH ocupa el canal físico en particular antes de la comunicación, indicando si ésta va a ser de datos o de control.

En TETRA se han definido siete tipos de **ráfagas** con diferentes estructuras y contenidos. Las ráfagas se clasifican según se transmitan en el enlace ascendente y descendente en:

- 1) Ráfagas ascendentes:
 - a. Ráfagas de control o CB (“Control Burst”).
 - b. Ráfaga de linealización de estación móvil o LB (“Linearization Burst”):
 - c. Ráfaga normal o NUB (“Normal Uplink Burst”).
- 2) Ráfagas descendentes:
 - a. Ráfaga normal continua o NDB (“Normal Downlink Burst”).
 - b. Ráfaga normal discontinua o NDB (“Normal Downlink Burst”).
 - c. Ráfaga de sincronización continua o SB (“Synchronization Burst”).
 - d. Ráfaga de sincronización continua o SB (“Synchronization Burst”).

Las ráfagas normales descendentes y de sincronización se designan con la misma abreviatura tanto si son continuas como si son discontinuas. Excepto la ráfaga normal y la de sincronización continua descendente todas las demás ráfagas tienen unos tiempos de guarda con una duración variable situados en el principio y en el fin de la ráfaga. Como se ve en la Figura 3.8 la duración es expresada en periodos de bit. Los bits del comienzo de la ráfaga sirven que el transmisor realice las tareas de linealización y para que alcance su potencia nominal. Los del final de la ráfaga ayudan a reducir las colisiones entre las ráfagas diferentes. La ráfaga normal y la de sincronización continua descendente no requieren tiempos de guarda ya que se emiten de forma continua, sin interrupciones [Comunicaciones Móviles 02].

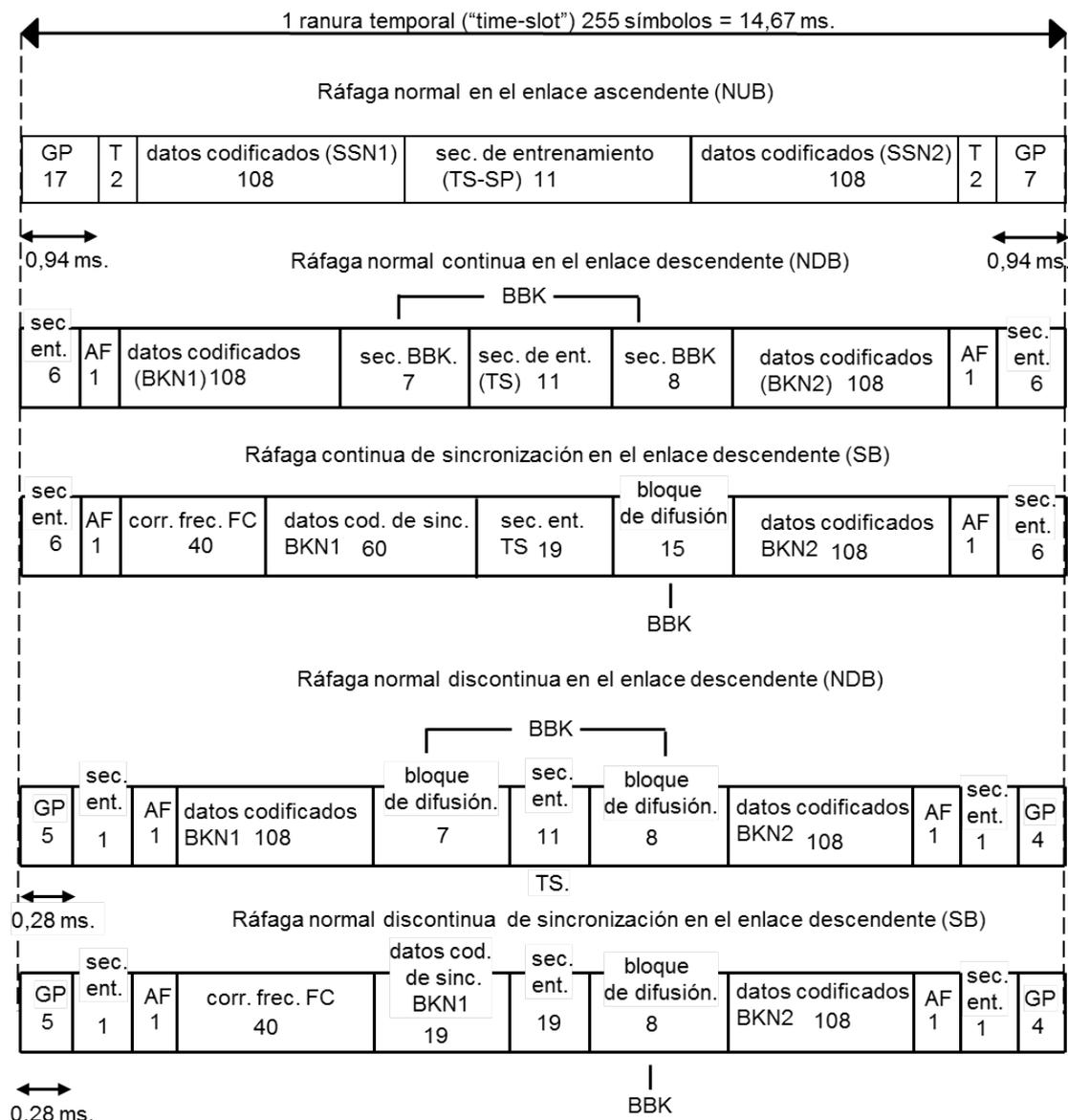


Figura 3.68. Estructura de las ráfagas de TETRA.

La transmisión de bits útiles tiene lugar en las ráfagas TETRA durante el periodo activo. El contenido y misión de los bits varía de una ráfaga a otra pero hay algunos fijos que se explican a continuación [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Todas las ráfagas incorporan una secuencia de entrenamiento ("training sequence") necesaria para revertir los efectos del canal móvil y para informar sobre los tipos de canales lógicos establecidos en la ráfaga.
- 2) Las ráfagas ascendentes transmiten información separada en dos campos de datos, uno en cada sub-intervalo que se representan por SSN1 Y SSN2, respectivamente.
- 3) Las ráfagas descendentes tienen 3 campos de datos o "Block Number" cuyas abreviaturas son BKN1, BKN2 y BBK (ver Figura 3.7). Los dos primeros se utilizan para transportar canales lógicos ya sean de tráfico o de señalización. El campo BBK o bloque de difusión consta de 30 bits (15 símbolos) y se emplea

para transmitir la información del canal lógico AACH tal como se aprecia en la Figura 3.8.

Aunque existen campos comunes entre los diferentes tipos de ráfagas, cada una posee características y campos propios. A continuación se comentan los detalles propios de cada ráfaga:

- 1) Ráfaga de control (CB). Es una ráfaga corta de 206 bits (108 símbolos). Las MS la utilizan para transmitir mensajes de control a la BTS. Para ello dispone de dos campos de información de 84 bits. Para reducir al mínimo los solapes entre ranuras temporales emplea una secuencia ampliada de 30 bits.
- 2) Ráfaga de linealización (LB). No es propiamente una ráfaga sino un tiempo sin transmisión con una duración equivalente a $240+15$ periodos de bit. Las MS aprovechan este periodo para linealizar sus transmisores. La BTS no emplea esta ráfaga sino que linealiza su transmisor en los periodos de tiempo habilitados al comienzo de las ráfagas descendentes discontinuas.
- 3) Ráfaga normal en el enlace ascendente (NUB). Contiene 472 bits (236 símbolos) y ofrece los campos SSN1 y SSN2 para transmitir información. Las emplean las MS que se ha sincronizado con la trama TDMA de la BTS, tras recibir el avance temporal, para transmitir información de tráfico o de señalización.
- 4) Ráfaga normal continua en el enlace descendente (NDB). Es una ráfaga completa, sin tiempos de guarda, de 510 bits. Dispone de los bloques BKN1, BKN2 y del bloque de difusión BBK. También posee bits de ajuste de fase. La BTS emplea esta ráfaga para enviar mensajes y tráfico a las MS de su célula.
- 5) Ráfaga continua de sincronización en el enlace descendente (SB). Es una ráfaga completa de 510 bits. Por tanto tampoco contiene tiempos de guarda. La BTS emplea esta ráfaga para difundir mensajes de sincronización y para transmitir señales de control a las MS. Como se muestra en la Figura 3.8 contiene un campo de 120 bits (60 símbolos) para sincronización y un campo BKN2 para los mensajes de control. Además, también contiene el campo BBK de difusión y un campo FC a través del cual se envía información de corrección de frecuencia a los móviles.
- 6) Ráfaga normal discontinua en el enlace descendente (NDB). Debido a que es discontinua contiene tiempos de guarda y tiempos de subida de potencia. Contiene 492 bits. La utilizan las BTS que funcionan en tiempo compartido para transmitir mensajes de control o tráfico a las estaciones móviles. Sus bloques de información son el BKN1, el BKN2 y el BBK, al igual que en la ráfaga normal.
- 7) Ráfaga normal discontinua de sincronización en el enlace descendente (SB). Como la ráfaga anterior posee 492 bits. Al ser discontinua incorpora tiempos de guarda y de subida de potencia. La utilizan las BTS que funcionan en tiempo compartido para transmitir mensajes de corrección de frecuencia y de sincronización además de transmisión de control. Contiene un campo de sincronización de 19 símbolos y un campo de corrección de frecuencia FC de 40 símbolos. Como la ráfaga continua de sincronización posee también un campo de difusión (BBK) y un campo BNK2 para la transmisión de información de control.

Las ráfagas explicadas anteriormente transportan los datos de tráfico y señalización digitales. En TETRA el procesamiento de la señal digital es complejo debido a diversas razones. Para proteger la información de las perturbaciones del canal se lleva a cabo una

fase codificación de canal junto con una operación de entrelazado de los bits fruto de la codificación. En una fase posterior los bits codificados y entrelazados se guardan en un orden aleatorio. Esta fase es necesaria para dificultar la escucha intencionada ya que TETRA es un sistema orientado en gran medida a los servicios de emergencia. Finalmente, se forman las ráfagas y se prepara la señal digital para su modulación en la fase de codificación diferencial. Los pasos y el orden seguido se muestran en la Figura 3.9.



Figura 3.69. Procesamiento de la señal TETRA

De forma más detallada cada paso realiza las siguientes funciones [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Codificación del canal: los bits de información procedentes de la fuente de voz o datos se codifican mediante un código bloque y un código convolucional con entresacado (“puncturing”) de bits. También se añaden bits complementarios (“tail bits”). Estos últimos facilitan el funcionamiento del decodificador. En la Figura 3.10 se muestra la codificación de canal completa en TETRA junto con el entrelazado.
- 2) Después de la codificación de canal tiene lugar una fase de reordenación de los bits que sirve para preparar el posterior entrelazado. En la reordenación, los bits se agrupan en bloques.
- 3) De una forma similar a la llevada a cabo en GSM, en el entrelazado cada bloque de bits se incorpora a una ráfaga junto a bloque de elementos de la señal codificada instantes anteriores y posteriores.
- 4) A continuación los bloques entrelazados se someten a una operación de aleatorización (“scrambling”). Este proceso produce una transmisión desordenada. El orden es conocido por el transmisor y receptor pero no por un extraño que intercepte la señal transmitida.
- 5) Posteriormente, los bloques aleatorizados se multiplexan con los bits de linealización formando así la estructura básica de la ráfaga.
- 6) En la fase de codificación diferencial se forman los símbolos a partir de los bits que forman la ráfaga. En la modulación estándar de TETRA, DPSK, cada símbolo contiene la información de dos bits.

7) Finalmente, el modulador genera la señal DPSK a transmitir.

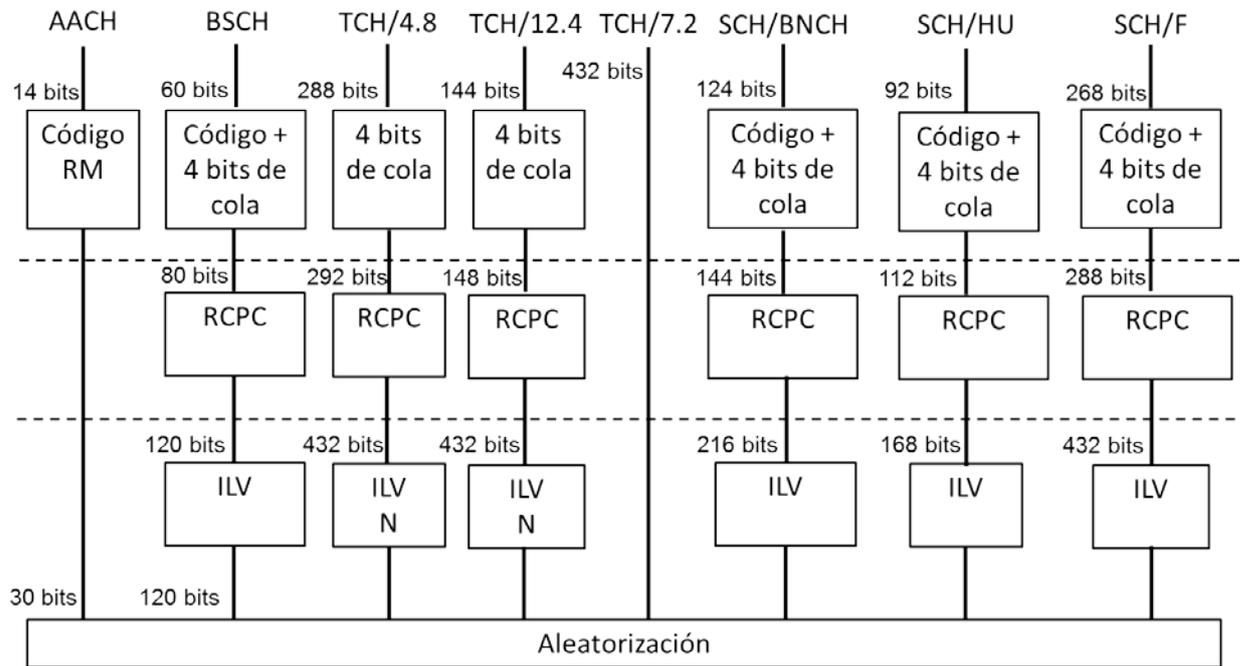


Figura 3.70. Codificación del canal en TETRA [Comunicaciones Móviles 02].

A continuación se explica la codificación de canal cuyo esquema se muestra en la Figura 3.10. La codificación en TETRA se lleva a cabo en un proceso doble [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) En primera instancia se aplica un código externo de tipo bloque en el que a k bits de información se le agregan r bits de redundancia para obtener $n=k+r$ bits del bloque de salida. Como se observa en la Figura 3.10 solo los canales de señalización emplean esta codificación.
- 2) Código interno de tipo convolucional con entresacado (“puncturing”) de bits de velocidad compatible con la tasa de bits: RCPC (“Rate Compatible Punctured Convolutional Code”). Este bloque también añade una serie de bits a los bits de entrada. Como se aprecia en la Figura 3.10, todos los canales poseen este bloque menos el AACH. Dependiendo del canal el bloque RCPC produce una cantidad de bits de salida diferente.
- 3) En la Figura 3.10 también se muestra la función de entrelazado representada por los bloques ILV. En el caso de los canales de tráfico el entrelazado se realiza cada N bloques donde N puede tomar los valores 1, 4 y 8. Si N es igual a 1, entonces no hay entrelazado. Tampoco hay entrelazado en el canal TCH/7.2. El entrelazado de N bloques, requiere $N-1$ bloques adicionales al bloque que se desea transmitir para transmitir la información. El entrelazado de N bloques añade un retardo equivalente de $N-1$ tramas. Por ello, no siempre se utiliza en los canales de tráfico y no se emplea nunca en los mensajes de señalización.

3.6 Modos de transmisión y control.

Para el enlace descendente, se han definido los siguientes modos de transmisión [Comunicaciones Móviles 02]:

- 1) Modo continuo D-CT (“Downlink-Continuou Transmisión”). En este modo la estación base transmite continuamente ráfagas hacia las MS en las ranuras temporales libres de la frecuencia portadora principal. Se utilizan las siguientes ráfagas:
 - a. Ráfagas normales descendentes con la secuencia de ajuste TS2.
 - b. Ráfagas normales de sincronización. Si se trata de ranuras no utilizadas entonces en los bloques BKN1 y BKN2 se inserta los canales BSCH y BNCH.
 - c. Para el inicio y la finalización se emplean dos ráfagas especiales denominadas de arranque y parada.
 - d. Opcionalmente, se pueden transmitir en modo continuo las ranuras no utilizadas de otras portadoras.
- 2) Modo tiempo compartido D-CTT. En este modo pueden compartir una misma frecuencia portadora hasta cuatro células o estaciones base. Cada una de ellas dispone de un canal físico de la portadora compartida. Para los enlaces descendentes se emplean ráfagas discontinuas y ráfagas de sincronización descendentes. Si el canal compartido es el canal principal de control, entonces las tramas del canal se dividen entre las reservadas a una BTS y las tramas comunes, es decir, compartidas por todas las células.
- 3) Modo múltiple. En este modo una BTS agrupa en un mismo canal físico un conjunto de dos a cuatro ranuras temporales. En este caso, no se exige que la BTS interrumpa y reanude la transmisión en la frontera entre ranuras temporales. Por esta razón, los tiempos de guarda se rellenan con 8 bits al finalizar una ranura y con 10 bits al comenzar la siguiente ranura. Las MS tampoco interrumpen la transmisión en las fronteras. Por ello, cada MS rellena con 4 bits el final de una ranura y con 34 bits el comienzo de la siguiente ranura. Se definen dos modos de control:
 - a. Modo de control normal o NCM (“Normal Control Mode”). Requiere la asignación de un canal de control principal y proporciona los servicios TETRA con las máximas prestaciones.
 - b. Modo de control mínimo MCM (“Minimum Control Mode”). Todos los canales físicos de una frecuencia portadora se dedican a tráfico. Los servicios proporcionados en este modo son de calidad reducida.

3.7 Correspondencia entre los canales lógicos y los canales físicos.

La correspondencia entre un canal lógico y el tipo de ráfaga es más flexible y variada en TETRA que en GSM. En TETRA la correspondencia depende del modo de control (NCM o MCM), del tipo de enlace (ascendente o descendente) y de la clase de canal (control o tráfico). Aunque existe mucha flexibilidad, hay unas reglas fijas, a saber:

- 1) La estructura multitrama define la correspondencia. Así, se utilizará la ranura temporal número 1 de la frecuencia portadora principal para los canales lógicos de control y las demás ranuras para los canales lógicos de datos. En todas las frecuencias, también se emplea la trama decimotava para transmitir canales de control.
- 2) El canal AACH se establece en el bloque de difusión BBK de cada enlace descendente.
- 3) El canal de linealización de la estación base o BLCH puede remplazar al canal SCH/HD situado en el segundo bloque BKN2 de las ráfagas.

- 4) Los canales de difusión BCCH y de linealización común CLCH se disponen en la trama de control de cada canal físico.
- 5) Cada canal lógico solo puede emplear una serie de ráfagas mostradas en la Tabla 3.5.

Canal lógico	Tipo de ráfaga
BSCH BNCH	SB
AACH	NDB, SB
BLCH CLCH	NDB, SB
SCH/F	NDB, NUB
SCH/HD SCH/HU	NDB, SB, CB
TCH/STCH	NDB, NUB

Tabla 3.13. Posibilidades de asignación de ráfagas a los canales lógicos.

La correspondencia de los canales de control en el enlace descendente y el enlace ascendente se muestra en las Tablas Tabla 3.6Tabla 3.7.

Número de la trama	Enlace descendente	
1 a 17	Bloque BKN1	Bloque BKN2
	SCH/F	
	SCH/HD SCH/HD	SCH/HD BNCH
18	BSCH	SCH/HD

Tabla 3.14. Correspondencia entre los canales de control y las ráfagas en el enlace descendente.

Número de la trama	Enlace ascendente	
1 a 17	Primera sub-ranura	Segunda sub-ranura
	SCH/F	
	SCH/HU CLCH	SCH/HU SCH/HU
18	BSCH	SCH/HD

Tabla 3.15. Correspondencia entre los canales de control y las ráfagas en el enlace ascendente.

Existen diversas configuraciones tanto en el enlace descendente como en el ascendente. En el enlace descendente se pueden utilizar los dos bloques BKN1 y BKN2 para el canal de señalización SCH/F. Pero también se pueden emplear los dos bloques para transportar bien dos canales de señalización de baja velocidad o bien un canal de señalización de baja velocidad y un BNCH. Alternativamente, se puede usar el intervalo decimotavo para los canales BSCH y SCH/HD [Comunicaciones Móviles 02].

La correspondencia de los canales de tráfico se muestra en las Tabla 3.8-Tabla 3.9. Como cada llamada debe llevar su señalización asociada se reserva la trama decimotava para este uso. El resto de tramas se reservan para tráfico empleándose los bloques BKN1 y BKN2. Para transportar tráfico se pueden emplear los canales TCH y

STCH. Existen diferentes alternativas para la señalización de la trama número 18. Como normal general, el canal de linealización de la estación base, BLCH, puede sustituir cuando sea necesario al canal SCH/HD del bloque BKN2 [Comunicaciones Móviles 02].

Número de la trama	Enlace descendente	
1 a 17	Bloque BKN1	Bloque BKN2
	TCH TCH + STCH STCH +STCH	
18	SCH/F	
	SCH/HD BSCH	SCH/HD SCH/HD
	SCH/HD	BNCH

Tabla 3.16. Correspondencia entre los canales de tráfico y las ráfagas en el enlace descendente.

Número de la trama	Enlace descendente	
1 a 17	Primera sub-ranura	Segunda sub-ranura
	TCH TCH + STCH STC +STCH	
18	SCH/F	
	SCH/HU CLCH	SCH/HU SCH/HU

Tabla 3.17. Correspondencia entre los canales de tráfico y las ráfagas en el enlace ascendente.

Finalmente, la correspondencia para el canal físico no está asignado se muestra en las Tabla 3.10Tabla 3.11 [Comunicaciones Móviles 02].

Número de la trama	Enlace descendente	
1 a 18	Bloque BKN1	Bloque BKN2
	SCH/HD BSCH	SCH/HD BNCH

Tabla 3.18. Correspondencia para las ráfagas no asignadas en el enlace descendente.

Número de la trama	Enlace ascendente	
1 a 18	Primera sub-ranura	Segunda sub-ranura
	CLCH	

Tabla 3.19. Correspondencia para las ráfagas no asignadas en el enlace descendente.

3.8 TETRA 2.

Al igual que GSM, el estándar TETRA, desde su aparición, ha evolucionado para proveer nuevos servicios a sus usuarios tanto públicos como privados. La primera versión de TETRA se conoce con el nombre de “TETRA release 1”, su evolución se denomina “TETRA release 2” o TETRA 2. Los objetivos de TETRA 2 son los siguientes:

- 1) Velocidades de datos mayores.
- 2) “Roaming” con GSM-GPRS y UMTS.
- 3) Codificación de voz de tipo adaptativa como en GSM: AMR (“Adaptive Multiple Rate”).
- 4) Extensión del modo TMO hasta 83 kilómetros.
- 5) Mayor eficiencia espectral.
- 6) Desarrollo del SIM.

Para tratar de cumplir los objetivos anteriores existen dos estandarizaciones de TETRA 2:

- 1) TAPS: TETRA Advance Packet Service. TAPS es una red superpuesta basada en la tecnología E-GPRS (Enhanced General Packet Radio Service). Se basa en los estándares GSM, ya que es una adaptación de E-GPRS para TETRA
- 2) TEDS: TETRA Enhanced Data Service. Es una evolución de TETRA que es compatible con TETRA V+D y permite la migración de este servicio a TEDS. Utiliza las mismas estaciones base y el mismo núcleo de red que TETRA. Además se pueden emplear las mismas antenas en cada estación base ya que TEDS puede desplegarse también en las mismas bandas de frecuencia de TETRA (380-410 MHz). Los beneficios de TEDS son diversos: permite mayores velocidades de datos de forma que es posible la transmisión de video, la cobertura es muy amplia y también aumenta la capacidad del sistema de modo que se puede dar servicio a más usuarios. Para aumentar la tasa de transmisión TEDS emplea diversas modulaciones que incrementan el número de bits por símbolo. En la Tabla 3.12 se recogen las modulaciones utilizadas y los bits por símbolo de cada una de ellas.

Modulación TETRA HSD	Número bits/símbolo dBm	Tasa alcanzada en 25 KHz (Kbps)	Capacidad (bits/s/Hz)
$\pi/8$ D8PSK	3	54	2.160
4-QAM	2	38.4	1.536
16-QAM	4	76.8	3.072
64-QAM	6	115.2	4.608

Tabla 3.20. Modulaciones del sistema de mejora TEDS y aprovechamiento del canal [Mobile Band, TETRA2].

La capacidad se ve incrementada con las nuevas modulaciones. Además de estas modulaciones en las nuevas versiones de TETRA, como TEDS, se emplean anchos de banda mayores de 50 KHz, 100 KHz y de 150 KHz. Al aumentar el ancho de banda total del canal, se aumenta la tasa de transmisión efectiva [TETRA 2].

3.9 Ejemplos de implantación.

El sistema TETRA ha sido implantado en numerosos países. En un principio se utilizó en sistemas de emergencia y seguridad públicos como el servicio de bomberos o

de policía respectivamente. Posteriormente, TETRA se convirtió también en un sistema muy empleado por PMRs, en aplicaciones distintas de las de seguridad y emergencia. A continuación se muestran algunos ejemplos de redes TETRA desplegadas tanto en España como en el extranjero:

- 1) La ciudad de Madrid está dotada de una red TETRA para servicios de seguridad y emergencia desplegada desde el año 2000. Esta red está compuesta por más de 3500 terminales, de los cuales 2500 pertenecen a la Policía Municipal y el resto se encuentran repartidos entre otros servicios de seguridad y emergencia como el servicio de Agentes de Movilidad, Samur y el servicio de bomberos. La red empezó con tan solo tres estaciones base y en ya en 2007 contaba con quince estaciones base que permitían ya en ese año que la cobertura del sistema fuera del 98% de la ciudad. Esta cobertura incluye zonas subterráneas como los túneles de la M-30. El despliegue de cualquier red TETRA de seguridad y emergencia debe cubrir este tipo de zonas ya que los accidentes, atentados y emergencias en general pueden producirse en cualquier zona de una ciudad.
- 2) Aunque TETRA es un sistema orientado especialmente a servicios de emergencia y seguridad también sirve para dotar de un servicio de comunicaciones inalámbricas a compañías públicas o privadas. Por ejemplo, la compañía pública que gestiona y proporciona el servicio de tranvía de la ciudad de Murcia cuenta con una red TETRA para las comunicaciones con los tranvías. Gracias a TETRA la compañía cuenta con un mayor control en el funcionamiento de las operaciones de transporte. Este mayor control permite la detección en tiempo real de cualquier tipo de incidencia o problema, lo cual posibilita su resolución en de forma eficaz y rápida.
- 3) La red urbana TETRA más grande del mundo se encuentra en Pekín y se denomina red “JustTop”. Esta red fue implantada por la compañía “EADS Defense & Security” y da servicio a varios organismos públicos de la ciudad: gobierno y consejo municipal, los cuerpos de seguridad (agentes del tráfico y la policía armada), personal sanitario de primeros auxilios, organizaciones de gestión municipal, y departamentos de conservación hidráulica. Cuando se celebraron los Juegos Olímpicos en Pekín, la red “JustTop” ofreció de forma fluida y segura los servicios de comunicaciones inalámbricas para todas las sedes olímpicas y todas las organizaciones relacionadas con los Juegos Olímpicos. La red llegó a contar en aquel momento con 90000 usuarios. Esta red también se utilizó para gestionar el transporte de mercancías durante los Juegos así como las llegadas y salidas de los miembros del comité organizados y de los atletas.

Glosario de TETRA

AACH “Access Assignment Channel”

ASSI “Alias Short Subscriber Identity”

ATSI “Alias TSI”

BCCH “Broadcast Control Channel”

BKN “Block Number”

BLCH “Base Station Linearisation Channel”

BNCH “Broadcast Network Channel”

BSCH “Broadcast Synchronization Channel”

BTS “Base Transceiver Station”

CB “Control Burst”

CLCH “Common Linearisation Channel”

CP “Control Physical Channel”

D-CT “Downlink-Continuous Transmisión”

DMO “Direct Mode Operation”

DMR “Direct Mode Repeater”

DQPSK “Differential Quaternary Phase Shift Keying”

ECCH “Extended Control Channel”

GTSI “Group TSI”

GSSI “Group Short Subscriber Identity”

HSD “High Speed Data”

IDI “Interfaz Interna del Sistema”

ISSI “Individual Short Subscriber Identity”

LB “Linearization Burst”

LCH “Linearisation Channel”

MCCH “Main Control Channel”

MCM “Minimum Control Mode”

MS “Mobile Station”

MSC “Mobile Switching Center”

NCM “Normal Control Mode”

NDB “Normal Downlink Burst”

NMC “Network Management Controller”

NUB “Normal Uplink Burst”

PABX “Private Automatic Branch eXchange”

PDN “Public Data Network”

RCPC “Rate Compatible Punctured Convolutional Code”

SB “Synchronization Burst”

SCH “Signalling Channel”

SMI “Short Management Controller”

STCH “Stealing Channel”

SSI “Short Subscriber Identity”

TAPS “TETRA Advance Packet Service”

TCH “Traffic Channels”

TEDS “TETRA Enhanced Data Service”

TEI “TETRA Terminal Equipment”

TETRA “Terrestrial Trunked Radio”

TP “Traffic Physical Channel”

TSI “TETRA Subscriber Identity”

UP “Unallocated Physical Channel”

USSI “Un-exchanged Short Subscriber Identity”

Bibliografía

[Comunicaciones Móviles 02] Hernando Rábanos, J. M., *Comunicaciones Móviles*, Centro de Estudios Ramón Areces, 2004, ISBN 9788480046350.

[CEPT] <http://www.erodocdb.dk/doks/doccategoryecc.aspx?doccatid=1> Decisiones de la CEPT ERC/DEC/(99)02, ERC/DEC/(99)03 y ERC/DEC/(99)04.

[TETRA 2] ETSI TR 102 580 V1.1.1 (2007-10), Technical Report.

[Mobile Band] *A Study of the Options for Improving Efficiency of Spectrum Use in the VHF Maritime Mobile Band*, Peter Sanders, Snaefell Communications, Cambridge, UK.

[Digital Mobile Communications and the TETRA System] Dunlop, J., Demessie, G., James, I., *Digital Mobile Communications and the TETRA System*, John Wiley and Sons, 2000, ISBN 0-471-98792-1.

Capítulo 4. UMTS.

4.1. Introducción a los sistemas 3G.

El mercado de las redes móviles está alcanzado prácticamente su punto de saturación. Los operadores ya no pueden confiar únicamente en la obtención de nuevos clientes para aumentar sus ingresos, sino que deben proporcionar servicios de valor añadido. En el campo de las telecomunicaciones, toda evolución hacia niveles superiores de calidad de servicio requiere, necesariamente, la evolución en paralelo y sumando sinergias de los tres aspectos fundamentales de todo sistema de comunicaciones:

- Evolución de servicios: El usuario final requiere, cada vez más, un nivel de servicio superior y a precios más asequibles. Este es el verdadero motor de toda evolución en el campo de las comunicaciones.
- Evolución tecnológica: No sería posible viajar hacia niveles superiores de servicio olvidando los aspectos tecnológicos necesarios para ofrecerlos, tanto a nivel de dispositivos como a nivel de red.
- Evolución de red: No solo debe evolucionar la capacidad y velocidad de la red sino que también debe existir una evolución técnica que permita aprovechar al máximo las nuevas funcionalidades de la red.

No tendría sentido por lo tanto valorar la evolución sufrida por las comunicaciones móviles entre las generaciones 2.5G y 3G a nivel de aplicación o servicio, olvidando los avances tecnológicos a nivel de dispositivo y red que hacen posible dicha evolución.

Los operadores 3G deberán modificar el diseño de sus ofertas. En lugar de ofrecer un número limitado de aplicaciones, habrán de alcanzar acuerdos con la mayor cantidad posible de proveedores de servicios y contenidos, para cubrir un amplio campo de necesidades. Si nos fijamos en cómo hemos evolucionado (Figura 4.1), vemos cómo hace 20 años buscábamos las cartelera de un cine en los periódicos, hace diez años en internet, y actualmente la podemos consultar en nuestros dispositivos de comunicaciones móviles, llegando incluso a realizar una reserva.

Cuando alguien viajaba hace 20 años llamaba por teléfono y echaba fotos que luego tenía que revelar a su regreso. Posteriormente ya se podía hacer uso del teléfono móvil, envío de emails y guardar información en formato digital. Actualmente los dispositivos de comunicaciones móviles realizan todas estas tareas en un solo dispositivo.

Finalmente, en el ámbito del ocio, vemos como hemos partido de juegos de mesa, consolas que tenían una conectividad muy limitada, hasta llegar a nuestros días donde utilizando bien una conexión fija o inalámbrica podemos realizar partidas compartidas entre varios usuarios.



Figura 4.71 Evolución del estilo de vida

Aunque parezca reciente, se comienza a pensar en los sistemas 3G en los años 80. La ITU (Unión Internacional de las Telecomunicaciones) buscaba un sistema de comunicaciones móviles global, con las siguientes características.

- Servicios de mayor capacidad que los de aquella época.
- Mejor eficiencia espectral

Con todo esto se empezó a trabajar en un estándar llamado “Future Public Land Mobile Telecommunication System”. Posteriormente, y llegada a la conclusión que la única parte del espectro libre era la banda de 2GHz (2000MHz), se le cambió el nombre a “International Mobile Telecommunication 2000”.

En la Figura 4.2 observamos la reserva de espectro por parte de la ITU para IMT-2000, donde distinguen el segmento terrestre y el segmento satelital. Además se observa cómo Japón, Europa y EEUU adecuaron este espectro a los sistemas previos como puede ser PHS en Japón, GSM en Europa y PCS en EEUU.

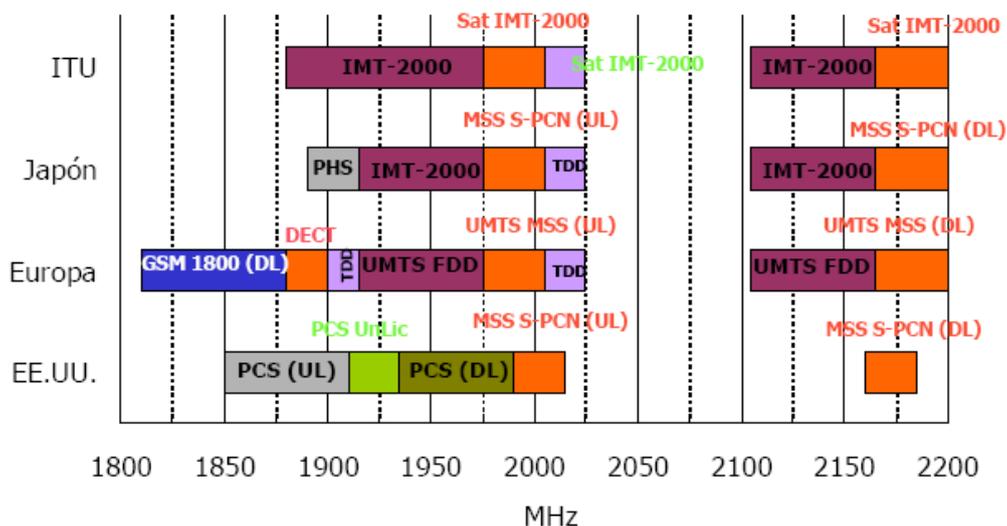


Figura 4.72. Bandas de frecuencias para Comunicaciones Móviles a 2GHz [3GPP, 2005].

Las primeras actividades relacionadas con la normalización de 3G tienen lugar en el seno de la UIT-R, donde el grupo de trabajo (8/13) investigó aspectos relacionados con los objetivos generales, las bandas de frecuencias más adecuadas, los niveles de compatibilidad y las necesidades de los países en vías de desarrollo, con relación a los futuros sistemas de 3G.

Como se ha comentado anteriormente, se le asignó finalmente el nombre de IMT 2000 (“International Mobile Telecommunications” 2000). El 2000 tiene el significado de la banda de trabajo (2000 MHz) y el año en el que debían de estar listas las Recomendaciones de la parte radio.

El objetivo inicial de un solo sistema dio paso a otro donde IMT 2000 designaba una familia de tecnologías de acceso radio. Esto fue debido a los intereses de los fabricantes en distintos países y con diferentes tecnologías, que lógicamente velaban por sus intereses y amortización de sus desarrollos. Estas familias debían cumplir las recomendaciones que establecía IMT 2000, pero no significa a priori que se pueda acceder al servicio mediante otros terminales que no sean de la propia familia. Este enfoque se aleja del objetivo inicial un solo sistema, único y global.

La UIT convoca un proceso de presentación de tecnologías que integrarían 3G. El proceso que seguiría sería la presentación por parte de miembros de la UIT seguida de una fase de consenso.

Para la elaboración de las tecnologías que participarían como candidatas en IMT-2000 trabajaron los siguientes grupos de trabajo:

- UIT (Union International of Telecommunications)
- 3GGP (Europa)
- 3GGP2 (USA)
- ETSI (European Telecommunication Standard Institute)
- Asociación GSM
- Forum UMTS (“Universal Mobile Telecommunications System”)
- “Global Mobile Suppliers Association” (GSA)
- “Operator Harmonization Group” (OHG)
- “Global Standards Collaboration” (GSC) y “Radio Standardization” (RAST)
- “Mobile Wireless Internet Forum” (MWIF)
- Comité T1P1 (USA)
- “Telecommunication Industry Association” (TIA)
- “Universal Wirelsss Communication Consortium” (UWCC)
- “CDMA Development Group”

Estos grupos de trabajo propusieron las siguientes tecnologías IMT-2000 para el segmento terrestre (recordar que IMT considera tanto segmento terrestre como satelital, aunque en esa asignatura solo se va a considerar la terrestre).

- DECT (“Digital Enhanced Cordless Telecommunications”). Propuesto por la ETSI. Se trata de una evolución del teléfono digital inalámbrico de casa con tecnología digital.
- UWC (“Universal Wireless Communication”) – 136. TIA y UWCC.
UWC-136 es una evolución desde la norma IS-136 de TDMA de 2G. Utiliza una canalización de 30kHz con una modulación más potente (EDGE) más una variante de banda ancha (para datos de alta velocidad que no son posibles con la

canalización estrecha) de 200kHz para exteriores (384kbps) y 1.6MHz para interiores (2Mbps).

- WIMS (“Wireless Multimedia and Messaging Services”). TIA
- ARIB (“Association of Radio Industries and Bussinesses”) WCDMA. Japón WIMS. Admite propuestas similares del ARIB (Association of Radio Industries and Bussinesses). FDD y TDD.
- CDMA I. TTA Corea. Basada en WCDMA síncrono.
- CDMA II. TTA. Corea. Basada en WCDMA asíncrono.
- UTRA (UMTS “Terrestrial Radio Access”). Propuesta de la ETSI, que es quien derivará en el sistema 3G que conocemos actualmente. Incluye TDD y FDD.
- WCDMA/NA. Norte América. Comité T1P1. Esta solución busca converger con otras propuestas con tecnología CDMA. Su objetivo es asegurar que los operadores PCS 1900 de 2G puedan converger a 3G.
- CDMA 2000. TIA. Quieren asegurar la evolución de los sistemas IS-95 de 2G. Incluye FDD y TDD. Los anchos de banda que admite son múltiplos de 1.25MHz (utilizado por IS-95). Este, junto con UMTS, son los dos estándares más implantados actualmente en el mundo de 3G.
- TD-SCDMA (Time Division Synchronous CDMA). China. Acceso TDD. Posibilidad de converger con otras propuestas. Canalización de 1.4MHz.

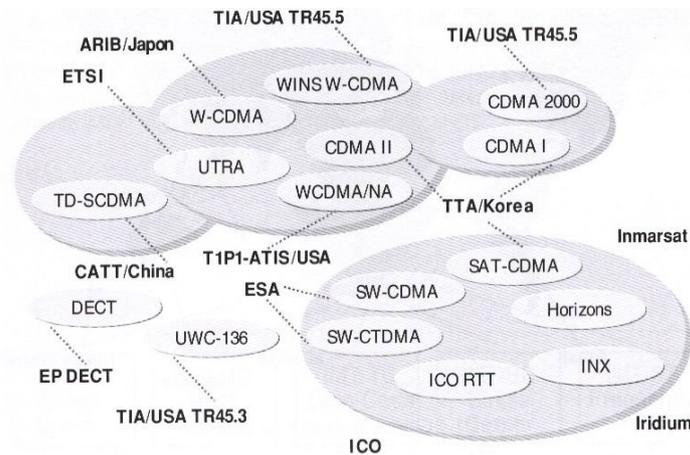


Figura 4.73. Mapa de tecnologías propuestas para IMT-2000 [Rabanos1].

En la Figura 4.3 se puede ver el mapa de tecnologías que se propusieron. De todas ellas, se eligieron las seis más representativas. Esta selección de tecnologías se realizó entre junio 1998 a Marzo 1999 a partir de las propuestas de la componente terrestre IMT-2000.

- UTRA: Proviene de CDMAII, ARIB WCDMA y UTRA
- WP-CDMA: Proviene de WIMS y NA WCDMA

- CDMA-2000: Proviene de CDMA2000 y CDMAI
- TD-SCDMA: Proviene de TD-SCDMA
- UWC-136: Proviene de UWC-136
- DECT: Proviene del DECT

En Europa, GSM era el estándar 2G y GPRS el estándar 2.5G. Para evolucionar hasta IMT-2000, y en concreto UMTS se siguieron unas fases de implantación que se pueden resumir de la siguiente forma:

- Extensión de la capacidad GSM mediante operaciones de transmisión de datos de alta velocidad y en paquetes (GPRS).
- Fase de Prueba preliminar de UMTS ya sea en subconjuntos de redes GSM reales o en redes basadas en paquetes de datos aislados.
- Fase de despliegue básico a partir del año 2002, incluyendo la incorporación de estaciones de base UTRA (Acceso Universal Radioeléctrico Terrestre) a redes “activas” y el lanzamiento de servicios UMTS basados en satélites.
- Fase comercial completa (2002-2005), con mejoras en cuanto a desempeño y capacidad, y la introducción de servicios UMTS nuevos y sofisticados.

Las velocidades máximas teóricas de transmisión de datos en UMTS eran:

- Medio rural: 144 kbps (objetivo 384 kbps), a velocidad máxima de 500km/h.
- Zona suburbana: 384 kbps (objetivo 512 kbps), a 120 Km/h.
- Interior, microcélulas: 2 Mbps

Estas velocidades son las que recoge el estándar UMTS, habiendo sido mejoradas actualmente mediante las tecnologías HSDPA, HSUPA, HSPA+

En España se sacaron 4 licencias a concurso público en Marzo de 2002. Estas licencias permitían operar en la banda de 2GHz con la tecnología UMTS/WCDMA. Las cuatro empresas que adjudicatarias del concurso fueron:

- Amena – www.amena.com
- Telefonica Moviles España – www.telefonica.es
- Vodafone – www.vodafone.es
- Xfera



Como comparativa con otros países vemos en la Figura 4.4 las fechas de alta comercial en las fases de inicio de UMTS.

2001				Telefónica Móviles			
NTT DoCoMo	Japón	01-10-2001	Comercial	España	24-05-2004	Comercial	
2002				Vodafone			
Vodafone KK	Japón	20-12-2002	Comercial	España	25-05-2004	Comercial	
Vodafone	Italia	25-05-2004	Comercial	Vodafone	Italia	25-05-2004	
2003				Cosmote			
3	Reino Unido	03-2003	Comercial	Grecia	26-05-2004	Comercial	
3	Italia	03-2003	Comercial	Tele2	Suecia	01-06-2004	
3	Australia	15-04-2003	Comercial	Optimus	Portugal	02-06-2004	
Mobilkom	Austria	25-04-2003	Comercial	SFR	Francia	06-06-2004	
3	Austria	05-05-2003	Comercial	Cellcom	Israel	06-06-2004	
3	Suecia	16-06-2003	Comercial	Etisalat	Emiratos Árabes Unidos	10-06-2004	
3GIS *	Suecia	16-06-2003	Comercial	Tele2/Tango	Luxemburgo	15-06-2004	
3	Dinamarca	13-10-2003	Comercial	O2	Alemania	01-07-2004	
MTC-Vodafone	Bahrein	28-12-2003	Comercial	Vodafone	Irlanda	07-07-2004	
One	Austria	30-12-2003	Comercial	KPN	Holanda	15-07-2004	
tele.ring	Austria	31-12-2003	Comercial	Orange	Reino Unido	19-07-2004	
2004				T-Mobile			
3	Hong Kong	27-01-2004	Comercial	Reino Unido	19-07-2004	Comercial	
TIM	Grecia	27-01-2004	Comercial	AT&T Wireless ***	Estados Unidos	20-07-2004	
Mobitel	Eslovenia	02-2004	Comercial	T-Mobile	Austria	21-07-2004	
TeliaSonera	Suecia	10-03-2004	Comercial	Vodafone	Grecia	11-08-2004	
Vodafone	Holanda	02-04-2004	Comercial	KPN E+	Alemania	16-08-2004	
Vodafone	Reino Unido	02-04-2004	Comercial	Partner	Israel	18-08-2004	
Vodafone	Suecia	02-04-2004	Comercial	Polkomtel	Polonia	02-09-2004	
TMN	Portugal	21-04-2004	Comercial	Orange	Francia	02-09-2004	
Vodafone	Alemania	04-05-2004	Comercial	O2	Reino Unido	04-10-2004	
Vodafone	Portugal	04-05-2004	Comercial	Sonera	Finlandia	12-10-2004	
T-Mobile	Alemania	05-05-2004	Comercial	Swisscom	Suiza	15-10-2004	
PT Luxembourg	Luxemburgo	02-05-2004	Comercial	Amena	España	22-10-2004	
VOXmobile **	Luxemburgo	12-05-2004	Comercial	Wind	Italia	28-10-2004	
Proximus	Bélgica	13-05-2004	Comercial				
TIM	Italia	04-05-2004	Comercial				
Telefónica Móviles	España	24-05-2004	Comercial				
Vodafone	España	25-05-2004	Comercial				

Figura 4.74. Fechas de despliegue de UMTS en diferentes países [UMTS Forum, 2005].

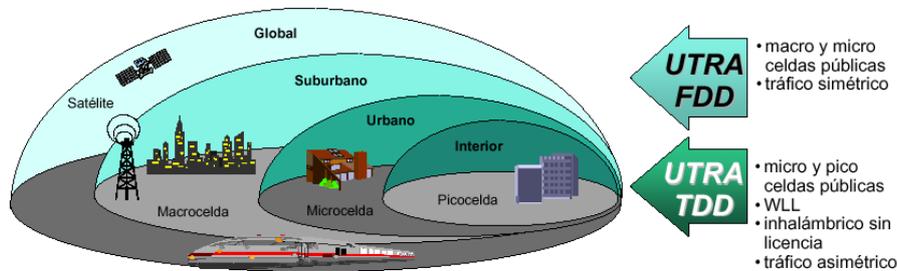
Como resumen, las características más importantes de UMTS son:

1. UMTS mantendrá compatibilidad con GSM.
2. La frecuencia para UMTS será de 2GHz y será posible transmitir datos a 2 Mbps (soportará videoconferencia móvil).
3. Integra transmisión de paquetes, así que dispondrá de conexión permanente a la red y se podrá facturar por volumen de datos en lugar de por tiempo.
4. Velocidad adaptable, se optimiza su uso, al asignar el ancho de banda de forma dinámica (dependiendo del tipo de llamada, imagen, voz,...).
5. Sistema global, diseñado para funcionar en todo el mundo, empleando tanto redes terrestres como enlaces por satélite.
6. Proporcionará servicios de usos fáciles y adaptables para abordar las necesidades y preferencias de los usuarios.
7. Bajos costos del servicio para asegurar un mercado masivo, con tarifas competitivas.

En cuanto al diseño de celdas, UMTS sigue las líneas de IMT-2000, cuya intención era brindar servicios en cualquier parte del mundo a través del empleo de diversas tecnologías integradas en un solo sistema, ajustándose a diferentes entornos geográficos y densidades de tráfico. Por lo tanto, se ha establecido una estructura de capas de células, clasificándose en cuatro categorías, las cuales pueden funcionar simultáneamente dentro de una misma área geográfica.

- Megacélulas: tienen radios desde 100 hasta 500 Km. Ofrecen amplia cobertura para zonas con baja capacidad de tráfico a través del uso de satélites no geoestacionarios. Soportan velocidades de estaciones móviles elevadas.

- **Macrocelulas:** tienen radios desde 1 hasta 35 Km. Se emplean para ofrecer coberturas en lugares rurales, carreteras y poblaciones cercanas.
- **Microcelulas:** tienen radios desde 50 m hasta 1 Km. Ofrecen servicio a usuarios fijos o que se muevan lentamente con elevada densidad de tráfico.
- **Picocelulas:** tienen radios menores a 50 m. Ofrecen coberturas localizadas en interiores



FDD: Servicio público con movilidad total a 144-384 Kbps

TDD: Servicio público con movilidad local hasta 2 Mbps

Figura 4.75. Jerarquía de celdas en UMTS [Siemens].

4.2. Arquitectura UMTS.

La arquitectura general del sistema UMTS consta básicamente de 3 bloques: la estación móvil o equipo de usuario, la red UTRA, que denominaremos UTRAN (“UTRA Network”) y la red troncal (“Core Network”).

- Núcleo de red (*Core Network*)
- Red de Acceso (*UMTS Terrestrial Radio Access Network UTRAN*)
- Terminales Móviles (*User Equipment UE*)

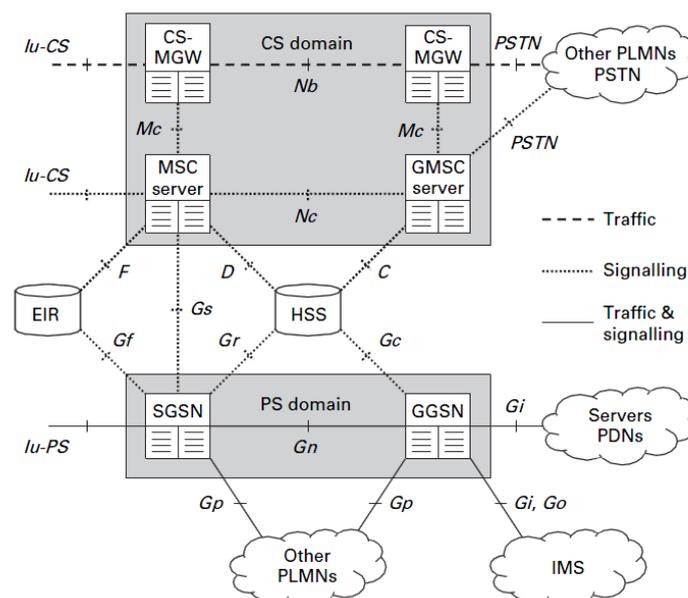


Figura 4.76. Diagrama de bloques de un sistema UMTS [Cox].

Lo fundamental que distingue UMTS de otras soluciones IMTS es la tecnología UTRAN, que es el acrónimo de: UMTS “Terrestrial Radio Access Network” (Acceso por Radio a la Red Terrestre UMTS). UTRAN hace posible la conexión del terminal usuario con el núcleo de la red UMTS. La interfaz radio UTRA (UMTS “Terrestrial Radio Access”) es la propuesta europea para el sistema UMTS.

Es necesario para comprender mejor 3G, relacionar los elementos de una red GSM con su equivalente UMTS. Las primeras diferencias entre una red GSM y otra UMTS se encuentran en la capa de acceso, donde las BTS y las BSC (propias de GSM) se sustituyen por los Nodos-B y los RNC (“Radio Network Controller”), respectivamente; por tanto se hace necesario desplegar una nueva red de acceso por radio (UTRAN). La UTRAN llega sólo hasta los RNS (“Radio Network Subsystem”), la red central no forma parte de ella y los Puntos de Acceso al Servicio Iu son las interfaces entre la red UTRA y la red central.

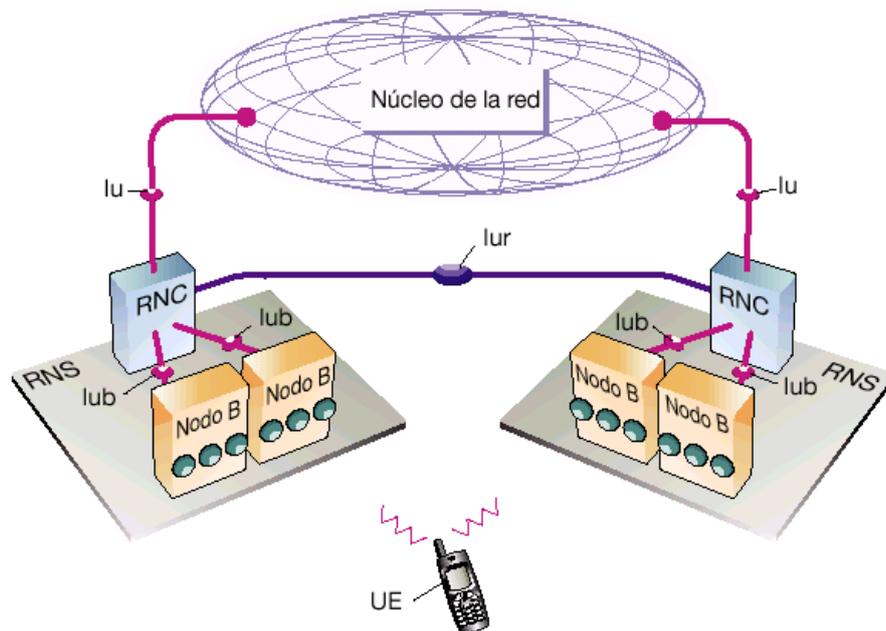


Figura 4.77. Estructura de una red UMTS [3GPP]

La tecnología UTRAN está basada en la tecnología de acceso CDMA, y presenta 2 modos de funcionamiento: UTRA-FDD y UTRA-TDD:

- El modo UTRA-FDD o acceso radio CDMA de banda ancha (WCDMA) hace que distintos usuarios compartan una misma portadora al mismo tiempo, y la comunicación bidireccional se lleva a cabo utilizando 2 portadoras (cada una de 5 MHz) en frecuencias distintas, una para el enlace ascendente y otra para el descendente.
- En el modo UTRA-TDD, para realizar la comunicación dúplex utilizando una única portadora se añade la división por tiempo empleando la técnica TDMA, es decir, se añade el recurso temporal (Time-slot) al código para diferenciar a un usuario de otro dentro de un mismo radiocanal.

Ambos modos de funcionamiento tienen una velocidad de chip (ver más adelante) de 3,84 Mchip/s, y un período de trama de 10 ms con 15 intervalos, cada uno de duración 2/3 ms. Existe una gran flexibilidad en la velocidad binaria: 12.2, 16, 64, 144, 384 y 2048 kbps. Además es posible multiplexar servicios y tener tráfico asimétrico.

4.2.1 Núcleo de red

Incorpora funciones de transporte (información y señalización) y de inteligencia (encaminamiento). A través del núcleo de red, el sistema UMTS puede estar conectado con otras redes de telecomunicación. En una primera fase de diseño, el núcleo de red está basado en las redes actuales 2G, 2.5G y se configura tanto en el dominio de conmutación de circuitos como en el de conmutación de paquetes. La evolución del núcleo de red va a ser hacia el dominio de modo paquete, siguiendo el protocolo TCP/IP. De hecho, este concepto de todo IP, se extenderá a la interfaz radio. Ello supondría la desaparición del modo circuito, para absorber todo el tráfico (incluso la voz) en el dominio del modo paquete.

El Núcleo de Red incorpora funciones de transporte y de inteligencia. Las primeras soportan el transporte de la información de tráfico y señalización, incluida la conmutación. El encaminamiento reside en las funciones de inteligencia, que comprenden prestaciones como la lógica y el control de ciertos servicios ofrecidos a través de una serie de interfaces bien definidas; también incluyen la gestión de la movilidad. A través del Núcleo de Red, el UMTS se conecta con otras redes de telecomunicaciones, de forma que resulte posible la comunicación no sólo entre usuarios móviles UMTS, sino también con los que se encuentran conectados a otras redes.

4.2.2 Red de Acceso UTRAN

La red de acceso UTRAN proporciona la conexión entre los terminales móviles y el núcleo de red. Los elementos funcionales que la componen son:

- **Nodos B:** Es el equivalente a la estación base de GSM, y es el responsable de la transmisión/recepción a/desde los terminales de usuario en una o más células.
- **Controlador radio (“Radio Network Controller”):** Controla uno o más Nodos B, controla el uso e integridad de los recursos radio, es responsable de las decisiones que requieren señalización a los terminales de usuario (UE) y tiene las funciones de separación/combinación la macro diversidad entre nodos B.

Las diferentes partes de la red UTRAN se interrelacionan con interfaces que están definidos por el 3GPP, siendo los principales (ver Figura 4.7).

- Interfaz Núcleo de Red- RNC (I_U)
- Interfaz RNC-RNC (I_{UR})
- Interfaz RNC-Nodo B (I_{UB})
- Interfaz radio (I_{U})

Como se habló en el apartado de Técnicas de Acceso al Medio, los sistemas de comunicaciones móviles permiten el acceso de diferentes usuarios mediante FDMA, TDMA y CDMA. De nuevo, como ya se ha visto la primera técnica corresponde a

sistema de primera generación, TDMA para sistemas de segunda generación y CDMA para 3G.

Si el núcleo de red del sistema UMTS ofrece un enfoque evolutivo, la red de acceso supone una ruptura con la del sistema GSM. Y ello, es debido principalmente a que la técnica de acceso utilizada es DS-SS-SSS (“Direct Sequence-Code Division Multiple Access”), diferente al TDMA (“Time Division Multiple Access”) utilizado por el GSM.

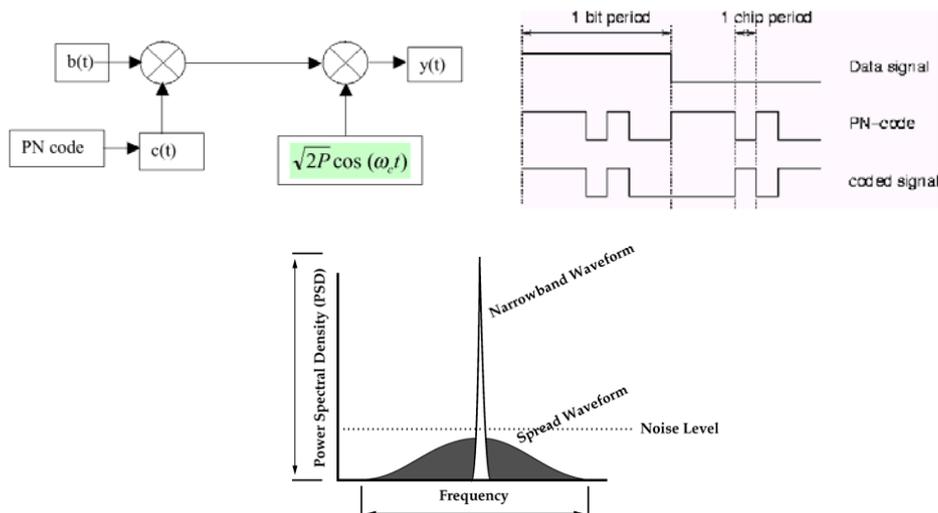


Figura 4.78. Técnica de acceso al medio por multiplexación en código [NewWave, 2005].

La señal digital en banda base (de banda estrecha) se multiplica por una secuencia conocida por los extremos de la comunicación, que posee una velocidad binaria mayor (un espectro de ancho de banda mayor que la de banda base). El producto (una señal de espectro ensanchado) modula a una portadora resultando la señal modulada (de ancho de banda 5MHz en UMTS) que es la que se transmite al canal. Esta señal modulada tiene un ancho de banda mucho mayor que la que tendría la señal modulada si la señal moduladora fuese la señal en banda estrecha. En la Figura 4.8 se puede observar el diagrama de bloques donde la señal útil $b(t)$ se multiplica por la secuencia pseudoaleatoria (PN code), de datagrama en el tiempo de las señales originales y ensanchadas, y finalmente el ensanchamiento de la señal original en frecuencia (PSD).

En recepción, la señal demodulada se multiplica por la misma secuencia, lo que permite la recuperación de la señal en banda base. Esta operación restaura el ancho de banda de la señal útil (banda estrecha), pero en cambio ensancha la de cualquier señal interferente de banda estrecha que pudiese recibirse, reduciendo la cantidad de energía de ésta que interfiere con la señal útil, en proporción al ensanchamiento efectuado.

El grado de ensanchamiento que experimenta la señal en banda base se le denomina “Spreading Factor” (SP), que es la relación también entre la duración de un bit de la señal en banda base y la duración de un chip de la señal ensanchada (ver Figura 4.8). Un chip denota un estado de la señal digital moduladora que resulta de multiplicar la señal digital en banda base por la secuencia con la que aumenta su velocidad.

El producto de una secuencia con ella misma produce un valor mucho mayor que el producto de esa misma secuencia con una réplica de sí misma desplazada en el tiempo en uno o más chips o con otra secuencia diferente.

Las secuencias empleadas pueden ser: pseudoaleatorias u ortogonales.

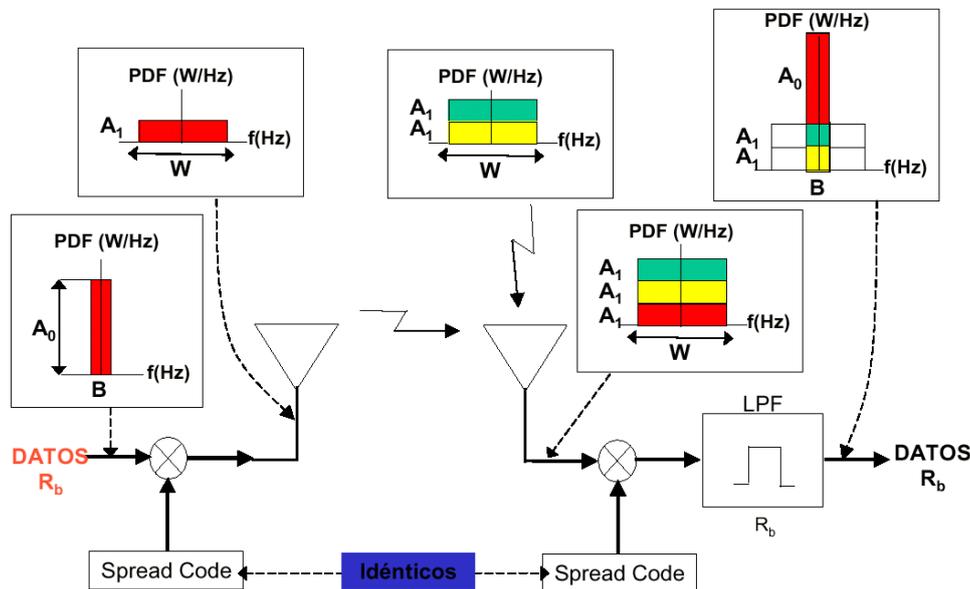


Figura 4.79. Técnica de acceso al medio por multiplexación en código [3GPP].

En la Figura 4.9, de nuevo podemos observar cómo la señal útil en rojo, es ensanchada para transmitirse por canal, donde compartirá el medio con otras señales tanto en tiempo y frecuencia (señales verde y amarilla). En el receptor, si los códigos de ensanchado son idénticos podremos recuperar la señal útil, admitiendo cierta interferencia de las otras señales. Es por todo esto que estos sistemas están limitados por un número dado de usuarios, que harán que la señal útil no pueda recuperarse con un nivel de ruido (interferencia) elevado.

Dicho de otra forma, la relación entre la potencia de la portadora y la señal interferente desciende a medida que aumenta el número de transmisiones simultáneas, una consecuencia de este efecto es lo que se conoce como respiración celular: la cobertura de una misma estación base es mayor o menor dependiendo de la carga (número de comunicaciones simultáneas). Es por tanto, muy importante el control de potencia en sistemas que hagan uso de esta técnica de acceso. Esto se verá más adelante.

En UMTS, en el **enlace descendente** la multiplicación por la secuencia correspondiente se realiza en dos pasos: primero se realiza una multiplicación por una **secuencia denominada de canalización**, mediante la cual se ensancha la banda, y que se utiliza para separar las transmisiones entre usuarios de una misma célula (secuencias diferentes para usuarios diferentes dentro de una misma célula). Seguidamente, se efectúa una segunda multiplicación por una **secuencia de aleatorización (scrambling)**, cuya misión es separar las transmisiones entre células (secuencia igual para todos los usuarios de una misma célula y diferente de las de otras células). La señal resultante es la señal moduladora.

En cuanto a las bandas de funcionamiento de UMTS, como ya se vio en la Figura 4.2, estarán en torno a 2GHz. UMTS realiza transmisiones en radiofrecuencia de 5MHz de ancho de banda, tanto en FDD como TDD.

Existen dos tipos de uso del espectro para UMTS, las bandas pareadas y las no pareadas. Este uso está relacionado con el duplexado, el primero con FDD y el segundo

con TDD. En cuanto a las bandas pareadas, la siguiente tabla resume las bandas de operación en todo el mundo:

Banda de operación	Frecuencias de UL	Frecuencias de DL
I	1920 – 1980 MHz	2110 –2170 MHz
II	1850 –1910 MHz	1930 –1990 MHz
III	1710-1785 MHz	1805-1880 MHz

Tabla 4.1: Bandas pareadas de UMTS (FDD)

En España, la componente FDD (banda pareada) se fija en la banda de operación I: 1920-1980 MHz para el canal ascendente y 2110-2170 MHz para el enlace descendente. Con esto se consiguen dos bandas de 60MHz, o lo que es lo mismo 12 portadoras (ascendente y descendente) de 5MHz con duplexado FDD. Se le asignaron tres portadoras a cada licencia de operación de UMTS.

La siguiente tabla resume las bandas de operación en todo el mundo para las bandas no pareadas.

Banda de operación	Frecuencias UL y DL
I	1900-1920 y 2010-2025 MHz
II	1850-1910 y 1930-1990 MHz*
II	1910-1930 MHz*

Tabla 4.2: Bandas no pareadas de UMTS (TDD)

En España también se utilizó la banda de operación I: 2010-2025 MHz para el enlace descendente y 1900-1920 MHz para el enlace ascendente. Esto da lugar a 35 MHz en total, o lo que es lo mismo 7 Portadoras con TDD. Se dio una portadora TDD para cada una de las licencias. Es decir, en España se otorgaron 4 licencias con 3 FDD y 1 TDD para cada una de ellas.

Para terminar, se reservó espectro para el servicio satelital aunque por el momento no está operativo. La siguiente tabla resume las dos bandas reservadas por la ITU:

Bandas de operación	Frecuencia
I	1980-2010 y 2170-2200 MHz
II	1990-2020 y 2155-2185 MHz

Tabla 4.3: Bandas satelitales en UMTS

En la actualidad se utiliza de una forma generalizada el modo FDD. Éste recibe también el nombre WCDMA. La transmisión se identifica por la portadora y la

secuencia multiplicadora (producto de la secuencia de canalización y la secuencia de aleatorización). La modulación utilizada es QPSK.

En el enlace descendente, se utilizan 8.192 códigos de aleatorización divididos en 512 grupos de 16 códigos. Cada célula dispone de uno de estos grupos. Por tanto, los códigos definen un patrón de reutilización de 512 células. La separación de transmisiones dentro de una misma célula se realiza mediante secuencias ortogonales que son asignadas eficientemente por la red.

En el enlace ascendente, tanto las transmisiones dentro de una misma célula como entre células, se desacoplan mediante secuencias pseudoaleatorias, asignadas de forma descentralizada, según unas reglas predefinidas. El número de códigos es muy alto (16.777.216), por lo que la probabilidad de coincidencia en una misma secuencia para dos transmisiones solapadas en cobertura es muy pequeña.

En UMTS cada trama dura 10ms (Figura 10), y contiene 15 intervalos, cada uno de ellos con 2560 chips. La velocidad de transmisión es de 3.84 Mchips/s. Las tramas se agrupan de 72 en 72 para formar una supertrama de duración 720ms. En la siguiente tabla se resumen las características de las tramas para UMTS.

Modulación	Dual channel QPSK para el UL Balanced QPSK para el DL
Modulación de datos	BPSK para el UL QPSK para el DL
Ensanchado	Códigos OVSF Factor de ensanchamiento de 4-256 para el UL Factor de ensanchamiento de 4-512 para el DL
Scrambling (Cifrado)	Scrambling complejo, códigos Largos y cortos
Longitud de la trama	10ms
Tasa de Chip	Fija a 3.84 Mcps

Tabla 4.4: Características de la capa física en UMTS

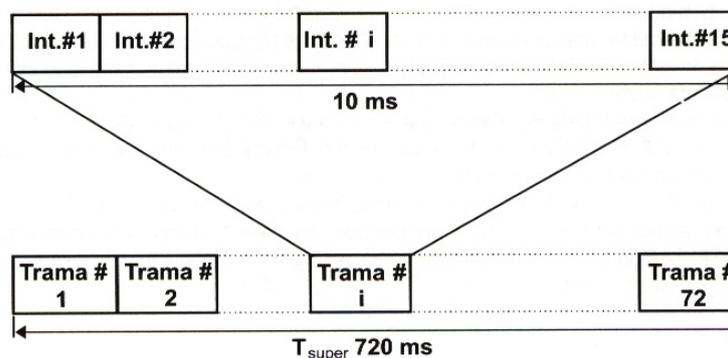


Figura 4.80. Estructura de tramas en UMTS [Rabanos1].

La definición de un canal físico en este marco está caracterizada por una frecuencia, un código y un slot dentro de la estructura de trama que, al igual que para UTRA-FDD, tiene una duración de 10 ms y se subdivide en 15 slots. Puesto que la tasa de chips es 3.84 Mchips/s, un slot estará compuesto de 2560 chips y un número variable de bits según sea la ganancia de procesamiento (SF) empleada. Los posibles valores de SF

son 1, 2, 4, 8 y 16, lo que representa un rango de velocidades desde 3.84 Msímbolos/s a 240 Ksímbolos/s. Dependiendo del “Spreading Factor” (SF) tendremos más o menos velocidad. Si aumenta el SF significa que el bit transmitido aumenta su duración que el chip, es decir, transmitimos menos bits por segundo. Si el SF decrece, entonces el bit transmitido se reduce por lo que se transmiten más bits por segundo [UMTS The fundamentals].

Los canales UMTS se dividen en tres tipos, canales lógicos, de transporte y físicos.

- **Canal lógico:** Se definen por el tipo de datos que transmiten.
 - Canal lógico de control: Información del plano de control.
 - Canal lógico de tráfico: Información del plano de usuario.
- **Canal de transporte:** Reclasificación de los canales lógicos según cómo y con qué características se va a enviar por el medio físico.
 - Canal transporte dedicado
 - Canal transporte común
- **Canal físico:** Formato concreto con que éstos se transmiten por el interfaz radio. Definido por: frecuencia, código de canalización, código de aleatorización, intervalo de tiempo de transmisión, fase relativa en enlace ascendente, número de slot (TDD), tipo de ráfaga (TDD).

Los canales lógicos se definen teniendo en cuenta lo que se transmite, pero no cómo se transmite que concierne a los canales de transporte. En la tabla V se resumen los canales lógicos más importantes.

BCCH (<i>Broadcast Control</i>)	Desc. Ctrl.	Difusión información del sistema
PCCH (<i>Paging Control</i>)	Desc. Ctrl.	Envío de información de aviso cuando no se conoce su ubicación
CCCH (<i>Common Control</i>)	Bid. Ctrl.	Info de control terminal situación desconocida.
DCCH (<i>Dedicated Control</i>)	Bid. Ctrl.	Info de control a terminal específico
SHCCH (<i>Shared Control</i>)	Bid. Ctrl.	Info control en TDD
DTCH (<i>Dedicated Traffic</i>)	Bid. Tráf.	Tráfico de un móvil específico
CTCH (<i>Common Traffic</i>)	Bid. Tráf.	Tráfico punto-multipunto

Tabla 4.5: Canales lógicos de la interfaz UMTS-FDD

Los canales de transporte se definen por cómo y con qué características se transmite la información, atendiendo a una serie de atributos propios del procesamiento en la capa física (por ejemplo, el tipo de control de potencia o la variabilidad o no de la

tasa binaria). Se dividen en dos clases: comunes y dedicados. A veces un canal lógico es soportado por varios tipos de canales de transporte. En la tabla VI se resumen los canales de transporte más importantes.

BCH (<i>Broadcast</i>)	Compart. Desc.	Difusión de información
FACH (<i>Forward Access</i>)	Compart. Desc.	Envío tráfico o señalización a terminales situación desconocida
PCH (<i>Paging</i>)	Compart. Desc.	Envío información a terminales situación desconocida
DSCH (<i>Downlink Shared</i>)	Compart. Desc.	Canal de asignación compartido
RACH (<i>Random Access</i>)	Compart. Asc.	Acceso aleatorio
CPCH (<i>Common Packet</i>)	Compart. Asc.	Transmisión de paquetes
DCH (<i>Dedicated</i>)	Dedic. Bidirec.	Envío datos o señalización a un terminal en concreto.

Tabla 4.6: Uso y categorización de los canales de transporte FDD

UMTS es un sistema muy flexible que permite abrir, mantener y cerrar diferentes conexiones simultáneas con un mismo terminal móvil, dichas conexiones pueden establecerse mediante canales de transporte independientes unos de otros o multiplexarse en un solo canal de transporte. Cada canal de transporte se corresponde con un canal físico.

Un canal muy importante es el DCH. Este canal es bidireccional. En el sentido descendente, multiplexa en el tiempo la parte de datos de tráfico y la de señalización, alternando los campos de información relativos a cada parte. En el sentido ascendente, las dos partes se envían simultáneamente en el tiempo, pero sobre fases de la portadora diferentes. Es apto para comunicaciones en modo circuito y en modo paquete.

Los canales físicos se corresponden con el formato concreto con que éstos se transmiten por el medio radio. También hay una correspondencia entre los canales de transporte y los físicos.

En GSM los intervalos de tiempo se corresponden con canales físicos. En UMTS, en el modo FDD, para una misma portadora, los canales físicos se separan mediante sus secuencias. En el enlace descendente, cada uno de ellos toma una fracción de la potencia total de la portadora. En el enlace ascendente, cada canal físico es transmitido desde el terminal móvil correspondiente, de manera que el control de potencia intenta que lleguen al Nodo B con un nivel adecuado. Dependiendo del tipo de canal, la secuencia correspondiente puede asignarse con carácter dedicado (para uso exclusivo de ese canal durante la duración de la conexión) o compartido, en ciertos momentos se utiliza para una conexión y el resto para otras. En la tabla VII se listan los canales físicos más importantes.

P-CCPCH (<i>Primary Common Ctrl Physical</i>)	Soporta el BCH
S-CCPCH (<i>Secondary Common Control Phi</i>)	Soporta FACH y el PCH
PDSCH (<i>Physical Downlink Shared Channel</i>)	Soporta el DSCH
PRACH (<i>Physical Random Access Channel</i>)	Soporta el RACH
PCPCH (<i>Physical Common Packet</i>)	Soporta el CPCH
DPDCH (<i>Dedicated Physical Data Channel</i>)	Soporta tráfico del DCH
DPCCH (<i>Dedicated Phys. Control Channel</i>)	Soporta señalización DCH
CPICH (<i>Common Pilot Channel</i>)	Piloto referencia de potencia y fase
SCH (<i>Synchronization Channel</i>)	Permite la sincronización
AICH (<i>Acquisition Indication Channel</i>)	Notifica aceptación o rechazo del RACH
AP-AICH (<i>Access Preamble Acquisition Indi</i>)	Como AICH pero del CPCH
CSICH (<i>CPCH Status Indicator Channel</i>)	Informa disponibilidad del CPCH
CD/CA-ICH (<i>CPCH Collision Dete....</i>)	Informa colisiones del CPCH y la asignación
PICH (<i>Page Indicator Channel</i>)	Informa si decodifican el PCH si mensaje

Tabla 4.7: Canales físicos del modo FDD

Destacamos los siguientes canales físicos:

Canal PDSCH: Va asociado a un DSCH. Permite el establecimiento de varias conexiones con diferentes terminales móviles, asignando a todos ellos el mismo código de canalización.

Canal PRACH: Permite a los móviles efectuar sus solicitudes de acceso aleatorio para solicitar recursos de transmisión. Con respecto a su homólogo del GSM, a diferencia de éste, puede contener una parte de mensaje que sirve para enviar información de tráfico; básicamente, mensajes cortos.

Canal PCPCH: Es exclusivo del enlace ascendente y sólo para transmisiones en modo paquete. Es parecido al PRACH.

Canal SCH: Permite a los móviles sincronizarse con las transmisiones de una célula determinada.

El control de potencia es un tema muy importante en UMTS. En el caso de GSM, el control de potencia ayuda a reducir el nivel general de ruido y a mejorar la C/I. El salto de frecuencia (“frequency hopping”) contribuye positivamente a ello. Sin embargo en el UMTS es fundamental. Si se transmite con una potencia muy elevada disminuimos la capacidad del sistema.

Existen dos estrategias de control de potencia: el control de potencia en lazo cerrado y el control de potencia en lazo abierto. En el caso de UTRA se necesita un control de potencia denominado en lazo cerrado que se divide en dos partes: el control de potencia interno o rápido y el control de potencia externo. La interacción entre los dos controles se basa en que a partir de la estimación de la señal recibida y de las condiciones de carga el control externo fija los umbrales de señal que el control interno se encarga de ajustar de forma precisa.

El control de potencia en lazo abierto se basa en realizar una estimación aproximada de las pérdidas del canal a partir de la señal piloto del enlace descendente y a partir de ahí establecer las potencias de transmisión. UTRA usa este control para establecer la potencia de transmisión cuando una estación móvil inicia una conexión o en el caso de transmisiones de paquetes cortos. Concretamente en los canales comunes FACH, RACH y CPCH, usados para la transmisión de pequeños paquetes individuales, donde no existe un canal de retorno y no se puede aplicar un control de potencia en lazo cerrado, se aplica un control en lazo abierto. Este control se establece mediante un preámbulo de 8 bits que incluso viene acompañado con un control de potencia rápido.

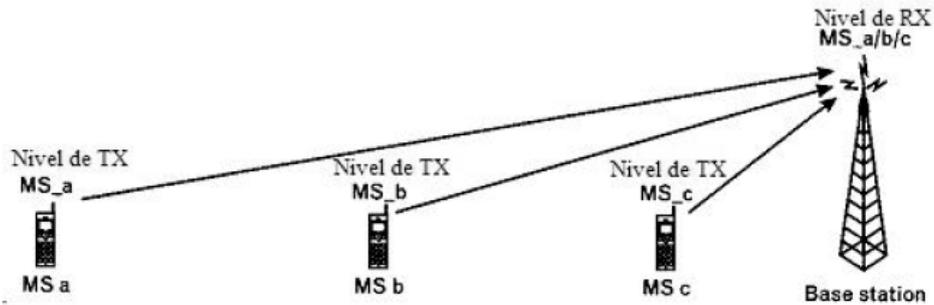


Figura 4.81. Control de potencia [Rabanos1].

Al usar UMTS el sistema CDMA, no es necesario que cada estación base trabaje a una frecuencia distinta, por lo que el handover que aparece se conoce como soft-handover, en contraposición al hard-handover que se daba en GSM. Aquel consiste en que cada estación móvil monitorizará constantemente los niveles de señal recibidos de las distintas estaciones base vecinas a la que se encuentra conectada actualmente. Esta información es enviada a la red, la cual en función de cuál es la base con un nivel de señal más fuerte o débil, dirá al móvil si deberá continuar enganchada a la estación base actual o deberá abandonarla para conectarse a alguna de las vecinas.

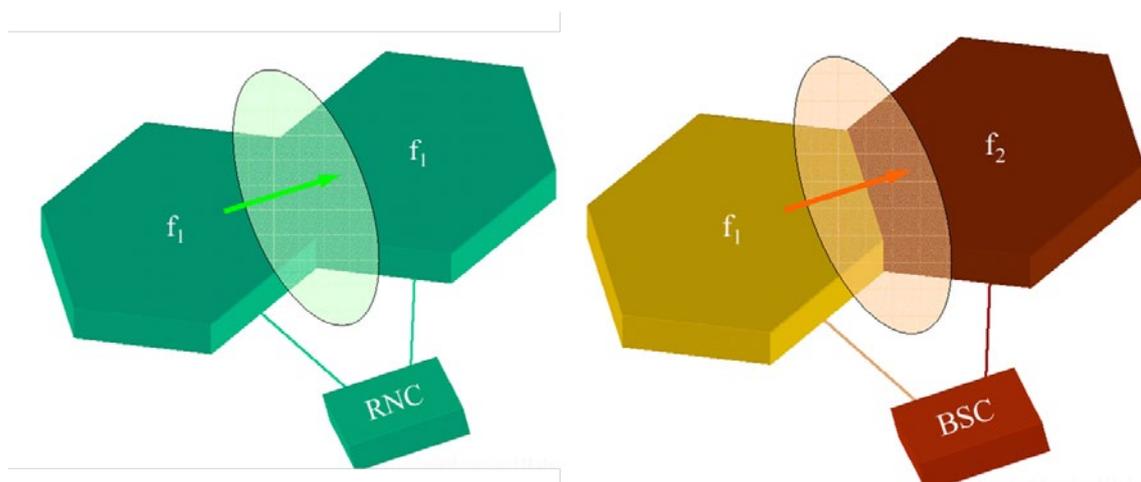


Figura 4.82. Soft handover y hard handover [3GPP, 2005].

4.2.3 Terminales Móviles

Los terminales móviles en UMTS se dividen en dos dominios:

- ME ("Mobile Equipment Domain"). Transmisión y recepción de la señal radio. Puede contener aplicaciones.

- MT (“Mobile Termination”): Operaciones del interfaz radio.
- TE (“Terminal Equipment”): Aplicaciones extremo a extremo.
- USIM (“User Identity Module”). Tarjeta extraíble. Datos y procedimientos para identificar al usuario frente a la red.

Como ya se observa en el mercado, los terminales móviles UMTS adoptan un rango muy versátil de configuraciones: móvil, tarjeta PCMCIA, agenda electrónica, PDA, etc.

Los terminales móviles pueden descomponerse en tres módulos hardware bien definidos como se muestra en la figura que son: el módulo de radio (RF radio frecuencia), el módulo de audio (AF audiofrecuencias) y el módulo lógico de control (CPU).

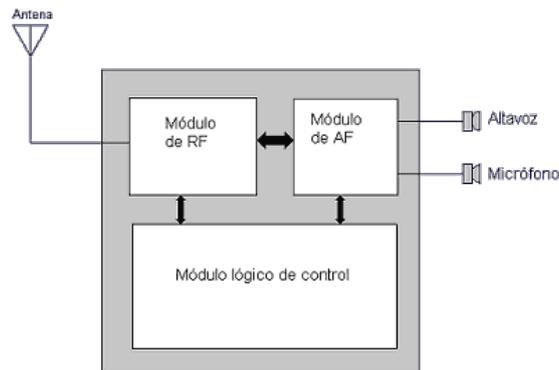


Figura 4.83. Módulos de un terminal móvil [PFC].

El circuito receptor de RF filtra y demodula las señales recibidas. La salida del módulo de RF se aplica al módulo de AF. En el módulo de RF se filtran las señales de RF y se convierten a señales banda base analógicas (parte transmisora). También en este módulo se filtran las señales analógicas en banda base y luego se convierten en señales de RF (parte receptora).

Las señales de voz provienen del módulo de AF y las señales de información provenientes de la unidad lógica de control se envían al circuito transmisor de RF que las coloca sobre la portadora de RF apropiada, las filtra, las amplifica y las aplica a la antena. La frecuencia portadora de RF está determinada por la celda particular en que se encuentre.

En el siguiente dibujo podemos observar una visión detallada de los componentes de la sección de RF.

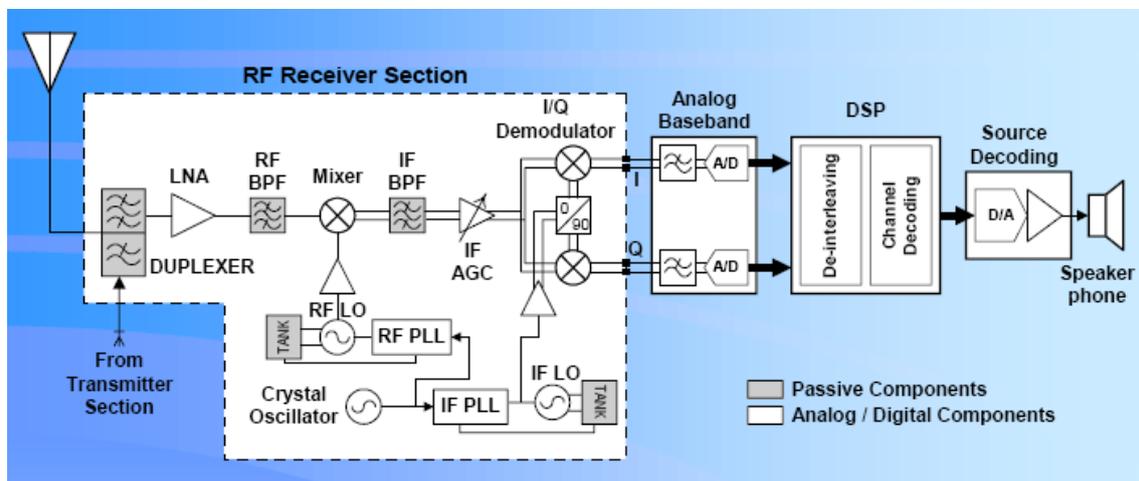


Figura 4.84. Componentes de la sección RF [PFC].

Veamos el mismo bloque RF pero implementado en un móvil que usa red UMTS

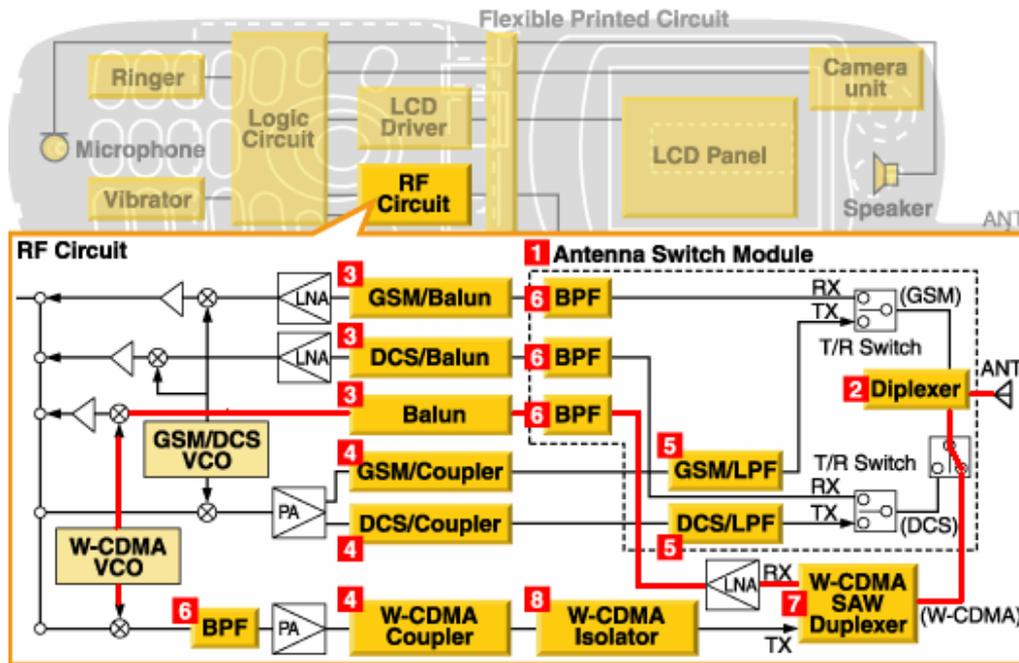


Figura 4.85. Bloques de un terminal UMTS [PFC].

En el dibujo anterior se aprecia el diagrama de bloques para GSM y el diagrama de bloques para W-CDMA (UMTS) implementado en el mismo terminal. De rojo se ha señalado el camino seguido en recepción UMTS.

Un concepto que se incluye en UMTS es el del receptor RAKE. Ya que el ancho de banda de una señal UMTS es bastante elevado, permite discriminar en el tiempo diferentes contribuciones que llegan al receptor (multicamino), viajando por caminos distintos y retardos diferentes. Esto permite que los canales de señal individual sean detectados por separado y coherentemente combinados con otros canales. Esto proporciona efecto diversidad de canales y robustez, y un rendimiento limitado por interferencias. Además, el tratamiento de la macrodiversidad se facilita gracias a las estructuras de receptor Rake existentes en las Estaciones Base y en los terminales móviles.



Figura 4.86. Receptor [PFC].

A continuación hacemos una comparativa de la evolución de los terminales hacia 3G

- **Terminales 2G**
 - Llamadas de voz
 - Buzón de voz
 - SMS
 - Datos a 9.6 Kbps
 - Tiempo de bajada 4 min MP3= 50 min

- **Terminales 2.5G**
 - Llamadas de voz
 - *Roaming* global
 - Buzón de voz
 - E-SMS, MMS
 - Internet GPS
 - Datos hasta 144 Kbps
 - Tiempo de bajada 4 min MP3= 7-12 min

- **Terminales 3 G**
 - Llamadas de voz
 - *Roaming* global
 - Buzón de voz
 - E-SMS, MMS
 - Internet de alta velocidad
 - GPS
 - Videoconferencia
 - Datos hasta 2Mbps
 - Tiempo de bajada 4 min MP3= 15sg-1.6min

Pero como es ampliamente sabido, la evolución de las comunicaciones móviles no ha acabado en 3G, encontramos los siguientes pasos de 3G:

“High Speed Downlink Packet Access” (3.5 G-HSDPA) Es la optimización de la tecnología espectral UMTS/WCDMA, incluida en las especificaciones de 3GPP release 5 y consiste en un nuevo canal compartido en el enlace descendente (downlink) que mejora significativamente la capacidad máxima de transferencia de información hasta alcanzar tasas de 14 Mbps. Soporta tasas de throughput promedio cercanas a 1 Mbps.

“High Speed Uplink Packet Access” (3.75 G o 3.5G+ HSUPA). Calificado como generación 3.75 (3.75G) o 3.5G Plus, es una evolución de HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access, Acceso descendente de paquetes a alta velocidad, nombrado popularmente como 3.5G). La solución HSUPA potenciará inicialmente la conexión de subida UMTS/WCDMA (3G). Protocolo de acceso de datos para redes de telefonía móvil con alta tasa de transferencia de subida (de hasta 7.2 Mbit/s). HSUPA está definido en Universal Mobile Telecommunications System Release 6 estándar publicado por 3GPP (www.3GPP.org), como una tecnología que ofrece una mejora sustancial en la velocidad para el tramo de subida, desde el terminal hacia la red.

“High Speed Packet Access” (HSPA+). HSPA+ engloba la versión en enlace descendente, conocida como HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access), y la correspondiente al enlace ascendente, o HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access). HSPA se comenzó a estandarizar en la versión Release 6 de UMTS y terminó su

estandarización en la Release 7 de UMTS. HSPA se basa en Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) y es completamente compatible con UMTS. Por ello, la filosofía que hay detrás de HSPA es introducir nuevas capacidades de transmisión manteniendo la compatibilidad. La siguiente Tabla resume las características de los anteriores sistemas:

FASE	3GPP Release 99/4	3GPP Release 5/6	3GPP Release 7	3GPP Release 8
TECNOLOGÍA	WCDMA	HSDPA/HSUPA	HSPA+	4G (LTE) y HSPA+
AÑO	2003/2004	2005/2006 (Desc.) 2007/2008 (Asc.)	2008/2009	2010
TASA DESC.	384 kbps (típico)	14 Mbps (pico)	28 Mbps (pico)	4G (LTE): 150-300 Mbps HSPA+: 42 Mbps
TASA ASC.	128 kbps (típico)	5.7 Mbps (pico)	11 Mbps (pico)	4G (LTE): 75 Mbps HSPA+: 11 Mbps
LATENCIA	~ 150 ms	< 100 ms	< 50 ms	LTE: < 10 ms

Tabla 4.8: Características de HSDPA, HSUPA y HSPA+.

4.3 Protocolos UMTS.

Aunque no es objetivo de la asignatura profundizar en la pila OSI de ISO de la telefonía móvil, creemos necesario para completar este capítulo sobre UMTS describir brevemente los 3 primeros niveles de esta tecnología:

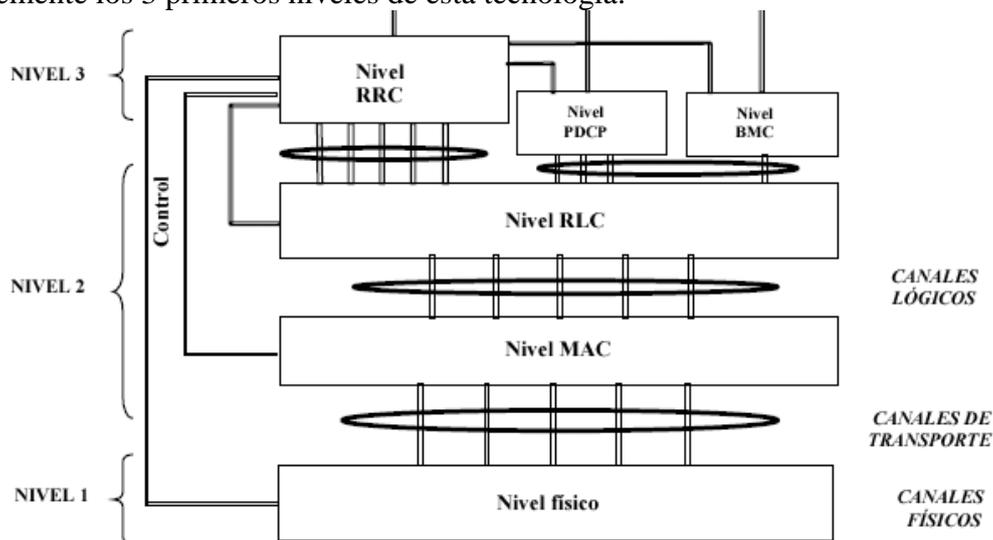


Figura 4.87. Arquitectura de protocolos para UMTS [Telefónica].

Nivel Físico: Se encarga de transmitir la información a través del interfaz aire teniendo en cuenta la técnica de acceso múltiple DS/CDMA empleada. Entre sus funcionalidades cabe destacar entre otras la modulación y el proceso de ensanchado haciendo uso de las secuencias código apropiadas en cada caso, el procesado de la señal de radiofrecuencia, la sincronización temporal y frecuencial a nivel de chip, bit y estructura de trama, el control de potencia, la codificación y entrelazado,

Nivel de Acceso al Medio (MAC): Ofrece a los niveles superiores servicios de transferencia de información, que entregan y reciben en forma de las denominadas PDUs, efectuando el multiplexado y demultiplexado de las mismas en bloques de transporte que son entregados al nivel físico. Entre sus funcionalidades se encuentran entre otras la selección de los formatos de transporte adecuados, la gestión de prioridades entre flujos de información diferentes, la identificación de terminales en los canales comunes y en ciertos casos el cifrado.

Nivel RLC (“Radio Link Control Protocol”): Ofrece a los niveles superiores servicios de control de las PDUs transferidas en el nivel MAC. Entre sus funciones destacan entre otras la segmentación y el reensamblado de la información de los niveles superiores, el relleno con bits hasta completar el tamaño específico para las unidades de transmisión, la retransmisión de las PDUs erróneas, el control del secuenciamiento, el cifrado y el control de flujo.

Nivel RRC (“Radio Resource Control”): Lleva a cabo funciones de control tales como el establecimiento, mantenimiento y liberación de conexiones, medidas reportadas por los terminales, selección inicial y reelección de celda.

Nivel PDCP (“Packet Data Convergente Protocol”): Existe únicamente en servicios orientados a transmisión de paquetes y su funcionalidad principal es la de efectuar la compresión y descompresión de la información redundante, como por ejemplo la asociada a las cabeceras de los protocolos TCP/IP de Internet.

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

4.4 Planificación UMTS.

En GSM, la planificación se hace para una C/I ligada a unos servicios básicos. Opcionalmente, en ciertas zonas se mejoran las prestaciones al poder utilizar esquemas de codificación GPRS más veloces (pero menos robustos frente a interferencias). Con EDGE (modulación multinivel aplicada a GPRS), se alcanzan velocidades mayores.

En la Figura 4.18 vemos como, a partir de la información de una zona dada, se hacen unos primeros cálculos de cobertura. A partir de ahí se hace un análisis de interferencia a partir de unos requisitos de tráfico.

Como resultado de la planificación de un sistema 2G es la asignación de portadoras para cada uno de los emplazamientos.

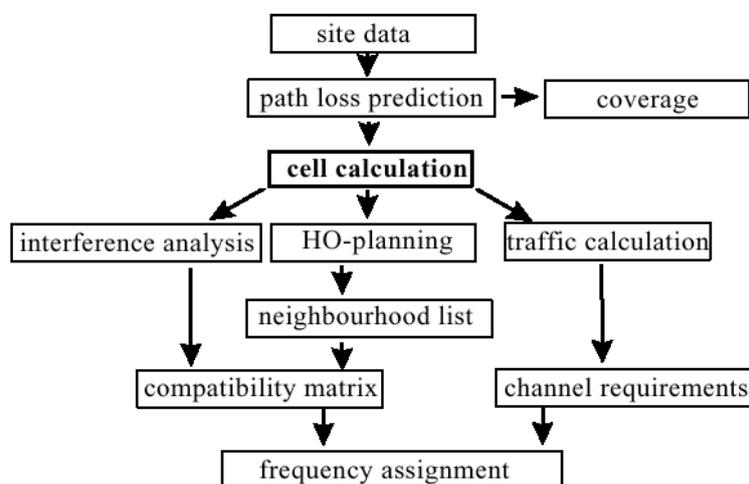


Figura 4.88. Planificación 2G [Silvia].

La planificación en un sistema 3G es totalmente diferente. En la Figura 4.19 vemos que la parte inicial es igual, pero ya no hay interferencia entre celdas, ya que todas utilizan la misma frecuencia y códigos ortogonales. La asignación de frecuencias la podemos entender como una asignación de códigos. En UMTS, es preciso decidir primero el repertorio de velocidades a proporcionar. El cálculo de capacidad en un entorno multiservicios no es evidente analíticamente, e implica simulaciones y medidas prácticas.

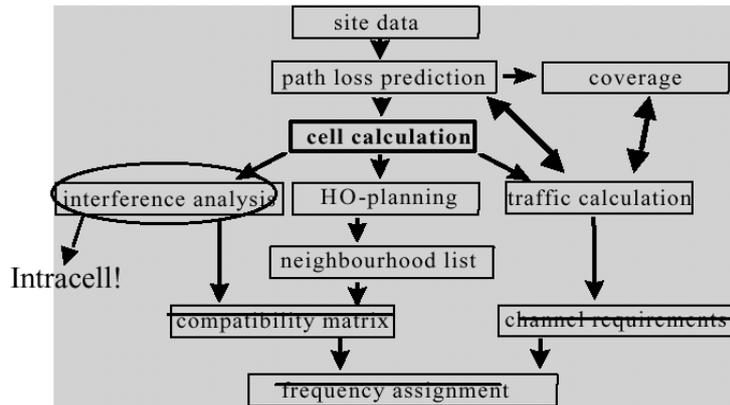


Figura 4.89. Planificación 3G [Silvia].

Como resumen, en GSM lo importante es jugar bien con la reutilización de frecuencias y en UMTS nos olvidamos de los patrones de reuso de frecuencias, ya que lo único que tenemos es que asignar códigos.

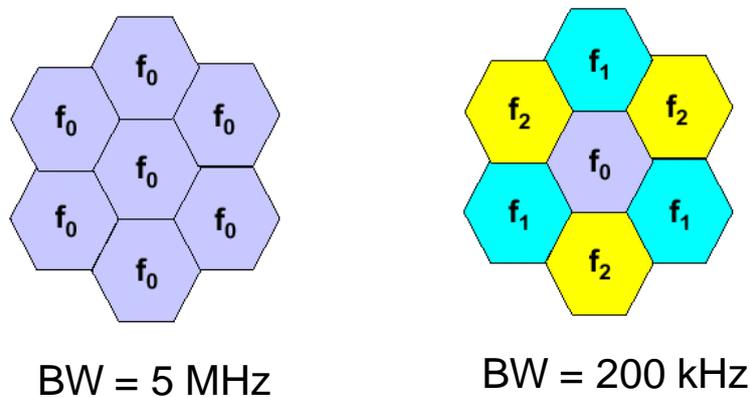


Figura 4.90. Planificación izquierda 3G y derecha 2G

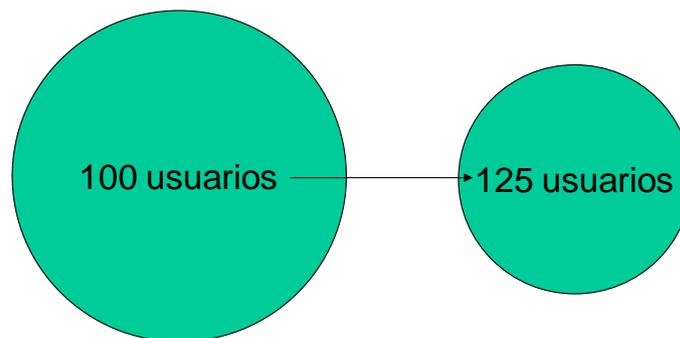


Figura 4.91. "Cell breathing"

Para acabar este punto, simplemente vamos a comentar de pasada el concepto de respiración celular ya mencionado cuando se habló de las técnicas de acceso al medio. El radio de la célula disminuye al aumentar el número de usuarios, ya que se provocan más interferencia entre ellos. Esto hace que el proceso de planificación 3G se complique ya que el resultado de la planificación va a depender directamente de las condiciones de partida en cuanto a tráfico objetivo.

4.5 Servicios y Aplicaciones.

En UMTS, a diferencia de GSM, los servicios no se especifican uno a uno, sino que se especifican herramientas y capacidades de red. A continuación se enumera y explican los tipos de servicio contemplados en UMTS

1. **Servicios portadores:** Ofrecen capacidad de transmisión
2. **Teleservicios:** Ofrecen capacidad completa de comunicación entre usuarios finales. Utilizan servicios portadores.
3. **Servicios suplementarios:** Modifican o complementan los servicios básicos.
4. **Servicios de usuario final:** Servicios que percibe el usuario final (chat, videoconferencia, correo electrónico,...).

1. Servicios Portadores

Servicios portadores basados en conmutación de circuitos

Modo de transferencia por circuito

Establecimiento bajo demanda

Simetría

Punto a punto

Servicios portadores basados en conmutación de paquetes

Punto a punto

Punto multipunto

2. Teleservicios

Teleservicios GSM (circuito)

Voz (telefonía y llamadas de emergencia)

SMS

Fax

Servicio de llamada en grupo

Servicio de mensajería multimedia (También GPRS 2.5G)

Acceso a Internet/Intranet

UMTS ofrece herramientas para la creación de nuevos teleservicios

3. Servicios Suplementarios

eMLPP (Mejora multinivel de la prioridad de las llamadas)

CD Redirección de llamada

Presentación y ocultación de identidades, CLI

Desvío de llamadas

Llamadas no completadas (Llamada en espera y llamada retenida)

Llamada compartida

Grupo cerrado de usuarios

Señalización usuario a usuario

Tarifificación

Restricción de llamadas
Trasferencia de llamada
Llamada completada en usuario ocupado
Identificación por nombre
Multillamada: MC

4. A continuación describiremos un conjunto de servicios de usuario final:

- **Servicios básicos:**
Incluye los servicios portadores y tradicionales teleservicios de voz y mensajes cortos, las llamadas de emergencia, el servicio de fax, los servicios suplementarios de GSM fase 2+ (desvíos, restricciones,...), multillamada, telefonía sobre IP y el *roaming* internacional.
- **Vídeo y audio:**
Archivos multimedia. Tendría los siguientes servicios:
 - Videotelefonía
 - Videoconferencia
 - Vídeo bajo demanda
 - Audio bajo demanda
 - Servicios afluentes de audio y vídeo
- **Descarga de imágenes**
Cambiar el icono/imagen del operador cada cierto tiempo. En 3G las imágenes serán de mayor calidad y se podrá utilizar para lanzar anuncios de publicidad
- **Difusión de radio y televisión**
Requieren gran QoS. Podremos utilizar el terminal para ver noticias, canales de TV y radio web, formando parte de servicios afluentes de audio y vídeo.
- **Juegos**
Se podrá utilizar el terminal como videoconsola en las siguientes modalidades:
 - Descarga de juegos en el terminal
 - Jugar interactivamente con otros participantesEl terminal debe tener una potente capacidad de procesamiento
- **Mensajería Multimedia**
 - Este servicio ya existe en 2.5G (MMS). Permite entrega de mensajes con texto, audio, imágenes y vídeo.
 - Tendrá dos modalidades:
 - Push: Se entrega directamente como SMS
 - Pull: Con solicitud.
 - Deberá tenerse en cuenta el tipo de terminal según las capacidades multimedia que posea.
 - Se puede extender fácilmente al email ofreciendo un valor añadido que es la movilidad.
 - Posibilidad de estar siempre conectado
 - Los mensajes se podrán almacenar en el terminal o en el servidor

- **Acceso a Internet/Intranet**

Dado que el servicio portador de UMTS para datos será de banda ancha, se podrá ofrecer un servicio ágil y fiable para el acceso a internet. La velocidad de acceso estará al nivel de las líneas RDSI y ADSL.

- **Navegación mediante voz**

El usuario podrá dar órdenes de voz al terminal para que navegue por las distintas opciones.

- **Chat**

Similar al famoso “Messenger”. Se podrán intercambiar archivos y mensajes entre los usuarios que estén conectados

- **Servicios de Información**

Asociado a un servicio de localización, un usuario podrá acceder/recibir información relacionada con una ubicación o unas preferencias, por ejemplo:

Noticias

Viajes

Información bancaria

Información del estado de las carreteras y gasolineras cercanas

Información financiera

Información de loterías

Periódico del día

Guía telefónica

Información de ocio asociada a una zona de una ciudad

Información meteorológica

- **Tele enseñanza**

Aulas virtuales

Bibliotecas virtuales

Visita de museos

-

- **Transacciones electrónicas**

Los usuarios del comercio electrónico tendrán la ventaja de la movilidad llevando el móvil como durante las compras.

Será un medio seguro de pago.

Ejemplos:

Reserva de billetes

Cesta de la compra

Pago de parquímetros y peajes

Pago de taxis

Pago de lotería

Productos en máquinas expendedoras

- **Banca móvil**

Consulta del saldo y movimientos

Contratación de fondos de inversión

Planes de pensiones

Seguros

Depósitos a plazo

Inversión en bolsa

- **Medios de pago**

Diversas modalidades de pago que se ofrecerán:

- A través del número de la tarjeta de crédito
- Monedero virtual
- A través de la SIM

- **Servicios de entorno personal**

Se puede personalizar el menú de acceso a los terminales

- **Servicios orientados a empresas: red privada virtual**

- Integración de los terminales como extensiones dentro del plan de numeración privado de la empresa. (facturas detalladas y opciones de tarificación)

- **Servicios de telemando, telemedida y telecontrol**

- Telemando: Se utiliza el terminal para controlar aplicaciones (hogar, ...)
- Telemedida: Transmisión periódica de medidas sobre el estado de maquinas, equipos etc.. (tráfico, contaminación, nivel de agua etc..)
- Telecontrol: Control remoto de aparatos

4.6 CDMA 2000

CDMA2000 es el homólogo de UMTS en EEUU (dentro de las soluciones IMT-2000 tal y como se explicó al principio del capítulo). Este nuevo sistema también está basado en el Acceso Múltiple por Código, y es el sucesor en Estados Unidos de los sistemas móviles de radio IS-95-A (14.4Kbps) y IS-95-B (115.2Kbps). Estos sistemas son los 2G y 2.5G estadounidenses.

CDMA2000 surge por la necesidad de evolucionar hacia la denominada tercera generación de sistemas de comunicaciones móviles, que se traduce en aumentar las prestaciones del servicio, generando mayores velocidades de transmisión y un mayor ancho de banda.

El estándar CDMA2000 ofrece servicios a partir de una o varias portadoras estándar de 1.25 MHz de ancho de banda (esto viene heredado del sistema previo IS-95 o CDMAone). La primera fase de CDMA2000 establece transmisiones de datos a 144 kbps, y 2Mbps.

La tecnología de acceso radio es DS-SS (Acceso múltiple por división en código a través de secuencia directa). Varios usuarios comparten un mismo canal con lo que la distinción en recepción de los distintos usuarios será posible si para cada usuario la fase inicial de la secuencia asignada es diferente y se habilita un procedimiento de sincronismo a nivel de chip para las señales recibidas en la estación base. Este sincronismo mantiene la diferencia temporal de los paquetes transmitidos por cada uno de los terminales móviles en la referencia de tiempos de la estación base.

Al igual que en UMTS, se plantea una estructura jerárquica compuesta por tres tipos de celdas dependiendo del entorno:

Entorno rural: Macro celda con radios de cobertura mayores a 1Km.

Entorno urbano: Micro celda con radios entre 50m y 1Km.

Entorno indoor: Pico celda con radios de cobertura menores a 50 m.

Al igual que se hizo con UMTS, se va a definir la capa física correspondiente a CDMA2000:

Las frecuencias correspondientes al enlace ascendente son de 1885 a 2025 MHz, y de 2110 a 2200 MHz para el descendente. Recordemos que siempre se utiliza la frecuencia mayor para el descendente.

La longitud de las tramas va desde 5 a 20ms, y al igual que en UMTS se combinan los dos métodos más comunes de multiplexado FDD y TDD. El primero asigna un margen de frecuencias para una dirección y el resto para la otra, y en el segundo, dentro del canal o trama se transmite en distintos slots temporales. Para TDD el número de slots en una trama de duración 20ms es 16 y para una trama de 5 ms son 4 slots. Esto posibilita una mayor eficiencia ya que el sistema se puede adaptar a la técnica más conveniente en cada caso.

En CDMA2000 el factor de ensanchamiento es variable, toma valores desde 4 hasta 256. El sistema CDMA2000 tiene una tasa de chip básica de 3.6864Mcps, que equivale a 3.75Mhz de ancho de banda, el triple que los anteriores IS-95 (1.2288Mcps y 1.25Mhz). Sin embargo, y gracias a las redes IS-95 existentes, se puede aumentar en el orden de $N \cdot 1.2288\text{Mcps}$ (con $N=6,9,12$), lo que permite unas mayores tasas de transmisión de bits. La total compatibilidad entre el CDMA2000 y las redes existentes del IS-95 hace posible dos técnicas distintas de modulación

Direct-spread modulation

Los símbolos son ensanchados según la tasa de chip y transmitidos usando una única portadora, obteniendo un ancho de banda de $N \cdot 1.25\text{Mhz}$. Este método es usado para los dos tipos de enlaces (ascendente y descendente).

Multicarrier modulation MC (sólo enlace descendente)

Los símbolos a transmitir son previamente demultiplexados en varias señales cada una ensanchada con una tasa de chip de 1.2288Mcps. Se usan N frecuencias portadoras distintas para transmitir esas señales, cada una con un ancho de banda de 1.25Mhz.

Destacar que el CDMA2000 MC permite que se puedan solapar señales del IS-95 con las propias del CDMA2000.

Normalmente todos los canales físicos se transmiten mediante tramas de 20ms. Aunque la información de control del Canal Fundamental y del Canal Dedicado de Control pueden también ser transmitidas en tramas de 5ms.

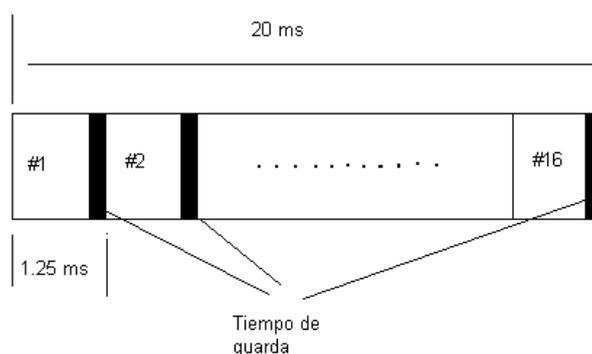


Figura 4.92. Estructura de una trama de 20ms en CDMA 2000 [Karim].

A continuación mostramos el diagrama de bloques de transmisor de la estación base en CDMA2000.

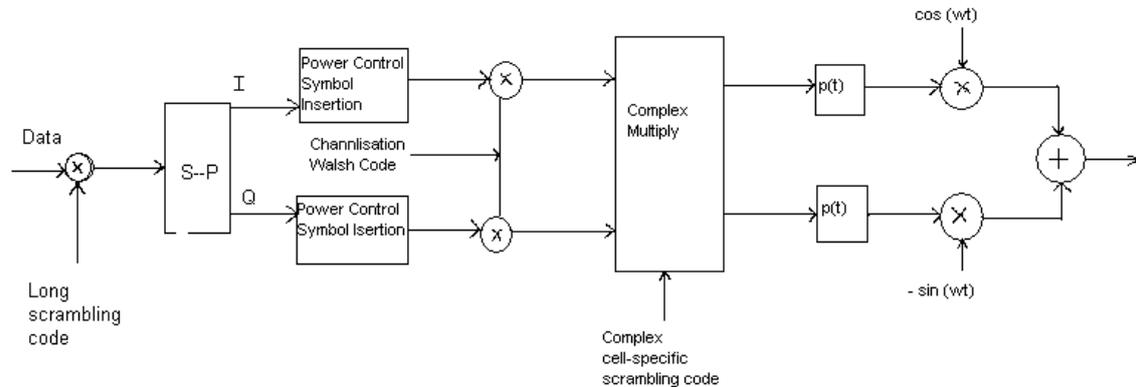


Figura 4.93. Transmisor CDMA en el enlace descendente [Karim].

En la Figura 4.23 vemos cómo la información se codifica inicialmente con un código (“long scrambling code”), se separa la información en la rama I (“In-Phase”) and Q (“Quadrature”), se multiplica por el código Walsh correspondiente, de nuevo se multiplica por otra secuencia que depende de la celda, se conforma el pulso ($p(t)$), y finalmente se sube en frecuencia con un coseno la parte I, y con un seno la parte Q.

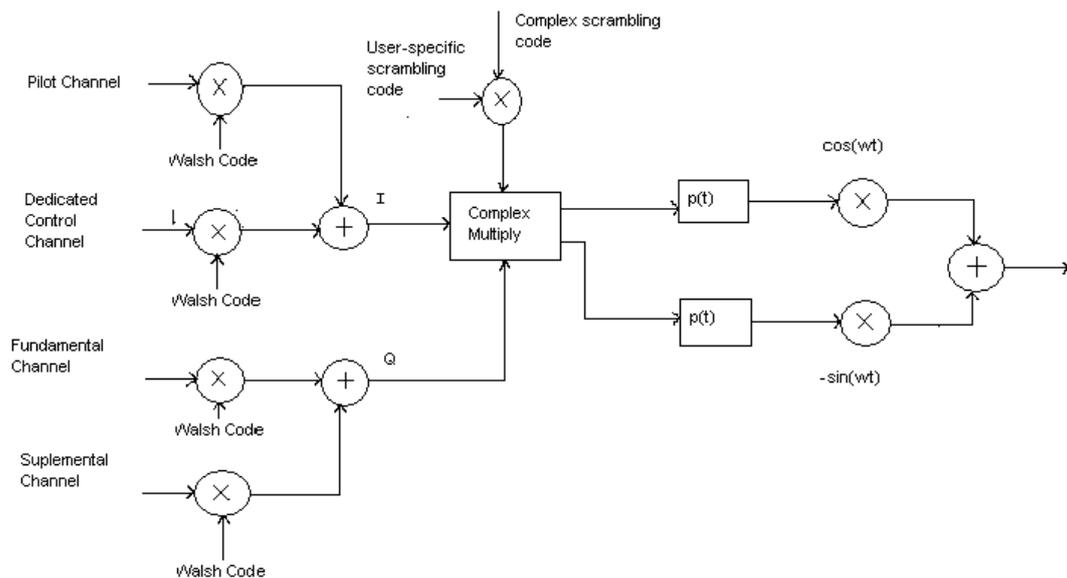


Figura 4.94. Transmisor CDMA en el enlace ascendente [Karim].

En el caso del enlace ascendente, vemos que también se realizan tareas de ensanchado y subida en frecuencia pero encontramos ligeras diferencias. Se emite un piloto y el canal de control dedicado en la parte I, y la información fundamental más un canal suplementario por la rama Q. Toda esta información se ensancha con secuencias Walsh, y posteriormente con secuencias “scrambling” para cada una de las dos ramas.

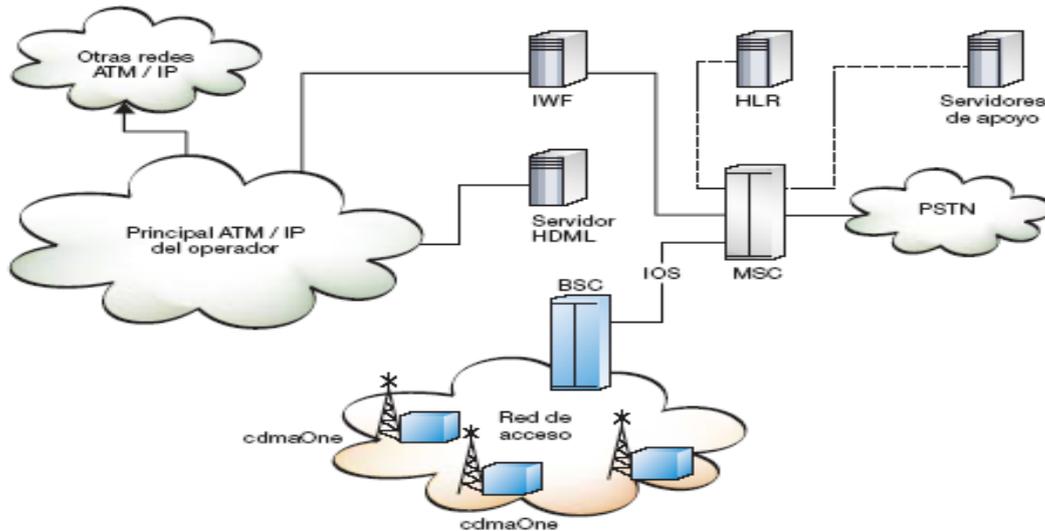


Figura 4.95. Estructura básica de red de CDMA2000 [Karim].

En cuanto a la estructura básica de una red CDMA2000, enumeramos a continuación los elementos más importantes (Figura 4.25):

- MSC Centro de conmutación móvil
- BSC Controlador de estación base
- HLR Registro de abonados residentes
- IWF Función de interoperabilidad, proporciona servicios de datos y conexiones a Internet para los abonados
- HDML Servicio de Lenguaje de marcador de dispositivo de mano, entrega contenido Internet a teléfonos CDMA provistos de microhojeadores HDML

A partir de estos elementos básicos se llegará en sucesivas fases de mejora a la siguiente estructura compleja de red

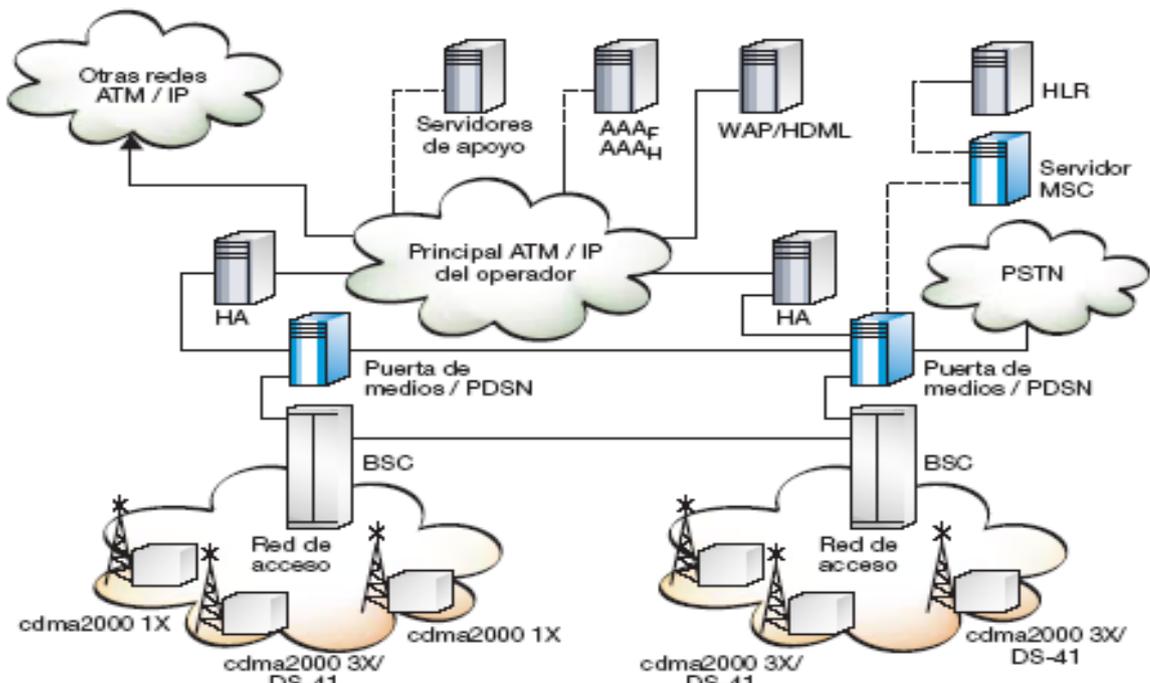


Figura 4.96. Estructura ampliada de red de CDMA2000 [Karim].

Para finalizar exponemos una tabla comparativa entre CDMA2000 y UMTS teniendo en cuenta los elementos fundamentales:

	EDGE	GERAN	W-CDMA	TD-CDMA	UMTS TD-SCDMA	HSDPA	1xRTT	1xEV-DO	1xEV-DV	
Carrier bandwidth [MHz]	0.2		5		1.6	According to base technology	1.25			
Min. spectrum required [MHz]	2x 2.4 (due to BCCH for 4/12)		2x 5	1x 5	1x 1.6		2x 1.25			
Multiple access principle	Time & frequency		code	code & time			code	UL: code DL: code & time		
Chip rate [Mcps]	Not applicable		3.84		1.28		1.2288			
Modulation	GMSK, 8-PSK		QPSK		QPSK, 8-PSK	QPSK, 16QAM	BPSK, QPSK	BPSK, QPSK, 8-PSK, 16QAM		
Peak user data rate [kbps]¹⁾	473		384 [2048 ²⁾]	2048	2048	10000 ³⁾	307 [625 ⁴⁾]	2400	3100	
System asymmetry (UL:DL)	1:1		1:1	2:13-14:1	1:6-6:1	1:1-5:1	1:1	1:1-4:1		
QoS classes	3 & 4	1 ... 4					None	3 classes of service only		
Transport network	PCM (CS), FR (PO)	PCM, FR, ATM	ATM for both CS and PO service domains				Sonet for CS domain, IP-network (PPP and SDLC) for PO domain			
Mobility support	MAP						IS-41, IP protocols for data			

¹⁾ according to presently defined framing, coding and modulation schemes and assuming ideal radio conditions, ²⁾ for pico cells

³⁾ present assumptions, ⁴⁾ second phase

Tabla 4.9: Comparativa UMTS vs CDMA 2000 [Karim].

En cuanto a las frecuencias

UMTS: Ascendente 1900-1980MHz, y descendente 2010-2170MHz

CDMA2000: Ascendente 1885-2025MHz, y descendente 2110-2200MHz

En cuanto a la modulación, UMTS utiliza direct-spread y CDMA2000 multicarrier. En cuanto al ancho de banda, UMTS utiliza 5MHz, y CDMA2000 1.25MHz por portadora.

	CDMA2000	W-CDMA
Core network	ANSI-41	GSM MAP
Chip rate	3.6864 Mcps	4.096 Mcps (Docomo) 3.84 Mcps (UMTS)
Longitud de trama	20 ms	10 ms
Opcion Multicarrier spreading	Yes	No
Codificación de voz	EVRC	ACELP

Tabla 4.10: Comparativa UMTS vs CDMA 2000

Glosario de UMTS

AICH	“Acquisition Indication Channel”
AP-AICH	“Access Preamble Acquisition Indicator”
BCCH	“Broadcast Control”
BCH	“Broadcast”
BMC	“Broadcast/Multicast Control”
CCCH	“Common Control”
CD/CA-ICH	“CPCH Collision Detection/Channel Acquisition”
CPCH	“Common Packet”
CPICH	“Common Pilot Channel”
CSICH	“CPCH Status Indicator Channel”
CTCH	“Common Traffic”
DCH	“Dedicated”
DPCCH	“Dedicated Physical Data Channel”
DPDCH	“Dedicated Phys. Control Channel”
DSCH	“Downlink Shared”
DTCH	“Dedicated Traffic”
DS-CDMA	“Direct Sequence-Code Division Multiple Access”
FACH	“Forward Access”
HSDPA	“High Speed Downlink Packet Access”
HSUPA	“High Speed Uplink Packet Access”
HSPA+	“High-Speed Packet Access +”
IMT-2000	“International Mobile Telecommunication 2000”
ME	“Mobile Equipment Domain”

MT	“Mobile Termination”
PCCH	“Paging Control”
P-CCPCH	“Primary Common Ctrl Physical”
PCH	“Paging”
PCPCH	“Physical Common Packet”
PDCP	“Packet Data Convergente Protocol”
PDSCH	“Physical Downlink Shared Channel”
PICH	“Page Indicator Channel”
PRACH	“Physical Random Access Channel”
RACH	“Random Access”
RLC	“Radio Link Control Protocol”
RNC	“Radio Network Controller”
RNS	“Radio Network Subsystem”
RRC	“Radio Resource Control”
S-CCPCH	“Secondary Common Control Physical”
SCH	“Synchronization Channel”
SHCCH	“Shared Control”
TE	“Terminal Equipment”
UMTS	“Universal Mobile Telecommunications System”
UTRA	“UMTS Terrestrial Radio Access”
UTRA	“UTRA Network”
USIM	“User Identity Module”

Bibliografía

[Siemens] Siemens: 3G Wireless Standards for Cellular Mobile Services

[UMTS Forum] www.UMTS Forum.com

[Prasad] Third Generation mobile communications Systems.
R.Prasad,W.Mohr,W.Konhauser Ed. Artech House.

[Oriol] Márquez, Victor; Sallent, Oriol. “Turbo codificación para UMTS”. 2004 UPC.
[Third Ramjee Prasad / Werner Mohr / Walter Konhäuser, “Third Generation Mobile Communications system”. ISBN 1-58053-082-6.

[Rysavy] Rysavy, Peter. “Informe: Mejoras en la Capacidad de Voz para la Evolución GSM a UMTS”. Julio 2002.

[Ojamperä] Tero Ojamperä /Ramje Prasad. “Wideband for Third Generation Mobile Communications”. Artech House Publishers.

[Huidobro] Comunicaciones móviles: José Manuel Huidobro Moya (Ed. Thomson, Paraninfo)

UMTS signaling: Ralf Kreher, Tarsten Rüdeshush (John Wiley & Sons).

[Rabanos1] Comunicaciones móviles de Tercera Generación, Vol. I: J.M. Hernando y C. Lluch (Ed. Telefónica Móviles España S.A., 2000).

[Rabanos2] Comunicaciones móviles de Tercera Generación, Vol. II: J.M. Hernando y C. Lluch (Ed. Telefónica Móviles España S.A., 2000).

[Karim] WCDMA and CDMA2000 for 3G Mobile Network: M.R. Karim, Mohsen Sarraf (Ed. Mc-Graw Hill).

[Telefónica] Las telecomunicaciones y la Movilidad en la Sociedad de la Información: AHCIET – Telefónica I+D (Ed. División de Relaciones Corporativas y Comunicación de Telefónica I+D).

[Silvia] Apuntes de Doctorado, “Planificación UMTS”, Silvia Ruiz Boqué, Dep. Teoría del Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña.

[Cox] Essentials of UMTS, Christopher Cox, Cambridge University Press, Cambridge, 2008.

[3GPP] <http://www.3gpp.org/>

[NewWave] <http://www.newwaveinstruments.com/>

[PFC] Alfredo Calvete, Diseño y comercialización de terminales para las Comunicaciones Móviles, Proyecto Final Carrera, ETSIT UPCT, 2009

Capítulo 5. El Sistema LTE.

5.1 Introducción.

Tal como se explicó en el Capítulo 4, los sistemas de 3G como UMTS se desarrollaron para dar servicio a los nuevos usuarios de los sistemas de comunicaciones móviles que demandaban tasas de datos superiores a las ofrecidas en 2G y sus sistemas de mejora. Este objetivo ha sido ampliamente cumplido por los sistemas de Tercera Generación. Como se observa en la Figura 5.1 solo el número de suscripciones de la familia de GSM (GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA) era en 2010 cercano a los 4500 millones y el número global de suscripciones era cercano a los 5000 millones. Cabe por ello preguntarse por qué era necesario desarrollar una nueva generación de comunicaciones móviles cuando todavía se estaban amortizando las redes de 3G y además seguían en funcionamiento las redes de 2G e incluso algunas redes 1G en ciertos países. Toda agrupación de industrias y de operadores realiza siempre previsiones más bien optimistas sobre su actividad y sobre la demanda futura de sus productos; con ello espera convencer a los futuros usuarios y ofrecer seguridad, aunque a veces sea engañosa, a sus inversores y accionistas. Así, la industria de las telecomunicaciones desarrolla continuamente nuevos estándares que sustituirán a los presentes como en el caso de los servicios móviles. Por ello, hay que analizar primero si la demanda actual y prevista ha justificado el desarrollo e implantación de los sistemas de Cuarta Generación (4G). Como se observa en la Figura 1 el número de suscripciones indica que no era necesario un nuevo sistema para dar servicio a nuevos usuarios, por lo menos en los países más desarrollados; por ejemplo en España el índice de penetración de la telefonía móvil es superior al 90 % como se ve en la Tabla 5.1. Sin embargo, si observamos la Figura 5.2 se aprecia que el crecimiento del tráfico que generan los usuarios sí indicaba que las redes de 3G no podrían satisfacer esa demanda y que sí era necesario el establecimiento de un nuevo sistema. Si en la Figura 5.2.a) la previsión realizada en el año 2010 para el año 2014 era de 14 Exabytes¹ durante todo un año, ya en el año 2013 se había alcanzado ese tráfico anual al cursarse 1.5 Exabytes por mes como se observa en la Figura 2.b). Por lo tanto, es de esperar que efectivamente se alcancen los casi 16 Exabytes por mes previstos para el año 2018 en la Figura 5.2.b); cifra que justifica la existencia de 4G e incluso el desarrollo de los sistemas de 5G para los que ya existen propuestas [IEEE Spectrum].

Los diversos organismos de estandarización propusieron diferentes sistemas de 4G. El 3GPP había desarrollado el sistema UMTS de 3G como se vio en el capítulo anterior y propuso como sistema 4G el conocido como “Long Term Evolution” (LTE). Este sistema aunque en ciertos aspectos es una evolución de UMTS presenta diferencias

¹ Un Exabyte es 10^{18} Bytes. Para hacerse una idea de esta cifra, un exabyte es más de 18 millones y medio de Blu rays de aproximadamente 50 GB cada uno.

significativas con respecto al sistema UMTS, especialmente en la capa física. También presenta algunos cambios en la arquitectura de red.

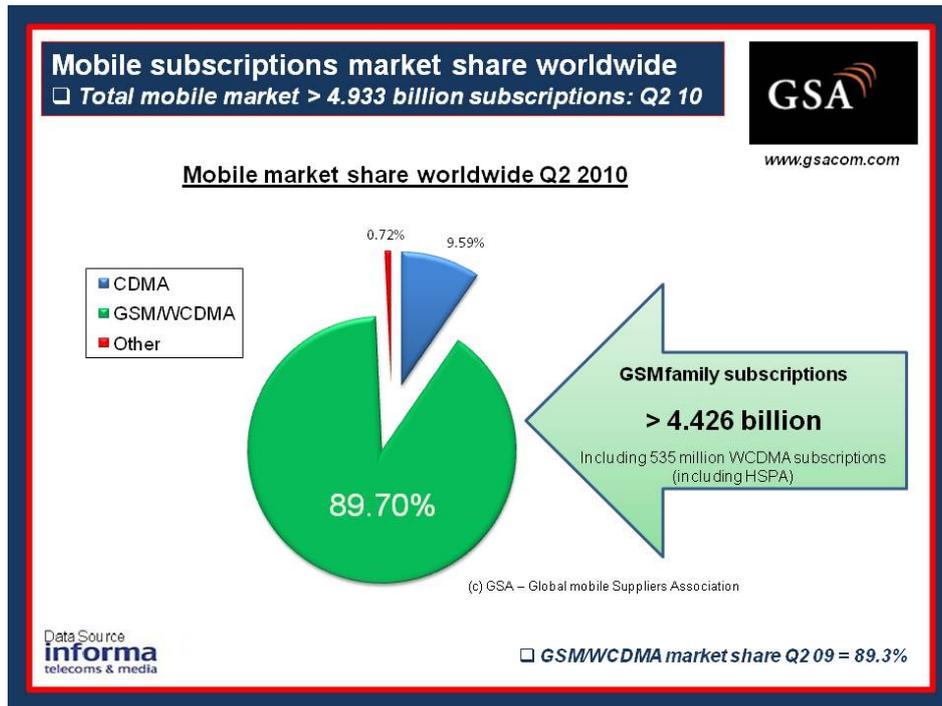


Figura 5.97. Número de suscripciones de servicios móviles en el año 2010 [GSA].

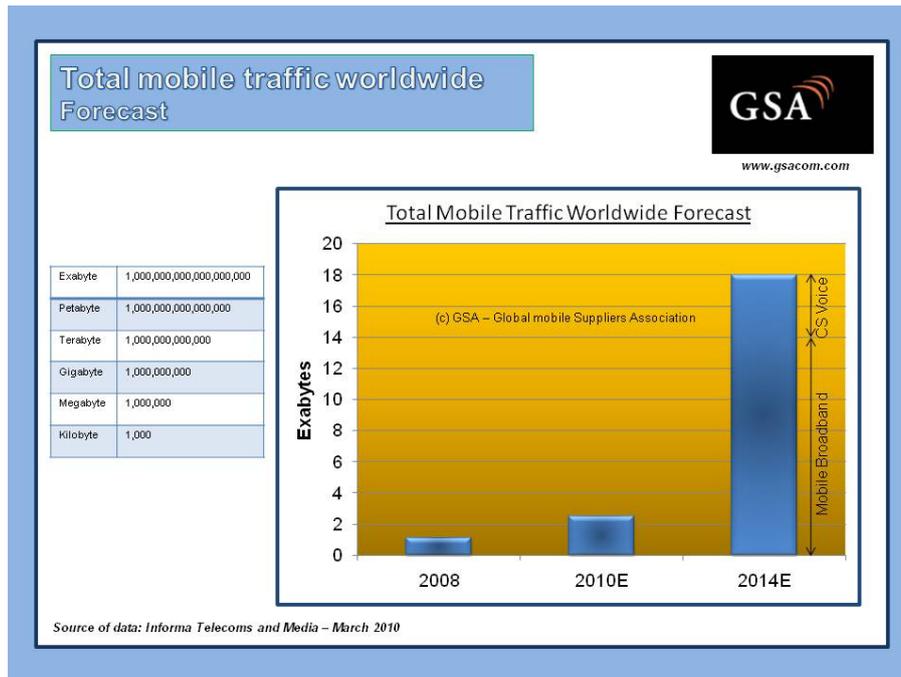
Edad	Porcentaje	Población	Porcentaje
16 a 24 años	99,0	Más de 100.000	95,0
25 a 34 años	98,7	De 50.000 a 100.000	96,3
35 a 44 años	98,4	De 20.000 a 50.000	95,8
45 a 54 años	95,5	De 10.000 a 20.000	94,0
55 a 64 años	91,1	Menos de 10.000	91,4
65 a 74 años	75,9	Más de 100.000	95,0
		De 50.000 a 100.000	96,3
		De 20.000 a 50.000	95,8

Tabla 5.21. Tasa de penetración de la telefonía móvil en España en el año 2012 [INE].

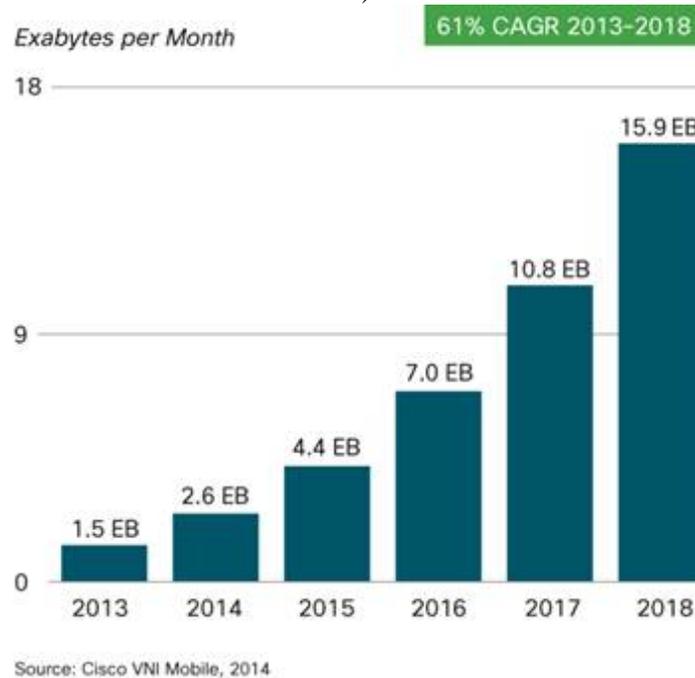
Dado que LTE debía ser competitivo con otros sistemas para dar servicio a la demanda creciente de datos vista en la Figura 5.2.b) debe cumplir una serie de requisitos que resumimos a continuación [3GPP LTE, LTE for UMTS]:

1. Velocidad de datos elevada: el pico de velocidad cuando se ocupan 20 MHz y los terminales utilizan 2 antenas en recepción y 1 en transmisión es de 100 Mbps en el enlace descendente y 50 Mbps en el ascendente. Estas tasas son 7 veces mayores en el enlace descendente que HSPA en su "Release" 6 y casi 8 en el sentido ascendente que HSUPA.

2. Conforme aumenta la tasa de datos se requiere que la latencia disminuya para que la mejora en la tasa de datos sea efectiva. Así, el requisito para el tiempo de ida y vuelta de un paquete de datos se fijó en 5 ms mientras que el tiempo máximo de acceso se fijó en 300 ms.
3. Eficiencia espectral: el sistema debe poseer una elevada capacidad medida en bits/s/Hz superior a los sistemas de HSDPA, HSUPA. Así, la capacidad requerida LTE es de 5 bits/s/Hz en el enlace descendente (7 veces mayor que HSDPA en la “Release” 6) y 2,5 bits/s/Hz en el enlace ascendente (2-3 veces mayor que HSUPA en la “Release” 6) [3GPP LTE].
4. El consumo de energía del terminal móvil debe ser mejorado respecto a los sistemas de 3G.
5. Los sistemas de 2G eran de banda estrecha (en GSM cada canal ocupa 200 KHz) mientras que los sistemas de 3G eran de banda ancha (el canal de UMTS ocupa 5 MHz). EL sistema LTE debe ser un sistema flexible de forma que puedan utilizar anchos de banda escalables de 5, 10, 15 y 20 MHz. Además, para facilitar la sustitución de los sistemas de GSM y cdma2000 por el sistema LTE se añadieron anchos de banda menores, específicamente de 1.4 y 3 MHz.
6. Interconexión: se debe garantizar la interconexión de LTE con los sistemas precedentes. El tiempo de interrupción en el traspaso entre distintos sistemas debe ser menor que 300 ms para los servicios de tiempo real y menor que 500 ms para los servicios de tiempo no-real.
7. El coste de despliegue del sistema LTE debe ser limitado comparado con el de los sistemas de 3G. Este objetivo se debe a varias razones. Por primer lugar no se quería un despliegue y puesta en funcionamiento tan costoso como el de UMTS que provocó problemas de solvencia a algunos operadores. En segundo lugar el modelo de tarifas planas de datos obliga a que el coste de la red para una determinada oferta de volumen de datos sea limitado.
8. Al igual que los sistemas precedentes el sistema debe presentar unas prestaciones óptimas para bajas velocidades del móvil (0-15 km/h). Se deben soportar velocidades superiores, de forma que a 120 km/h las prestaciones todavía deben ser altas y a 350 Km/h la conexión se debe mantener.
9. En cuanto a la cobertura el sistema LTE debe ofrecer unas prestaciones máximas a una distancia máxima de 5 km. Las prestaciones solo pueden degradarse levemente cuando la distancia está entre los 5 y 30 km. La distancia máxima es de 100 km, aunque la tendencia es a utilizar microcélulas y nanocélulas de radios cada vez más reducidos.
10. LTE debe ser capaz de soportar transmisiones de contenidos multimedia a múltiples usuarios simultáneamente. Estos servicios se conocen con el nombre de “Multimedia Broadcast/Multicast Services” (MBMS) y permiten reducir la cantidad de recursos destinados a la transmisión del contenido ya que los recursos son compartidos por los usuarios [jdsu].



a)



b)

Figura 5.98. Tráfico mundial de tráfico móvil y su previsión: a) para el año 2014 [GSA], b) para el año 2018.

Los anteriores requisitos fueron definidos durante la primera mitad de 2005. A finales de la primera década de siglo el sistema LTE ya estaba diseñado como se aprecia en la Figura 5.3 donde se muestran las fases de despliegue de los sistemas de comunicaciones móviles y sistemas de redes inalámbricas urbanas más importantes. El despliegue de las redes LTE por operadores de todo el mundo está siendo un éxito: en 2014 ya se habían puesto en funcionamiento cerca de 300 redes LTE como se observa en los datos de la Figura 5.4. Esto es debido a que LTE permite de forma efectiva un aumento en las tasas de datos por lo que cumple la razón principal para su despliegue. En la Figura 5.5 podemos ver que los tiempos necesarios para descargar archivos de

diferente extensión por el sistema WCDMA (3G), el sistema de mejora de 3G HSPA y el sistema LTE. Aunque los datos de la Figura 5.5 utilizan las tasas de pico y por tanto en un caso real un DVD de 2 horas de duración no se pueda descargar con LTE en tan solo 4,8 minutos, observamos que LTE mejora en gran medida las prestaciones de los otros sistemas y resulta así muy competitivo. Por tanto, Las previsiones son optimistas ya que se espera incluso un crecimiento en el número de usuarios móviles para la actual década. Se piensa que este crecimiento puede llegar a ser casi exponencial; en particular para el año 2018 se estima que existirán 1345 millones de clientes de LTE en el mundo y 4232 millones de clientes en los sistemas WCDMA-HSPA (ver Figura 5.6).

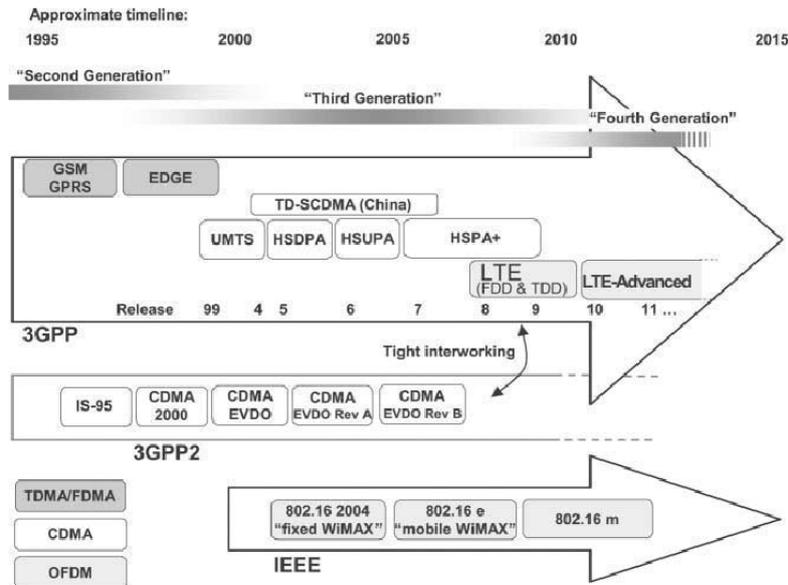


Figura 5.99. Cronología del diseño y despliegue de los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos más importantes [LTE].

Mobile Broadband Update		<input type="checkbox"/> 1.473 billion WCDMA subs (incl HSPA) <input type="checkbox"/> 200.1 million LTE subs (Q4 2013)	
Source: GSA reports, papers, statements to Mar 31, 2014 © Global mobile Suppliers Association (GSA)		GSA forecasts 350+ commercial LTE networks by end 2014	
www.gsacom.com			
Commercial EDGE networks	604	UMTS900 networks launched	80
HSPA network commitments	581	HSPA devices launched	> 6,000
HSPA commitment countries	211	LTE network commitments	482
Commercial HSPA networks	547	LTE network commitment countries	147
Countries HSPA launched in	205	Additional pre-commitment network trials	54
WCDMA networks with HSPA	100%	LTE commercial networks launched	279
Networks with HSUPA launched	335	Commercial LTE1800 networks	120
HSPA+ networks launched	363	LTE user devices (FDD and/or TDD)	1,563
Countries HSPA+ launched in	157	LTE user devices with support for HSPA	870
Commercial DC-HSPA+ networks	159	LTE phones which are 3G/multimode	99%
Countries with DC-HSPA+ services	83	Commercial LTE TDD (TD-LTE) networks	32
DC-HSPA+ share of HSPA network market	29%	LTE TDD (TD-LTE) user devices	387

Figura 5.100. Datos sobre el número de redes de los sistemas de 2G, 3G y 4G en el mundo [GSA].

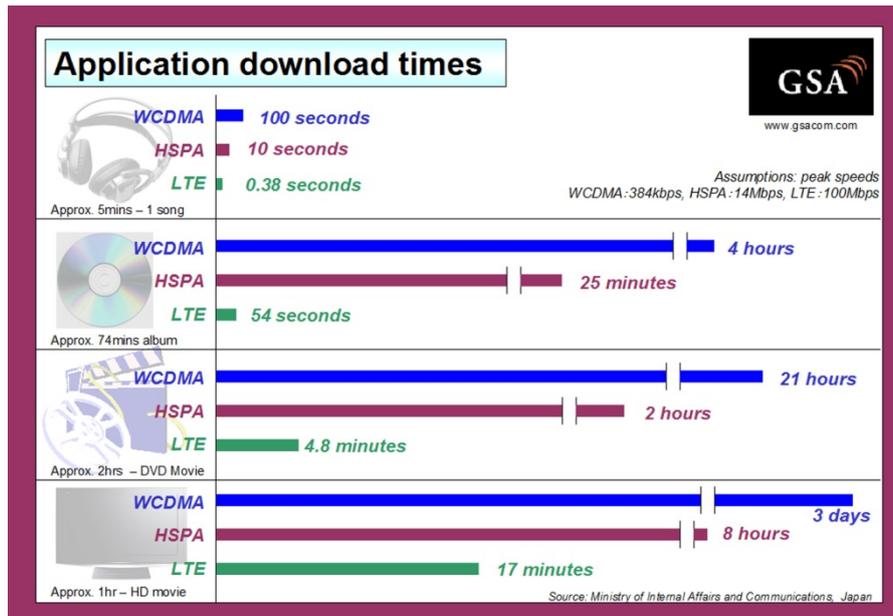


Figura 5.101. Comparación de las prestaciones de WCDMA (3G), de HSPA (sistema de mejora 3G) y LTE (4G). Las velocidades de datos utilizadas son tasas de pico máximas. [GSA].

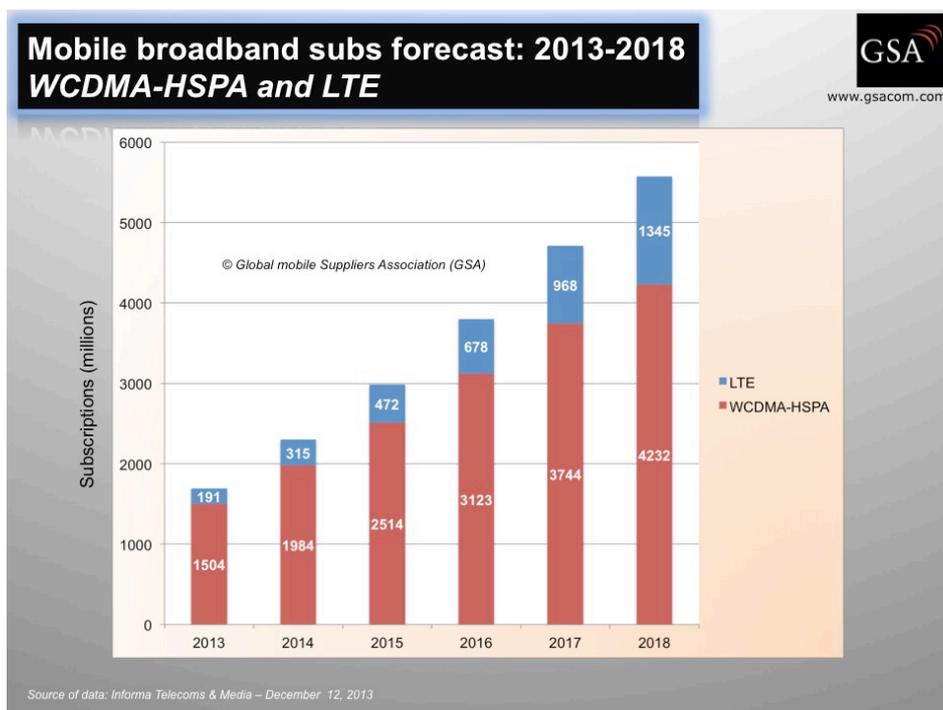


Figura 5.102. Previsión del número de usuarios de 3G y 4G para los años 2013 a 2018 [GSA].

Es muy posible que el crecimiento de la demanda de datos, tanto en las velocidades como en la cantidad descargada a lo largo de un periodo de tiempo como un mes, haga necesario el diseño de una nueva generación de comunicaciones móviles. De hecho, ya se ha diseñado la evolución de LTE conocida con el nombre de LTE-Advanced cuyas principales características serán mostradas en este capítulo. Asimismo, se ha comenzado a proponer distintas alternativas para la siguiente generación 5G [IEE Spectrum] que se desea desplegar entorno al año 2020. Muy probablemente los sistemas de esta generación utilizarán anchos de banda, situados en las bandas de ondas milimétricas,

muchos mayores que los actuales; así se desea utilizar las bandas de 28 y 38 GHz e incluso bandas de frecuencias más elevadas como la de 60 GHz y 100 GHz. La atenuación estas bandas es muy elevada por lo que las células poseerán un tamaño muy reducido al igual que las estaciones base, que se encontrarán en las paredes de los edificios, por debajo de los tejados. Las principales características de la 5G se muestran en la Figura 5.7. Por supuesto, el crecimiento de la demanda o del número de usuarios podría no ser el esperado por lo que se retrasaría la sustitución de redes LTE por LTE-Advanced así como la puesta en marcha de la 5G.

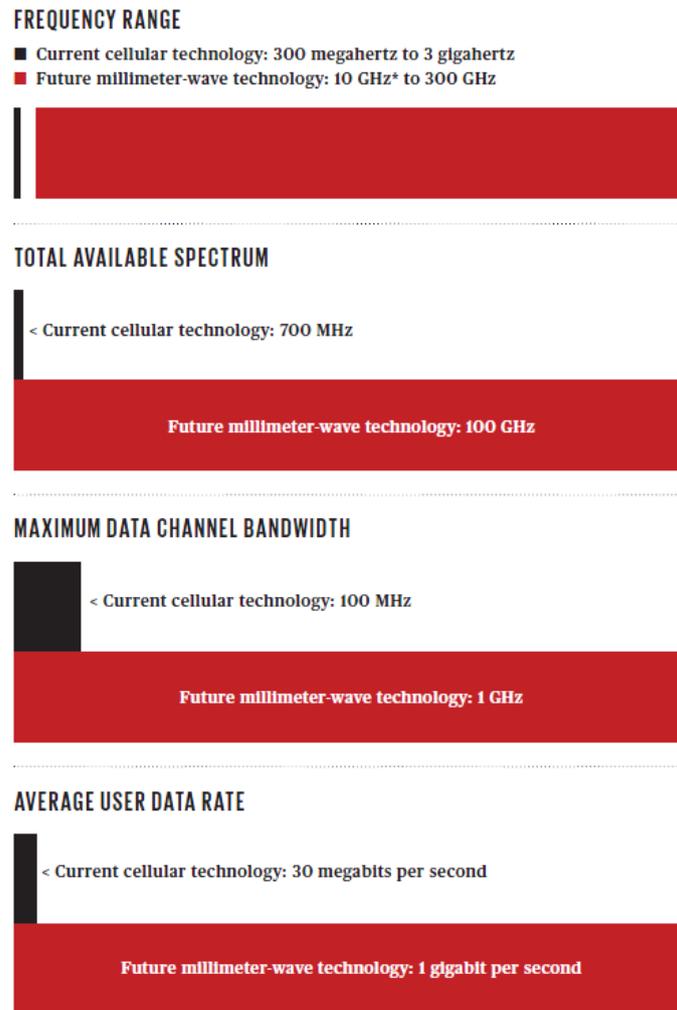


Figura 5.103. Posibles características de los sistemas 5G [IEEE Spectrum].

5.2 Estructura de la red de LTE.

La arquitectura de UMTS supuso un aumento de las tareas inteligentes de red en nodos más cercanos al usuario móvil. En UMTS, los RNC equivalentes a los BSC de GSM se interconectaban y eran capaces de realizar complejos procesos de traspaso de llamadas (“handover”). La arquitectura de LTE continúa esa tendencia; además, la arquitectura se simplifica respecto a la de UMTS. Por tanto, la arquitectura de LTE es una evolución de la arquitectura de UMTS y por eso se le denomina también “Evolved Packet System”. La arquitectura de LTE se divide en cuatro partes: el dominio de usuario o “User Equipment” (UE), la red de acceso radio o “Evolved UMTS Terrestrial

Access Network” (E-UTRAN), el núcleo de red o “Evolved Packet Core” (EPC), que también incluye al “System Architecture Evolution” (SAE) encargada de las comunicaciones en modo paquete, y el dominio de Servicios [LTE for UMTS]. En la Figura 5.8 se muestran los diferentes elementos que componen las cuatro partes de la arquitectura LTE. Las funciones de los elementos de la red dependen de los protocolos que debe ejecutar cada elemento. En la Figura 5.9 se muestran la pila de protocolos que ejecutan los elementos inteligentes más importantes de la red. Estos protocolos sirven para establecer un flujo de datos entre usuario y red. Como ya se ha explicado en capítulos precedentes el flujo de datos intercambiado puede ser de información de tráfico o de información de señalización. En 3G y 4G a estos flujos de información diferentes se les denomina planos. Así, el flujo de datos en el Plano de Usuario (“User Plane” o UP) son todos aquellos datos intercambiados de forma directa y transparente entre usuarios de una conexión de voz o de paquetes IP. En cambio, el Plano de Control (“Control Plane” o CP) se encarga del intercambio de todos los datos de señalización que permiten el establecimiento de llamadas, de conexiones de datos y de actualización de la localización [GSM to LTE]. En la Figura 5.10 se dibujan los dos planos y cómo la estructura de la red ha ido evolucionando desde 3G hasta 4G a lo largo de diversas versiones o “releases”; se observa una simplificación de la estructura ya que los planos de Control involucran en LTE únicamente a tres elementos mientras que en la “Release 6” de 3G-UMTS involucraban a cuatro elementos; además, en LTE el Plano de Usuario conecta directamente dos elementos de la estructura mientras que en la “Release 6” existían dos elementos intermedios entre los nodos de los extremos.

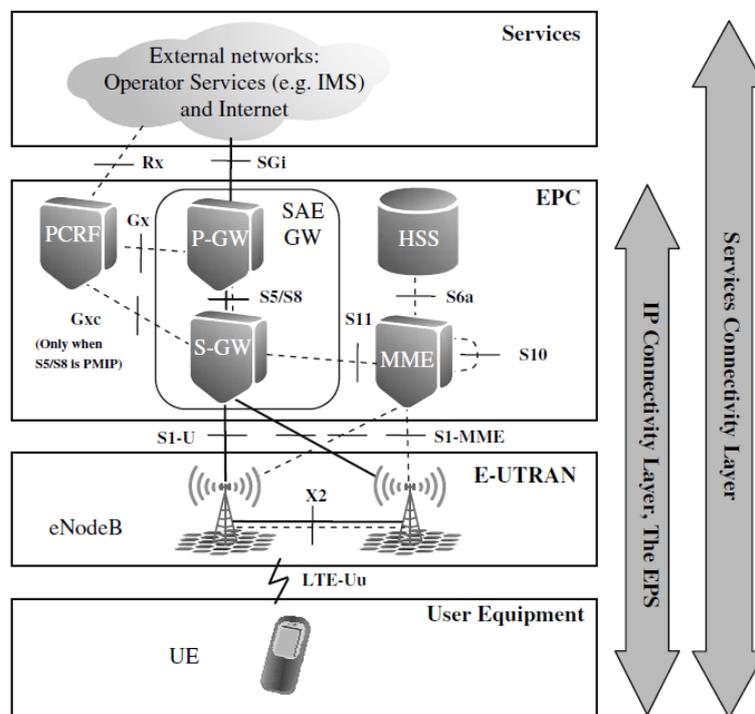
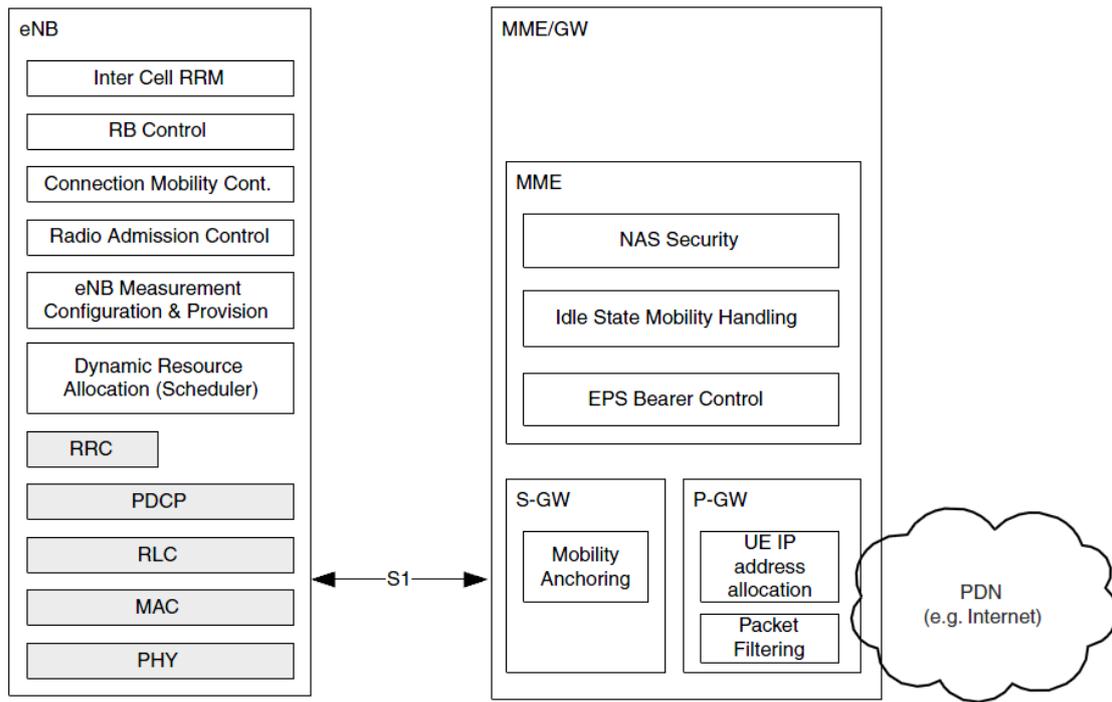
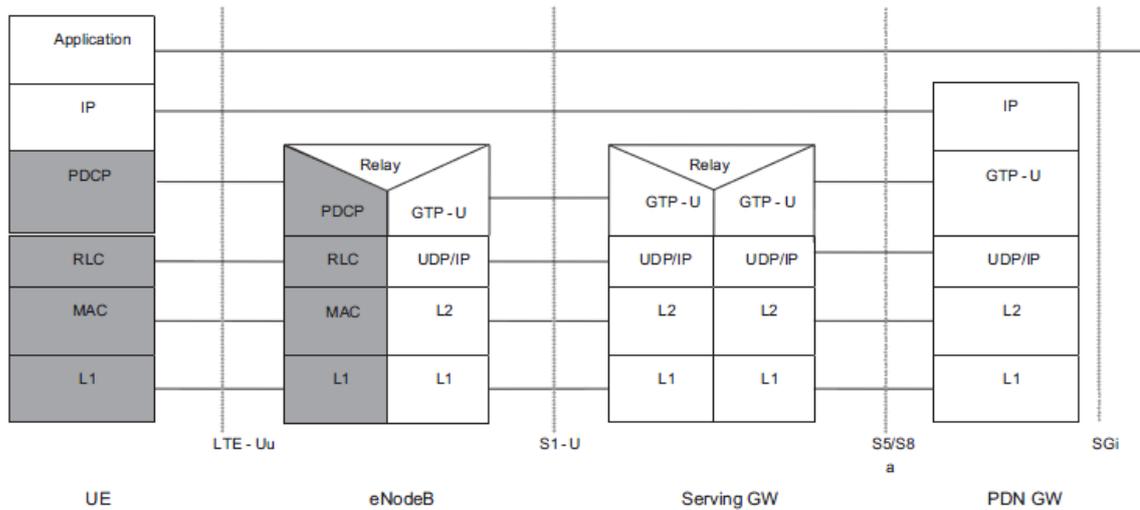


Figura 5.104. Arquitectura de un sistema únicamente LTE [LTE for UMTS].



a)



b)

Figura 5.105. Protocolos de los elementos de la red LTE a) y correspondencia entre los protocolos de la pila entre los elementos de LTE b). [The UMTS Long Term Evolution-LTE].

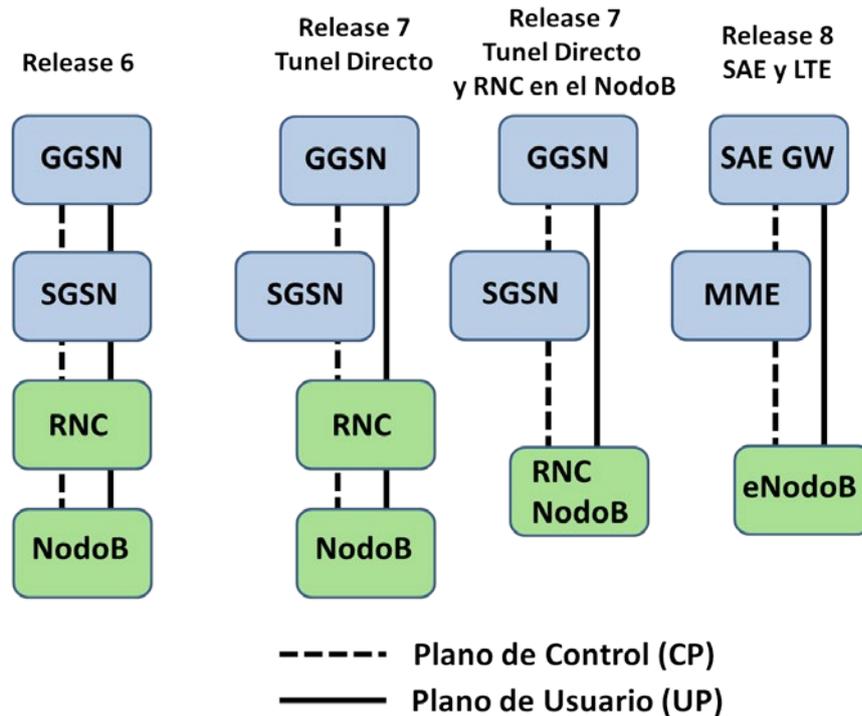


Figura 5.106. Evolución de los elementos involucrados en los Planos de Control y Usuario desde 3G a 4G en las diversas versiones [LTE for UMTS].

A continuación se describen las funciones de cada elemento de la red LTE [LTE for UMTS]:

1. UE: como ya conocemos es el dispositivo que el usuario emplea para su comunicación. Desde la implantación final de 3G existen diversos tipos de dispositivos con los que un usuario puede conectarse a la red. En la Figura 5.11 se muestra el porcentaje de utilización de cada dispositivo por parte de los usuarios para conectarse a LTE. El UE contiene el “Universal Subscriber Identity Module” (USIM) que identifica al usuario y es diferente del dispositivo empleado conocido en ocasiones como “Terminal Equipment” (TE). Al igual que en GSM y UMTS, la identidad del usuario, es decir, el USIM se guarda en una tarjeta inteligente que en LTE se denomina “Universal Circuit Card” (UICC). El UE sigue siempre las instrucciones de la red en todas las tareas que realiza. Estas tareas consisten en el establecimiento, mantenimiento y finalización de las comunicaciones con la red; además también se incluyen la gestión de la movilidad, es decir, de la actualización de la localización y la gestión de los “handovers”. Además, el UE proporciona el interfaz para las aplicaciones finales de usuario.

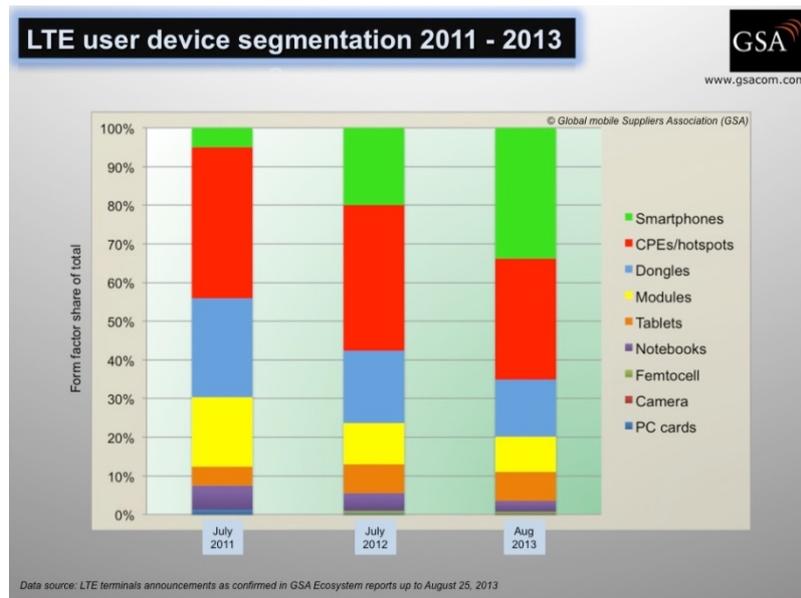


Figura 5.107. Porcentaje de utilización de los dispositivos para conectarse a LTE [GSA].

2. e-NodoB: la parte de red E-UTRAN solo contiene un tipo de nodo que es el e-NodoB (“evolved” NodoB). Estos nodos son las estaciones base que sirven de puente entre los UEs y la EPC. Entre las tareas tradicionales que llevan a cabo estos nodos se encuentran:
 - a. Emisión y recepción de las señales con destino y desde el UE.
 - b. Cifrado y descifrado de las comunicaciones con el UE.
 - c. Compresión y descompresión de las cabeceras IP.

El e-NodoB es un elemento más complejo que los nodosB de UMTS y por tanto realiza funciones que antes eran realizadas por los RNC:

- a. Es responsable de muchas funciones del Plano de Control. Así, es responsable de la gestión de los recursos radio que incluye la asignación de los recursos dependiendo de las peticiones, la programación del tráfico según la Calidad de Servicio (QoS) deseada y la constante monitorización de la utilización de los recursos.
- b. También es responsable de varias funciones de Gestión de la Movilidad (“Mobility Management”). Se encarga de la gestión de los trasposos de llamada (“handovers”); para ello el e-NodoB controla y analiza los niveles de la señal radio realizados por el UE y realiza sus propias mediciones de los niveles de señal recibidos. Los “handovers” requieren del intercambio de información entre e-NodosB y con la Entidad de Gestión de la Movilidad o “Mobility Management Entity” (MME). Como se observa en la Figura 5.8, los e-NodosB están interconectados a través del interfaz X2, al igual que los RNC estaban interconectados a través del interfaz Iur. Además, cuando un nuevo UE solicita una conexión el e-NodoB se encarga de enrutar esa conexión

hacia el MME que servía anteriormente al UE o hacia otro MME si el antiguo no está disponible.

3. HSS: es una base de datos cuyas siglas significan “Home Subscriber Server”. Da servicio a todas las entidades de control de la red. Engloba las funciones que en los sistemas anteriores realizaban el HLR y el AuC. Por tanto, está involucrada en la gestión de la autenticación y autorización de los usuarios, almacena la información de localización y contiene la información IP del usuario. La información de autorización incluye los servicios contratados, la restricción de servicios, los servicios suplementarios, etc. Como en el HLR el HSS contiene una entrada para cada uno de los usuarios de la red que permanecerá activa durante todo el tiempo en el que el usuario esté dado de alta en la red.
4. EIR: aunque no se muestra en la Figura 8 esta base de datos, presente en GSM y UMTS, también existe en LTE. El “Equipment Identity Register” almacena los IMEIs de los terminales de los usuarios de la red. Al igual que en GSM existen tres listas: una lista blanca, una gris y una negra. La lista blanca contiene los datos de los móviles que operan con normalidad, la gris los que poseen restricciones y la negra los móviles con prohibición de acceso. En [3GPP LTE] se indica que a pesar de su utilidad no todos los operadores utilizan un EIR.
5. S-GW: el “Serving Gateway” es el nodo servidor de las comunicaciones en modo paquete. Sus funciones son [3GPP LTE]:
 - a. Encaminar los datos desde la red radio hasta la EPC.
 - b. Servir de punto de encaminamiento en caso de movilidad, es decir, en el caso de que una sesión activa cambie de e-NodoB o se traspase a una red 2G o 3G.
 - c. Almacenar paquetes en sentido descendente enviados a un usuario hasta que se complete el establecimiento de la portadora radio (“radio bearer”).
 - d. Filtrar los datos potencialmente peligrosos o no adecuados para que no accedan el EPC.
6. PCRF: es el “Policy and Charging Rules Function”. Está formada por dos entidades: la “Policy Decision Function” (PDF) cuya misión es la de decidir la política de asignación de recursos y la “Charging Rules Function” (CRF) que se encarga de asignar una regla de tarificación definida por la operadora a cada flujo de datos.
7. PDN-GW o P-GW: el “Packet Data Network Gateway” es el nodo pasarela o “Gateway” a través del cual se accede a Internet o a otras redes de datos externas. Sus funciones son:
 - a. Encaminar los paquetes desde la EPC hasta otra red de paquetes externa.
 - b. Inspeccionar los paquetes en busca de actividades fraudulentas.
 - c. Asegurar la ejecución de las políticas de servicio del PCRF y marcar los paquetes para que se garanticen las prioridades de los distintos flujos de datos.

- d. Dar información de los flujos de datos transmitidos a las entidades encargadas de la tarificación. Asignar la dirección IP al UE cuando establece la conexión con la red.
8. MME: es el “Mobility Management Entity” y se encarga de todas las tareas de control del núcleo de red, es por tanto, el responsable del Plano de Control, como se aprecia en la Figura 10, y carece de tareas en el Plano de Usuario. Entre sus funciones destaca:
- a. Autenticación y Seguridad: el MME lleva a cabo el proceso mediante el cual el usuario y la red llegan a un acuerdo mutuo de autenticación. Este acuerdo implica un intercambio de claves denominado “Authentication and Key Agreement” (AKA). Este proceso es similar al efectuado en GSM y 3G. Cuando el usuario se registra en la red el MME busca la identidad permanente en la base de datos HSS; asociada a esa identificación permanente existe una pareja de datos denominados desafío de autenticación y parámetros de respuesta (“authentication challenge-parametres response”); el desafío es enviado al UE que responde a la red con la respuesta asociada; finalmente, la red compara la respuesta recibida con la guardada para decidir sobre la autenticación. Este proceso se realizará cuando sea necesario y también se puede repetir periódicamente. El MME también calcula las claves de cifrado y protección del usuario y controla la configuración de seguridad de los planos UP y CP de forma separada. Al igual que en los sistemas precedentes para proteger la identidad del UE el MME asigna a cada usuario un número de identidad temporal llamado “Globally Unique Temporary Identity” (GUTI). El GUTI se puede reasignar periódicamente para evitar seguimientos no autorizados [LTE for UMTS].
 - b. Gestión del perfil de suscripción y del servicio de conectividad: el MME se encarga de obtener el perfil de suscripción del UE cuando se conecta a la red por primera vez.
 - c. Gestión de la Movilidad: la gestión de la ubicación del UE también es similar a la de GSM y UMTS. Cuando el UE se conecta a la red por primera vez se crea una entrada en el HSS. Posteriormente, el MME se encarga de realizar el seguimiento del UE a nivel de e-NodoB si el UE ha iniciado una comunicación o a nivel de Área de Seguimiento o “Tracking Area“ (TA) si el UE se encuentra en reposo (“idle”). El UE informa periódicamente a la red de la TA en la que se encuentra y asimismo cuando detecta un cambio de TA informa inmediatamente. El MME también controla el establecimiento y liberación de los recursos dependiendo de los cambios en el estado del UE. Finalmente, el MME participa, aunque no lleva a cabo todas las tareas necesarias, en los “handovers” entre e-NodosB, S-GWs o MMEs.
 - d. El MME selecciona el S-GW apropiado y el PDN-GW apropiados para la comunicación con el UE.

Como se mencionó en la introducción el sistema LTE se diseñó para permitir una interconexión total con los sistemas precedentes. Por ello, los elementos de la arquitectura LTE mostrados en la Figura 8 poseen una serie de conexiones e interfaces para conectarse a las redes GRPS (2G) y UMTS-HSPA (3G) como se observa en la Figura 5.12. La configuración presentada en la Figura 5.12 pertenece a la “Release” 12; la implementación de esta configuración puede variar según el operador, por ejemplo, algunas funciones particulares pueden ser realizadas en el mismo equipo por lo que los interfaces correspondientes se convertirían en interfaces internos del equipo en cuestión.

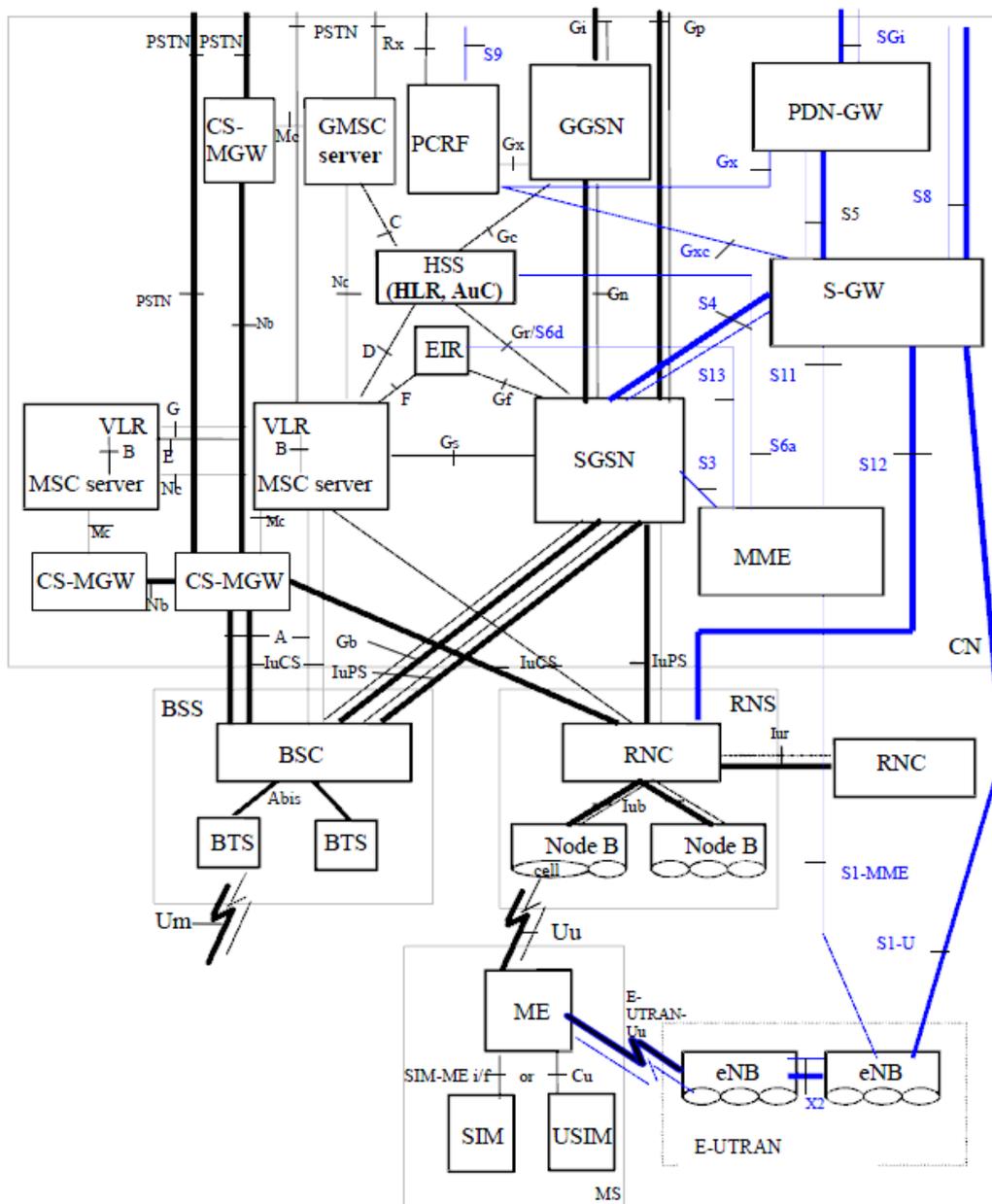


Figura 5.108. Interconexión de la arquitectura LTE a redes de conmutación de circuitos y de paquetes 2G y 3G de la “Release” 12 de 3GPP [Release 12]

Hasta el momento se han descrito los elementos y entidades del dominio de usuario, del dominio E-UTRAN (e-NodoB) y del dominio EPC-SAE. Queda por tanto describir las características del dominio de servicios situado en la parte superior de la Figura 8. Existen tres tipos de conjuntos de servicios posibles en una red LTE:

1. El conjunto de servicios preferido en LTE es el conocido como Sub-Sistema de Servicios Multimedia IP o “IP Multimedia Services Sub-System” (IMS). El IMS es una capa de servicios superpuesta a la capa IP que proporciona el EPS. Como se observa en la Figura 5.13 el UE establece tres tipos de conexión con el IMS. La línea gruesa representa la conexión de tipo IP con el IMS y otras redes de externas a través de del núcleo de red (EPC). La segunda conexión se realiza mediante el interfaz Gm y conecta al UE con los “Call Session Control Function” (CSCF); esta conexión permite al UE solicitar los servicios que desea. La tercera conexión se realiza mediante el interfaz Ut y conecta al UE con los Servidores de Aplicaciones o “Application Servers” (AS) del IMS. Los CSCFs son los elementos que gestionan y controlan la sesión; para gestionar el registro del UE en el IMS se conectan a las bases de datos HSS y SLF; para controlar la sesión se conectan a los Elementos de Servicio o “Services Elements”. Si la conexión implica la comunicación con otra red los CSCFs se conectan a los “Inter-working Elements”.
2. Servicios propios del operador que no sean IMS. La arquitectura de estos servicios, al contrario que la del IMS, no se define en los estándares 3GPP. El operador puede simplemente colocar un servidor en su red e indicar a los UE que se conecten a dicho servidor a través de un protocolo que es soportado por una aplicación en el UE. Un servicio de video bajo demanda o “streaming” ofrecido por un servidor de videos es un ejemplo de este tipo de servicios.
3. Otros servicios no proporcionados por el operador y que están disponibles para el UE: son por ejemplo los servicios proporcionados a través de internet. La arquitectura de estos servicios tampoco está especificada en los estándares de 3GPP. La arquitectura dependerá del servicio en cuestión. Algunos ejemplos típicos de este tipo de servicios son la conexión de un UE a un servidor de internet web para navegar por las web alojadas o acceder a sus servicios o la conexión a un servidor SIP (“Session Initiation Protocol”) para utilizar un servicio de telefonía ,es decir, de Voz sobre IP.

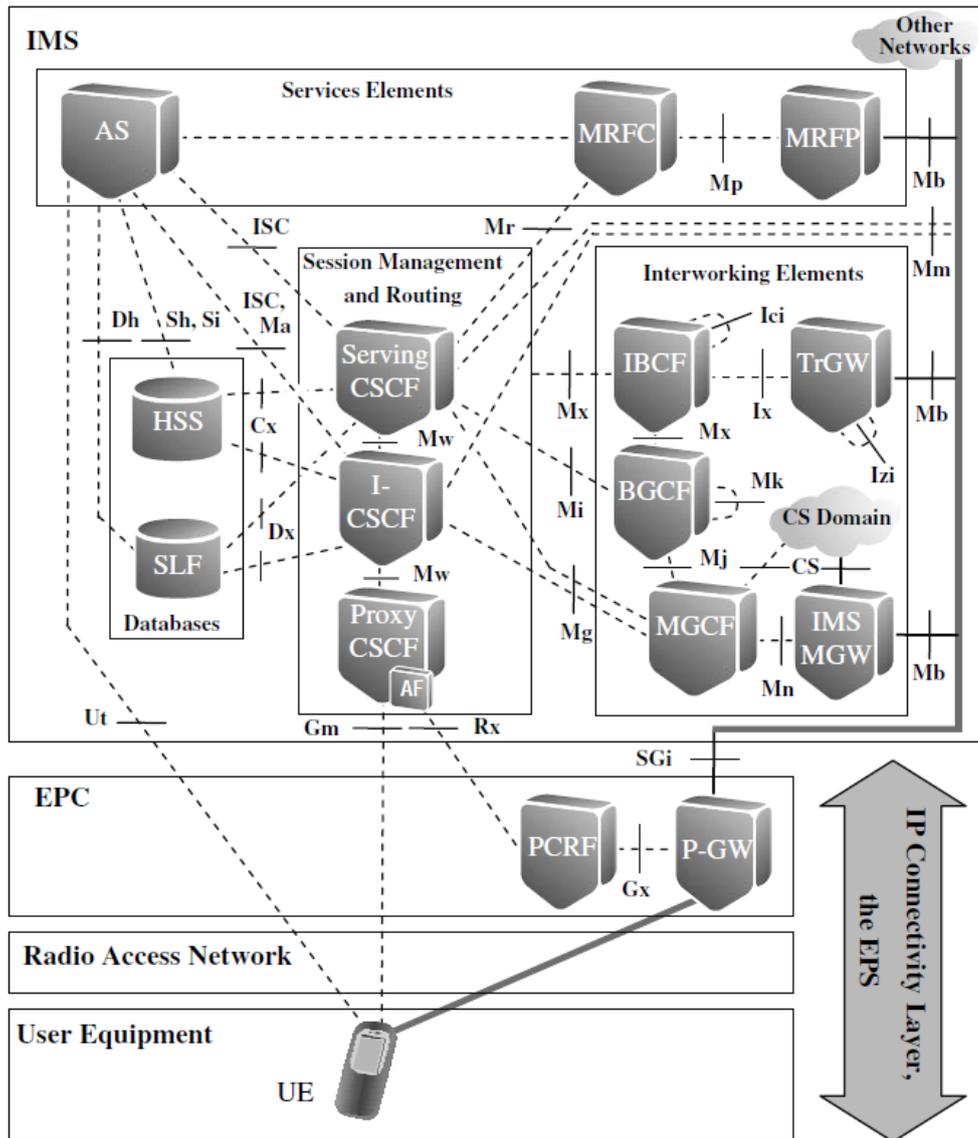


Figura 5.109. Arquitectura IMS y sus conexiones con el EPS [LTE for UMTS].

5.3 Nivel físico de LTE: interfaz radio.

En este capítulo se explican las características más importantes del nivel físico de LTE. Este sistema incluye técnicas muy variadas para alcanza elevadas velocidades de datos por ello se dedicará un sub-apartado a cada una de las siguientes características:

- Las bandas de frecuencias ocupadas por LTE.
- La técnica de acceso al medio y el duplexado. La técnica de acceso al medio se basa en la técnica “Orthogonal Frequency Division Multiplexing” (OFDM). Esta técnica se aplica de forma diferente según si el duplexado es en frecuencia (FDD) o en el tiempo (TDD). En este apartado también se enumerarán las posibles modulaciones empleadas en LTE.
- La técnica de multiplexación espacial “Multiple-Input Multiple-Output” (MIMO) que permite aumentar la tasa de datos.

El capítulo terminará con una serie de tablas resumen de las velocidades de datos alcanzadas dependiendo de las técnicas utilizadas.

5.3.1 Bandas de frecuencia en LTE.

Tal como se mencionó en la introducción una de las características que diferencia a LTE de los sistemas precedentes es el de la capacidad para operar con diferentes anchos de banda. En GSM el ancho de banda se limitaba a 200 KHz mientras que en UMTS el ancho de cada canal aumentaba hasta 5 MHz para permitir la aplicación de la técnica de espectro ensanchado. En LTE se pueden utilizar los anchos de banda de 1,4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz. En LTE estos anchos de banda se pueden alojar en bandas de frecuencia muy diferentes situadas entre los 400 MHz y los 3 GHz. Esta diversidad permite un despliegue amplio y eficiente en zonas diversas, tanto en entornos urbanos densamente poblados como zonas sub-urbanas y en entornos rurales. Según la técnica de duplexado se pueden utilizar unas bandas u otras. Las bandas seleccionadas por los organismos de estandarización si la técnica de duplexado es FDD se muestran en la Tabla 5.2; si la técnica de duplexado es TDD se pueden emplear las bandas mostradas en la Tabla 5.3.

Band Number	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Band Gap (MHz)	Duplex Separation (MHz)	UMTS Usage	LTE Usage
	$F_{UL,low}-F_{UL,high}$	$F_{DL,low}-F_{DL,high}$				
1	1920–1980	2110–2170	130	190	Y	Y
2	1850–1910	1930–1990	20	80	Y	Y
3	1710–1785	1805–1880	20	95	Y	Y
4	1710–1755	2110–2155	355	400	Y	Y
5	824–849	869–894	20	45	Y	Y
6*	830–840	875–885	35	45	Y	Y
7	2500–2570	2620–2690	50	120	Y	Y
8	880–915	925–960	10	45	Y	Y
9	1749.9–1784.9	1844.9–1879.9	60	95	Y	Y
10	1710–1770	2110–2170	340	400	Y	Y
11	1427.9–1447.9	1475.9–1495.9	28	48	Y	Y
12	698–716	728–746	12	30	Y	Y
13	777–787	746–756	21	31	Y	Y
14	788–798	758–768	20	30	Y	Y
17	704–716	734–746	18	30	N	Y
18**	815–830	860–875	30	45	N	Y
19**	830–845	875–890	30	45	Y	Y
20**	832–862	791–821	11	41	Y	Y
21**	1447.9–1462.9	1495.9–1510.9	33	48	Y	Y
23***	2000–2020	2180–2200	160	180	N	Y
24***	1626.5–1660.5	1525–1559	-135.5	-101.5	N	Y
25***	1850–1915	1930–1995	15	80	Y	Y
26****	814–849	859–894	10	45	Y	Y

Tabla 5.22. Bandas de frecuencia en LTE-FDD [LTE].

Band	$F_{low}-F_{high}$ (MHz)	UMTS	LTE
33	1900–1920	Y	Y
34	2010–2025	Y	Y
35	1850–1910	Y	Y
36	1930–1990	Y	Y
37	1910–1930	Y	Y
38	2570–2620	Y	Y
39	1880–1920	N	Y
40	2300–2400	Y	Y
41*	2496–2690	N	Y
42*	3400–3600	N	Y
43*	3600–3800	N	Y

Tabla 5.23. Bandas de frecuencia en LTE-FDD [LTE].

Hasta el año 2014 se han otorgado en España licencias de LTE en la banda de 2500 MHz. Como se ve en la Tabla 5.4 existen una gran cantidad de licencias tanto de tipo regional como nacional. La mayor parte de las licencias se han otorgado para ofrecer un servicio de tipo FDD y los anchos de bandas más empleados son los de 5 MHz y 10 MHz, aunque como se puede apreciar dos bloques de 10 MHz contiguos pueden formar un único ancho de banda de 20 MHz. La banda de 1800 MHz permanece por ahora asignada al servicio de GSM; en el futuro las licencias concedidas en esta banda, mostradas en la Tabla 5.5, se podrán emplear para ofrecer servicio de LTE ya que esta banda es una de las posibles bandas de uso como se observa en las Tablas 5.2 y 5.3. En el año 2014, fruto de la reorganización de los canales de Televisión Digital Terrestre, se han liberado 72 MHz en la banda de los 800 MHz que van a ser subastados para que los operadores móviles puedan ofrecer servicio LTE a través de estas bandas; a este ancho de banda situado entre los 790 MHz y 862 MHz se le conoce como dividendo digital y se espera que sirva para que la cobertura LTE alcance el 98 % en toda España con velocidades de hasta 30 Mbps [Marco Dividendo Digital].

Titular	Bloque (MHz)	Enlace Descendente (MHz)	Enlace Ascendente (MHz)	Ámbito de utilización
JAZZ TELECOM SA	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	ANDALUCIA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	ANDALUCIA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	ARAGÓN
JAZZ TELECOM SA	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	CANARIAS
CABLEUROPA, S.A.U	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	CANTABRIA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	CANTABRIA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	CASTILLA Y LEÓN

El Sistema LTE

TELECOM CASTILLA LA MANCHA SA	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	CASTILLA-LA MANCHA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	CASTILLA-LA MANCHA
CABLEUROPA, S.A.U.	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	CATALUÑA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	CATALUÑA
CABLEUROPA, S.A.U.	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	CEUTA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	CEUTA
CABLEUROPA, S.A.U.	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	COMUNIDAD DE MADRID
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	COMUNIDAD DE MADRID
CABLEUROPA, S.A.U.	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA
CABLEUROPA, S.A.U.	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	COMUNIDAD VALENCIANA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	COMUNIDAD VALENCIANA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	EXTREMADURA
R CABLE Y TELECOMUNICACIONES GALICIA SA	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	GALICIA
R CABLE Y TELECOMUNICACIONES GALICIA SA	2x5		2595 - 2605	GALICIA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	GALICIA
JAZZ TELECOM SA	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	ISLAS BALEARES
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	ISLAS BALEARES
CABLEUROPA, S.A.U.	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	LA RIOJA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	LA RIOJA
CABLEUROPA, S.A.U.	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	MELILLA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	MELILLA
EUSKALTEL SA	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	PAÍS VASCO
EUSKALTEL SA	2x5		2595 - 2605	PAÍS VASCO
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	PAÍS VASCO
TELECABLE DE ASTURIAS S.A.	2x5		2595 - 2605	PRINCIPADO DE ASTURIAS
TELECABLE DE ASTURIAS SA	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	PRINCIPADO DE ASTURIAS
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	PRINCIPADO DE ASTURIAS

CABLEUROPA, S.A.U. (ONO)	2x10	2680 - 2690	2560 - 2570	REGIÓN DE MURCIA
CONSORCIO DE TELECOMUNICACIONES AVANZADAS, SA	2x5		2595 - 2605	REGIÓN DE MURCIA
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2675 - 2680	2555 - 2560	REGIÓN DE MURCIA
FRANCE TELECOM ESPAÑA, SAU	2x10	2650 - 2660	2530 - 2540	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
FRANCE TELECOM ESPAÑA, SAU	2x10	2640 - 2650	2520 - 2530	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
TELEFONICA MOVILES ESPAÑA SAU	2x10	2630 - 2640	2510 - 2520	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
TELEFONICA MOVILES ESPAÑA SAU	2x10	2620 - 2630	2500 - 2510	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2670 - 2675	2550 - 2555	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2665 - 2670	2545 - 2550	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x5	2660 - 2665	2540 - 2545	TODO EL TERRITORIO NACIONAL

Tabla 5.24. Licencias otorgadas en España en la banda de 2500 MHz [Ministerio]

Titular	Bloque (MHz)	Enlace Descendente (MHz)	Enlace Ascendente (MHz)	Ámbito de utilización
XFERA MOVILES SA (YOIGO)	2x5	1845,1 - 1850,1	1750,1 - 1755,1	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
XFERA MOVILES SA (YOIGO)	2x5	1850,1 - 1855,1	1755,1 - 1760,1	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
XFERA MOVILES SA (YOIGO)	2x5	1855,1 - 1859,9	1760,1 - 1764,9	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
VODAFONE ESPAÑA, S.A.	2x20	1825,1 - 1845,1	1730,1 - 1750,1	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
FRANCE TELECOM ESPAÑA, SAU	2x20	1859,9 - 1879,9	1764,9 - 1784,9	TODO EL TERRITORIO NACIONAL
TELEFONICA MOVILES ESPAÑA SAU	2x20	1805,1 - 1825,1	1710,1 - 1730,1	TODO EL TERRITORIO NACIONAL

Tabla 5.25. Licencias otorgadas en España en la banda de 1800 MHz [Ministerio]

5.3.2 Técnica de acceso al medio, duplexado y modulaciones empleadas.

La técnica de acceso al medio de los sistemas 1G era FDMA; en GSM (2G) la técnica de acceso al medio cambió ya que se utilizó TDMA; en UMTS (3G) la técnica de acceso al medio es CDMA. En FDMA cada usuario toma una porción del espectro disponible, en cambio, en TDMA cada usuario toma una porción del tiempo disponible. En LTE, aunque no se pueda decir que es una mezcla de FDMA y TDMA, cada usuario toma una porción del espectro y del tiempo para comunicarse con el e-NodoB. La técnica de acceso se basa en la técnica (también se le llama modulación) OFDM. Esta técnica consiste en la transmisión de una serie de funciones sinusoidales de distintas frecuencias. La expresión matemática general de la señal OFDM en el dominio del tiempo es:

$$s(t) = \sum_{l=1}^P \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} A_k^l \sin(\omega_k t + \phi_k^l) \Phi(t - l \cdot T_s) \right\}$$

Ecuación 22

, donde P es el número de símbolos, N es el número de sinusoides que se transmiten en cada símbolo, T_s es la duración del símbolo, A es la amplitud de cada sinusoides, ϕ es la fase, ω la pulsación, k es el número de la sinusoides, l el número del símbolo y Φ es la función que delimita la duración del símbolo transmitido. Como las funciones son ortogonales se puede recuperar cada sinusoides en recepción sin interferencia de unas sinusoides en otras. En la Figura 5.14 a) se muestra un ejemplo hipotético, no real, de símbolo OFDM cuya duración es 20 segundos y está formada por tres sinusoides de frecuencias $(1/T_s) \cdot 2$, $(1/T_s) \cdot 3$, $(1/T_s) \cdot 4$, es decir, las frecuencias k/T_s con $k=2,3,4$. En los sistemas que utilizan OFDM los símbolos duran menos de 1 ms; así las frecuencias se sitúan en un rango de varias decenas de kHz. Por ello podría pensarse que la tasa de datos estaría limitada a unos pocos kbps en OFDM, sin embargo hay que tener en cuenta que la transmisión consta de muchas sinusoides por lo que la tasa total será de muchos Mbps. Es decir, en OFDM se transmiten en paralelo, de forma multiplexada muchos canales, cada uno de ellos de tasas reducida pero que en total alcanzan una tasa elevada.

Si se emplea la función ventana o pulso rectangular para delimitar la duración del símbolo, el espectro del símbolo OFDM sería el mostrado con línea de puntos en la Figura 5.14 b). La frecuencia de cada sinusoides se denomina subportadora. El espectro de cada subportadora es la convolución del espectro de la sinusoides (una raya frecuencial) con el espectro de la ventana utilizada para delimitar el símbolo. El espectro total de la señal OFDM es la suma de los espectros de las subportadoras; hay que destacar que la frecuencia se ha normalizado con respecto a la frecuencia de la primera subportadora, por eso la primera subportadora posee frecuencia 0. Se puede apreciar que en cada frecuencia subportadora la amplitud del espectro del resto de subportadoras vale 0. Por lo tanto, se puede analizar el valor de cada subportadora sin

interferencia del resto. La separación en frecuencia entre una subportadora y la siguiente es igual a $1/T_s$.

La ventana rectangular delimita perfectamente el símbolo transmitido, no obstante posee la desventaja de ocupar un ancho de banda significativo, mucho mayor que el existente entre la primera y la última subportadoras. Para reducir el ancho de banda ocupado por la señal OFDM se recurre a una ventana de coseno alzado; esta ventana se expresa en el dominio del tiempo como:

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |t| \leq \frac{1-\beta}{2f_s} \\ 0,5 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi f_s}{\beta} \left(|t| - \frac{1-\beta}{2f_s} \right) \right] \right\} & \frac{1-\beta}{2f_s} \leq |t| \leq \frac{1+\beta}{2f_s} \\ 0 & |t| > \frac{1+\beta}{2f_s} \end{cases}$$

Ecuación 23

, donde f_s es $1/T_s$ y es β el factor de “roll-off”. Este factor controla el decaimiento de la ventana tal como se observa en la línea de puntos y guiones de la Figura 5.15.a) en la que $\beta=0.5$. Ahora el símbolo posee dos colas en $[-5,0]$ y $[20,25]$ que antes no poseía. Como veremos más adelante, estas colas se pueden aprovechar para mejorar el rendimiento de la comunicación. El espectro de esta ventana posee la siguiente expresión:

$$h(f) = \frac{\sin\left(\pi \frac{t}{T_s}\right) \cos\left(\pi\beta \frac{t}{T_s}\right)}{\pi \frac{t}{T_s} 1 - \left(2\beta \frac{t}{T_s}\right)^2}$$

Ecuación 24

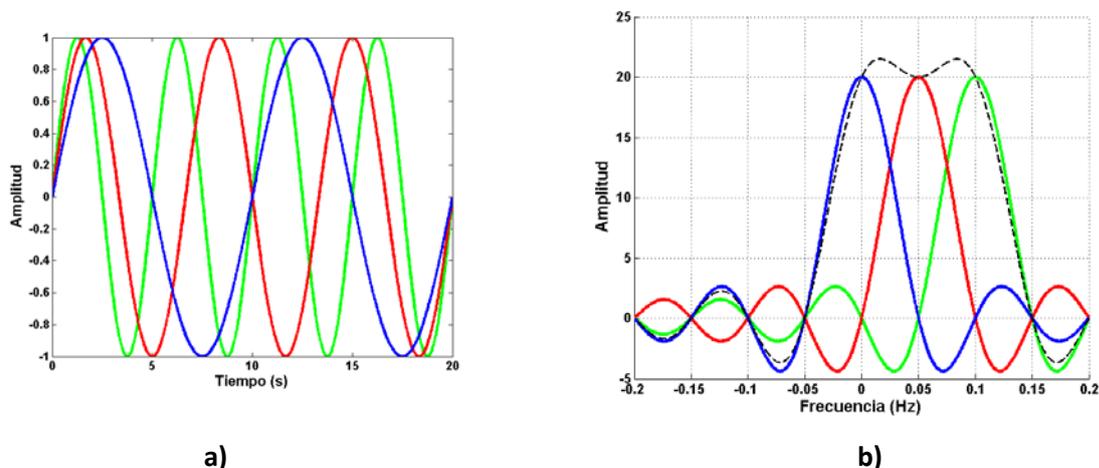


Figura 5.110. Sinusoides que forman el símbolo OFDM en el dominio del tiempo a). Espectro de las sinusoides del símbolo OFDM cuando se emplea una ventana rectangular en el tiempo. La línea de guiones representa el espectro final de la señal OFDM b).

En la Figura 5.15.b) se muestra el espectro de la señal OFDM cuando se emplea la ventana de coseno alzado con $\beta=0.5$. Se puede observar que la caída de la amplitud desde cada subportadora es mucho mayor que en el caso de usar la ventana rectangular.

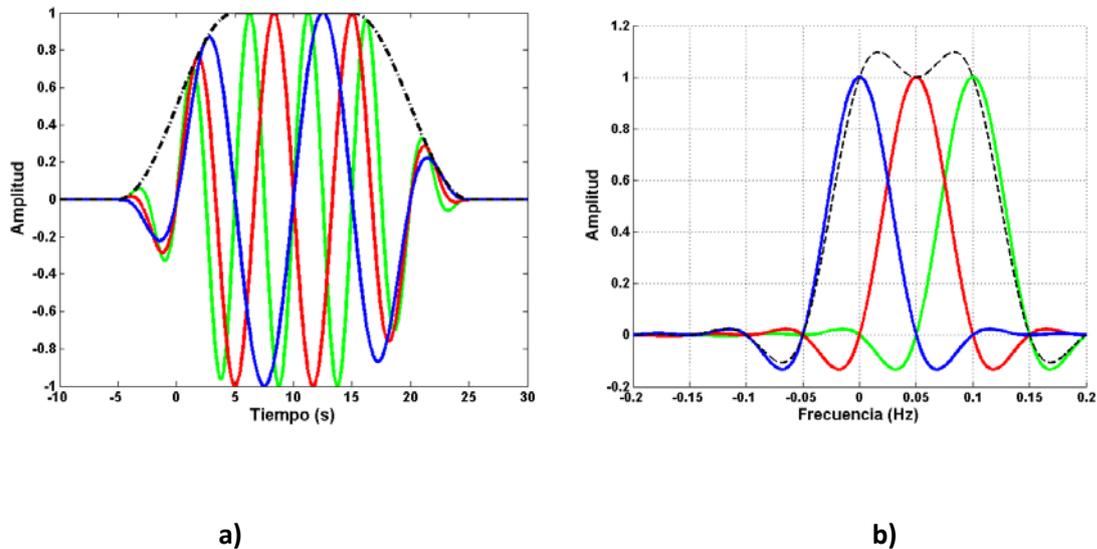


Figura 5.111. Sinusoides que forman el símbolo OFDM en el dominio del tiempo cuando se emplea una ventana de coseno alzado. La línea de guiones y puntos representa la ventana de coseno alzado a). Espectro de las sinusoides del símbolo OFDM cuando se emplea una ventana de coseno alzado en el tiempo. La línea de guiones representa el espectro final de la señal OFDM b).

En una señal OFDM cada subportadora puede portar la información de un símbolo de una determinada modulación digital, generalmente de tipo QAM. Esto se consigue al cambiar la amplitud y fase de cada senoide para representar el símbolo como se muestra en la Figura 5.16 en la que cada senoide del ejemplo de la Figura 14 representa un símbolo de una modulación QPSK.

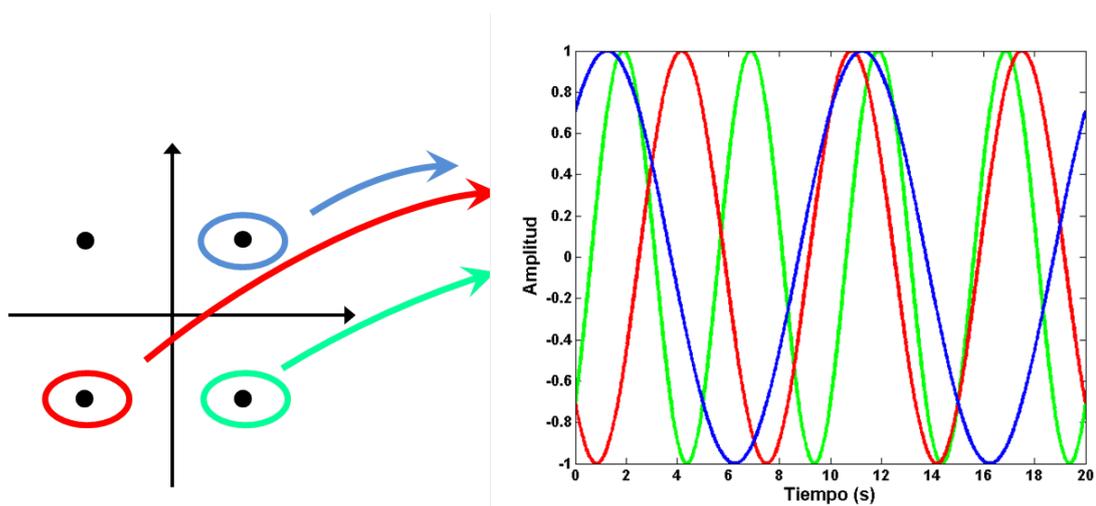


Figura 5.112. Cambio de las características de cada senoide para portar la información de los símbolos de una modulación digital.

Aunque cada senoide tenga una amplitud y fases diferentes, las sinusoides siguen siendo ortogonales en el tiempo y en frecuencia sigue sin existir interferencia entre subportadoras. Es decir, el símbolo de cada senoide en el tiempo, o de forma equivalente subportadora en frecuencia, se puede recuperar en recepción. La señal OFDM modulada se puede expresar con la siguiente expresión general:

$$s(t) = \sum_{l=1}^P \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \left[C_k^l e^{j2\pi kt/T_s} \Phi(t - l \cdot T_s) \right] \right\}$$

Ecuación 25

, donde C es el símbolo complejo de la modulación y Φ es la función de enventanado que como hemos dicho será de forma general una ventana de coseno alzado. Si se han transmitido funciones seno entonces se deberá obtener la parte imaginaria de los términos entre corchetes para recuperar las funciones y si se han transmitido cosenos la parte real. De nuevo, el espectro de la señal anterior estaría compuesto por los espectros de cada subportadora; para recuperar la información del símbolo en cada subportadora se realizaría un muestreo en las frecuencias discretas k/T_s con $k=0,1,2,\dots$; las frecuencias estudiadas para recuperar la información transmitida serían por tanto las mostradas como ejemplo en la Figura 5.17.

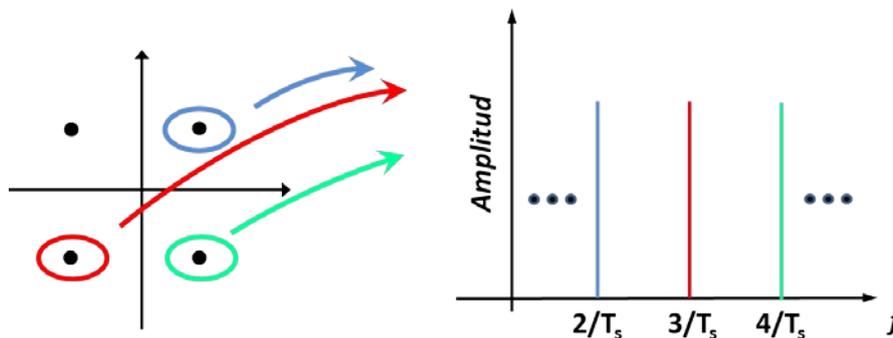


Figura 5.113. Muestreo del espectro del símbolo OFDM para obtener una serie de frecuencias discretas. Cada frecuencia discreta es una subportadora cuya amplitud y fase contiene la información de un símbolo de una modulación digital.

Como ya se ha mencionado las colas formadas en el símbolo OFDM se pueden aprovechar para mejorar el rendimiento de la comunicación. El canal altera cada una de las frecuencias que componen el espectro del símbolo OFDM, ese cambio en las frecuencias altera el símbolo OFDM en el dominio del tiempo; si consideramos solo el cambio efectuado en las frecuencias discretas k/T_s , entonces el cambio en el dominio del tiempo es una convolución discreta circular del símbolo con el canal. Si se desea ecualizar en frecuencia, se deben alterar las frecuencias discretas recibidas, cambiar su módulo y fase, para corregir el efecto del canal en dichas frecuencias. Por lo tanto, para poder cambiar las frecuencias discretas en el dominio de la frecuencia se debe poder realizar en el dominio del tiempo una convolución discreta circular ya que ambas operaciones son equivalentes. Esto solo es posible si se copia el final del símbolo OFDM en el principio del mismo; esta operación se realiza tal como se muestra en la

Figura 5.18 de modo que la parte final del símbolo se copia en la parte de la cola inicial. A la parte del símbolo copiada e insertada en el inicio se le denomina *prefijo cíclico*. Así, gracias al prefijo cíclico se puede llevar a cabo la ecualización frecuencial que es mucho más eficiente que la ecualización en el dominio de la tiempo especialmente si el ancho de banda es grande; por ejemplo, si la dispersión temporal tiene un valor de RMS del ensanchamiento del retardo igual a $5\mu\text{s}$ y el ancho de banda utilizado es de 20 MHz, se necesitaría un ecualizador lineal de alrededor de 100 coeficientes; por lo tanto, la ecualización sería muy complicada y el ancho de 20 MHz no se podría utilizar. En cambio, la ecualización en frecuencia es perfectamente factible en el caso anterior [3GPP LTE].

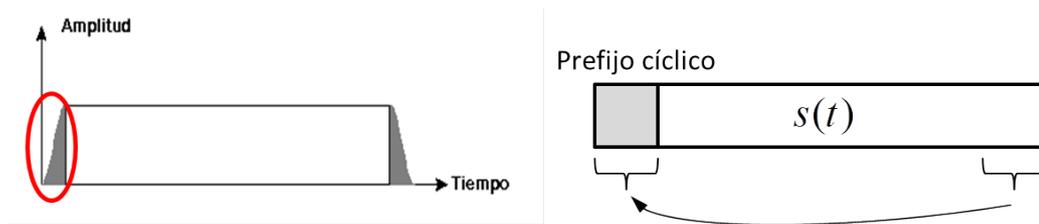


Figura 5.114. Inserción del prefijo cíclico en el inicio del símbolo OFDM.

El prefijo cíclico proporciona además una protección frente al efecto multicamino. En el receptor se captan múltiples réplicas de la señal radiada desde el transmisor. Cada réplica posee un retardo diferente que si es muy elevado puede producir interferencia entre símbolos (ISI). Sin embargo, la técnica OFDM permite la existencia de un mayor grado de dispersión temporal que en otras técnicas. Esto es debido a que un grado de dispersión que en otra técnica produciría ISI en OFDM produciría solo una interferencia entre el final de un símbolo y el prefijo cíclico del siguiente. En la Figura 5.19 se muestra un ejemplo en el que existen tres réplicas que únicamente provocan el solapamiento entre el final de las réplicas y el prefijo cíclico de las réplicas del siguiente símbolo.

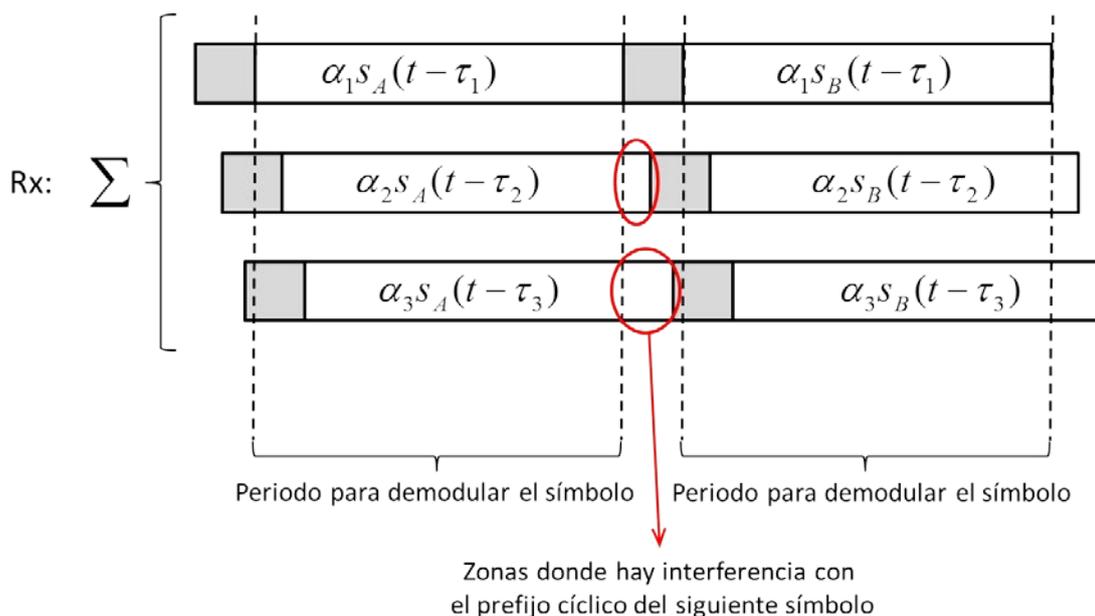


Figura 5.115. El prefijo cíclico de OFDM y efecto multicamino [3GPP LTE].

Otra de las ventajas de OFDM consiste en que los desvanecimientos en frecuencia solo afectan a la subportadora o subportadoras situadas en la zona del espectro donde se producen el desvanecimiento, el resto de subportadoras quedan inalteradas. Por ello, pese a la existencia del desvanecimiento en frecuencia se puede demodular parte del símbolo OFDM. En cambio, en las modulaciones de una sola portadora (uniportadoras) el desvanecimiento en frecuencia afecta a la demodulación de todo el símbolo. Por la misma razón, la técnica OFDM es robusta frente a interferencias de banda estrecha.

Hasta aquí se han mostrado las ventajas de OFDM. Respecto a sus desventajas se pueden citar las tres siguientes:

- Las sinusoides pueden dar lugar a amplitudes elevadas en la señal total cuando se combinan en fase en ciertas zonas del símbolo. En la Figura 20 se muestra la señal final resultante correspondiente a las sinusoides de la Figura 14; en las zonas en las que las tres sinusoides poseen una amplitud elevada y fase similar, la señal resultante alcanza picos cercanos a tres. Estos picos provocan que el parámetro de potencia de pico a potencia media o “Peak-to-Average Power Ratio” (PAPR) sea elevado. Por ello, en OFDM se requieren amplificadores de potencia de alta linealidad.
- Comparada con las modulaciones uniportadoras OFDM es más sensible a las desviaciones en frecuencia y el ruido de fase. Una desviación en frecuencia del muestreo del espectro del símbolo demodulado produce el muestreo en las frecuencias discretas incorrectas y por tanto un error en la obtención de los símbolos QAM.
- La dispersión en frecuencia puede producir interferencia entre portadoras (ICI).
- La sincronización en el tiempo debe ser precisa ya que un error en la sincronización produce un cambio en la fase de los símbolos QAM.

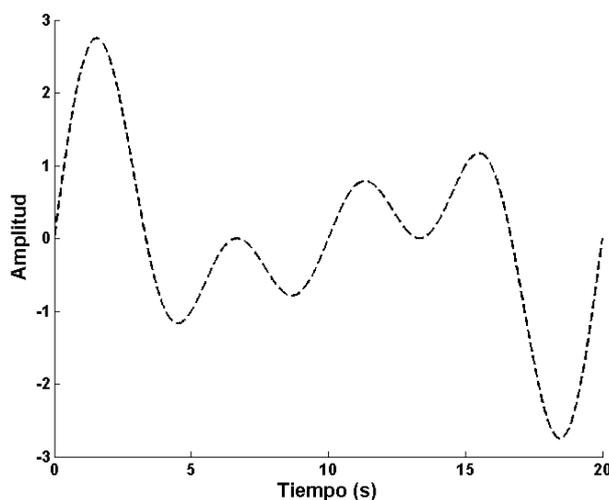


Figura 5.116. Símbolo final OFDM producto de la suma de la sinusoides de la Figura 14 a).

LTE utiliza OFDM para diferenciar unos usuarios de otros y posibilitar el acceso de esos usuarios a los recursos. Así la técnica de acceso al medio en el enlace descendente en LTE se llama “Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access” (OFDMA). En

la Figura 5.21 se muestran los bloques de un transmisor y un receptor. Los pasos que se siguen para generar la señal OFDM son los siguientes:

1. El convertidor de serie a paralelo (S/P) distribuye los bits entre los símbolos lógicos de la modulación QAM escogida. Si existen M símbolos diferentes, cada símbolo portará la información igual a $\log_2(M)$ bits. Si existen N subportadoras en cada símbolo, entonces el número de bits que se transmiten en un símbolo de duración T_s es $N\log_2(M)$.
2. Los mapeadores transforman cada conjunto de $\log_2(M)$ bits, es decir, cada símbolo lógico en un símbolo real de la modulación escogida. Cada símbolo real (C en la Figura 5.21) es un número complejo que implica un cambio de amplitud y fase en una senoide.
3. Como se observa en la Ecuación 4 la operación realizada para obtener la señal transmitida es una Transformada de Fourier Inversa (IDFT en inglés). Por tanto, el bloque que genera la señal en el dominio del tiempo es un procesador que realiza una IDFT.
4. El convertidor paralelo/serie (P/S) ordena la señal en un flujo de datos serie. A continuación se inserta el prefijo cíclico en el inicio del símbolo.
5. La señal obtenida hasta ahora está compuesta por números complejos. La parte real son las muestras temporales a transmitir por la rama que transmite funciones coseno. La parte imaginaria son las muestras temporales que componen la señal que se transmite por la rama de las funciones seno. Esta tarea se lleva a cabo mediante convertidores Analógicos/Digitales (A/D). El proceso se completa con la suma de las funciones coseno y seno, su muestreo con la función de coseno alzado y finalmente la señal resultante se transmitiría a la frecuencia RF del canal (multiplicación con un oscilador de frecuencia RF). Estas tareas no se muestran en la Figura 5.21.

Los pasos que se siguen para recuperar los símbolos transmitidos son los siguientes:

1. La señal recibida en la banda de RF se trasladaría hasta las frecuencias banda base. A continuación en una fase de sincronización se determinaría el inicio del símbolo.
2. Una vez fijado el inicio del símbolo se elimina el prefijo cíclico. Las muestras temporales de los cosenos se transforman en la parte real de la señal en el dominio del tiempo y las muestras de los senos en la parte imaginaria de la señal. El convertidor serie a paralelo ordena los nuevos números complejos en un total de N ramas.
3. Un procesador realiza la Transformada de Fourier Directa (DFT en inglés). Esta operación permite recuperar los símbolos de la modulación digital escogida. Es decir, se recupera el número complejo que modificaba cada subportadora.
4. Hay que tener en cuenta que el canal, debido al efecto multicamino, habrá alterado los símbolos. En el último los símbolos son ecualizados en frecuencia para corregir el efecto del canal.

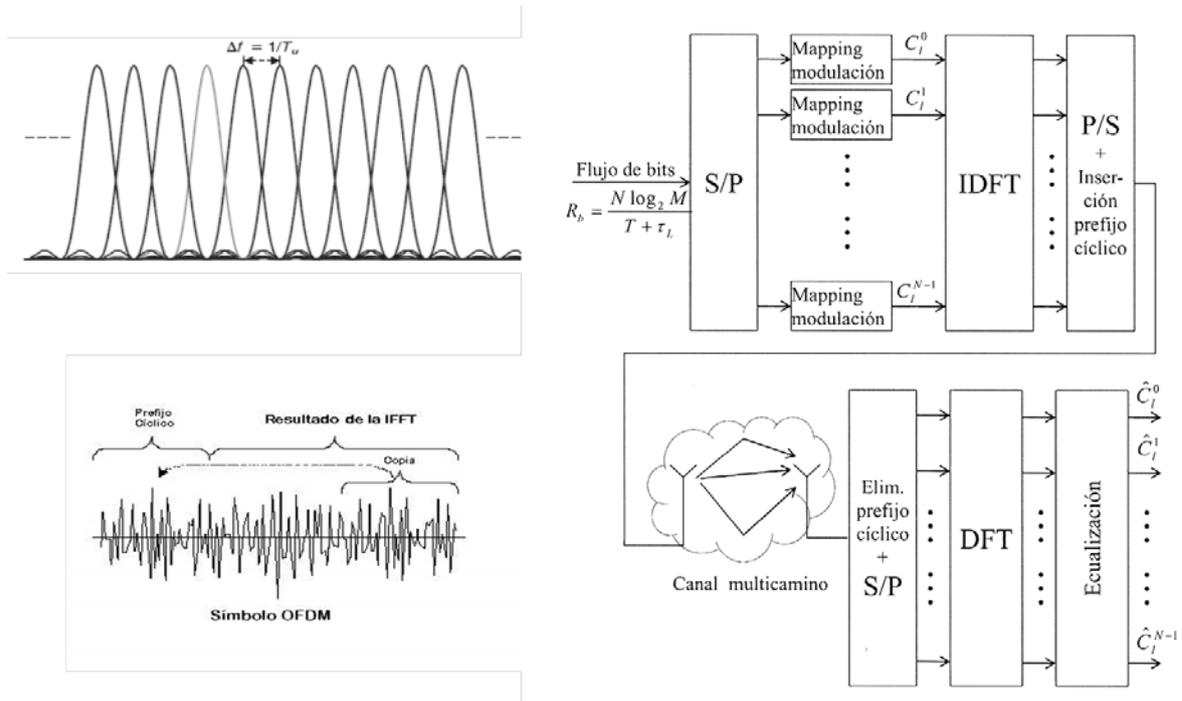


Figura 5.117. Señal OFDM en frecuencia y prefijo cíclico del símbolo en el dominio del tiempo (elaboración propia). Diagrama de bloques del transmisor y del receptor en OFDMA [3GPP LTE].

En el enlace ascendente la técnica de acceso al medio es diferente de la del enlace descendente. En el enlace UE a e-NodoB se emplea “Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access” (SC-FDMA). Existen dos razones principales para elegir esta variante de OFDM en el enlace ascendente:

- La técnica OFDM original requiere de amplificadores de potencia de alta linealidad y estos dispositivos son difíciles de integrar en la estructura del UE, que debe ser lo más sencilla posible. La técnica SC-FDMA presenta un PAPR menor que OFDMA, ello evita el problema anterior por lo que su implementación es más sencilla y se abarata el coste de fabricación de los terminales.
- Permite utilizar bloques de procesamiento comunes entre el enlace ascendente y descendente, de esta forma se simplifica el transmisor del UE.

En la Figura 5.22 se muestra el diagrama de bloques del transmisor y del receptor en el enlace ascendente. Los pasos que se siguen en el transmisor son los siguientes:

1. Los bloques que generan los símbolos complejos son los mismos que en el enlace descendente. Sin embargo, como un usuario solo puede ocupar una fracción de las subportadoras existentes en el ancho de banda del sistema, no se transmiten N símbolos sino P ($P \leq N$).
2. Para reducir el PAPR y a la vez conservar las virtudes de la técnica OFDM se realiza una Transformada de Fourier Directa (DFT en inglés) de los P símbolos complejos. Mediante esta operación el problema del PAPR se traslada al dominio de la frecuencia.

3. A continuación se realiza un mapeado entre los P número complejos obtenidos tras la DFT y los N valores necesarios para generar la señal en el dominio del tiempo. Existen dos tipos de mapeado: el mapeado localizado y el distribuido. Ambos tipos se muestran en la Figura 23 donde se aprecia que las subportadoras no utilizadas se rellenan con ceros. Aunque el distribuido reduce en mayor medida el PAPR se emplea el localizado ya que facilita la separación de los símbolos de un usuario de los de otro usuario. En las P subportadoras existe información de los P símbolos QAM seleccionados como se aprecia en la Figura 24. En OFDMA cada subportadora poseía la información de un símbolo, en SC-FDMA la información de los símbolos se encuentra repartida entre todas las subportadoras utilizadas. Por ello, la señal generada es de tipo uniportadora o “Single Carrier”.
4. La IDFT permite obtener la señal en el dominio del tiempo al igual que en OFDMA.
5. Finalmente, el convertidor P/S ordena las muestras, se añade el prefijo cíclico y se suman las señales seno y coseno para transmitirlos por RF.

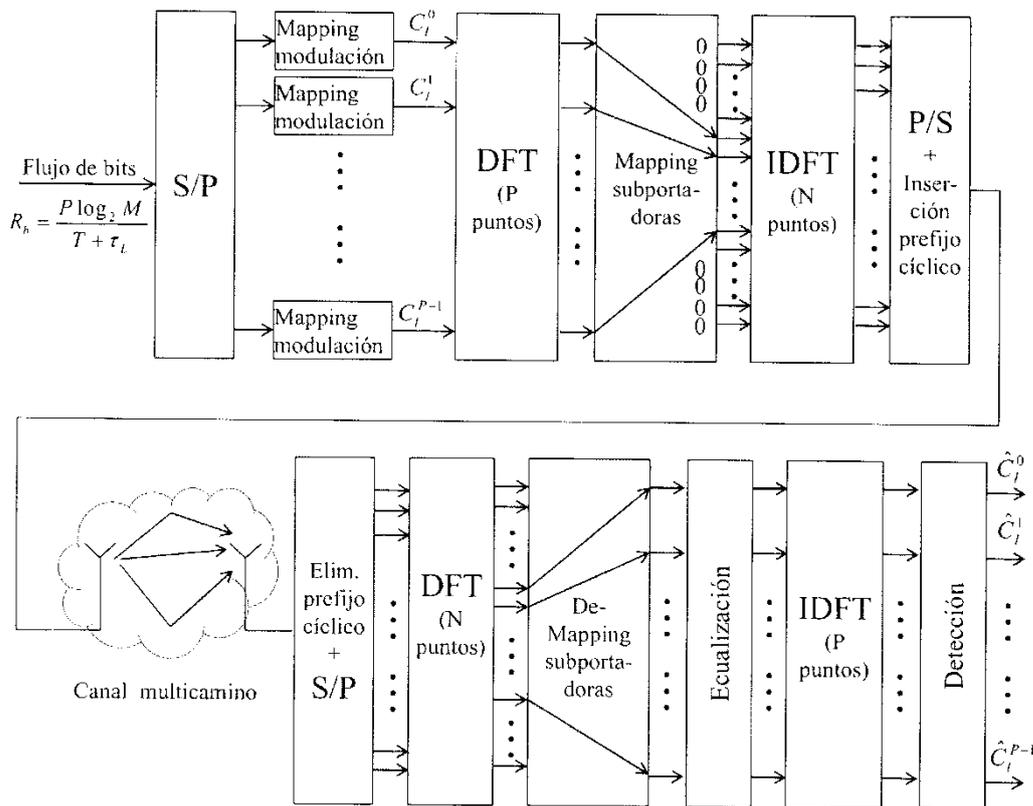


Figura 5.118. Diagrama de bloques en SC-FDMA [3GPP LTE].

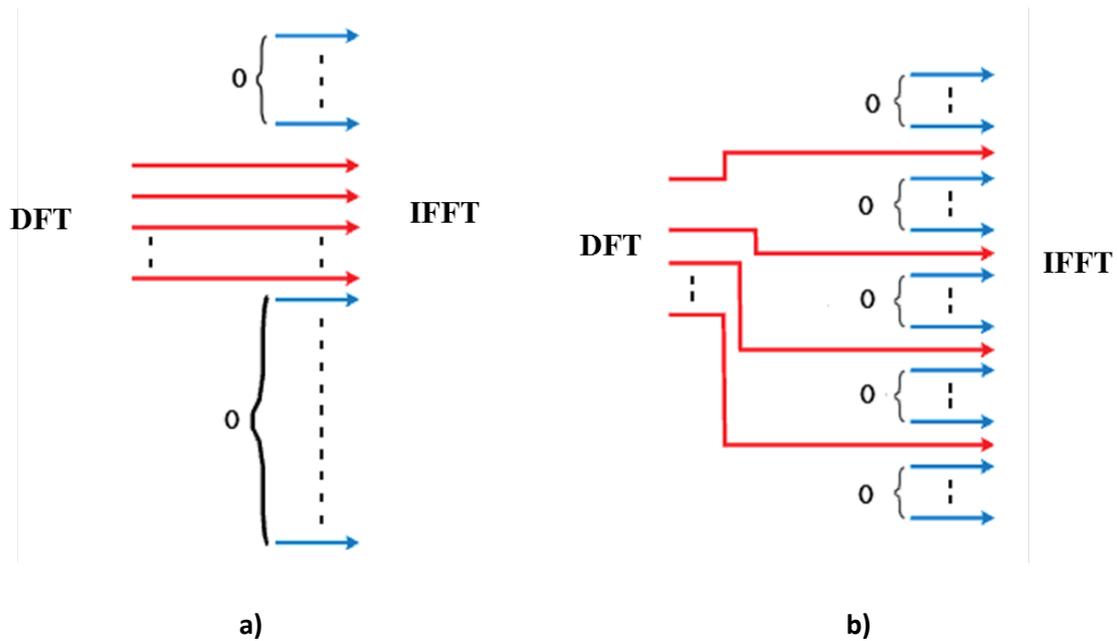


Figura 5.119. Mapeado localizado a) y distribuido b).

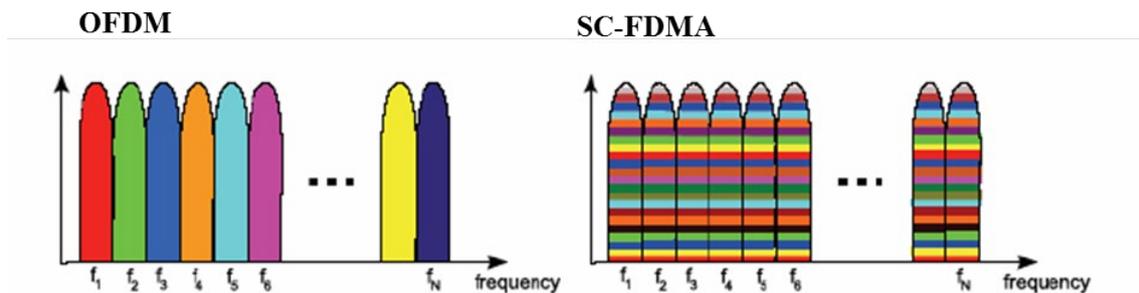


Figura 5.120. Diferencia entre OFDMA (multiportadora) y SC-FDMA (uniportadora) [LTE technology].

En el receptor se lleva a cabo el proceso inverso para recuperar la información transmitida:

1. Al igual que en el enlace descendente la señal recibida en la banda de RF se trasladaría hasta las frecuencias banda base. A continuación en una fase de sincronización se determinaría el inicio del símbolo.
2. Se aplica un DFT que es la operación inversa a la IDFT del transmisor. De este modo se recuperan la señal en frecuencia.
3. A continuación se ejecuta un mapeado inverso al realizado en transmisión. Este mapeado inverso equivale a seleccionar las N subportadoras deseadas.
4. El canal altera la señal transmitida. En este paso tiene lugar la ecualización en el dominio de la frecuencia.
5. La IDFT permite recuperar los símbolos originales al aplicar la operación inversa de la DFT inicial del transmisor.

Una vez estudiado cómo se puede generar la señal OFDMA y SC-FDMA se puede mostrar la forma efectiva en la que se produce el acceso al medio. En LTE cada usuario toma una porción de las subportadoras existentes durante un periodo de tiempo determinado. Como se observa en la Figura 5.25 las subportadoras se dividen en grupos de 12 llamados bloques de recurso. A cada subportadora también se le llama elemento de recurso. El espaciado entre subportadoras es de 12 kHz con lo que cada bloque de recursos ocupa 180 kHz. El tiempo también se divide en grupos llamados ranuras (“slots”) que duran 0,5 ms y contienen 7 símbolos OFDM. Dos ranuras forman una subtrama de 1 ms que constituye el periodo mínimo que toma un usuario o el e-NodoB para transmitir: a este periodo se le conoce con el nombre de intervalo de tiempo de transmisión o “Transmission Time Interval” (TTI). Como se aprecia en la Figura 25 un usuario puede tomar varios TTIs y varios bloques de recurso para su transmisión. Asimismo, los bloques de recurso y TTIs pueden cambiar durante la comunicación de forma que existe una gran flexibilidad en las tasas de datos en LTE.

En la Figura 5.25 se indican las modulaciones empleadas en LTE pueden ser: QPSK en la que se transmiten 2 bits por símbolo, 16 QAM en la que se transmiten 4 bits por símbolo y 64 QAM en la que se transmiten 6 bits por símbolo.

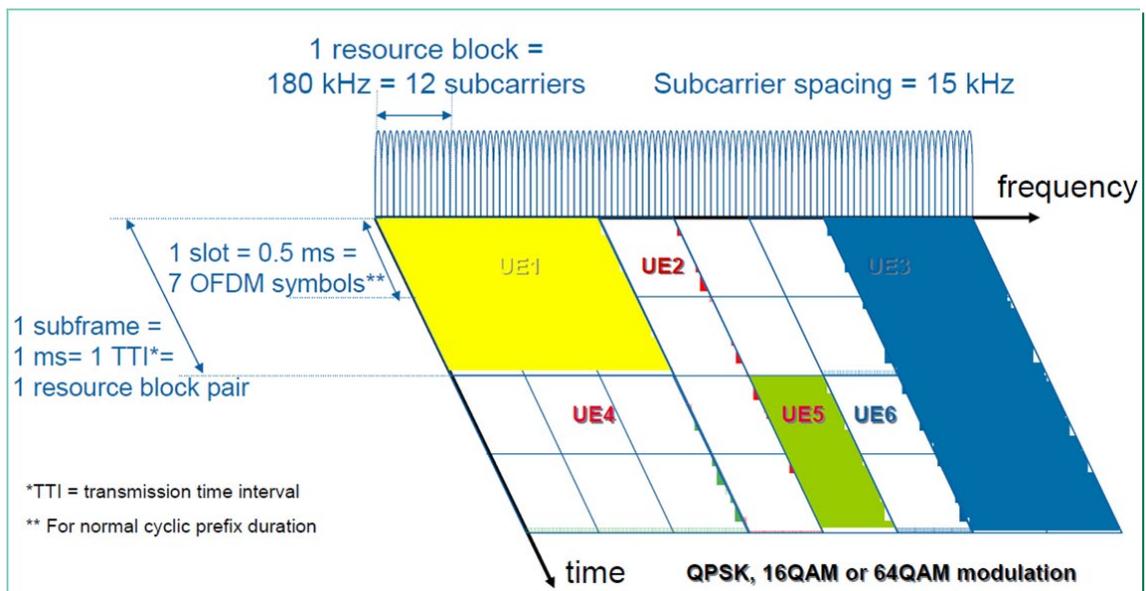


Figura 5.121. Acceso al medio en LTE [LTE technology].

Las subtramas se agrupan conjuntos de 10 subtramas para formar una trama de duración 10 ms tal como se representa en la Figura 5.26. En LTE existen los dos tipos de duplexado: duplexado en frecuencia FDD y duplexado en el tiempo TDD. En FDD existe la trama mostrada en la Figura 26 tanto en el enlace ascendente como el enlace descendente. En TDD solo existe una trama compartida por ambos enlaces; al igual que en 3G unas subtramas se destinarán al enlace ascendente y el resto de tramas al descendente.

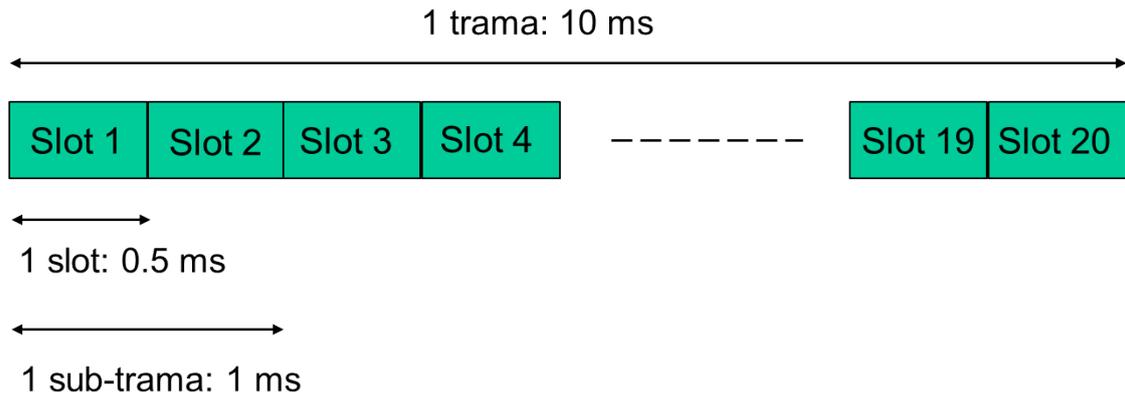


Figura 5.122. Trama temporal compuesta por 10 subtramas.

Si el canal se estima con precisión se pueden conocer los periodos de tiempo y zonas del espectro en las que el canal presenta un menor desvanecimiento para un determinado usuario. Cada usuario se encuentra en una posición de la zona de cobertura del e-NodoB por lo que cada usuario tendrá unas zonas temporales-frecuenciales con menos desvanecimiento, es decir, más aptas para llevar a cabo la comunicación. La asignación de las mejores zonas temporales-frecuenciales a los usuarios se denomina “scheduling”. En la Figura 5.27 se muestra el desvanecimiento para dos usuarios diferentes. Así, a cada usuario se le asignan los bloques de recurso durante las subtramas o TTIs en los que el canal presenta un menor desvanecimiento.

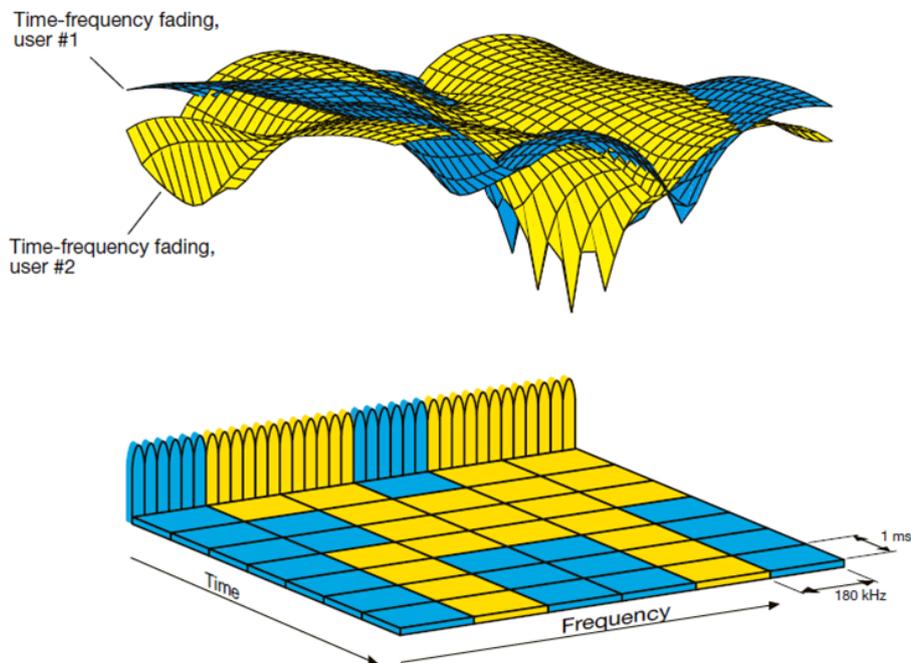


Figura 5.123. Aplicación de la técnica de “scheduling” [LTE technology].

5.3.3 La técnica MIMO.

La tasa de transmisión de un sistema inalámbrico depende exclusivamente del ancho de banda utilizado y de la eficiencia espectral de la tecnología utilizada. Una vez fijado el ancho de banda, para poder aumentar la velocidad de transmisión podemos usar codificaciones complejas (turbo códigos), aumentar los órdenes de las modulaciones (por ejemplo, pasar de una BPSK a una 64 QAM hacer que transmitamos 6 veces más información) o incrementar el número de elementos radiantes.

Centrándonos en el número de antenas, tradicionalmente una de las formas de incrementar la tasa de datos en los sistemas de comunicaciones móviles se basa en el empleo de varias antenas en transmisión y/o recepción. En 2G las estaciones base contaban con dos antenas en recepción de forma que gracias a la aplicación de técnicas de diversidad espacial se conseguía mejorar la relación señal a ruido (SNR) en unos 3 dB (dependiendo de la técnica usada); este aumento de la SNR posibilitaba en último término el aumento de la tasa de datos ya que podremos aumentar el tamaño de la constelación para una mismo BER.

En el sistema HSPA+, evolución de UMTS, se dotó de múltiples antenas a los MS y a los NodosB para aplicar las técnicas de “Multiple-Input Multiple-Output” (MIMO). Estas técnicas son más complejas que los métodos de diversidad espacial empleados en 2G y permiten un aumento sustancial de las tasas de datos. En LTE al igual que en HSPA+ los UE y los e-NodosB cuentan con dos o más antenas de modo que se pueden aplicar las técnicas MIMO. Las técnicas MIMO se dividen en métodos de diversidad (TxD con códigos espacio temporales) y métodos de multiplexación espacial (SM).

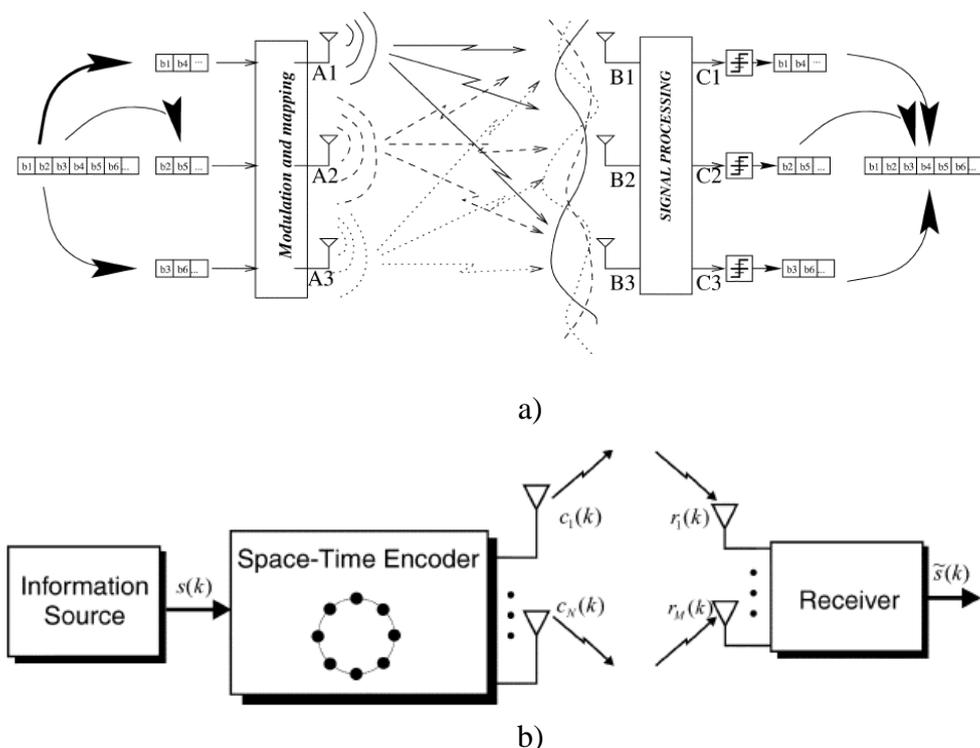


Figura 5.124. Diagrama de bloques genérico de a) un sistema MIMO de multiplexación espacial, y b) un sistema de codificación espacio temporal [Bonek 2003].

Según podemos ver en la Figura 28 a), la multiplexación espacial permite transmitir flujos de datos independientes por cada una de las antenas, y de esa forma crear caminos independientes y aumentar así la cantidad de información transmitida por unidad de tiempo. En el caso de los códigos espacio temporales (Figura 28.b), la misma información se codifica en cada una de las antenas para darle más robustez a la transmisión, y de esa forma mejorar el BER. Indirectamente, esta mejora en la tasa de error permite aumentar el tamaño de la constelación, y a su vez la velocidad de transmisión.

En la Figura 5.29 se muestra el diagrama de bloques del transmisor en el enlace descendente, es decir, el diagrama que permite la utilización de TxD y SM cuando transmite el e-NodoB. Las palabras código son la información que se desea transmitir en forma de símbolos de una modulación digital de tipo QAM (QPSK, 16 QAM o 64 QAM). Los símbolos que se van a transmitir se mapean y transforman de una forma diferente según se aplique la técnica TxD o SM. A continuación los símbolos codificados según la técnica empleada ocupan las subportadoras y periodos de tiempo adecuados. Finalmente, la señal OFDM se genera según lo visto en el apartado anterior.

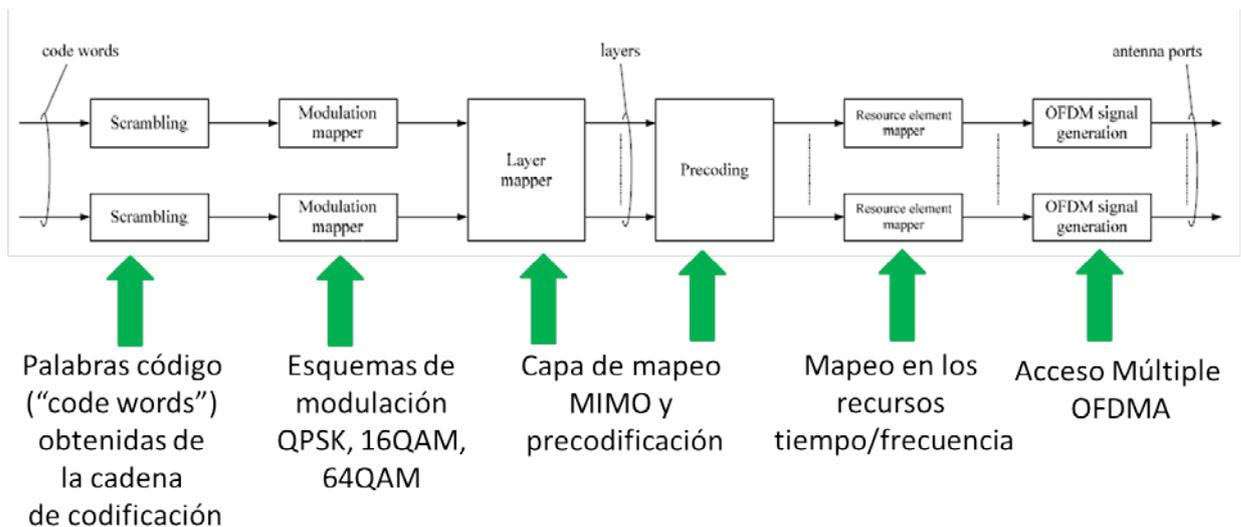


Figura 5.125. Diagrama de bloques del transmisor en el enlace descendente [LTE technology].

Como se ha comentado anteriormente en la TxD se transmiten los mismos símbolos por las antenas del transmisor. En la Figura 5.29 se muestra un ejemplo de esta técnica en un caso con dos antenas.

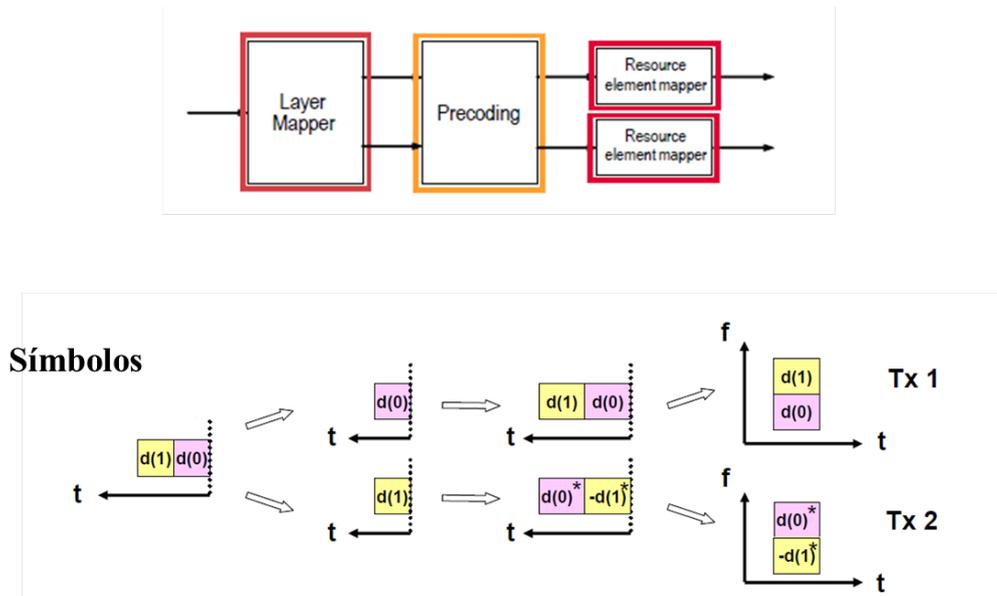


Figura 5.126. Ejemplo de diversidad en transmisión (TxD) [LTE technology].

Se desea transmitir los símbolos $d(0)$ y $d(1)$. En la capa de mapeo los símbolos son mapeados en las dos capas existentes. A continuación los símbolos son precodificados según el código de bloque espacial-frecuencial o “Space-Frequency Block Coding” (CFBC) que ha sido previamente seleccionado; estos códigos están definidos en el estándar LTE desarrollado por el 3GPP. En este caso la precodificación consiste en transmitir por la primera capa los dos símbolos sin cambio y en la segunda capa el conjugado con signo cambiado de $d(1)$ y el conjugado de $d(0)$. En la fase de mapeo en los recursos de tiempo y frecuencia los símbolos mapeados se colocan en los periodos de tiempo y subportadoras adecuadas. Como se puede observar se transmiten dos señales OFDM en las que hay dos subportadoras y cuatro versiones de dos símbolos por lo que el número de símbolos por subportadora no ha aumentado respecto al caso de una antena. Lo que se consigue con esta técnica es una transmisión redundante en las dos antenas que permite una mayor robustez en la comunicación. Y consecuentemente, si la BER disminuye, podremos aumentar el tamaño de la constelación.

La otra técnica utilizada, como se ha comentado anteriormente, es la multiplexación espacial, donde se transmiten flujos de datos diferentes en cada antena al contrario que en TxD. La Figura 5.31 muestra un ejemplo de transmisión con de multiplexación espacial. En este caso, como en el caso anterior, queremos transmitir los símbolos $d(1)$ y $d(0)$. Directamente se mapea cada símbolo en cada antena, ocupando el mismo time slot y frecuencia en cada caso. Si comparamos esta figura con la anterior, vemos que los recursos son la mitad, ya que sólo necesitamos un “slot frecuencial” frente a dos (que podrían haber sido temporales).

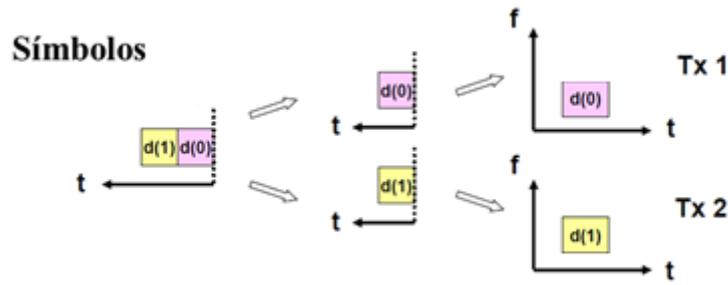


Figura 5.127. Ejemplo de Multiplexación espacial [LTE technology].

Para explicar cómo el receptor consigue diferenciar los diferentes flujos de datos hay que recurrir a un modelo matricial del canal en el que la señal recibida se expresa de la siguiente forma:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}$$

Ecuación 26

, donde \mathbf{H} es la matriz compleja que describe el canal, \mathbf{y} es un vector complejo de dimensión $(N \times 1)$ que representa la señal recibida, \mathbf{s} es un vector complejo de dimensión $(M \times 1)$ que representa la señal transmitida y \mathbf{n} es el vector de ruido complejo de dimensión $(M \times 1)$. N es el número de antenas en recepción y M el número de antenas en transmisión.

El elemento h_{ij} de la matriz \mathbf{H} representa el efecto del canal sobre la señal transmitida por la antena j y captada por la antena i . Así, la matriz \mathbf{H} es:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix}$$

Ecuación 27

Si \mathbf{H} está bien condicionada entonces se puede expresar por su descomposición en valores singulares o “Singular Value Decomposition”:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^H.$$

Ecuación 28

Si sustituimos la Ecuación 7 en la Ecuación 5 se obtiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{y} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^H \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}$$

Ecuación 29

Si el canal es conocido por el transmisor y por el receptor, entonces el transmisor podría emplear la matriz \mathbf{V} para precodificar la señal transmitida y el receptor la matriz \mathbf{U} como matriz de ecualización [3GPP LTE]. De este modo el transmisor transmite la siguiente señal:

$$\mathbf{x} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{s}$$

Ecuación 30

, que se afectada por el canal de forma que la señal que llega al receptor es:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}.$$

El receptor recibe la señal anterior y la ecualiza con la matriz \mathbf{U} para obtener la señal \mathbf{s} transmitida originalmente:

$$\mathbf{r} = \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{y} = \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{n} = \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^H \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{n} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{n}$$

Ecuación 31

, como \mathbf{D} es una matriz diagonal de valores propios que contiene solo N valores distintos de 0 la señal \mathbf{r} recuperada es una versión de la señal \mathbf{s} transmitida más el ruido. En la Figura 5.32 se muestra un ejemplo de SM con $M=3$ y $N=2$, es decir, con 3 antenas transmisoras y 2 antenas receptoras. Las señales s_1 y s_2 se multiplican por los coeficientes α_1 y α_2 para mejorar la SNR de los canales de forma que se mejora la capacidad. De cada flujo s_1 y s_2 surgen tres flujos que son realmente las señales que se precodifican con la matriz \mathbf{V} . Cada antena transmite una versión de s_1 y s_2 precodificada. El receptor aplica la ecualización descrita y obtiene una señal $r_1 = \sqrt{\lambda_1} \cdot s_1$ y $r_2 = \sqrt{\lambda_2} \cdot s_2$ más el ruido. De este modo se transmiten en paralelo dos flujos diferentes de datos s_1 y s_2 que son recuperados por separado en las señales r_1 y r_2 . Por lo tanto, la tasa de datos aumenta respecto a la situación en la que se emplea una única antena o múltiples antenas con la técnica TxD.

Hasta ahora hemos hablado de las técnicas usadas en LTE para el enlace descendente. Para el enlace ascendente el estándar recoge dos posibles técnicas:

- Diversidad por conmutación en la antena transmisora.
- La técnica de MIMO colaborativo: en esta técnica dos MS en los que el canal de uno de ellos es ortogonal al canal del otro MS utilizan los mismos recursos temporales y frecuenciales. En la Figura 5.33 se muestra un esquema de este tipo de técnica del enlace ascendente.

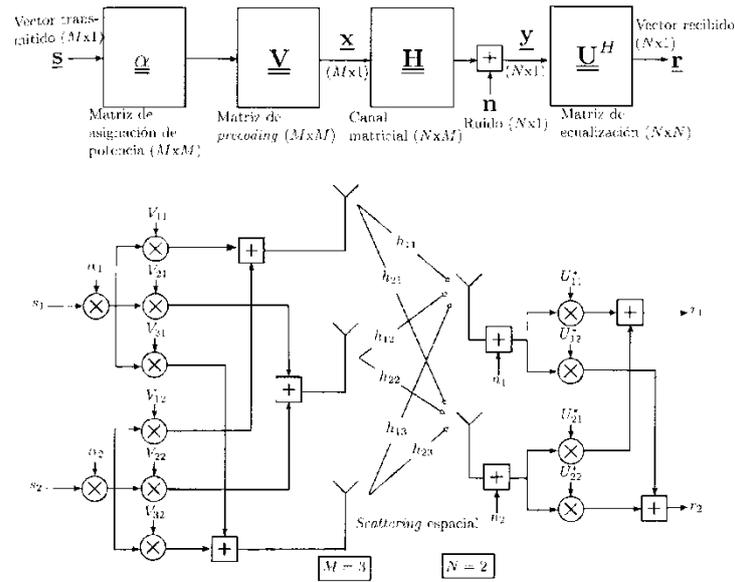


Figura 5.128. Ejemplo de un sistema MIMO de tipo SM [3GPP LTE].

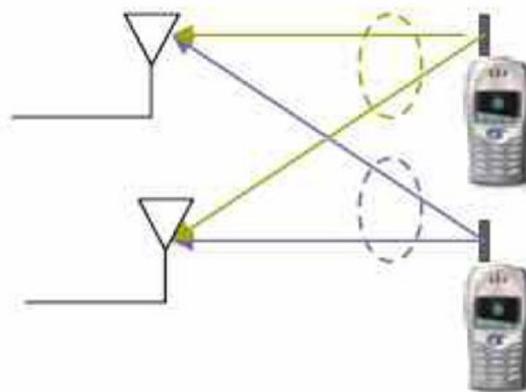


Figura 5.129. Ejemplo de MIMO colaborativo en el enlace ascendente.

5.3.4 Tablas resumen.

En el actual apartado 5.3 se han descrito una serie de técnicas que permiten en último término alcanzar elevadas tasas de datos tanto en el enlace descendente como ascendente. En este subapartado vamos a mostrar una serie de tablas que resumen lo explicado en el apartado. En la Tabla 5.6 se muestran las características clave de la capa física de LTE. La latencia se define como el tiempo promedio existente entre la primera transmisión de un paquete de datos y la recepción del reconocimiento (“acknowledgment”) de la capa física. Como se indica en la Tabla 6 la tasa de pico de datos que puede alcanzar LTE en el enlace descendente depende la categoría del UE, asimismo la tasa de pico en el enlace ascendente también depende de dicha categoría, siendo 75 Mbps la tasa de pico más elevada. En la Tabla 5.7 se indica la categoría de cada UE y la tasa de pico que puede alcanzar en ambos enlaces. Finalmente, en la Tabla 8 se muestra una comparación entre las tasas alcanzadas por los distintos sistemas de 3G y LTE. Como se puede apreciar, gracias a la introducción de las técnicas MIMO y a modulaciones de alto nivel (64 QAM) HSPA+ aumenta significativamente las tasas de

pico de los sistemas precedentes. LTE no solo aplica las técnicas MIMO y emplea modulaciones de alto nivel sino que también utiliza anchos de banda mayores que 3G con lo que supera ampliamente las tasas de pico de HSPA+.

Rango de Frecuencias	Muchas bandas: 700 MHz a 3.5 GHz (700MHz, 800MHz, 1.7-2.1GHz, 2,3 GHz, 2.5GHz y 3.5GHz). Bandas con prioridad FDD: banda de UMTS, 1.7 GHz, 2.5 GHz, 777 MHz. Bandas con prioridad TDD: banda 2.5 GHz, 2.3 GHz.
Anchos de banda	1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz
Modulaciones	Enlace descendente: QPSK, 16 QAM, 64 QAM Enlace ascendente: QPSK, 16 QAM, 64 QAM (opcional)
Acceso Múltiple	Enlace descendente: OFDMA Enlace ascendente: SC-FDMA
Tecnología MIMO	Enlace descendente: MIMO máximo de 4 antenas Enlace ascendente: MIMO, multi-usuario colaborador
Picos de tasas de datos.	Enlace descendente: depende de la categoría del UE. Enlace ascendente: 75 Mbps (20 MHz)

Tabla 5.26. Características clave de LTE.

Categoría del UE	Tasa de transmisión enlace descendente	Tasa de transmisión enlace ascendente	Máximo número capas multiplexación espacial (desc.)	Soporta 64 QAM enlace ascendente
1	~ 10 Mbps	~ 5 Mbps	1	No
2	~ 50 Mbps	~ 25 Mbps	2	No
3	~100 Mbps	~ 50 Mbps	2	No
4	~ 150 Mbps	~ 50 Mbps	2	No
5	~ 300 Mbps	~ 75 Mbps	4	Sí

Tabla 5.27. Categorías de UE.

FASE	3GPP Release 99/4	3GPP Release 5/6	3GPP Release 7	3GPP Release 8	En estudio
TECNOLOGÍA	WCDMA	HSDPA/HSUPA	HSPA+	LTE y HSPA+	LTE avanzado
AÑO	2003/2004	2005/2006 (Desc.) 2007/2008 (Asc.)	2008/2009	2010	
TASA DESC.	384 kbps (típico)	14 Mbps (pico)	28 Mbps (pico)	LTE: 150-300 Mbps HSPA+: 42 Mbps (64 QAM, doble portadora)	100 Mbps 1 Gbps
TASA ASC.	128 kbps (típico)	5.7 Mbps (pico)	11 Mbps (pico)	LTE: 75 Mbps HSPA+: 11 Mbps (16 QAM)	
LATENCIA	~ 150 ms	< 100 ms	< 50 ms	LTE: < 10 ms	

Tabla 5.28. Comparación entre las tecnologías 3G y LTE (4G).

5.4 Canales, protocolos y protocolos de enlace radio de LTE.

En este apartado se explicarán los canales de LTE, las principales labores de los protocolos y algunos de los protocolos de enlace radio indicando los canales involucrados. En LTE al igual que en UMTS existen tres tipos de canales:

- Canales lógicos: definen qué tipo de información se transmite. Transportan información desde la capa “Radio Link Control” (RLC) a la capa “Medium Access Control” (MAC).
- Canales de transporte: definen cómo se envía la información anterior. La capa MAC mapea los canales lógicos en canales de transporte (ver Figura 34).
- Canales físicos: definen qué recursos de la capa física (tiempo y frecuencia) son los adecuados para transmitir la información. En la capa física además de los canales existen señales que no tienen entidad de canales y que transportan información de control. La capa física (PHY) toma la información de los canales de transporte y genera los canales físicos, es decir, mapea los canales de transporte en canales físicos.

En la Figura 5.9.b se muestra la pila de protocolos existente en los diferentes elementos de la arquitectura de LTE. En la Figura 5.34 se muestran los protocolos sombreados en la Figura 5.9.b y la ubicación de los canales descritos anteriormente.

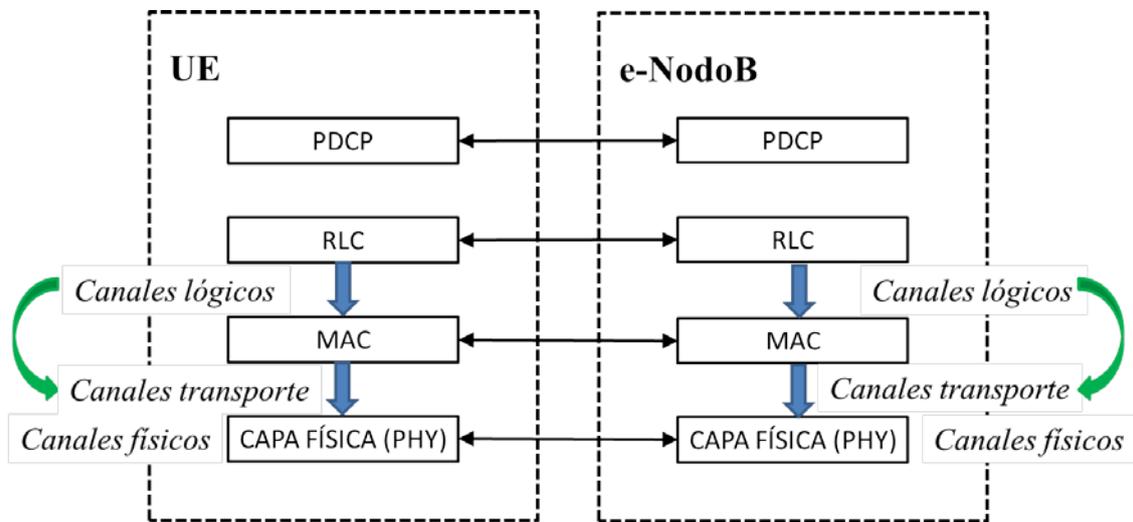


Figura 5.130. Pila de protocolos y canales en LTE. La flecha verde indica el mapeado realizado en la capa MAC.

A continuación enumeraremos las principales tareas de las capas superiores a la capa física de la pila de protocolos [LTE technology]. La primera capa de la Figura 5.34 es la “Packet Data Convergence Protocol” (PDCP) y entre sus tareas destacan:

- Compresión de cabeceras.
- Entrega secuencial de las “Packet Data Units” (PDU) a los niveles superiores.
- Eliminación de las “Service Data Units” (SDU) provenientes de las capas inferiores.
- Cifrado para el plano de control o de usuario.
- Protección de la integridad para el plano de control.

Las tareas más importantes de la capa RLC son:

- Re-segmentación.
- Concatenación.
- Entrega secuencial/detección de duplicados.
- Descarte de SDU.
- Restablecimiento de la conexión.

Finalmente, las labores de la capa MAC más importantes son:

- El ya mencionado mapeo de los canales lógicos en canales de transporte.
- De-multiplexación.
- Informe de la información de “scheduling”.
- HARQ: es el mecanismo de “Hybrid Automatic Repeat reQuest”. En la capa RLC existe un mecanismo de detección de errores y de corrección basado en el reenvío. Sin embargo, este mecanismo por estar programado en una capa superior es lento y este hecho aumenta la latencia. Para reducir la latencia el

3GPP incorporó a partir de HSDPA, y por tanto también en LTE, el mecanismo HARQ de detección y reenvío en la capa MAC, por debajo de la capa RLC [GSM to LTE]. El ratio de retransmisiones HARQ es uno de los parámetros que determinan la estimación de la latencia.

Respecto a los canales de LTE, existen dos tipos de canales lógicos: los canales que transmiten información de control y los que transmiten información de tráfico. Los canales lógicos de control son [LTE]:

1. BCCH “Broadcast Control Channel”: se transmite solo en el enlace descendente. Se emplea para transmitir información del sistema (por ejemplo el ancho de banda) y avisos públicos del sistema.
2. PCCH “Paging Control Channel”: se transmite en el enlace descendente para notificar a los UE una llamada entrante o un cambio en la información del sistema.
3. CCCH “Common Control Channel”: se emplea tanto en el enlace descendente como en el ascendente para entregar información de señalización o control común de cuando no hay conexión activa, por ejemplo durante el establecimiento de una conexión.
4. DCCH “Dedicated Control Channel”: tanto en el enlace descendente como en el ascendente para entregar información de señalización o control dedicado a un UE específico.
5. MCCH “Multicast Control Channel”: es un canal del enlace descendente que se emplea para transmitir información de control relacionada con la recepción de servicios de tipo MBMS como por ejemplo retransmisiones de televisión (“Mobile TV”).

Los canales lógicos de tráfico son [LTE]:

1. DTCH “Dedicated Traffic Channel”: se utiliza en ambos enlaces para transmitir información dedicada de tráfico del usuario.
2. MTCH “Multicast Traffic Channel”: se utiliza sólo en el enlace descendente para transmitir información de tráfico punto/multipunto de tipo MBMS.

Los canales de transporte multiplexan los datos de los canales lógicos dependiendo de cómo se van a transmitir a través del enlace radio. Se pueden dividir en canales del enlace descendente o ascendente [LTE]. Los del enlace descendente son:

1. BCH “Broadcast Channel”: transporta partes esenciales de información del sistema. El formato es fijo y la capacidad limitada.
2. DL-SCH “Downlink Shared Channel”: se utiliza para transportar mensajes de datos o de control. Además, transporta la información del sistema que no es transportada a través del BCH. El BCH a su vez es esencial para acceder al DL-SCH.
3. PCH “Paging Channel”: se emplea para transportar información de búsqueda (“paging”) a los UEs y para informar a los UEs sobre actualizaciones de la información del sistema.

4. MCH “Multicast Channel”: soporta los datos de usuario de tipo MBMS. Soporta el MTCH y MCCH lógicos.

Los canales de transporte en el enlace ascendente son:

1. RACH “Random Access Channel”: es utilizado para acceder a la red cuando el UE no posee una sincronización precisa en el enlace ascendente o cuando el UE no posee ningún recurso asignado.
2. UL-SCH “Downlink Shared Channel”: el UE emplea este canal para transportar mensajes de control y datos.

Los canales físicos se dividen en canales asociados a canales de transporte y canales no asociados a canales de transporte. Los primeros son:

1. PDSCH “Physical Downlink Shared Channel” (enlace descendente): sustenta el DL-SCH y el PCH. Transporta todo tipo de datos (de usuario, de información del sistema, “paging”,...).
2. PBCH “Physical Broadcast Channel” (enlace descendente): sustenta el BCH y transmite información esencial del sistema.
3. PMCH “Physical Random Access Channel” (enlace descendente): sustenta el MCH.
4. PUSCH “Physical Uplink Shared Channel” (enlace ascendente): sustenta el UL-SCH
5. PRACH “Physical Random Access Channel” (enlace ascendente) : sustenta el RACH

Los canales físicos no asociados a canales de transporte son:

1. PDCCH “Physical Downlink Control Channel” (enlace descendente): contiene decisiones de planificación (“scheduling”) de usuarios en el enlace descendente y ascendente, e información relacionada.
2. PHICH “Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel” (enlace descendente): contiene los ACK/NACK de HARQ en sentido descendente.
3. PCFICH “Physical Control Format Indicator Channel” (enlace descendente): transmite información de señalización necesaria para decodificar el PDCCH.
4. PUCCH “Physical Uplink Control Channel” (enlace ascendente): contiene los ACK/NACK de HARQ ascendentes, informes de estado del canal radio y petición de recursos ascendentes.

El mapeo entre los diferentes canales de muestra en la Figura 5.35. Además de los canales físicos, en la capa física existen las siguientes señales:

1. Señal de sincronización primaria y secundaria (“Primary and Secondary Synchronization Signal”): se transmite cada 5 ms en las subtramas 1^a y 6^a. Ocupan 72 subportadoras (6 bloques de recurso) de los símbolos OFDM 6^o y 7^o. Poseen las siguientes funciones fundamentales:
 - a. Identificación de la célula: la señal primaria es de amplitud constante y contiene un número llamado identidad de capa física. La señal secundaria contiene un número llamado grupo de identidad de la célula

en la capa física. Ambos números son necesarios para identificar a la célula a la que el UE desea engancharse. Si el UE no obtiene la primera señal de sincronización no puede obtener la secundaria.

- b. Sirven para la búsqueda de la célula y la adquisición final.
 - c. Sirven para la estimación del canal descendente para la demodulación y detección coherente en el UE.
 - d. Sirven para que el UE realice medidas de calidad en el enlace descendente. La red le informa sobre la potencia a la que se transmiten las señales de referencia en el enlace descendente. El UE mide la diferencia existente entre la potencia transmitida y la recibida y con este valor estima el “Cell Quality Indicator” (CQI). Este valor es posteriormente enviado por el UE a la red. El CQI es un parámetro muy importante ya que determina la modulación empleada (QPSK, 16 QAM o 64 QAM) y la codificación aplicada.
2. Señal de referencia en el enlace descendente (“Downlink Reference Signal”): se envían cada 6 subportadoras en el primer y cuarto símbolos OFDM de un bloque de recursos. Sirven para que el UE identifique a las antenas empleadas en el e-NodoB, de este modo se pueden aplicar las técnicas multiantena MIMO.

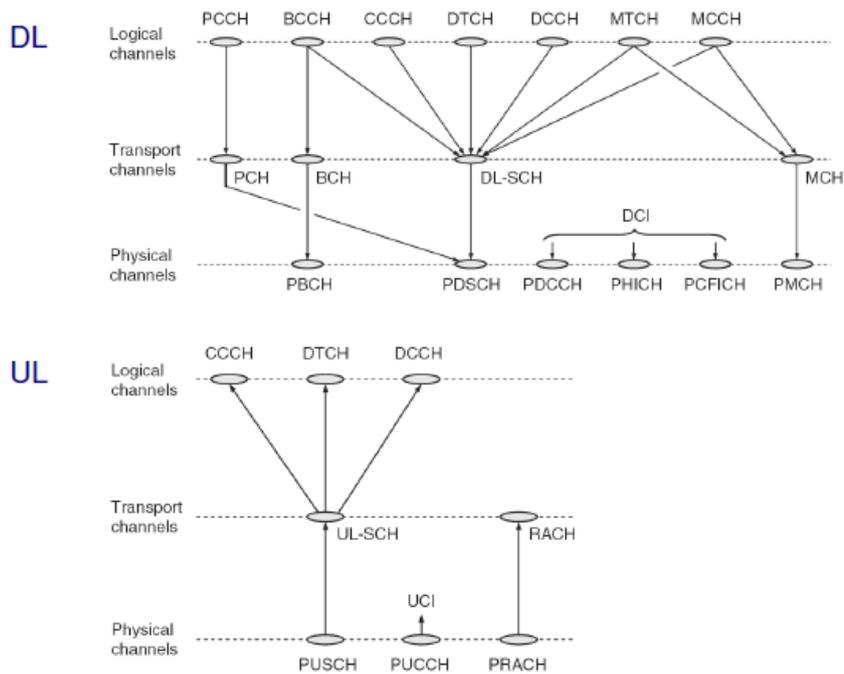


Figura 5.131. Mapeo de canales lógicos, de transporte y físicos en LTE [LTE].

Los protocolos de enlace radio son muy variados. Nos vamos a limitar a explicar algunos de los más destacados. En la Figura 5.36 se muestra un esquema de los pasos que debe seguir un UE para establecer una comunicación con la red.

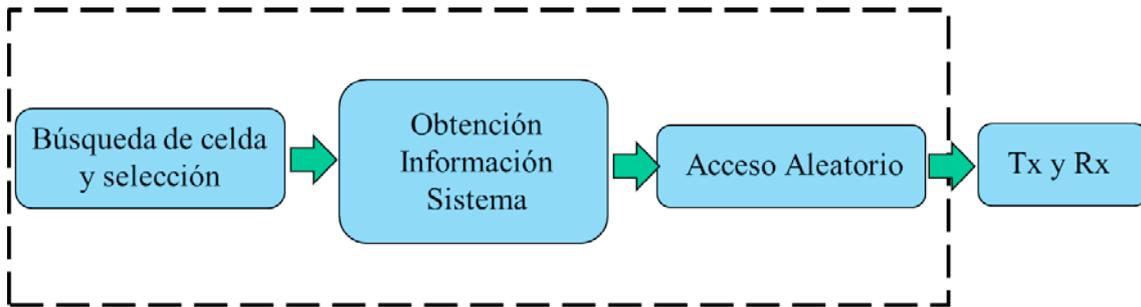


Figura 5.132. Esquema de acceso inicial en LTE.

En primer lugar el UE debe buscar las diferentes células y seleccionar una de ellas. Esta fase se lleva a cabo mediante la inspección de las señales de sincronización descritas anteriormente. En segundo lugar el UE obtiene la información del sistema; A diferencia de 3G en LTE esta tarea se lleva a cabo tanto mediante la lectura del canal de capa física PBCH como del canal compartido PDSCH. En la Figura 5.37 se observa cómo se transmite la información del sistema.

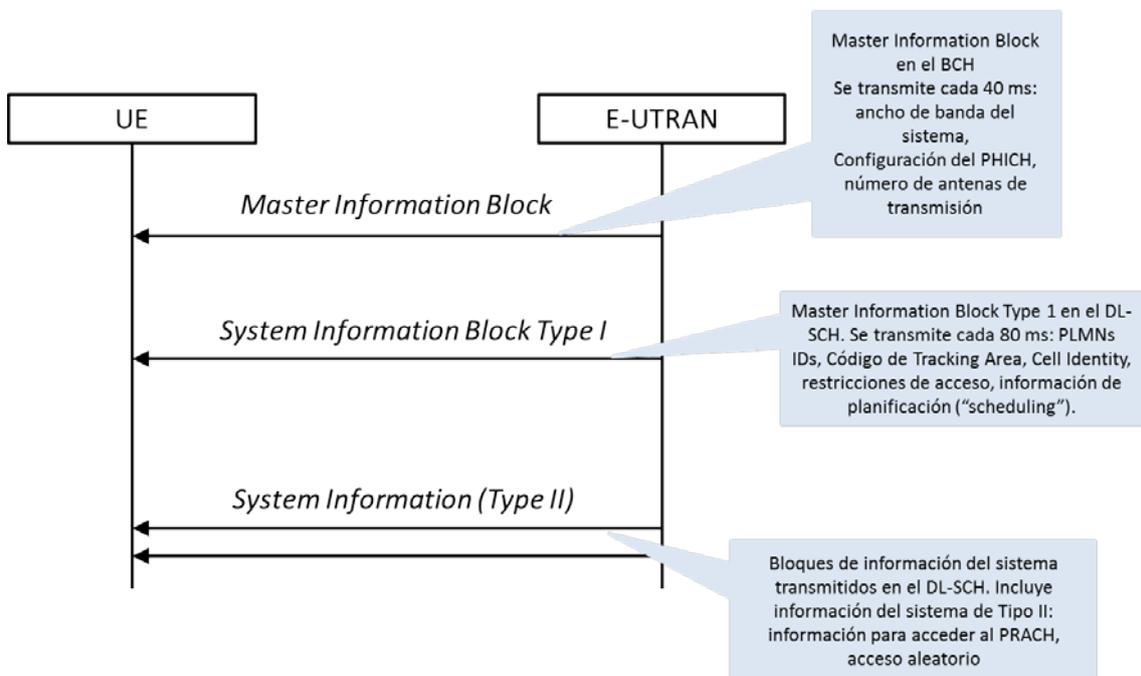


Figura 5.133. Obtención de información del sistema y de la célula [LTE technology].

Una vez se ha obtenido la información del sistema el UE debe darse a conocer a la red para registrarse. Para ello sigue los pasos mostrados en la Figura 5.38; estos pasos son:

1. El UE envía el "Random Access Preamble" a través del PRACH, es decir, a través del canal físico de acceso aleatorio. El UE sabe gracias a la información del sistema de Tipo II en qué subtrama puede enviar el "Random Access Preamble" y su formato. En este mensaje el UE envía un número que le identifica provisionalmente denominado "Random Access Radio Network Temporary Identity" (RA-RNTI) como se ve en la Figura 38. Tras el envío del

preámbulo el UE espera la respuesta y si no la recibe, pasado un tiempo, vuelve a enviarla aumentando el nivel de potencia.

2. La red envía su respuesta a través del DL-SCH de transporte mapeado en el PDSCH físico. El PDSCH es un canal compartido por todos los usuarios (la S es de “Shared”) por lo que el UE debe conocer de entre todos los recursos ocupados por el PSDCH los recursos que contienen la información de acceso dirigida a él. La indicación de estos recursos está contenida en el PDCCH como se observa en la Figura 5.38; la indicación está asociada al RA-RNTI por lo que el UE puede encontrar la información de los recursos entre todos los datos del PDCCH. Este canal se envía en el comienzo de cada subtrama a lo largo de todo el ancho de banda; el número de símbolos OFDM reservados al comienzo de cada subtrama (1, 2, 3 o 4) se indica a su vez en el PCFICH. La respuesta contenida en el PDSCH incluye los ajustes temporales necesarios para la comunicación, la asignación de los recursos iniciales en el enlace ascendente necesarios para el siguiente paso y el “Temporary Cellular RNTI” (TC-RNTI).
3. En este paso el UE utiliza el UL-SCH de transporte mapeado en el PUSCH físico para, por ejemplo, actualizar su localización mediante la indicación del nuevo “Tracking Area” o para solicitar una asignación de recursos (“scheduling request”).
4. En este paso final la red responde al UE sobre la decisión tomada por la red en el mensaje de “Contention Resolution” (CR).

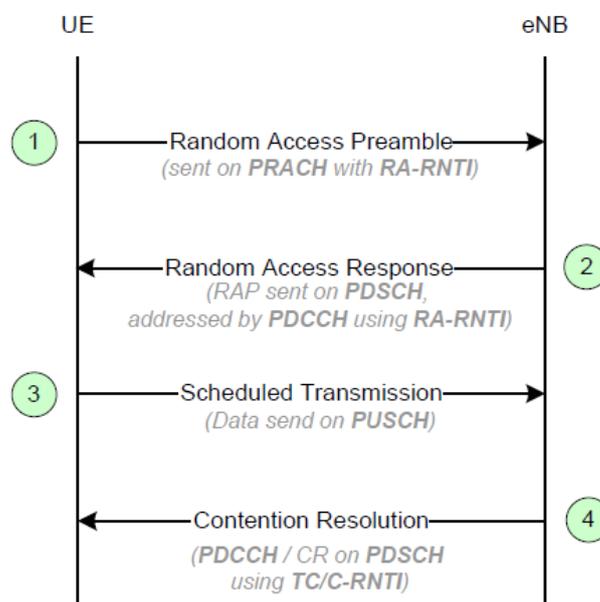


Figura 5.134. Proceso de acceso aleatorio [LTE technology].

Después del registro el UE habrá quedado registrado en la red por lo que a continuación ya puede recibir o transmitir información. La información tanto de control, de búsqueda o “paging” o de usuario se envía mediante el PDSCH. Por tanto, el UE procederá a leer el PDSCH siguiendo los pasos ya indicados en el punto 2 del algoritmo de acceso aleatorio. Estos pasos están mostrados en la Figura 5.39. En primer lugar el UE lee en el PCFICH cuántos símbolos ocupa el PDCCH, a continuación lee en el

PDCCH los recursos reservados a la información dirigida a él en el PDSCH y finalmente lee el PDSCH.

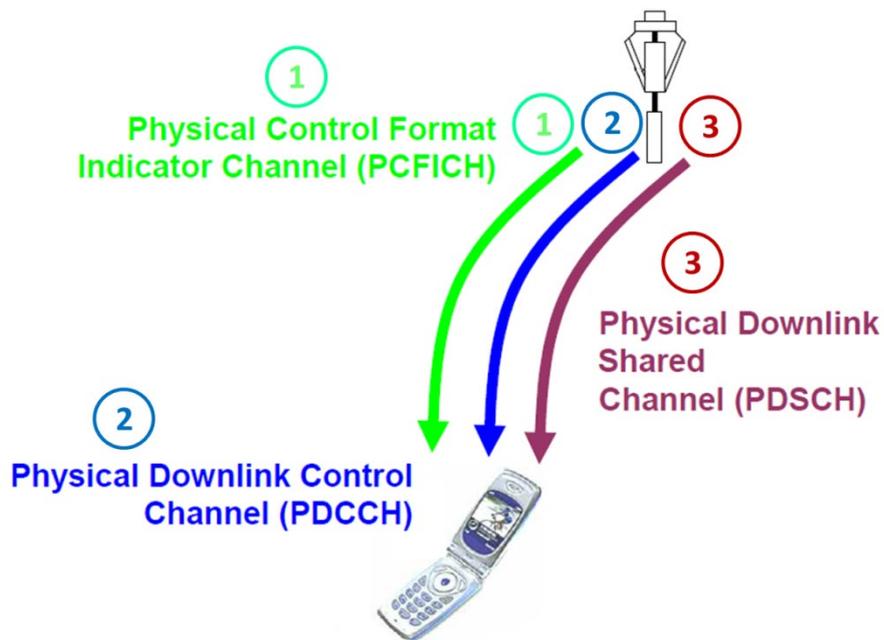


Figura 5.135. Acceso a datos en el enlace descendente [LTE technology].

El UE puede pedir la retransmisión de los paquetes que recibe si estos presentan errores. Como ya se ha indicado este procedimiento se denomina HARQ y funciona igual que en HSDPA. Como se observa en la Figura 5.40 pueden existir hasta 8 procedimientos HARQ funcionando en paralelo en el enlace descendente. El mensaje ACK/NACK es transmitido bien a través del PUCCH bien multiplexado en el PUSCH; el mensaje de ACK o NACK de un paquete se envía 4 subtramas después de que fuera recibido.

El UE también deseará enviar datos hacia el e-NodoB. Para ello utiliza el canal físico PUSCH como se observa en la Figura 5.41; este canal es compartido por todos los usuarios de la célula por lo que antes de enviar datos el UE deberá conocer qué bloques de recursos están reservados para su comunicación, es decir, deberá conocer cuál es la planificación o “scheduling” reservada para él. También deberá conocer qué formatos de transporte, qué modulaciones puede emplear y qué salto en frecuencia (“frequency hopping”) debe aplicar; en LTE existen dos tipos de salto en frecuencia: el salto intra-subtrama en el que se salta de frecuencia de una ranura a otra y el salto inter-subtrama en el que se cambia de frecuencia de una subtrama a otra. Todos estos datos se transmiten en el PDCCH del enlace descendente. El UE busca en el PDCCH los datos asociados a su identidad de modo que no toma los datos de otro UE.

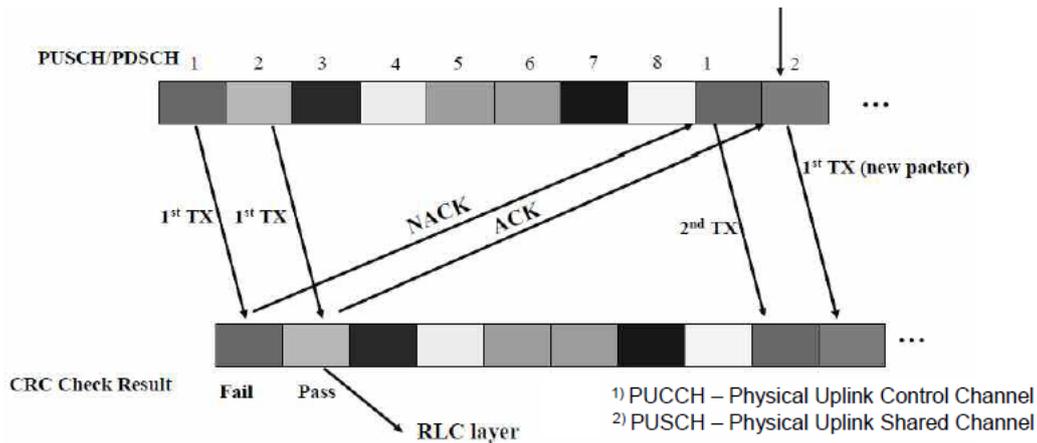


Figura 5.136. Procedimiento de HARQ [LTE technology].

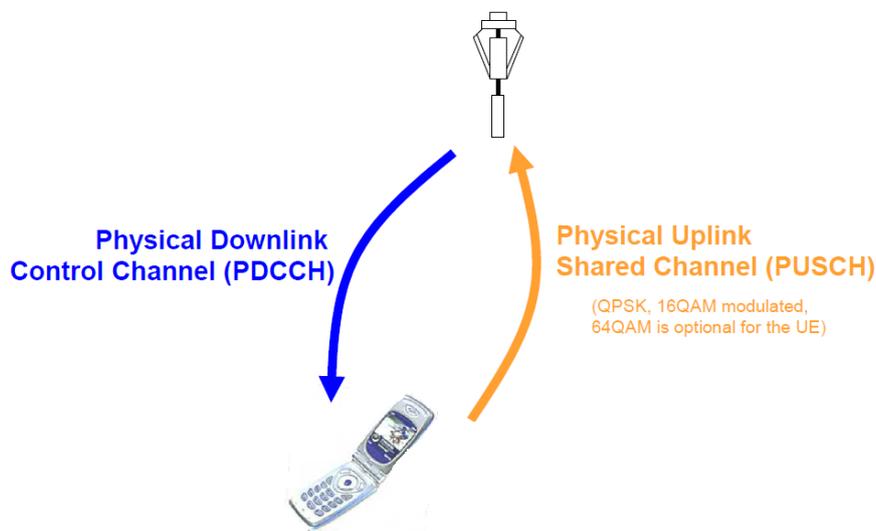


Figura 5.137. Envío de datos en el enlace ascendente [LTE technology].

5.5 Planificación en LTE.

La planificación en LTE es similar a la de otros sistemas de comunicaciones móviles. Debido a que la comunicación predominante entre los UEs y la red es de datos, la planificación se orienta a garantizar una determinada calidad en este tipo de comunicación. Además, debido a la elevada capacidad de LTE la demanda de servicios de voz queda cubierta con muchos menos e-NodosB que la demanda de datos por lo que es esta última demanda la que determina el número mínimo de e-NodosB. Los pasos simplificados de la planificación son los siguientes:

1. Cálculo de la capacidad de la célula medida en GB/célula/mes o medida en la tasa máxima que se puede ofrecer.
2. Cálculo del número de usuarios por célula según la demanda; con este valor se calcula el número de células.
3. Estimación del enlace más desfavorable según el balance del enlace.
4. Selección de un modelo de propagación adecuado. Cálculo de coberturas y ubicación de los e-NodosB para cubrir toda el área de servicio.

La capacidad de la célula depende del ancho de banda, la modulación, la técnica MIMO empleada (si existe) y el “overhead”. Cada modulación posee un número de bits por símbolo, de modo que en la modulación QPSK se transmiten 2 bits/símbolo, en la 16 QAM se transmiten 4 bits/símbolo y en la 64 QAM se transmiten 6 bits/símbolo. Sin embargo, la cantidad efectiva de bits por símbolo es determinada por las condiciones del canal; cuanto mejor es el canal, es decir, cuanta menos atenuación presenta, más se acerca el número efectivo del bits/símbolo al número máximo permitido en la modulación. La calidad medida del canal se indica con el parámetro CQI. Este parámetro limita las modulaciones que se pueden emplear e indica la tasa real de bits/símbolo. Como se observa en la Tabla 5.9 cuando el CQI es pequeño no se pueden emplear modulaciones de alto nivel.

Índice CQI	Modulación	Tasa ideal (bits/símbolo)	Tasa del código	Tasa real (bits/símbolo)
0	Fuera de cobertura	N/A	N/A	N/A
1	QPSK	2	0,076172	0,1523
2	QPSK	2	0,117188	0,2344
3	QPSK	2	0,188477	0,3770
4	QPSK	2	0,300781	0,6016
5	QPSK	2	0,438477	0,8770
6	QPSK	2	0,587891	1,1758
7	16 QAM	4	0,369141	1,4766
8	16 QAM	4	0,478516	1,9141
9	16 QAM	4	0,601562	2,4063
10	64 QAM	6	0,455078	2,7305
11	64 QAM	6	0,553711	3,3223
12	64 QAM	6	0,650391	3,9023
13	64 QAM	6	0,753906	4,5234
14	64 QAM	6	0,852539	5,1152
15	64 QAM	6	0,925781	5,5547

Tabla 5.29. Tabla de CQI y de tasas finales [3GPP LTE, LTE for UMTS].

La cantidad de Mbits/s disponibles en la célula es igual al número de símbolos por segundo transmitidos multiplicado por los bits/símbolo. Los símbolos/s se calculan a

partir del ancho de banda del sistema. Hay que tener en cuenta que el ancho de banda efectivo del sistema es un 90% del ancho de banda total, ya que se reserva un 10% como ancho de banda de guarda. Por lo tanto el número de símbolo/s se calcula de la siguiente forma:

$$B_{\text{efectivo}} = 0.9 \cdot B_{\text{sistema}} ; B_{\text{bloque de recurso}} = 180 \text{ kHz}$$

$$N_{\text{bloques de recurso}} = \frac{B_{\text{efectivo}}}{B_{\text{bloque de recurso}}}$$

En una ranura o "slot" se transmiten 7 símbolos OFDM. Dos ranuras ocupan 1 ms.

Cada bloque de recurso contiene 12 subportadoras o elementos de recurso.

Cada subportadora contiene 1 símbolo de la modulación escogida.

$$N_{\text{símbolos/ms}} = N_{\text{bloques de recurso}} \cdot 12 \text{ (subportadoras/bloques de recurso)} \cdot 7 \text{ (símbolos OFDM/slot)} \cdot 2 \text{ (slot/ms)}$$

$$N_{\text{símbolos/s}} = N_{\text{símbolos/ms}} \cdot 1000.$$

Ecuación 32

Por ejemplo, si se dispone de 20 MHz el ancho de banda efectivo es de 18 MHz; el número de bloques de recurso es $18\text{MHz}/180\text{kHz} = 100$ recursos de bloque. Así, el número de símbolos por segundo es:

$$100 \times 12 \text{ subportadoras} \times 7 \text{ símbolo en OFDM} \times 2 \text{ Slots} = 16800 \text{ símbolos por ms.}$$

El número final de bits/s se obtiene al multiplicar la cantidad anterior por el número de bits/símbolo. Si por ejemplo el CQI es 8, según la Tabla 5.9 la tasa sería 1,9141 bits/símbolo por lo que tendríamos: $16800 \text{ símbolos/ms} \times 1,9141 \text{ bits/símbolo} = 32157 \text{ bits/ms}$; la tasa en bits/s sería: 32,157 Mbits/s.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que no todos los bits son de tráfico. Hay una cantidad de bits significativa destinada a señalización conocida como "overhead". Esta cantidad expresada en porcentaje representa una disminución de la tasa obtenida anteriormente. En [LTE for UMTS] se indica que el "overhead" toma un valor entre el 10% y el 25% si se toman los siguientes recursos de los siguientes canales y señales:

- PDCCH: se asume 1 símbolo de cada 14. Es el valor mínimo. Si la tasa aumenta debe aumentarse asimismo el número de símbolos de este canal con un máximo de 4.
- Señales de referencia del enlace descendente (RS).
- Otros canales y señales en el enlace descendente: señal de sincronización, PBCH, PCFICH, PHICH.
- El PUCCH del enlace ascendente reduce ligeramente la tasa en este enlace. Se puede despreciar.
- Las señales de referencia del enlace ascendente ocupan 1 símbolo de cada 7. Estas señales suponen en el enlace ascendente un "overhead" del 14.3 %.

Cuando ya se ha obtenido la tasa final en Mbps de la célula se puede evaluar el número de células para cubrir la demanda de los usuarios. Si esa demanda se expresa en una cantidad de consumo de GB por mes entonces hay que aplicar el procedimiento

mostrado en la siguiente tabla donde se ha tomado una célula (“site”) trisectorizada con una capacidad de 35 Mbps en cada sector [LTE for UMTS]:

Nombre de la operación	Operación	Valor después de la operación
Capacidad de la célula en un sector	Descrita anteriormente	35 Mbps
Convertimos los Mbps a GBytes	/8192	0.0043 GB
GB en una hora	× 3600	15,48 GB/hora
Carga de la hora más ocupada (50%)	× 0,50	7,74 GB/hora ocupada
Tráfico que puede cursar la célula en un día: la hora más ocupada supone el 15% del tráfico de un día	/0,15	51,60 GB/día
Tráfico que puede cursar la célula en un mes (30 días en un mes)	× 30	1548 GB/mes
3 sectores por célula (“site”)	× 3	4644 GB/célula/mes
Cada usuario demanda 5 GB	/ 5 GB	928 usuarios/células
Número de usuarios en el área=10000	10000/928	11 células

Tabla 5.30. Dimensionamiento LTE según la demanda de GB en un mes [LTE for UMTS].

La hora ocupada (cargada) consume el 50% de los recursos de la célula (o el sector si es un caso sectorizado); se asume que el tráfico de la hora ocupada supone el 15 % del tráfico total del día. De este modo se puede dimensionar el sistema para que se pueda dar servicio durante todos los días y durante la hora ocupada a los usuarios sin sobredimensionar el sistema en exceso. Si la planificación se realiza para garantizar una tasa máxima deseada, entonces se aplica siguiente procedimiento mostrado en la Tabla 5.11 [LTE for UMTS]. En este caso para no sobredimensionar el sistema se toma una tasa media de usuario que es la vigésima parte de la tasa máxima deseada. Generalmente, el número de células (“sites”) obtenidos según la tasa es menor que el valor obtenido según la demanda. En todos estos cálculos se ha asumido que la reutilización de recursos entre células es total. Esta reutilización es posible si se lleva a cabo un “scheduling” cuidadoso de forma que se minimicen las interferencias.

Una vez estimado el número de células habría que calcular el balance del enlace para hallar el enlace más desfavorable. Este enlace es el que se usará en el cálculo de las coberturas de cada e-NodoB. En la Tabla 5.12 se muestra un ejemplo del balance en el enlace ascendente cuando la tasa de datos es de 64 kbps y un ancho de banda de 360 KHz y en la Tabla 5.13 en el enlace descendente cuando la tasa de datos es de 1024 kbps y el ancho de banda de 10 MHz. El ruido térmico se calcula como k (constante del Boltzmann) $\times T$ (290 K) \times Ancho de banda; por esta razón el ruido término es menor en el enlace ascendente. El ruido del receptor es la suma de las filas e y f, es decir, de la figura de ruido y el ruido término. La sensibilidad se halla sumando el objetivo de SINR y el ruido de receptor (suma de las filas g y h).

Nombre de la operación	Operación	Valor después de la operación
------------------------	-----------	-------------------------------

Capacidad de la célula en un sector	Descrita anteriormente	35 Mbps
Carga de la hora más ocupada (50%)	$\times 0,50$	17,5 Mbps/hora ocupada
Tasa deseada por los usuarios (1 Mbps)		1 Mbps
Factor de sobredimensionamiento: tasa final del usuario	$/ 20$	50 kbps
Usuarios por sector	17,5 Mbps/50 kbps	350 usuarios/sector
3 sectores por célula ("site")	$\times 3$	1050 usuarios/célula
Número de usuarios en el área=10000	10000/928	10 células

Tabla 5.31. Dimensionamiento LTE según la tasa deseada [LTE for UMTS].

	Transmisor: UE	Valor
a	Máxima potencia transmitida (dBm)	23
b	Ganancia de la antena de transmisión (dBi)	0
c	Pérdidas del cuerpo ("Body Loss") (dB)	0
d	PIRE (dBm)	23
	Receptor: e-NodoB	
e	Figura de Ruido (dB)	2
f	Ruido térmico (dBm)	-118,4
g	Ruido del receptor (dBm)	-116,4
h	SINR (dB)	-7
i	Sensibilidad del receptor (dBm)	-123,4
j	Margen de interferencia (dB)	1
k	Pérdidas del cable (dB)	0
l	Ganancia de la antena de recepción (dBi)	18
m	Margen de desvanecimiento rápido (dB)	0
	Pérdidas máximas compensables (dB)	163,4

Tabla 5.32. Balance del enlace ascendente [LTE for UMTS].

	Transmisor: e-NodoB	Valor
a	Máxima potencia transmitida (dBm)	46
b	Ganancia de la antena de transmisión (dBi)	18
c	Pérdidas del cable (dB)	2
d	PIRE (dBm)	62
	Receptor: UE	
e	Figura de Ruido (dB)	7
f	Ruido térmico (dBm)	-104,5
g	Ruido del receptor (dBm)	-97,5
h	SINR (dB)	-9
i	Sensibilidad del receptor (dBm)	-106,5
j	Margen de interferencia (dB)	4
k	"Overhead" % canal de control (dB)	1
l	Ganancia de la antena de recepción (dBi)	0

m	Margen de desvanecimiento rápido (dB)	0
n	Pérdidas del cuerpo ("Body Loss") (dB)	0
	Pérdidas máximas compensables (dB)	163,5

Tabla 5.33. Balance del enlace descendente [LTE for UMTS].

En el enlace descendente debido al "overhead" se asumen unas pérdidas adicionales respecto al ascendente de entre 0.4 (10 % de "overhead") y 1 dB (25 % de "overhead"). Los valores de las tablas anteriores son orientativos, en un caso real habría que incluir las pérdidas del cuerpo, pérdidas en los cables del e-NodoB, el valor de ganancia de las antenas puede variar, etc.

5.6 LTE-Advanced.

LTE-Advanced es el sistema de mejora de LTE que se está desarrollando desde principios de la primera década del siglo XXI. Este sistema posee las siguientes ventajas frente a LTE:

1. Aumenta la eficiencia espectral de pico: hasta 30 bps/Hz en el enlace descendente y 15 bps/Hz en el enlace ascendente. Aumenta asimismo la eficiencia espectral media:
 - a. 2.40 bps/Hz con 2x2 MIMO en el enlace descendente.
 - b. 3.70 bps/Hz con 4x4 MIMO en el enlace ascendente.
2. Aumenta el ancho de banda disponible en una célula hasta un máximo de 100 MHz adicionales en una célula. Esto se consigue gracias a la agrupación de hasta 5 anchos de banda de 20 MHz cada uno. Existen tres tipos de agrupación de anchos de banda como se aprecia en la Figura 5.42.

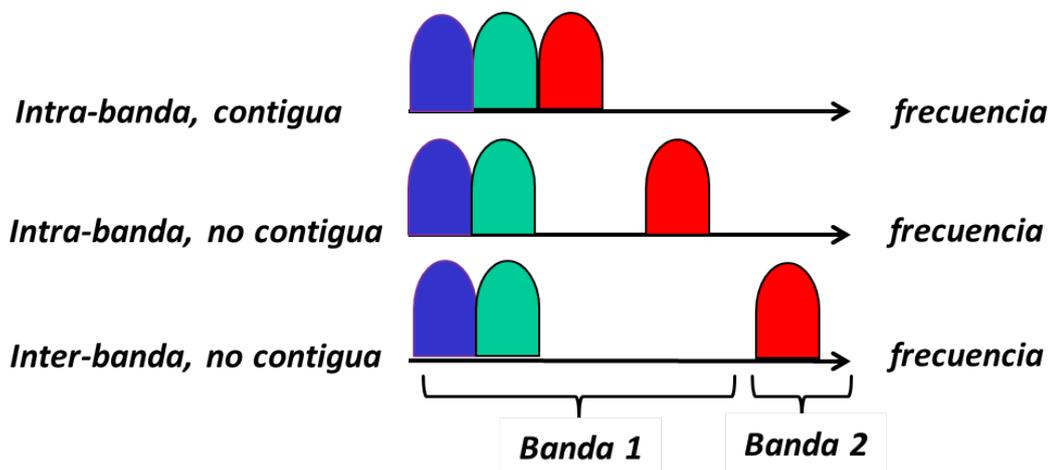


Figura 5.138. Agrupación de anchos de banda en LTE-Advanced.

3. Se puede llegar a utilizar MIMO 8 x 8 en el enlace descendente y 4x4 en el enlace ascendente siempre que las condiciones del canal lo permitan. Si la SNR es baja se emplea diversidad espacial.
4. Se plantea la implantación de "Relay nodes", éstas son estaciones base que transmiten con poca potencia y se sitúan en los bordes de una célula (ver

Figura 5.43). Sirven para incrementar la capacidad de la célula y se pueden conectar a la estación base central vía radio. Planificación pasa a ser más que nunca en una mezcla de células grandes y pequeñas.

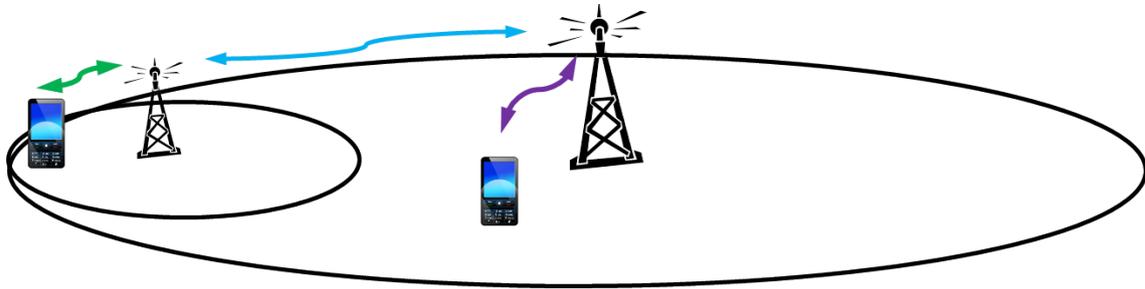


Figura 5.139. “Relay Nodes” en LTE-Advanced.

Con todas estas mejoras se espera que la tasa de pico alcance los 3 Gbps en el enlace descendente y los 1.5 Gbps en el enlace ascendente.

Glosario de LTE

AKA	“Authentication and Key Agreement”
AS	“Application Servers”
BCCH	“Broadcast Control Channel”
BCH	“Broadcast Channel”
CCCH	“Common Control Channel”
CP	“Control Plane”
CQI	“Cell Quality Indicator”
CR	“Contention Resolution”
CSCF	“Call Session Control Function”
DCCH	“Dedicated Control Channel”
DL-SCH	“Downlink Shared Channel”
DTCH	“Dedicated Traffic Channel”
EIR	“Equipment Identity Register”
e-NodeB	“evolved” NodeB
EPC	“Evolved Packet Core”
EPS	“Evolved Packet System”
E-UTRAN	“Evolved UMTS Terrestrial Access Network”
GUTI	“Globally Unique Temporary Identity”
HARQ	“Hybrid Automatic Repeat reQuest
HSS	“Home Subscriber Server”
IMS	“IP Multimedia Services Sub-System”
LTE	“Long Term Evolution”
MAC	“Medium Access Control”

MBMS	“Multimedia Broadcast/Multicast Services”
MCCH	“Multicast Control Channel”
MCH	“Multicast Channel”
MIMO	“Multiple-Input Multiple-Output”
MME	“Mobility Management Entity”
MTCH	“Multicast Traffic Channel”
OFDM	“Orthogonal Frequency Division Multiplexing”
OFDMA	“Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access”
PAPR	“Peak-to-Average Power Ratio”
PBCH	“Physical Broadcast Channel”
PCFICH	“Physical Control Format Indicator Channel”
PCH	“Paging Channel”
PCRF	“Policy and Charging Rules Function”
PDCCH	“Physical Downlink Control Channel”
PDCP	“Packet Data Convergence Protocol”
PDN-GW (PD-GW)	“Packet Data Network Gateway”
PDSCH	“Physical Downlink Shared Channel”
PDU	“Packet Data Unit”
PHICH	“Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel”
PMCH	“Physical Random Access Channel”
PRACH	“Physical Random Access Channel”
PUCCH	“Physical Uplink Control Channel”
PUSCH	“Physical Uplink Shared Channel”
RACH	“Random Access Channel”
RA-RNTI	“Random Access Radio Network Temporary Identity”

RLC	“Radio Link Control”
SAE	“System Architecture Evolution”
SC-FDMA	“Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access”
SDU	“Service Data Units”
SFBC	“Space-Frequency Block Coding”
S-GW	“Serving Gateway”
SIP	“Session Initiation Protocol”
SM	“Spatial multiplexing”
TA	“Tracking Area”
TC-RNTI	“Temporary Cellular Radio Network Temporary Identity”
TE	“Terminal Equipment”
TTI	“Transmission Time Interval”
TxD	“Transmit diversity”
UE	“User Equipment”
UICC	“Universal Circuit Card”
UL-SCH	“Downlink Shared Channel”
UP	“User Plane”
USIM	“Universal Subscriber Identity Module”

Bibliografía

[Bonek] Ernst Bonek, Andreas F. Molisch, Helmut Hofstetter, Werner Weichselberger, Tutorial on MIMO Channel Modeling, COST 273, September 2003.

[GSA] *The Global mobile Suppliers Association*, <http://www.gsacom.com/>

[GSM to LTE] Martin Sauser, *From GSM to LTE An Introduction to Mobile Networks And Mobile Broadband*, John Wiley and Sons, 2011, ISBN 978-0-470-66711-8.

[IEEE Spectrum] T. Rappaport, W. Roh y K. Cheun, *Mobile's Millimeter-Wave Makeover*, IEEE Spectrum, pp. 35-58, Septiembre, 2014.

[INE] *Encuesta sobre Equipamiento y Uso de Tecnologías de Información y Comunicación en los Hogares 2012 (TIC-H'12)*

http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=/t25/p450/base_2011/a2012&file=p_caxis

[jdsu] *JDS Uniphase Corporation*. <http://www.jdsu.com/nse/Pages/default.aspx>

[Release 12] *3GPP Release 12*, <http://www.3gpp.org/specifications/67-releases>

[LTE] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker, *LTE, the UMTS Long Term Evolution*, John Wiley and Sons, 2011, ISBN 9780470660256.

[LTE for UMTS] Harri Holma for UMTS y Antti Toskala, *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, John Wiley and Sons, 2009, ISBN 9780470994016.

[LTE technology] *LTE technology and LTE test; a deskside chat*, Abril 2009, Rohde & Schwarz. [http://lteworld.org/webinar/LTE technology-schwarz-lte-basics-webinar](http://lteworld.org/webinar/LTE%20technology-schwarz-lte-basics-webinar)

[Marco Dividendo Digital] *Plan Marco de actuaciones para la liberación del dividendo digital 2012-2014*.

http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/es-es/novedades/documents/plan_marco_dividendo_digital.pdf

[Ministerio]

http://oficinavirtual.mityc.es/SETSI_RegConcesiones/default.aspx?codservicio=1800&servicio=Servicio+de+Comunicaciones+Electr%u00f3nicas+1800+Mhz&titular=&rn=tr ue

[3GPP LTE] Narcís Cardona, Juan José Olmos, Mario García y José F. Monserrat, *3GPP LTE: Hacia la 4G móvil*, Marcombo, 2011, ISBN 978-84-267-1710-8.