

---

# Redes de gran alcance sin hilos

---

PID\_00265432

Antonio Satué Villar

---

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 7 horas

---



Universitat  
Oberta  
de Catalunya

---

**Antonio Satué Villar**

Doctor ingeniero en Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Cataluña, en el año 2007. Desde el año 1994 es profesor de la Escuela Universitaria Politécnica de Mataró y secretario académico desde el año 2009. Su línea de investigación se centra principalmente en el ámbito del reconocimiento de locutor y las aplicaciones biométricas. En este sentido, participa en distintos proyectos de ámbito nacional y europeo.

La revisión de este recurso de aprendizaje UOC ha sido coordinada por el profesor: Ferran Adelantado Freixer (2019)

Segunda edición: septiembre 2019  
© Antonio Satué Villar  
Todos los derechos reservados  
© de esta edición, FUOC, 2019  
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona  
Realización editorial: FUOC

*Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y de la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitido de ninguna manera ni por ningún medio, tanto eléctrico como químico, mecánico, óptico, de grabación, de fotocopia, o por otros métodos, sin la autorización previa por escrito de los titulares del copyright.*

# Índice

<b>Introducción</b> .....	5
<b>Objetivos</b> .....	6
<b>1. Redes 2G</b> .....	7
1.1. Panorámica de las redes 2G .....	7
1.2. GSM .....	8
1.2.1. Evolución .....	9
1.2.2. Arquitectura .....	10
1.2.3. Autenticación .....	22
1.2.4. Canales y estructura de tramas .....	24
1.2.5. Acceso .....	31
1.2.6. Funcionamiento en llamada .....	33
1.2.7. Traspaso .....	36
1.2.8. Localización. Tarifación .....	37
<b>2. Redes 2.5G</b> .....	39
2.1. Introducción .....	39
2.2. GPRS .....	41
2.2.1. Arquitectura .....	41
2.2.2. Contexto PDP .....	43
2.2.3. Gestión de la movilidad .....	45
2.2.4. Funciones de la PCU .....	46
2.3. Servicios sobre GSM/GPRS .....	47
2.3.1. Servicios de mensajes .....	47
2.3.2. Servicios de posicionamiento .....	51
<b>3. Redes 3G</b> .....	52
3.1. Panorámica de las redes 3G .....	52
3.2. CDMA .....	54
3.2.1. Ventajas de un acceso CDMA .....	54
3.2.2. Diagrama de bloques .....	55
3.2.3. Problemática de un acceso CDMA .....	57
3.2.4. Macrodiversidad .....	58
3.2.5. Secuencias pseudoaleatorias .....	59
3.2.6. Capacidad .....	62
3.3. UMTS .....	63
3.3.1. Arquitectura .....	63
3.3.2. Interfaces UMTS .....	66
3.3.3. Canales y estructura de tramas .....	67
3.3.4. Penetración 3G .....	68

<b>4. LPWAN (<i>Low Power Wide Area Networks</i>)</b> .....	70
<b>5. Comunicaciones por satélite</b> .....	73
5.1. Antecedentes históricos .....	73
5.2. Conceptos básicos .....	75
5.3. Sistemas de órbita media .....	78
5.4. Sistemas de órbita geoestacionaria .....	82
5.5. Sistemas de órbita baja .....	84
<b>Actividades</b> .....	87
<b>Ejercicios de autoevaluación</b> .....	87
<b>Solucionario</b> .....	89
<b>Glosario</b> .....	90
<b>Bibliografía</b> .....	92

## Introducción

En este módulo, dividido en cinco partes, hablaremos de las redes inalámbricas de gran cobertura: las redes de gran alcance. El primer apartado recoge las redes de segunda generación y hace una descripción detallada de la red de telefonía móvil GSM, que fue la que popularizó la telefonía móvil en Europa y es la base de las redes más modernas. El sistema GSM se pensó para transmitir voz, a pesar de que tiene opciones para transmitir datos a baja velocidad. Con la aparición de internet y la consolidación de las tecnologías digitales, las personas hemos tenido acceso a muchos contenidos que queremos compartir con los otros. Así, si queremos enviar una fotografía entre dos teléfonos móviles o un fichero entre dos ordenadores aprovechando la red GSM, hay que dotarla de más velocidad de transmisión. Aquí es donde surge la red GPRS, construida sobre la red GSM. En el segundo apartado hablamos de GPRS y también describimos dos de los servicios más populares: el de mensajería y el de posicionamiento. El tercer apartado trata de las redes de tercera generación (UMTS, en el caso europeo) que permiten velocidades muy elevadas y el cuarto apartado hace un breve repaso de uno de los nuevos paradigmas de las redes de gran alcance: las redes de gran alcance de baja potencia (*Low Power Wide Area Networks*, LPWAN).

Finalmente, dedicamos un apartado a las redes por satélite. Estas redes son las que tienen una mayor cobertura y dan soporte a servicios tan populares como el sistema de posicionamiento global GPS. También son de especial importancia en lugares donde no es posible (o es muy caro) ofrecer cobertura con antenas terrestres.

## Objetivos

Los contenidos de este módulo deben permitir a los estudiantes:

- 1.** Enumerar los servicios característicos de las fases evolutivas de GSM.
- 2.** Describir la arquitectura de GSM y las funciones de sus elementos.
- 3.** Describir las características y funciones de la tarjeta SIM.
- 4.** Aplicar las normas de protección ante radiaciones electromagnéticas.
- 5.** Describir el proceso de autenticación de usuarios en el estándar GSM.
- 6.** Describir la organización de los canales físicos y lógicos en el estándar GSM.
- 7.** Describir el proceso de codificación de voz y su inserción en la trama GSM.
- 8.** Describir el proceso de acceso de los usuarios y los efectos que tiene en la cobertura máxima del estándar GSM.
- 9.** Diferenciar los procedimientos de entrelazado del estándar GSM.
- 10.** Describir el funcionamiento técnico del servicio de mensajes cortos.
- 11.** Describir el funcionamiento de los servicios de posicionamiento basados en GSM.
- 12.** Diferenciar el contexto PDP y el contexto de movilidad en el estándar GPRS.
- 13.** Describir los procesos de gestión de paquetes en el estándar GPRS.
- 14.** Describir los fenómenos de diversidad de los que se aprovecha CDMA.
- 15.** Describir las características deseables de las secuencias pseudoaleatorias que se utilizan en CDMA.
- 16.** Describir la arquitectura del estándar UMTS.
- 17.** Describir los fundamentos técnicos del estándar HSDPA.
- 18.** Describir los puntos clave de la cuarta generación móvil.

## 1. Redes 2G

En este apartado hablaremos de las redes de telefonía móvil de segunda generación. Primero haremos un repaso de los distintos estándares existentes para después centrarnos en el estándar GSM, que, claramente, es el adoptado por más países.

### 1.1. Panorámica de las redes 2G

Cuando aparecieron los primeros sistemas móviles, tuvieron una gran aceptación. El número de usuarios aumentó rápidamente y la red se saturó pronto. Además, cada país tenía su estándar y no eran compatibles entre sí.

En 1982, la CEPT (*Conference of European Post and Telecommunications Administration*), que fue el primer organismo de estandarización de comunicaciones en Europa, creó el grupo de estandarización **GSM** (*Groupe Special Mobile*). En 1987 se firma el **MoU** (*Memorandum of Understanding*), con el cual los países europeos se comprometen a vaciar la banda frecuencial del futuro GSM (en torno a los 900 MHz). También cambian el significado de las siglas. Ahora se llamará *global system for mobile communications*.

#### ETSI

En 1988 se crea el ETSI. Está compuesto por las administraciones (CEPT) y los fabricantes.

En 1990, los fabricantes todavía no se atreven a hacer prototipos de terminales GSM, ya que cada poco tiempo se aprobaban nuevos documentos técnicos. Como se quería que el GSM estuviera operativo en 1992, se decide congelar las especificaciones. Lo que se había hecho hasta aquel momento se llamó **GSM fase 1**. Consta de 130 recomendaciones (5.000 páginas). Todo lo que se haga después tendrá que ser compatible con esta fase, por lo cual los fabricantes ya pueden fabricar sin temores. Ese mismo año, Reino Unido pide que el GSM se pueda utilizar en una banda más alta para permitir más capacidad, y empiezan los estudios de lo que más tarde será el DCS1800 (trabaja a 1.800 MHz, frente a los 900 MHz del GSM). En 1991 se congelan las especificaciones del DCS1800.

El éxito del GSM en Europa fue total. Los dos factores clave de este éxito son las tarjetas de prepago (el primer servicio de prepago fue en Alemania en 1995) y los mensajes cortos (el primero fue en Reino Unido en 1992).

El servicio de voz de GSM900 estuvo operativo en 1992, pero los datos no lo estuvieron hasta 1994.

En España lo está en 1995 –Telefónica en julio y Airtel (actual Vodafone) en octubre. En España, el espectro GSM, además de repartirse entre los dos operadores, también ha de convivir con los sistemas móviles analógicos (hasta el 2005). Eso provoca que rápidamente se saturen zonas en Barcelona y Madrid.

En 1993, el DCS1800 está ya operativo en Reino Unido. En España llegó más tarde, de la mano de Vodafone y Movistar, y en enero de 1999 se añadió a él Amena (actual Orange).

La banda de los 1.800 MHz tiene menos alcance que la de 900 MHz, y eso hace que cueste más dar cobertura en áreas rurales, donde las distancias que se deben cubrir son mayores.

En 1995 se congelan las especificaciones de **GSM fase 2** y se inicia el estudio de la fase 2+. En la fase 2, el DCS1800 se integra en la norma GSM y se llama GSM1800. También en 1995 se estandariza PCS1900 en Estados Unidos, basado totalmente en GSM, pero incompatible con GSM y DCS.

Los primeros terminales duales GSM/DCS aparecieron en 1997. En sus inicios, los operadores DCS1800 necesitan estos terminales para atraer clientes, ya que pueden hacer itinerancia a operadores GSM900 mientras crean su infraestructura (fue el caso de Orange en España). Tuvimos que esperar hasta 1999 para que fuera viable la conexión en Internet por el móvil, mediante el protocolo WAP.

El éxito conseguido con GSM hizo que las distintas fases se sucedieran con más velocidad, y se hicieron especificaciones anualmente (fase 2+ *release* 96, fase 2+ *release* 97, fase 2+ r. 98, fase 2+ r. 99). La fase 2+ r. 99 ya tiene puntos comunes con UMTS y se decide que el grupo que lleva el proyecto UMTS (grupo 3GPP) coja el control de las especificaciones GSM futuras.

Mientras en Europa el sistema de segunda generación es claramente el GSM, en otros lugares del mundo también desarrollaban sus sistemas:

- En Estados Unidos tienen el DAMPS (también llamado *IS-54* o *ADC*), que es un sistema compatible con el sistema de primera generación que ellos tenían (AMPS). Posteriormente desarrollan el IS-136 (grado de evolución del IS-54) y el IS-95, éste último basado en CDMA. El IS-136 es el equivalente americano del GSM europeo, pero no son compatibles.
- En Japón tienen el PDC (*personal digital cellular*), que es como el DAMPS pero con algunas pequeñas modificaciones técnicas para que sea compatible con el de primera generación que tenían (NMT).

El crecimiento de GSM fue muy rápido. Si en el año 2000 había 18 millones de móviles en España (igualando las líneas fijas), a finales del 2004 teníamos unos 39 millones (44% de Movistar, 31% de Vodafone y 25% de Orange). La penetración de la telefonía móvil ya superaba el 90%.

En el 2002 aparecen los operadores móviles virtuales (OVM), que pueden dar servicios de telefonía móvil con la red de los ya establecidos (compra y reventa de minutos). Carrefour Móvil, Happy Móvil o RACC Móvil son algunos de los OVM actuales.

A finales del 2004 teníamos en todo el mundo unos 1.600 millones de usuarios (1.200 de GSM, 200 de CDMA en Estados Unidos, 100 de PDC en Japón y 100 de IS-54 en Estados Unidos).

**Una penetración del 90%...**

... significa que 90 de cada 100 habitantes disponen de móvil.

## 1.2. GSM

A continuación describiremos con detalle las características del estándar GSM. Este conocimiento nos permitirá entender cuáles son los servicios que nos puede ofrecer.



### 1.2.1. Evolución

Veamos las características de las distintas fases GSM y los servicios que ofrecen. Aquí trataremos los servicios como un único conjunto, pero debe decirse que están divididos en básicos y suplementarios:

#### 1) Servicios básicos

- Teleservicios: dan un servicio completo dentro de la red GSM. Proporcionan capacidad para comunicarse. Es el caso de la voz, fax grupo 3 (el grupo 4 va sobre RDSI), mensajes cortos (SMS, EMS, MMS), llamadas de emergencia...
- Portadores (*bearer*): GSM proporciona sólo las capas bajas de la estructura OSI. Proporcionan capacidad para transmitir señales. Es el caso de las transmisiones de datos entre PDA (*personal digital assistant*) o PC mediante GSM. También es el caso del acceso de GSM a otras redes. Los servicios portadores en GSM son:
  - conmutación de circuitos asíncronos dúplex entre 300 y 9.600 bps.
  - conmutación de circuitos síncronos dúplex entre 1.200 y 9.600 bps
  - datos a 12 kbps (servicio portador sin restricciones)
  - acceso a la red telefónica conmutada (es analógica)
  - acceso a la RDSI (es digital)
  - acceso a la red pública de paquetes (X.25)

#### Asíncrono...

... quiere decir que los datos son un flujo serie con bits de *start* y *stop*. Síncrono quiere decir que por el canal de datos el extremo emisor también envía el reloj al receptor.

#### 2) Servicios suplementarios

Son un valor añadido a los servicios portadores o a los teleservicios: limitación de llamadas salientes, multiconferencia, redirección de llamadas (si el abonado llamado está ocupado, no responde...), identificación de quién llama, restricción de identificación...

#### GSM fase 1 (1990)

- Uso del terminal y la tarjeta en cualquier lugar de Europa (*itinerancia o roaming*).
- Capacidad elevada, para que no se sature rápido.
- Servicios de voz (telefonía) y datos (hasta 9.600 bps).
- Frecuencias: 890-915 MHz y 935-960 MHz.
- El coste está en la red, y no en los terminales.
- Cifrado de la información, para ofrecer seguridad.

Pensemos que una conversación en un sistema analógico es fácilmente espiable con un receptor FM. También es fácil construir móviles que simulen el terminal de otras personas.

- Uso del sistema de señalización internacional CCITT núm. 7. Lo usan los operadores para comunicarse entre sí (o entre elementos de la misma red).
- Servicio de mensajes cortos (SMS).
- Número único para llamada de emergencia.

- Fax.
- Restricción de llamadas.

### GSM fase 2 (1995)

- Ampliación del espectro: 880-915 y 925-960 MHz.
- Permite utilizar un codificador más rápido (*half-rate speech coder*). Reduce el número de bits necesario para codificar la voz, manteniendo una calidad aceptable.
- Identificación de quién llama, llamada en espera, llamada a 3...
- Opciones específicas para grupos de usuarios: llamada de grupo, llamada para todos...

### GSM fase 2+ (1996 en adelante)

- Terminales duales GSM/DCS.
- Interconexión con DECT.
- CAMEL (*customized application for mobile network enhanced logic*).

CAMEL es un proceso por el cual las redes GSM garantizan la traslación de los servicios suscritos por un usuario en su red origen a la red visitada en la que está en itinerancia. Hasta la fase 2+ eso sólo se garantizaba en el servicio de voz. CAMEL es la red inteligente sobre redes móviles que permite mantener nuestros servicios de red inteligente aunque estemos sobre otro operador.

- Ampliación de la funcionalidad del SIM.
- Permite llamadas de emergencia combinando un terminal GSM y un receptor GPS.
- GPRS (1997).
- UMTS (1999).
- HSDPA (3GPP release 5, 2001).
- HSUPA (3GPP release 6)
- LTE (3GPP release 8)

Veremos estos cinco últimos conceptos en posteriores apartados de este módulo y en el siguiente módulo.

## 1.2.2. Arquitectura

A continuación veremos la arquitectura del GSM. Los elementos que la componen son:

### 1) MS (*mobile station, estación móvil*)

- TE (*terminal equipment*): genera los datos.
- MT (*mobile termination*): es el conversor de señal eléctrica a radio (y al revés).
- TA (*terminal adaptor*): es la interfaz entre el TE y el MT.
- SIM (*subscriber identity module*): es la tarjeta que ponemos dentro del terminal.

**TE, MT y TA...**

... se corresponden con el terminal físico.

### 2) BSS (*base station subsystem, subsistema de estaciones base*)

- BTS (*base transceiver station*): son las estaciones base. Entre otros elementos, aquí tenemos las antenas y los amplificadores de potencia.

- BSC (*base station controller*): controlador de las estaciones base.

### 3) NSS (*network and switching subsystem, subsistema de red*)

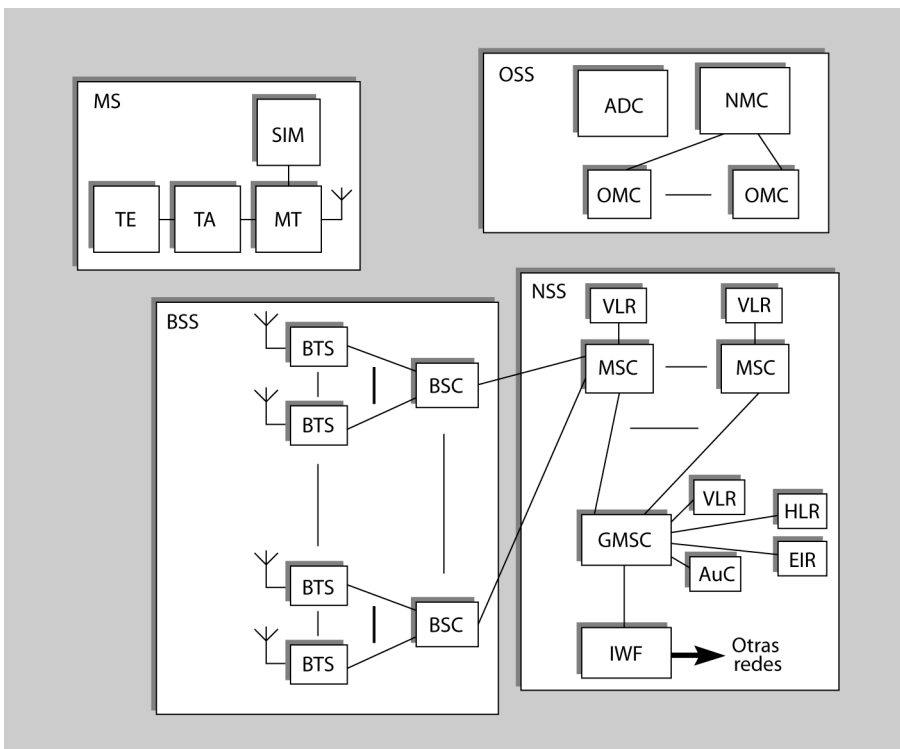
- MSC (*mobile switching center*): elemento de conmutación.
- GMSC (*gateway mobile switching subsystem*): es un MSC en contacto con otras redes.
- IWF (*interworking function*): permite interconectar la red GSM con otras redes.
- Bases de datos.
  - HLR (*home location register*)
  - VLR (*visitors location register*)
  - EIR (*equipment identity register*)
  - AuC (*authentication center*)

### 4) OSS (*operation support subsystem, subsistema de gestión*)

- OMC (*operation and maintenance center*): supervisa la carga de tráfico de la red, detecta anomalías...
- NMC (*network management center*): supervisa toda la red. En horas de poco tráfico hace la función del OMC.
- ADC (*administration center*): como indican las siglas, ahí se realizan las distintas tareas administrativas (facturación, atención a clientes...).

En la figura siguiente tenemos los elementos de la red, que explicaremos con más detalle a continuación:

Arquitectura GSM



## Mobile station

Se puede dividir en dos objetos: equipo móvil y tarjeta SIM.

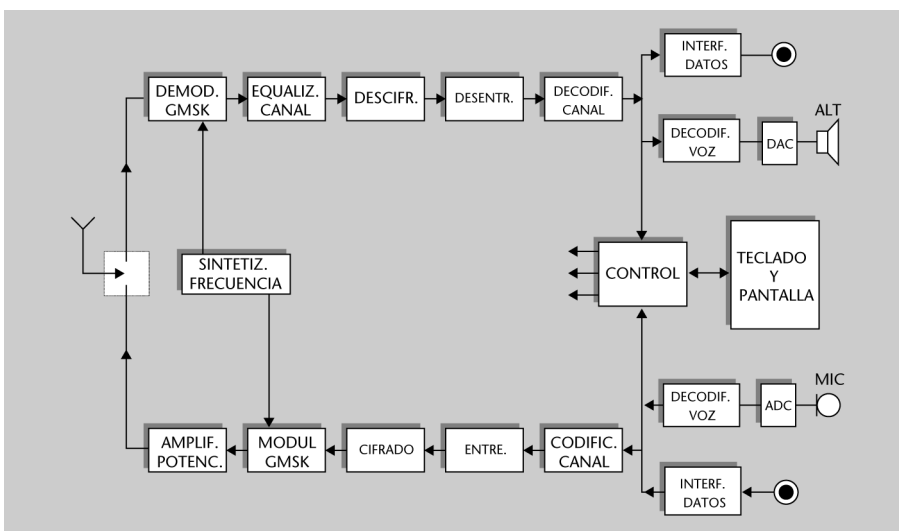
### 1) Equipo móvil

Tiene un número de serie único internacional, llamado *IMEI (international mobile equipment identity)*. Más adelante veremos que el EIR (base de datos vista anteriormente) lo necesita. Su composición es:

- **TAC (6 dígitos):** *type approval code*, es un número que asignan los centros autorizados de homologación de terminales.
- **FAC (2 dígitos):** *final assembly code*, indica el país de fabricación.
- **SNR (6 dígitos):** número de serie único, asignado por el fabricante.
- **SP (1 dígito):** *spare*, es un dígito todavía no utilizado.

En la figura siguiente vemos el diagrama de bloques de un terminal móvil. Los diferentes bloques de los que consta los iremos comentando en diferentes puntos del tema:

Estación móvil



Cuando se compra un terminal móvil hay que tener en cuenta algunas características importantes:

- Hay equipos de baja potencia (1-2 W) y otros para vehículos que típicamente dan 8 W. Los mapas de cobertura de los operadores diferencian la cobertura en ambos casos. Los terminales se pueden clasificar según la potencia máxima que pueden emitir: clase 1 (20 W, obsoleto), clase 2 (8 W), clase 3 (5 W, obsoleto), clase 4 (2 W) y clase 5 (0,8 W). En cualquier caso, deben poder recibir señales entre  $-10$  y  $-104$  dBm (sensibilidad). La norma dice que si recibimos señales de  $-102$  dBm debemos tener menos de un error por cada 100 bits.
- Los fabricantes dan la autonomía del terminal en función de dos parámetros: la autonomía cuando no estamos en comunicación y la autonomía

#### Observación

La mayoría de los terminales son de clase 5.

mientras hablamos. Utilizando baterías estándar, la autonomía en espera es de unas 300 horas y la autonomía en comunicación de unas 4 horas.

Hay innovaciones tecnológicas que pueden tenerse en consideración (también son un sobreprecio):

- Baterías solares.
- Teléfonos que van con pilas alcalinas.
- Teléfonos en los que para llamar a alguien no se necesita escribir sino decir su nombre.
- Hay teléfonos que tienen gran autonomía. Combinado con baterías de alta capacidad, tenemos 10 días de espera y 10 horas de conversación.
- Móviles con micrófonos que eliminan el ruido de fondo.
- Diccionario que cuando hemos escrito tres letras nos diga la palabra más probable.
- Diversidad de antena (más de una antena).
- Antenas fractales para terminales duales: son antenas basadas en elementos geométricos simétricos y que son ideales para terminales multibanda.

Una antena debe tener unas dimensiones proporcionales a la longitud de onda de la señal que queremos captar. Cuando un terminal puede recibir señales, además de una frecuencia (por ejemplo, a 900 MHz de GSM y 1.800 MHz de GSM), la longitud de la antena es un valor de compromiso, de tal manera que no es óptimo para ninguna de las dos frecuencias pero es aceptable para las dos. Con antenas fractales, la antena es óptima para las dos frecuencias.

## 2) Tarjeta SIM

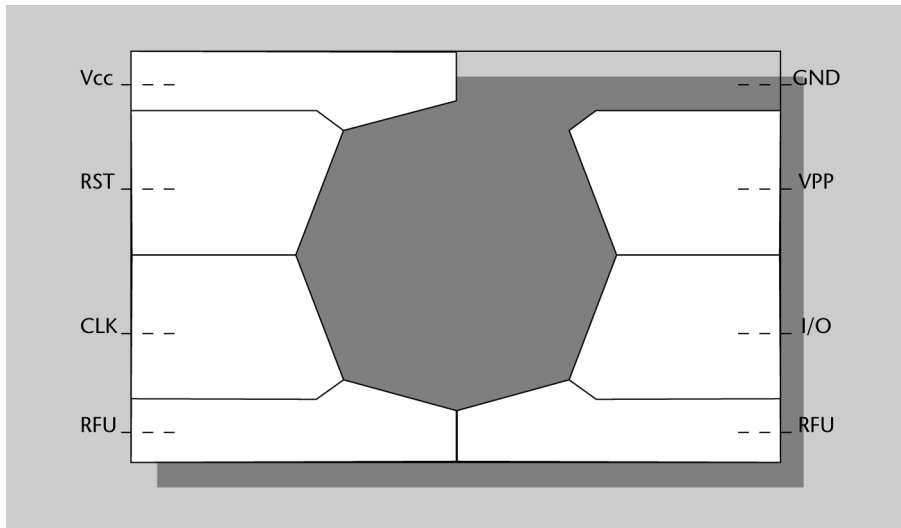
El SIM es el módulo de identificación de abonado. Las llamadas a un abonado irán hacia el teléfono donde esté insertado el SIM. Un usuario sólo puede llamar desde un teléfono si ha puesto su SIM (sin SIM sólo se pueden hacer llamadas de emergencia).

La tarjeta SIM, al igual que el terminal móvil, tiene un número único que permite identificarla. Este número es el ICC (*identification card code*), que no es exclusivo de GSM sino que es un código estándar. Su composición es:

- CT (2 dígitos): *card type*, identifica el tipo de tarjeta y la aplicación (89 en telecomunicaciones).
- CC (2 o 3 dígitos): *country code*, identifica al país (34 en España).
- MNC (2 dígitos): *mobile network code*, para países donde hay más de una red (01 para Vodafone, 03 para Orange y 07 para Movistar).
- SN: *serial number*, no está estandarizado y lo asigna cada operador.
- CD (1 dígito): *check digit*, de control.

El SIM tiene una parte de memoria tipo ROM (unos 128 K aproximadamente), una memoria RAM permanente (EEPROM, de unos 64 K) y una RAM (1 K aproximadamente) cuando está conectado. Todo está controlado por una CPU. El SIM puede ser de dos tamaños, como vemos en la figura siguiente: SIM o *plug-in-SIM* (es un SIM más pequeño, para teléfonos que no tienen espacio para poner el SIM grande). Un SIM grande se puede recortar por una línea ya marcada para obtener un *plug-in-SIM*.

### Terminales de la tarjeta SIM



En la figura anterior vemos la forma de la tarjeta SIM (los terminales son *Vcc*, *reset*, *clock*, *GND*, tensión de programación, entrada/salida y dos sin usar):

El SIM contiene:

- Identidad del abonado (**IMSI**, *international mobile subscriber identifier*). Es único para cada abonado en toda Europa. Está en la ROM. Su composición es:
  - MCC (3 dígitos): *mobile country code*, es un código del país de origen del abonado (214 para España).
  - MNC (2 dígitos): *mobile network code*, es la red preferente del abonado para países con más de un operador (01 para Airtel, 03 para Orange, 07 para Movistar y 04 para Yoigo).
  - MSIN (hasta diez dígitos): *mobile subscriber identification number*, es el número que identifica al abonado.
- Autenticación. Está en la ROM:
  - clave secreta (*Ki*): la graba el fabricante, pero no se puede leer de ninguna manera. Sólo los algoritmos pueden trabajar con ella.
  - algoritmos de cifrado y autenticación (A3, A8): se los puede inventar cada operador.
- Datos del abonado, tanto de sistema como personales (agenda telefónica, mensajes SMS que hemos querido guardar, en qué instante hemos hecho la última conexión a la red...).
- PIN y PUK (también el estado del PIN/PUK –bloqueado o no– y el contador de errores PIN/PUK).

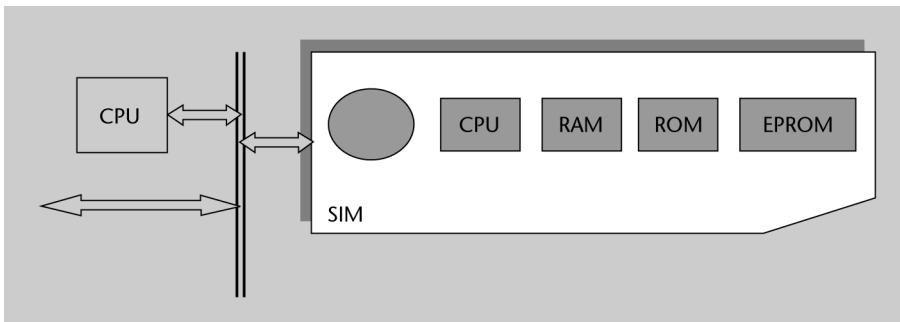
Si alguien conociera el IMSI y la clave secreta de un abonado, podría falsear su identidad.

Entre otros factores, la vida de una SIM depende del número de accesos que hagamos. Para alargar esta vida, los teléfonos trabajan con una SIM virtual. Cuando encendemos un terminal, el móvil lee datos de la SIM (por ejemplo, números abreviados) y los guarda en la memoria del teléfono (no se incluyen las verificaciones de PIN ni la autenticación). Cuando apaguemos el móvil, los datos de la SIM virtual van a la SIM física. Todas las operaciones entre el encendido y el apagado se hacen con la SIM virtual y se evitan lecturas y escrituras en la SIM real. Este proceso de SIM virtual no forma parte del estándar GSM.

El acceso no autorizado a una SIM puede prevenirse con el **SIM lock**. Se basa en datos guardados en la SIM y en el móvil que se comparan al encenderlo. Un móvil se asocia a una SIM (lo suele hacer el usuario, como protección) o a un grupo de SIM (lo hace la operadora para evitar traspaso de clientes cuando ésta ha subvencionado el terminal). El *SIM lock* se puede desactivar por aire o por código secreto.

Con el *SIM application toolkit* (SAT), que forma parte del GSM 2+, pueden desarrollarse aplicaciones que aprovechen la SIM. Hasta que apareció el SAT, la SIM era esclava del procesador que llevaba el terminal. Con el SAT, introducimos un mecanismo por el cual la SIM puede pedir al terminal que haga cosas (antes, el operador activaba funciones ocultas de la SIM, pero que ya estaban grabadas de serie). También hay que saber que nos pueden poner código en el EPROM vía radio (figura siguiente).

Memorias de la tarjeta SIM



El SAT ofrece posibilidades a los operadores para cargar aplicaciones en las tarjetas que les permiten controlar los móviles. Así, la SIM puede controlar el visualizador, el teclado, etc.

MExE (*mobile execution environment*; entorno de ejecución móvil) es una especificación creada por ETSI y asumida por 3GPP que permite ejecutar código en el móvil. Define cuatro clases:

clase 1: asume que el terminal tiene WAP.

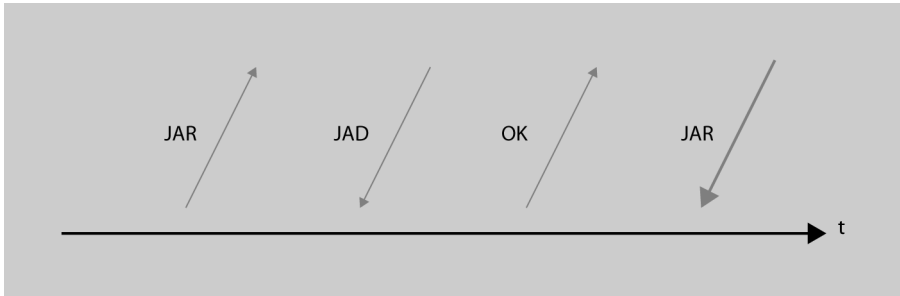
clase 2: *personal Java*.

clase 3: J2ME (*Java 2 micro edition*).

clase 4.

La clase J2ME es la más habitual, en la cual la aplicación está en un archivo JAR. Este JAR contiene un manifiesto (JAD), el cual nos dice la versión necesaria, el tamaño del JAR, el nombre del autor, etc. Después, si queremos, bajamos el JAR. Vemos la secuencia en la figura siguiente.

Bajada de aplicaciones



También hay plataformas *smartphone*, que son programas específicos para cada terminal que ofrecen entornos de desarrollo.

**Las plataformas más conocidas son...**

... Android, iOS y Blackberry.

### BSS (*base station subsystem*)

Una BSS es un conjunto de BTS y una BSC.

#### 1) Funciones de la BTS

a) La BTS tiene un código de identificación llamado **BSIC** (*base station identity code*) que permite que cada móvil pueda diferenciar sin ambigüedad la cobertura de dos celdas vecinas. El BSIC se estructura de la siguiente manera:

- NCC (3 bit): *network color code*, es para diferenciar las celdas de distintos países en zonas fronterizas. Para asignarlo, los países implicados deben ponerse de acuerdo.
- BCC (3 bit): *base station color code*, hace como el NCC pero de estaciones base.

b) Recibir y transmitir (antenas y procesado de señales de radio). Las BTS pueden clasificarse en función de la potencia máxima que pueden transmitir: clase 1 (320 W), clase 2 (160 W) y así hasta clase 8 (2,5 W). Pueden variar su potencia en saltos desde 2 dB hasta un mínimo de 13 dBm. Cada BTS puede manejar varias portadoras (dobles).

c) Medir el canal. En los sistemas analógicos, eso sólo lo hacía la EB. Aquí lo hace la BTS y también el móvil. El móvil coopera en el traspaso (MAHO, *mobile assisted handover*). En concreto, el móvil mide el nivel y la calidad (RxQual y RxLevel) de la portadora actual y de las seis celdas más próximas.



d) Gestionar el nivel físico y de enlace (aquí iría el cifrado de la comunicación).

Para dar un servicio de telefonía móvil a muchos usuarios y con una cobertura próxima al 100%, es necesario instalar muchas antenas. En el año 2009, el Comité Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud (CCARS) concluyó que los actuales límites de exposición de las normativas son suficientes para la protección de las personas.

La radiación es un fenómeno de propagación de partículas (fotones). Los fotones no tienen masa pero sí una energía proporcional a su frecuencia. Las ondas interactúan con la materia transfiriendo parte de su energía. Si la energía de los fotones es alta, pueden ionizar las moléculas del material sobre el cual inciden (pueden arrancar un electrón). Esto pasa con los rayos ultravioletas, rayos X, rayos gamma (radiactivos)... Estos rayos tienen una frecuencia unas  $10^7$  veces mayor que las de telefonía y pueden alterar el código genético. Las de telefonía no ionizan, pero sí pueden agitar los átomos y causar efectos térmicos debidos a esta agitación.

Cuando recibamos una radiación que viene de lejos, hay que considerar la densidad de potencia de la fuente emisora ( $S$ , en  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ), y el efecto en el organismo es una **absorción superficial**. Normalmente las antenas de las calles son direccionales y tras ellas el riesgo es 0.

Si la radiación viene de cerca, hay que considerar la tasa de absorción específica del móvil (SAR, en  $\text{W}/\text{kg}$ ), ya que la onda puede **penetrar** unos 1-3 cm y por lo tanto parte de la energía se la queda la cabeza en forma de calor. Los fabricantes conocen el valor de SAR de sus aparatos, pero en general no lo dan (en algunas webs se pueden encontrar). El SAR se mide con una cabeza artificial y da una idea de la cantidad de radiación que absorbe esta cabeza. Si el número es grande, peor es el terminal.

Uno de los objetivos de los estudios actuales es responder a dos preguntas: ¿los móviles, provocan cáncer de oído? ¿Las bases provocan dolor de cabeza?

Actualmente disponemos de normativas que marcan como límite aquellos valores que hacen que los niveles estén a un 2% del nivel en el que hay efectos biológicos.

La ITU-T K.52 (Unión Internacional de Telecomunicaciones) ha adoptado las recomendaciones del ICNIRP (International Commission on Non-ionizing Radiation Protection), que dice que a 900 MHz (GSM)  $S$  debe ser inferior a  $4,5 \text{ W}/\text{m}^2$ , a 1.800 MHz (DCS)  $S$  debe ser inferior a  $9 \text{ W}/\text{m}^2$  y a 2.000 MHz (UMTS)  $S$  debe ser inferior a  $10 \text{ W}/\text{m}^2$ .

En España la normativa está publicada en el RD 1066/2001, y dice que para frecuencias de entre 400 y 2.000 MHz,  $S < f[\text{MHz}] / 200$  y para valores superiores,  $S < 10$ . Las comunidades autónomas pueden tener otras normativas. Así, en Cataluña,  $S < f / 450$  (Decreto 148/2001).

Con respecto al SAR, la OMS dice que el cuerpo tiene mecanismos de regulación para soportar un SAR de  $4 \text{ W}/\text{kg}$  (30 minutos con SAR de  $4 \text{ W}/\text{kg}$  pueden provocar  $1^\circ\text{C}$  de incremento de temperatura). La Comisión Europea, en 1999, establece un límite 50 veces menor ( $0,08 \text{ W}/\text{kg}$ ).

WEB

Más información de las actividades de esta comisión en [icnirp.org](http://icnirp.org).

Observamos que el valor normativo de  $S$  nos determina la distancia de seguridad:

$$S = \frac{PIRE}{4 \cdot \pi \cdot d^2}$$

donde  $S$  es la densidad de potencia radiada [ $W / m^2$ ], la PIRE es la potencia isotrópica radiada equivalente en la dirección de máxima radiación y  $d$  es la distancia.

Por ejemplo, si  $PIRE = 447,7 \text{ W}$  y  $f = 900 \text{ MHz}$ ,

$$d_{\text{límite}} = \sqrt{\frac{PIRE}{4 \cdot \pi \cdot S_{\text{máx}}}} = \sqrt{\frac{447,7}{4 \cdot \pi \cdot \frac{900}{200}}} = 2,81 \text{ m.}$$

En Cataluña, como  $S_{\text{máx}} = 900 / 450 = 2$ , la  $d$  sería de 4,2 m. Habría que dejar 4,2 metros entre el centro de radiación de la antena y cualquier lugar donde pueda haber personas.

Si el sistema anterior tuviera dos operadoras con tres portadoras/operador,

$$PIRE_{\text{total}} = 447,7 \cdot 6 = 2686,2 \text{ W y, por lo tanto, } d = 6,89 \text{ m.}$$

Si tenemos varios sistemas (p. ej., GSM y DCS), hay que calcular la distancia de cada sistema y hacer:

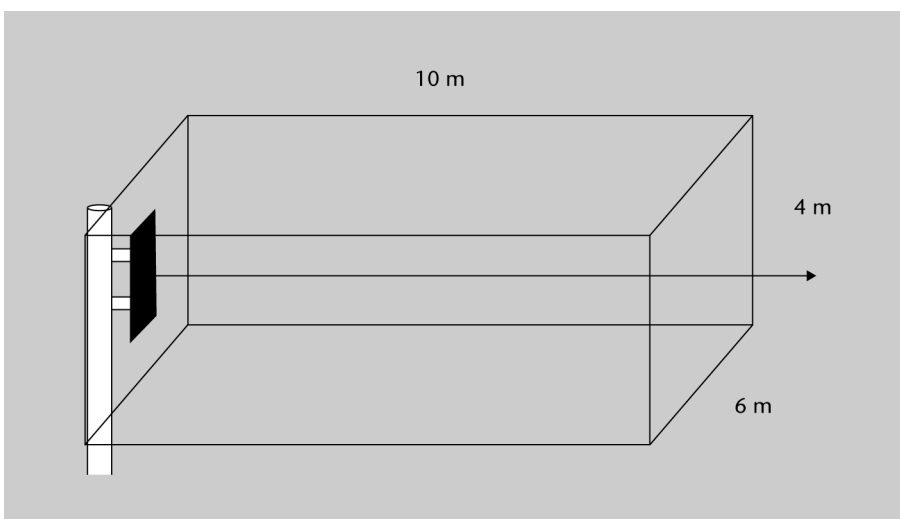
$$d_{\text{límite}} = \sqrt{d_{\text{lim GSM}}^2 + d_{\text{lim DCS}}^2}$$

Así, seis portadoras GSM y nueve portadoras DCS con una PIRE de 447,7 W daría:

$$d_{\text{límite}} = \sqrt{6,89^2 + 5,96^2} = 9,11 \text{ m.}$$

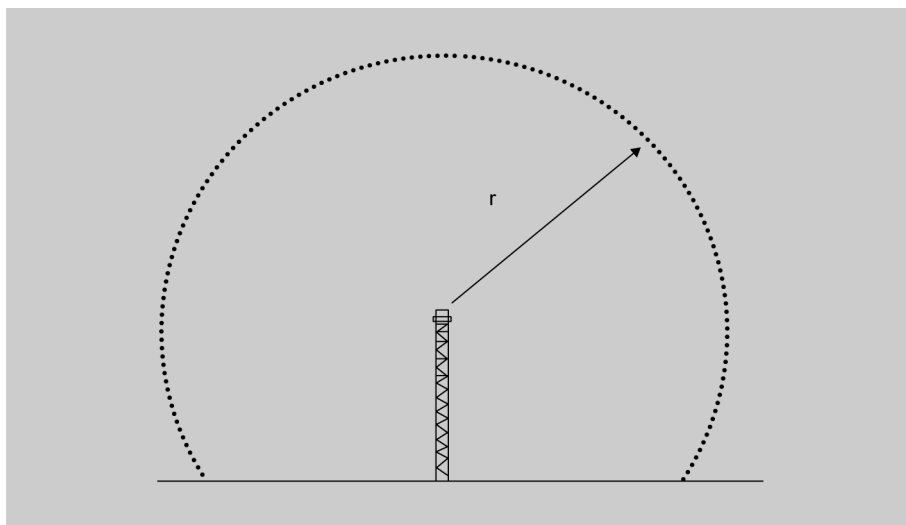
La normativa actual permite establecer unas distancias de seguridad, de manera tal que si la potencia radiada es inferior a 1.000 W, hay que dejar libre un paralelepípedo de 10 x 4 x 6 metros frente al diagrama principal de radiación (figura siguiente).

Espacio de protección



Si la potencia radiada es superior a 1.000 W, entonces hay que dejar libre una esfera de radio  $r$  (el radio depende de la potencia radiada), como vemos en la figura siguiente.

Esfera de protección



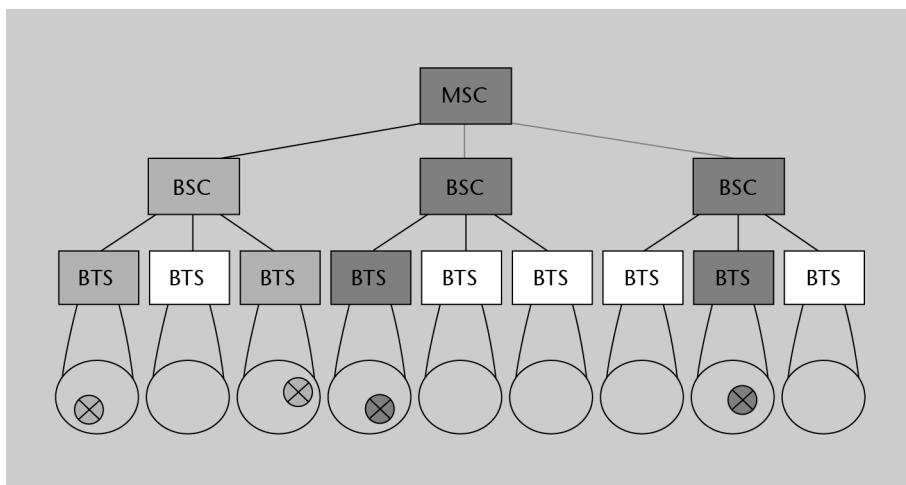
Pot (W)	100-1.000	1.500-2.500	2.501-5.000	5.001-10.000	10.001-50.000	50.001-100.000	...
R (m)	10	15	20	25	45	63	...

Estas distancias son cinco veces mayores si hay espacios abiertos donde regularmente hay niños/as.

## 2) Funciones del BSC

En GSM, cada EB tiene unos canales prefijados. Si la BSC los conoce, la BSC puede hacer los traspasos dentro de una BSS sin molestar al MSC (figura siguiente):

Conexiones BTS-BSC-MSC

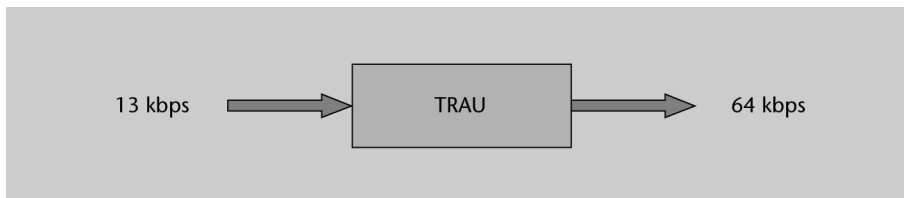


Además de eso, el BSC:

- Asigna canales en las comunicaciones.
- Supervisa la calidad del enlace.
- Controla la potencia (se verá más adelante).

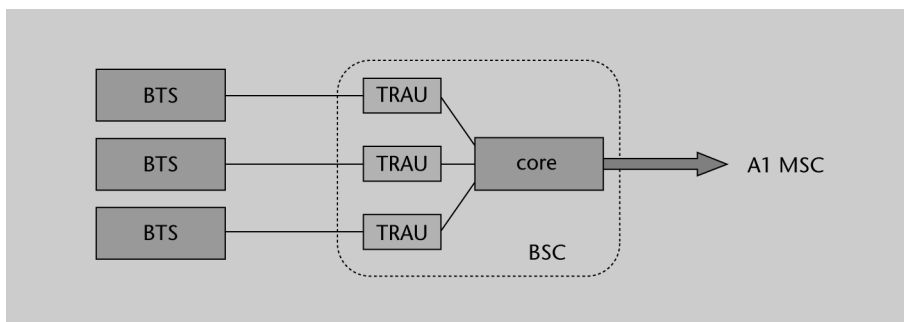
Dentro del BSS está el **TRAU** (*transcoder/rate adaptor unit*), o unidad de transcodificación y adaptación de velocidad. El terminal móvil comprime la información en 13 kbps. Esta unidad la amplía a 16 kbps (13 kbps + sincronización), la descomprime hasta 64 kbps y lleva los 64 kbps por la red fija digital (figura siguiente).

Función del TRAU



El estándar GSM no especifica dónde debe ponerse el TRAU. Pero habitualmente se pone como muestra la siguiente figura:

Ubicación del TRAU



Observamos que una comunicación móvil-móvil experimenta dos compresiones-descompresiones, por lo cual tiene peor calidad que una llamada móvil-red fija.

### **Network and switching subsystem**

#### **1) MSC**

Es la central de conmutación móvil. 1 MSC puede dar servicio a unas 200 estaciones base (unos 300.000 abonados). Sus funciones son:

- Control del establecimiento de llamadas.
- Acceso directo a la red telefónica fija.
- Acceso a otros servicios con la IWF.
- Diálogo basado en CCITT núm. 7 (el diálogo BSC-MSC se hace con una red de señalización propia de GSM).
- Hace el traspaso (conmutación) entre EB que dependen de diferentes BSC.

#### **2) GMSC**

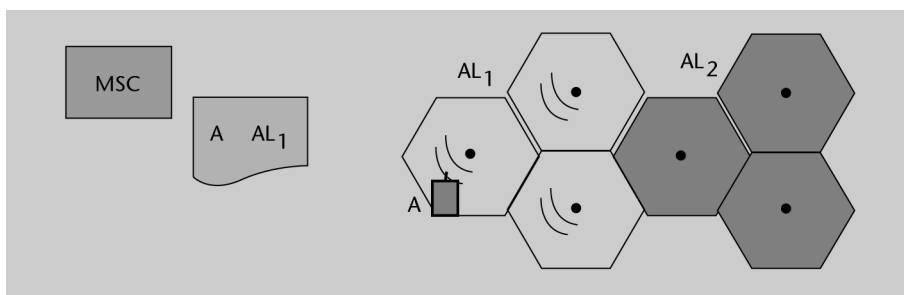
Es el MSC que está en contacto con otras redes. Así, es el elemento de conexión en la red fija para recibir o generar llamadas. Hoy en día se fabrican MSC. Para convertirlas a GMSC, sólo hay que comprar un software aparte.

### 3) HLR

Es el registro de posiciones base. Hay un HLR por operador o los mínimos necesarios. Cada GMSC tiene un HLR. Sus funciones son:

- Guarda datos relativos a los abonados dados de alta (servicios contratados, tarificación, cifrado...).
- Guarda información de localización (es necesario para gestionar la movilidad). Con el sistema clásico, cuando hay una llamada a un móvil, las estaciones base emiten un mensaje con la identidad del abonado buscado. Si definimos dos áreas de localización (figura siguiente), sólo emitirán el mensaje las estaciones base de la zona donde está el móvil.

Áreas de localización



Una área de localización suele estar servida por más de un BSC.  
Una MSC sirve a varias áreas de localización.

### 4) VLR

Es el registro de posiciones visitante. Toda MSC tiene un VLR asociado (están integrados físicamente). Es posible que un VLR sea utilizado por varias MSC. Su función es como la del HLR: guardar datos relativos al abonado (permite que los datos de abonado estén próximos al abonado) y la información de localización. Cuando un abonado cambia de área, los datos se mueven con él (el nuevo VLR le pide los datos al HLR).

El VLR es el que atiende al móvil cuando éste está fuera del área de su HLR.

En el HLR está la información del VLR en la que encontraremos al abonado. Cuando una llamada parte de la red fija, el HLR es la primera entidad que se utiliza; si parte de un móvil, el VLR.

La SIM guarda el nombre del último VLR en el que estuvo. Si cuando nos conectamos estamos en otro VLR, éste le pedirá los datos al primero y evitará molestar al HLR.

### 5) EIR

Es el registro de identidad de los equipos. Tiene una lista con el número de serie del terminal que el operador quiere verificar. Sirve tanto para controlar el

acceso de equipos no aprobados (porque quizás radian fuera de banda) como equipos robados.

## 6) AuC

Es el centro de autenticación. Hay uno por cada operador. Normalmente está asociado al HLR. Guarda los números secretos de abonado y genera las tripletas (mecanismo de autenticación). En el próximo punto lo trataremos con más detalle.

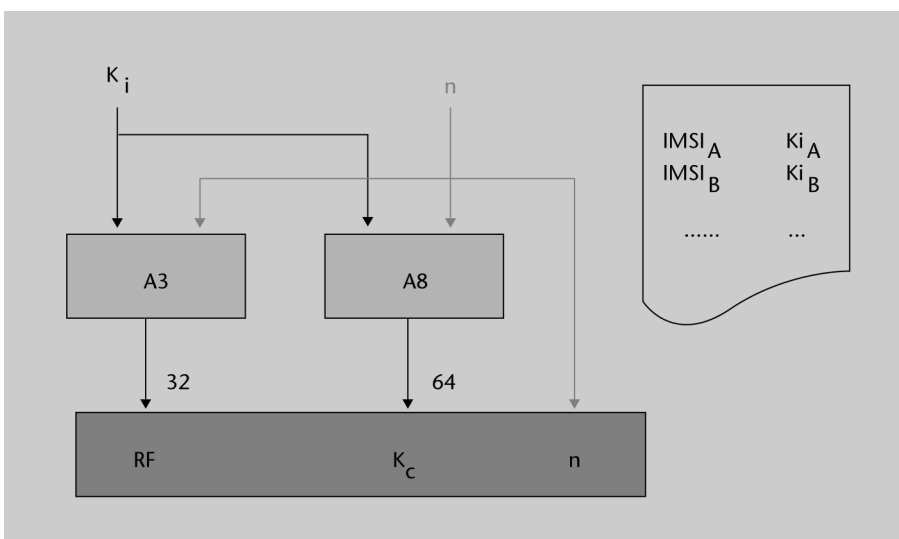
### 1.2.3. Autenticación

El AuC es el elemento que da funciones de seguridad. Se encarga de generar las **tripletas**, que son uno de los datos que hay en el HLR. Cada vez que el abonado se autentique (eso sucede cuando se establecen o aceptan llamadas), el móvil le pide tripletas al VLR.

Para hacerlo, dispone de lo siguiente (ver figura siguiente):

- algoritmos A3 y A8 (propios de cada operador).
- un archivo con el IMSI y la clave secreta ( $K_i$ , de 128 bits) de los usuarios (estas  $K_i$  están cifradas).
- generador de números aleatorios ( $n$ ) de 128 bits.

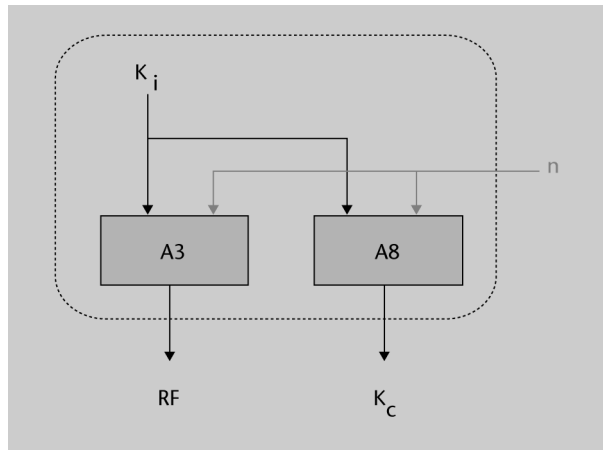
Autenticación en el AuC



En una tripleta tenemos el RF (respuesta firmada) o SRES (*signed response*), la  $K_c$  (clave de cifrado, *key ciphering*) y  $n$  (número aleatorio) o RAND: entre 0 y  $2^{128} - 1$ .

La clave secreta del abonado ( $K_i$ ) está grabada en la SIM. Esta clave no se puede leer (sólo pueden trabajar con ella los algoritmos). La SIM tiene los mismos algoritmos que el AuC del operador (figura siguiente).

## Autenticación en la SIM



En un sistema tradicional (por ejemplo, una red de ordenadores), nosotros tenemos una conexión (*login*) y una contraseña que no es necesario que estén protegidos. En cambio, en un entorno de radio (GSM), la contraseña debe estar protegida. El proceso de autenticación pretende **evitar que la  $K_i$  pase por el canal de radio**. Como protección adicional, también se utiliza un código personal de usuario (PIN) para tener acceso al SIM.

## Proceso de autenticación

1) Si el móvil transmite su identificador (IMSI) alguien podría saber quién está llamando. Para esconder la identidad del usuario, se crea un TMSI (temporal) que sólo tiene validez en una determinada zona de servicio, por lo cual es más corto. Cuando un usuario accede al área de una MSC, le envía la IMSI y la MSC le devuelve el TMSI, que es el código que se utilizará a partir de aquel momento. En resumen, las funciones del TMSI son:

- Reducir la longitud del número de acceso.
- Esconder la identidad del abonado (cada vez que interactúa con el sistema, le asigna un TMSI diferente).

En comunicaciones internacionales puede ser que un operador le exija a otro el IMSI y no le acepte el TMSI.

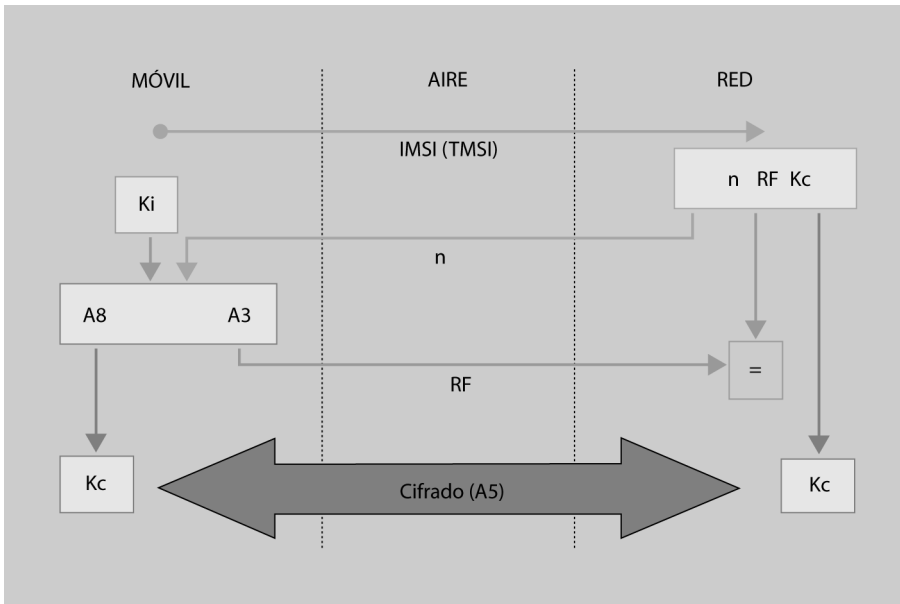
2) El TMSI llega al VLR. Éste genera una tripleta (esta tripleta se usará sólo una vez) y se transmite la  $n$  (número aleatorio de la tripleta) hacia el móvil. Este genera una RF y una  $K_c$ . La  $K_c$  cambia en cada tentativa de llamada.

3) El móvil transmite la RF hacia el MSC, y se comparan las dos RF (la que le llega y la de la tripleta que generó). Si son iguales, eso quiere decir que la  $K_i$  del SIM es la misma que la de la base de datos del VLR y, por lo tanto, el usuario es quien dice ser.

4) El MSC envía la  $K_c$  al BSC. Todo el diálogo entre el móvil y BSC está cifrado con la clave  $K_c$ . En GSM, se utiliza el algoritmo A5 junto con la clave  $K_c$ . El A5 está especificado internacionalmente para permitir itinerancia. Tiene como entradas el número de trama (2048·26·51 diferentes) y  $K_c$ .

En la figura siguiente tenemos todo este proceso:

Proceso de autenticación



Sólo se cifra la parte de radio. De manera excepcional, si un operador comunica sus estaciones base mediante radioenlaces, puede escoger si cifra o no, estas comunicaciones.

En principio, parece que no haría falta un AuC con las claves de cifrado, ya que las puede tener en la HLR sin necesidad de tripletas. Utilizando tripletas, hacemos que cada operador sea independiente. No sería correcto facilitar a otro operador las  $K_i$  de los usuarios. Además, los algoritmos A3 y A8 son exclusivos de cada operador. Así, cuando un usuario viaja, si llama, tendrá que ir al operador nativo para solicitar tripletas.

No siempre se cifra (por ejemplo, si la red está saturada).

#### 1.2.4. Canales y estructura de tramas

En GSM el duplexado es FDD (las comunicaciones de terminal a base y de base a terminal van en frecuencias diferentes). En GSM, estas frecuencias están siempre separadas 45 MHz (95 MHz en el DCS1800).

En DCS1800, la banda es el triple que en GSM. Por lo tanto, la capacidad también se triplica (en GSM tenemos 124 canales de 200 KHz, mientras que en DCS tenemos 374 canales de 200 KHz).

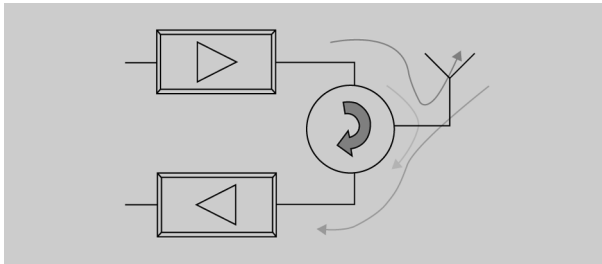
#### En GSM...

... las comunicaciones de móvil a base van entre los 890 y los 915 MHz. Las de base a móvil, entre 935 y 960 MHz. En DCS las de móvil a base van entre los 1.710 y los 1.785 MHz y las de base a móvil, entre 1.805 y 1.880 MHz.

La separación de 45 MHz (o 95 MHz) se hace para compensar los problemas del duplexor (figura siguiente), ya que, aunque no queramos, parte de la señal que va desde el móvil hacia el exterior se vuelve a colar hacia la entrada del móvil, como vemos en la figura.



Duplexor

**Duplexor**

El duplexor es el elemento que permite que una única antena pueda hacer emisión y recepción.

GSM tiene 25 MHz de espectro en cada sentido. Mediante FDMA se divide en 125 portadoras de 200 KHz. Mediante TDMA, cada portadora de 200 KHz se divide en ocho ranuras de 25 KHz. Así, un canal físico en GSM es una ranura de una portadora.

GSM es más robusto a las interferencias que los sistemas de primera generación, eso implica que la distancia de reuso puede ser menor (reuso intenso). En entornos urbanos se utilizan clústers de 3 celdas y 3 sectores/celda o de 4 celdas con 3 sectores/celda. No se hacen sectores en zonas rurales.

**Tipo de canales**

Un terminal puede estar en dos estados: dedicado (cuando tiene establecida una comunicación) y no dedicado (cuando no tiene una comunicación pero está activo).

**1) Canales en modo dedicado (cuando el móvil tiene establecida una comunicación)**

En un canal en modo dedicado puede haber datos de usuario (por ejemplo, voz) y señalización (información de control entre el terminal y la red GSM).

**a) Señalización:**

- Lenta (SACCH, *slow associated control channel*)
  - Es permanente.
  - Es bidireccional.
  - Se transmiten medidas y otras órdenes (por ejemplo, control de potencia, en el que el móvil le dice a la base que aumenta o disminuya la potencia).
  - 2 mensajes/segundo. Por tanto, las medidas están retrasadas 0,5 segundos respecto al momento en el que se tomaron. Un traspaso no puede tolerar este retardo.
- Rápida (FACCH, *fast associated control channel*)
  - En esta señalización se utiliza el canal de voz (se hace un robo del canal y, por lo tanto, el usuario tendrá unos pequeños silencios).

**Observación**

Tal como vimos en el módulo "Comunicaciones sin hilos", si la distancia de reuso es pequeña, los clústers serán menores y se podrán reaprovechar mejor las frecuencias disponibles.

**b) Datos de usuario:** este canal puede ser *full* (TCH/F) o *half* (TCH/H). En este último, la ranura se utiliza la mitad de las veces. También podemos tener canales de 1 octava (TCH/8). Puede haber tres tipos de datos de usuario:

- **Voz:** Puede ser *full-duplex* en 13 kbps si escogemos TCH/F o en 6,5 Kbps si escogemos TCH/H (de peor calidad, ya que comprime mucho; sólo disponible en la fase 2 y posteriores).
- **Datos.** Básicamente hay tres opciones:
  - 9.600 bps + señales de control = 12 kbps
  - 4.800 bps + señales de control = 6 kbps
  - 2.400 bps + señales de control = 3,6 kbps

Después, todavía se añaden protecciones (los de 3,6 kbps tendrán más protección que el resto). Así, el usuario puede escoger la fiabilidad de los datos. Si hemos escogido TCH/H, no podemos enviar datos a 12 kbps.

- Mensajes cortos (es más económico que llamar)

## 2) Canales en modo no dedicado (cuando el móvil no tiene establecida una comunicación)

En sentido de móvil a base sólo está el canal **RACH** (*random access channel*). Como hay un **acceso aleatorio por parte de los móviles**, es necesario un mecanismo de resolución de colisiones.

En sentido de base a móvil hay cuatro canales:

- **FCCH** (*frequency correction channel*). Este canal permite la localización de EB (permite localizar canales de control). Es una secuencia de 0. Cuando llega al receptor, en la salida nos da un tono separado de 67 KHz de la portadora (es el desplazamiento de la modulación GMSK que utiliza GSM).

En GSM, un canal de control puede estar en cualquier lugar del espectro, pero siempre en la ranura 0. Toda estación base tiene, como mínimo, una ranura con la información de control. Estas ranuras, de vez en cuando, transmiten esta secuencia de 0.

El terminal sintoniza una frecuencia. Dispone de un filtro de 67 KHz. Si no lo detecta, busca otro. Así, permite la localización de canales de control dentro del espectro. El terminal se quedará pegado a una ranura de una frecuencia.

- **SCH** (*synchronisation channel*). Da información de sincronización para la localización de canales. Pensemos que la trama GSM dura 3 h 28' 53" 760 ms, y **el terminal tiene que saber en qué instante se encuentra**. La estructura la tenemos en la figura siguiente.

## Organización de los bits en el canal SCH

3	<b>39 bits codificados</b>	<b>64 bits entrenamiento</b>	<b>39 bits codificados</b>	3
---	--------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	---

De los 78 bits codificados, 6 son el BSIC, 19 son el número de trama (más adelante lo veremos) y 53 son redundancia.

- **BCCH** (*broadcast control channel*). Tiene la misma estructura que la ráfaga de tráfico (la veremos más adelante en este mismo punto). Difunde **información útil para acceder**, como la información de sistema (identidad del operador...) e información de la célula en la que se encuentra y de las células vecinas.
- **PAGCH** (*paging access grant channel*). Tiene la misma estructura que la ráfaga de tráfico (la veremos más adelante en este mismo punto). Hay dos informaciones:
  - *pagings* (**avisan al terminal** de que hay una llamada entrante). A veces se dice que esta información viaja por el canal PCH (*paging channel*).
  - confirmaciones de acceso. A veces se dice que esta información viaja por el canal AGCH (*access grant channel*).

**Organización de los canales**

En **modo dedicado**, hay que enviar los datos de usuario y la señalización lenta (SACCH). Se estructura en 26 tramas:

- de la 0 a la 11 la ranura se utiliza para datos de usuario.
- la 12 se utiliza para SACCH.
- de la 13 a la 24 la ranura se utiliza para datos de usuario.
- la 25 se deja vacía (cuando se utilicen los dos canales de velocidad, la mitad TCH/H se utilizará para la señalización del segundo canal).

Actualmente, la trama 25 se utiliza para monitorizar los demás canales, ya que en GSM es el terminal el que se encarga de medir el nivel de señal de otros EB.

En **modo no dedicado**, la estructura se repite cada 51 tramas. Recordemos que se utiliza la ranura 0. A continuación se representa la ranura 0 de una multi-trama de 51 tramas:

- Sentido de base a móvil

Observamos en la siguiente figura que, cuando el móvil escucha un FCCH, sabe que una trama después recibirá el SCH.

Organización de los canales en modo no dedicado y sentido de base a móvil

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 a 19	...	40	41	42 a 49	50
FCCH	SCH	BCCH	BCCH	BCCH	BCCH	PAGCH	PAGCH	PAGCH	PAGCH	FCCH	SCH	PAGCH	...	FCCH	SCH	PAGCH	vacío

Así, en la ranura 0 de la trama 0 tenemos el FCCH; en la ranura 0 de la trama 1 tenemos el SCH, etc.

- Sentido de móvil a base

En este sentido, en la figura siguiente observamos que el canal RACH está en todas las ranuras 0, sea cual sea la trama.

Organización de los canales en el modo no dedicado y sentido de móvil a base

0	1	2	...	51
RACH	RACH	RACH	...	RACH

La figura anterior nos dice que en la ranura 0 de las tramas 0 a 51 tenemos el canal RACH.

Cada EB debe tener, como mínimo, un canal de control (subida + bajada), y siempre estará en la ranura 0. Por ejemplo, si una EB trabaja con seis portadoras (dobles), podría llevar  $6 \cdot 8 = 48$  conversaciones, pero como un canal es de control, en total podremos tener 47 conversaciones. Es normal que las estaciones base dispongan de hasta 24 portadoras y que destinen un canal de control por cada tres portadoras.

Estructura de tramas

A continuación se muestra cómo se estructuran las tramas en GSM. La hipertrama es necesaria para garantizar un cifrado seguro.

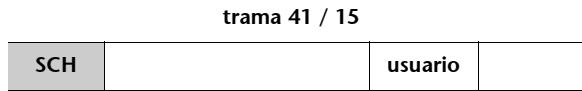
Una **ranura** dura 15 / 26 ms. Con ocho ranuras se forma una **trama**. En estas ranuras hay información de usuario (en la ranura 0 puede ser que no haya información de usuario, pero sí información de control).

Con 51 tramas se construye la **multitrama de 51**. Se define así porque, si en la ranura 0 hay información de control, cada 51 tramas se repite la funcionalidad de la ranura 0. Con 26 tramas se construye la **multitrama de 26**. Se define así porque, cuando en una ranura hay información de usuario, cada 26 tramas se repite la funcionalidad de aquella ranura.

Con 51 multitramas de 26 o con 26 multitramas de 51 se construye la **supertrama**. Con 2.048 supertramas se forma la **hipertrama**, que dura 3 h 28' 53" 760 ms.

La ranura SCH es la que le permite al terminal saber en qué punto de la hipertrama se encuentra. En la figura siguiente tenemos un ejemplo.

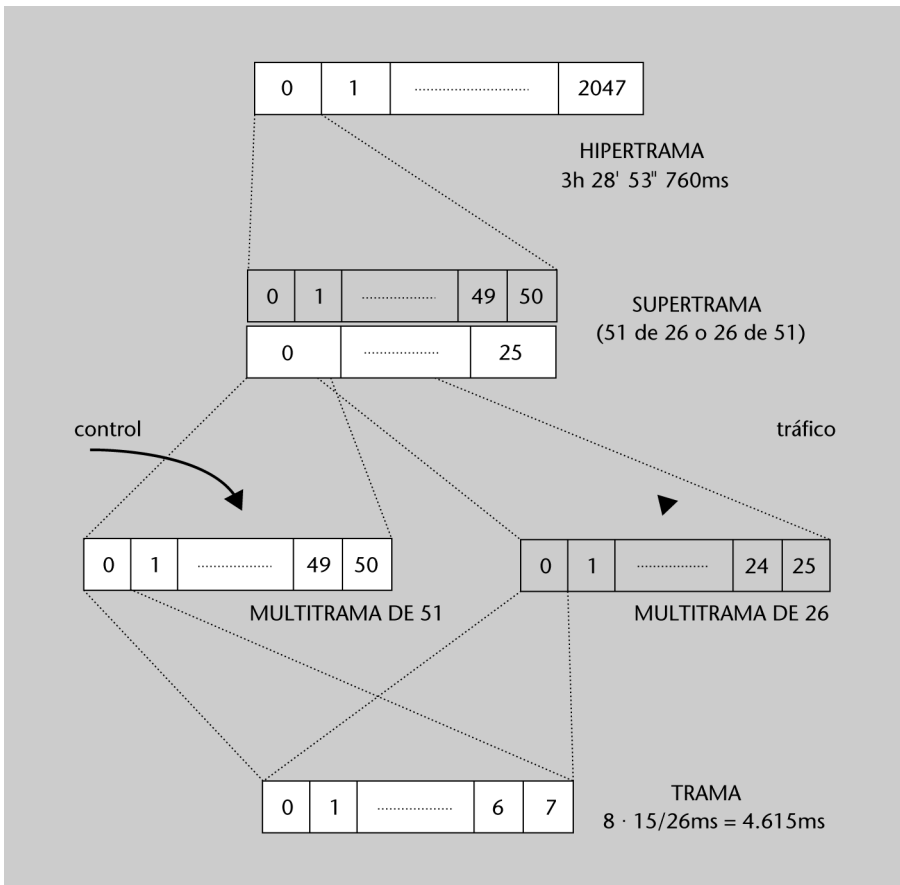
Ejemplo



Recordemos que el SCH nos decía el número de trama en 19 bits. 11 bits son para el número de supertrama (de 0 a 2.047), 5 para el número de multitrama (de 0 a 25) y 3 para la década de la trama en la multitrama de 51 (de 0 a 4) (sabemos que el SCH está en una trama acabada en 1). En este caso nos dirá que pertenece a la supertrama núm. 0, en la multitrama de 51 núm. 0 y en la década de trama núm. 4. No hace falta que nos diga que es la trama 41, porque el SCH siempre está en tramas que finalizan en 1.

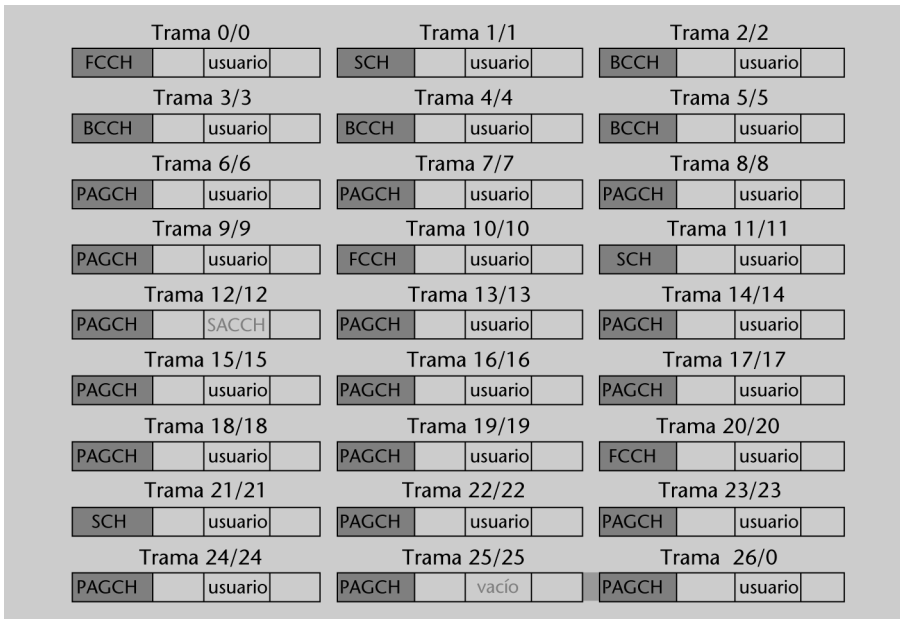
En la figura siguiente podemos ver toda la estructura.

Estructura de tramas



En la figura siguiente vemos el contenido de una trama en la que hay información de control en la ranura 0 y tráfico en una de las otras ranuras. Se puede apreciar cómo en la ranura de tráfico sólo hay datos de usuario y el SACCH, mientras que en la ranura de control tenemos FCCH, SCH, BCCH y PAGCH. El gráfico se corresponde con la portadora de base a móvil. La portadora de móvil a base sería idéntica por lo que respecta a las ranuras de tráfico; en cambio, en las ranuras de control siempre estaría el RACCH.

Ejemplo



Ráfaga de tráfico

A la información que ponemos dentro de una ranura la llamamos *ráfaga*. En la figura siguiente tenemos la composición (en bits) de la ráfaga de tráfico.

Ráfaga de tráfico

3	58	26	58	3
"0"	Bits de usuario	Secuencia de entrenamiento	Bits de usuario	"0"

La secuencia de entrenamiento la utiliza el ecualizador de la siguiente manera: primero guarda los 58 bits iniciales; después entrena con los 26 bits y recibe los otros 58 bits. Finalmente, pasa los primeros 58 bits por el ecualizador. El proceso de entrenamiento sirve para que el ecualizador conozca cómo se está comportando el medio aire en aquel momento. El receptor sabe cuál es la secuencia que debe recibir durante el entrenamiento (*training sequence code*). Hay ocho posibles TSC, y la base le dice al móvil cuál utilizará.

Los bits de usuario tienen la disposición de la figura siguiente:

Disposición de los bits de usuario



El bit aislado indica si los 57 bits de al lado son de tráfico o de señalización de alta velocidad (FACCH). Hay un bit por cada bloque de 57 porque, cuando se "roba" el canal, no hace falta hacerlo durante toda una ráfaga.

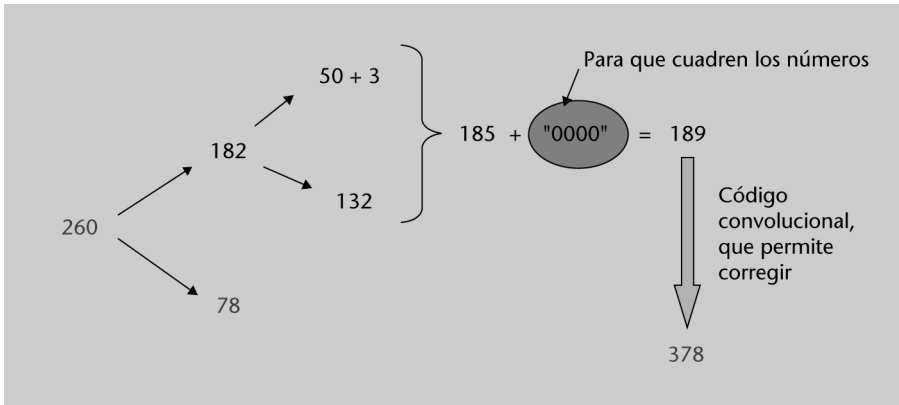
Los terminales GSM...

... disponen de un ecualizador (ver la figura "Estación móvil" en el apartado 1.2.2) que se adapta a las condiciones del canal en cada momento. Así, cuando sabe que debe recibir la secuencia de entrenamiento, aprovecha para estimar el estado del canal. Esta estimación la usa cuando llegan datos de usuario, que desconoce *a priori*.

Con respecto a los bits de voz, el GSM utiliza una compresión llamada RPE-LTP (*regular pulse excitation long term prediction*). Cada 20 ms de voz generará 260 bit. Los 1.280 bits correspondientes a 20 ms de voz en 64 kbps se convierten en 260 bits (en 13 kbps).

De estos 260 bits, no todos son igual de sensibles a los errores. La RPE-LTP clasifica los bits en tres grupos: 50 bits muy críticos (a los cuales añade 3 bits de redundancia) llamados de tipo Ia, 132 bits intermedios de tipo Ib y 78 bits poco críticos de tipo II.

Codificación de los bits de usuario



Según la figura anterior, los 260 bits se transforman en  $78 + 378 = 456$  bits. Observemos que 20 ms de voz los colocaremos en cuatro ranuras ( $114 \times 4$ ).

Una multitrama de 26 (26 tramas) tiene 24 ranuras disponibles para un usuario. Por lo tanto, en 24 ranuras llevaremos  $20 \text{ ms} \cdot 6 = 120 \text{ ms}$  de voz. Esta multitrama dura  $8 \cdot (15/26) \cdot 26 = 120 \text{ ms}$ . Por lo tanto, en 120 ms de trama transportamos 120 ms de voz.

Los 3 bits de redundancia en los 50 bits más críticos se ponen para ver en recepción si alguno de los 50 bits es erróneo (eso se hace viendo si los 50 bits generan estos 3 bits de redundancia). Si hay error, se silencia la voz.

### 1.2.5. Acceso

Aquí hablaremos del canal RACH. Los móviles utilizan este canal cuando quieren acceder al sistema GSM.

Interesa que la ráfaga de acceso coincida con la ranura. Pero eso no siempre es posible, ya que, si tenemos dos móviles y el uno está cerca y el otro lejos de la EB, a uno de ellos lo tendremos que enviar con más potencia y al otro con menos. El inconveniente es que los amplificadores no son instantáneos, y tendríamos un retardo. Nuestro objetivo es que las ranuras de los terminales no se solapen cuando llegan a la EB.

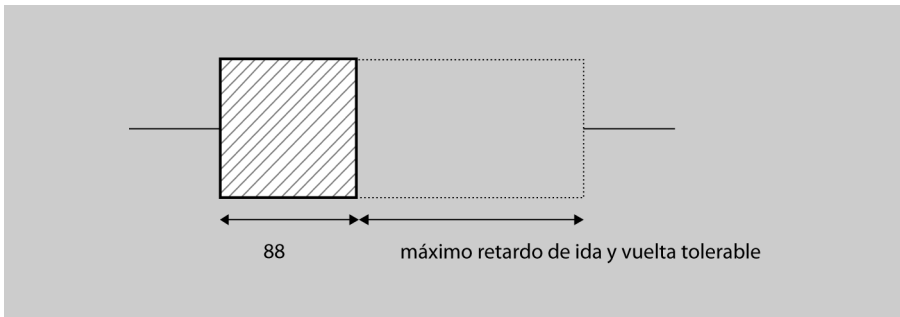
Tampoco nos podemos fiar del nivel que recibimos de la EB para saber si estamos lejos o cerca de la EB, ya que puede ser que la base emita fuerte porque haya algún obstáculo.

Lo que se hace es enviar una ráfaga de acceso pequeña, que ocupe una pequeña parte de la ranura (88 bits). Lo vemos en la figura siguiente.

#### Codificadores

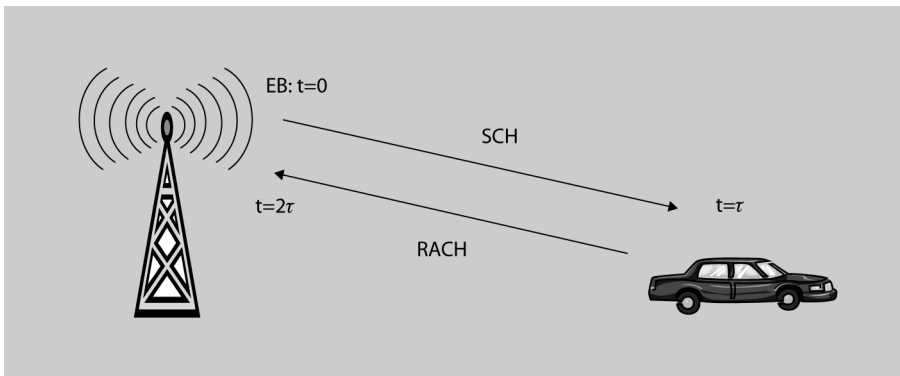
La RPE-LTP es un codificador simple que comprime 20 ms de voz en 260 bits. Hay otros codificadores mejores: VSELP, que comprime 20 ms de voz en 112 bits, y ACELP, que comprime 20 ms de voz en 244 bits.

## Ráfaga de acceso



La EB tiene el origen de tiempo. Lo envía al móvil y le llega retrasado el tiempo de ida. El móvil lo devuelve y, cuando llega a la EB, el retardo ya es la suma de los tiempos de ida y vuelta (ver la figura siguiente).

## Retardos entre la base y el móvil



Con esta ráfaga, la base puede calcular el tiempo que el móvil tendrá que avanzar su origen de tiempo para que las ráfagas de tráfico encajen. Este tiempo que la base suministra al móvil se llama *time advance*.

Hemos visto que una ranura dura  $15/26$  ms y que en este tiempo se pueden transmitir 148 bits (ver la ráfaga de tráfico). En realidad, en ese tiempo se transmiten 156,25 bits (la diferencia es un espacio de guarda al inicio y al final de la ranura). Por lo tanto, el máximo retardo de ida y vuelta es el tiempo correspondiente a  $156,25 - 88 = 68,25$  bits.

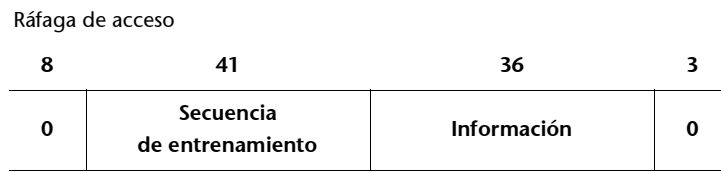
Estableciendo proporcionalidades, si 156,25 bits corresponden a  $15/25$  ms, entonces 68,25 bits corresponden a  $252 \mu\text{s}$ . Es decir, en este tiempo la onda debe salir de la estación, llegar al móvil y volver a la estación. Aplicando la expresión  $e = v \cdot t$ , donde  $e$  es el espacio,  $v$  la velocidad y  $t$  el tiempo, la distancia máxima entre la estación y el móvil es de 37,8 km.

Ésta es la limitación por la cual, en general, el radio de las celdas está limitado a unos 35 km.

El *time advance* es un número de 6 bits que indica el número de bits de retardo que el móvil debe aplicar (entre 0 y 63 bits).



En la figura siguiente vemos cómo es la ráfaga de acceso:



La secuencia de entrenamiento se pone al comienzo porque la ráfaga no es tan larga como lo era la de tráfico. La información son 8 bits de usuario y 28 de protección. De los 8 bits de usuario, 3 dan el motivo del acceso y 5 son un número aleatorio generado por el terminal. Los motivos de acceso pueden ser una localización, la respuesta a un *paging*, una llamada de emergencia y una petición de usuario. Obviamente, no todos los motivos son tratados con la misma prioridad.

### Proceso para acceder

- 1) El móvil envía la ráfaga de acceso por el RACH.
- 2) La EB contesta por el canal PAGCH (recordemos que este canal sirve para hacer un *paging* o confirmar un acceso). La información que devuelve es:

- número aleatorio (el que le ha enviado el móvil por el RACH)
- canal asignado (portadora y ranura)
- potencia a la que debemos transmitir
- *time advance* (para que las ráfagas de tráfico encajen en la ranura)

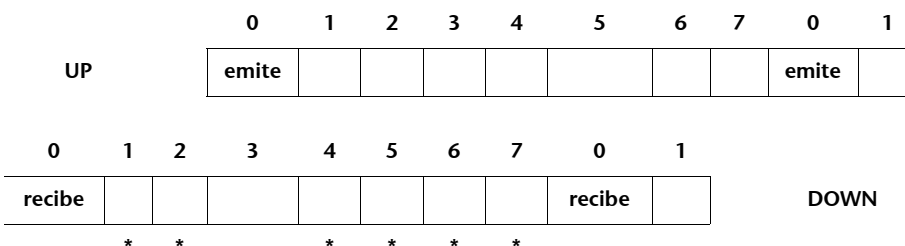
La utilidad del número aleatorio es identificar el terminal al que quiere acceder. Como el IMSI no cabe en 5 bits, se envía un número aleatorio.

- 3) Por el canal de tráfico, el móvil envía un mensaje inicial, en el que hay:
  - revisión del estándar que el móvil es capaz de entender
  - potencia del terminal (máxima)
  - capacidad de mensajes cortos (tipo de visualizador...)

### 1.2.6. Funcionamiento en llamada

Se utilizan dos frecuencias. Transmitir y recibir en la misma ranura de cada banda no sería fiable a causa del duplexor. Haremos que en la banda de emisión y recepción estén decaladas tres ranuras (figura siguiente). Así, el duplexor se podrá sustituir por un interruptor, ya que las dos ranuras en el medio le dan tiempo para conmutar.

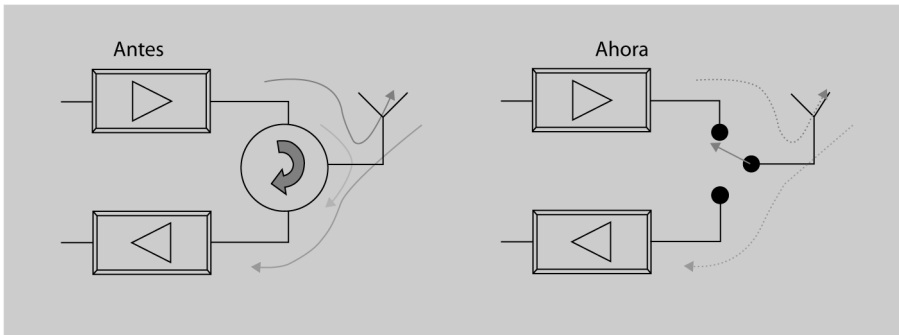
Decalaje de tres ranuras



\*: durante este tiempo, monitoriza las seis bases adyacentes.

En la figura siguiente vemos las diferencias entre el duplexor y el conmutador.

Duplexor frente a conmutador



La estación base sí que necesitará el duplexor, ya que transmite y recibe al mismo tiempo.

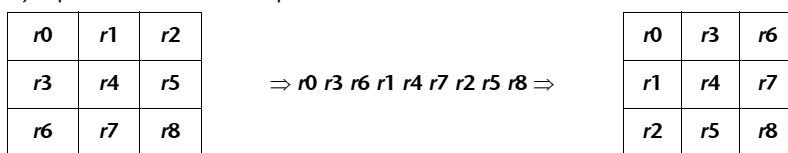
**Entrelazado**

Mientras que los códigos convolucionales corrigen errores aislados, el entrelazado permite romper ráfagas de errores. Hay dos tipos de entrelazado que se usan en GSM:

**1) Entrelazado temporal (*interleaving*)**

Introducimos la información en una matriz por filas y la leemos por columnas. El receptor hará el proceso inverso. En la figura siguiente se puede observar cómo en el canal no viajan bits consecutivos (en el ejemplo, el orden natural de los bits es  $r_0, r_1, \dots, r_8$ ):

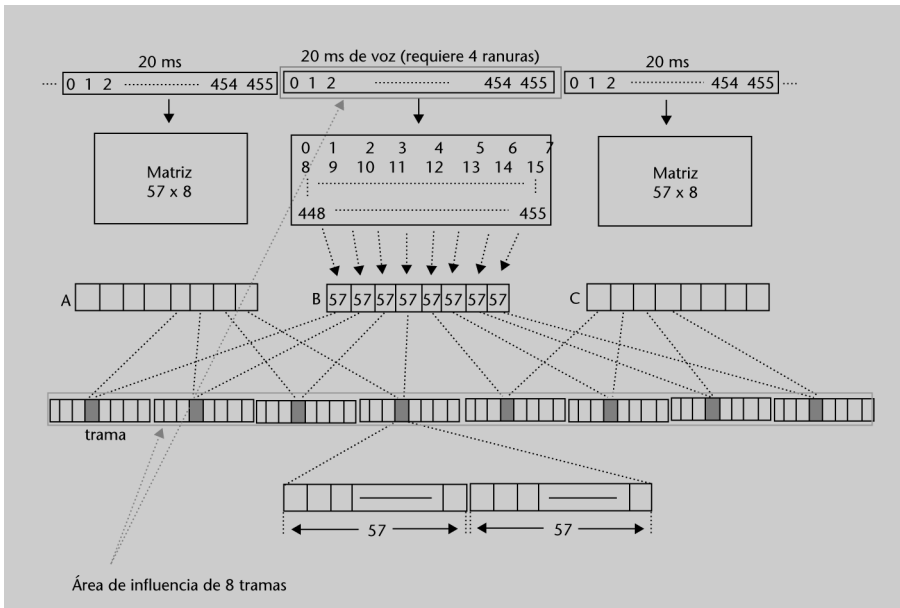
Ejemplo de entrelazado temporal



Si queremos proteger mucho, necesitaremos matrices grandes y eso provocará un retardo. Si el móvil está quieto, esta técnica no es útil, ya que, si hay un desvanecimiento en la posición del móvil, todos los bits serán erróneos.

En la figura siguiente tenemos el proceso de entrelazado temporal. En GSM, parte de bloques de 456 bits y utiliza una matriz de 57 filas y 8 columnas. Lo rellenamos por filas y se generan ocho subbloques de 57 bits cada uno (bits adyacentes están en diferentes subbloques). Estos bloques se colocarán en las ranuras tal como se ilustra en la siguiente figura. Debe destacarse que en una ranura de tráfico va la información de dos subbloques de 57 bits cada uno, pero estos subbloques no son del mismo bloque de 456 bits, sino que son 57 bits de un bloque y 57 bits del siguiente. Eso hace que el entrelazado de GSM sea muy potente.

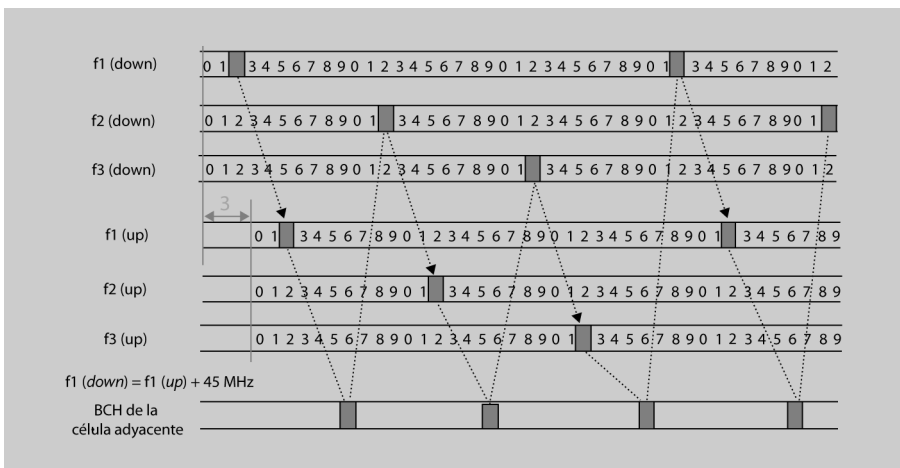
Entrelazado temporal



2) Entrelazado frecuencial (*frequency hopping*)

En este caso, tanto el modulador como el demodulador son de frecuencia variable, por lo cual vamos transmitiendo la información a diferentes frecuencias. Por ejemplo, una EB que tenga tres portadoras disponibles, dará los siguientes saltos (figura siguiente):

Entrelazado frecuencial



Observamos en el dibujo que el canal de control no da saltos, ya que los móviles de EB vecinas también lo van mirando para ver su nivel.

Aunque el móvil esté parado, este tipo de entrelazado es muy útil, ya que, si hay un desvanecimiento en un punto a una frecuencia, tal vez no lo habrá a otra.

Transmisión discontinua (*DTX mode*)

Esta opción está disponible en la segunda fase de las especificaciones del GSM. De los 13 kbps se pasa a 500 bps durante los periodos de silencio, con lo cual se reduce el consumo del móvil.

Para hacerlo, utiliza el algoritmo VAD (*voice activity detector*). Si detecta inactividad durante cuatro ráfagas de 20 ms seguidas, utiliza estos 80 ms para calcular los parámetros del ruido de fondo y, mientras no detecte actividad los actualiza cada 480 ms. Eso se aplica en los dos sentidos. Como si hablamos no escuchamos y al revés, el modo DTX estará activo durante más del 50% del tiempo.

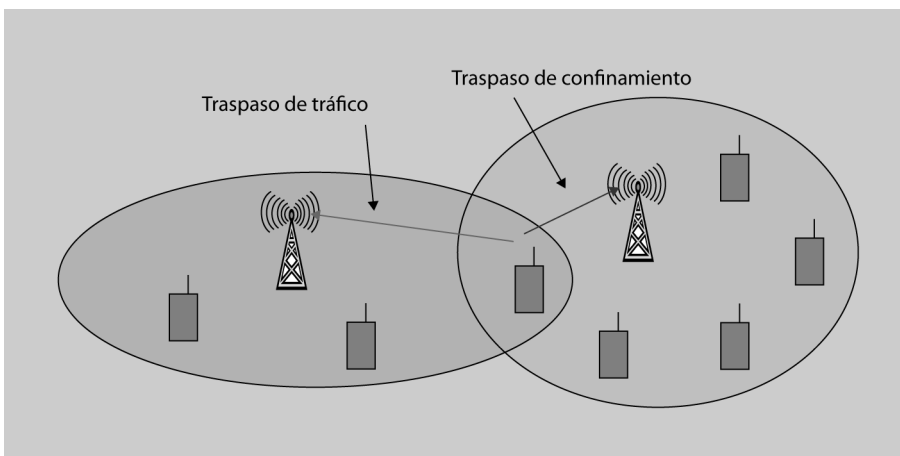
### 1.2.7. Traspaso

Hay tres causas por las cuales podemos hacer un traspaso:

- 1) traspaso de rescate: se hace por motivos de calidad, cuando ya hemos bajado por debajo de determinado nivel.
- 2) traspaso de confinamiento: hacemos un traspaso a la celda más cercana para reducir la potencia transmitida. Con ello:
  - ahorramos batería
  - reducimos las interferencias (tenemos más capacidad)
- 3) traspaso de tráfico: quita llamadas de celdas sobrecargadas. Así, reducimos la probabilidad de bloqueo.

Los dos últimos son complementarios, como vemos en la figura siguiente.

Traspaso de tráfico y de confinamiento



En la BSC hay un algoritmo de traspaso (cada operador tiene el suyo). Le llega información de la potencia que recibe el móvil, la calidad, la congestión de las celdas...

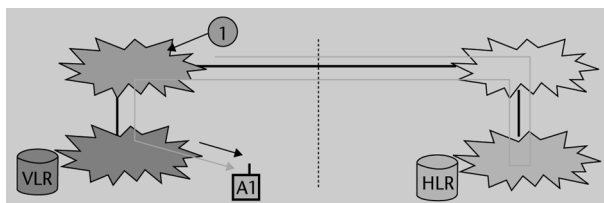
También hay celdas paraguas que sirven cuando hay móviles a alta velocidad que nos provocarían muchos traspasos.

### 1.2.8. Localización. Tarifación

La localización es el proceso por el cual un móvil informa de su posición. Cuando un terminal hace uso de la infraestructura de un operador al que no está abonado, se dice que hace itinerancia. Veamos dos ejemplos:

- **Caso 1:** un terminal A (de un operador A) se localiza en la red de un operador B. Como el operador B no tiene datos de él, mediante la señalización núm. 7 (paquetes) le pedirá datos al operador A. En la base de datos de A se indicará que este abonado estará en B (por si alguien lo busca).
- **Caso 2:** suponemos el entorno de la figura siguiente. Cuando un abonado fijo (1) quiere llamar a un móvil (A1), hay que conducirlo mediante el operador A, ya que la red fija no sabe que A1 ya estaba en su país. La HLR del operador A reenvía la llamada. Lo que sería una llamada local se convierte en dos internacionales. Hay una solución (operativa en la fase 2+) denominada *optimal routing*, que haría que se hiciera la consulta a la HLR del operador A pero la llamada se hiciera desde el origen hasta el VLR (sería una única llamada, pero el usuario móvil no sabría lo que le cobran, ya que es el precio de otro operador).

Ejemplo



La persona llamada paga el tramo debido a su desplazamiento (es lógico que quien se mueve pague por su movilidad). Además, quien llama no sabrá si el otro estaba cerca o lejos de casa, ya que no lo notará en el recibo.

Hay algunos operadores PCS1900 de América que, si estás en itinerancia, no cobran los primeros instantes de la llamada (por si fuera un error).

No debemos confundir localización y *paging*. Mientras que localización es el proceso por el cual un móvil informa de su posición, el *paging* es la búsqueda que hace la red en una determinada área de localización.

#### Tarifación

Más arriba se ha comentado que cuando un abonado está en itinerancia, si le llaman, tendrá que pagar la parte internacional de la llamada. Veamos algunos conceptos generales del proceso de tarifación en la red GSM.

Mientras que en telefonía fija la tarifación va orientada al abonado (se incrementa un contador de pasos), en GSM la tarifación va orientada a la llamada. Por cada llamada se genera un *toll ticket*, que es un registro que contiene to-

dos los datos que se utilizarán en el proceso de tarificación. Estos tiques se pasan al *billing center*, donde se generan las facturas por cada abonado en función del tipo de llamada, franja horaria, duración y tipo de contrato.

Hay diferentes tipos de *toll ticket*: cuando el móvil origina una llamada, cuando la llamada finaliza en un móvil, para el servicio de mensajes cortos, cuando se activa algún servicio suplementario del GSM, etc. Cuando se tiene que cobrar al abonado móvil, el *toll ticket* contiene la tarifa, mientras que en caso contrario no se incluye. Así, si la llamada va hacia un móvil, a éste no se le tiene que cobrar nada a menos que esté en itinerancia.

Cuando entra en una red un abonado que no pertenece a ella, el operador que deba cobrar enviará sus *toll tickets* al abonado principal, para que éste cobre al nuevo abonado. Hay dos maneras de hacerlo: a) enviando las facturas de manera periódica; b) mediante la Cámara de Compensación o **Clearing House**, organismo con el cual se ponen de acuerdo las operadoras interesadas y que actuará de intermediario entre todas ellas. Así, cada operador tendrá que pagar (o cobrar) una única cantidad en la Clearing House, y no lo tendrá que hacer por cada una de las operadoras con las que tenga acuerdos de itinerancia.

Los sistemas de prepago se basan en un sistema centralizado. Cuando llega una petición para hacer una llamada al sistema de llamadas:

- 1) El sistema de llamadas avisa al sistema de prepago.
- 2) El sistema de prepago pide información al *Billing Center* de cuál puede ser la duración máxima de la llamada, en función del crédito del abonado.
- 3) El sistema de llamadas autoriza la llamada (la encamina) o la deniega. En el primer caso, controla que la duración no exceda del límite.
- 4) Cuando ha finalizado la llamada, el sistema de llamadas pide al *Billing Center* los datos de ésta, y se actualiza el crédito.

## 2. Redes 2.5G

Los sistemas de primera generación evolucionaron a los de segunda (GSM). La evolución natural del GSM son los sistemas de tercera generación (3G), pero dados los retrasos en la implantación de la 3G aparecieron algunos estándares con prestaciones menores que la 3G y que se conocen como la *generación 2.5* (2.5G).

### 2.1. Introducción

GSM fue pensado para transmitir voz, aunque ofrece la posibilidad de transmitir datos de hasta 9.600 bps. Se desarrollaron tres sistemas que permitían obtener más velocidad aplicando algunas modificaciones a la red GSM. Estos sistemas son el HSCSD, GPRS y EDGE, y se consideran sistemas 2.5G.

#### HSCSD (*high speed circuit switched data*)

Es una transmisión de datos en modo circuito a alta velocidad. Se puede utilizar más de 1 intervalo de la trama TDMA (teóricamente hasta 8; en la práctica hasta 4). La velocidad puede llegar a 38,4 kbps (9,6 x 4) o bien 57,6 kbps (14,4 x 4).

Todos los canales deben tener las mismas secuencias de entrenamiento y *frequency hopping*.

Puede ser asimétrico (*uplink* y *downlink* con diferentes velocidades). Por ejemplo, un HSCSD de clase 2 es de la forma 2 + 1 [19,2 kbps + 9,6 kbps].

HSCSD nos permite garantizar la velocidad, ya que el usuario dispone de las ranuras para él solo. Pero hay muchos problemas:

- **Problemas para el usuario**

- Un terminal de, por ejemplo, dos ranuras, consume el doble de batería y paga las transmisiones al doble de precio.
- Con tres o más ranuras, hace falta un duplexor en el terminal.

- **Problemas para el operador**

- Dependiendo de la congestión de la célula, tenemos traspasos complejos, ya que necesitamos más de una ranura para hacer un trabajo (está el peligro de que no tengamos ranuras libres).

- El establecimiento es complicado. Eso hace que no siempre se nos asigne la capacidad solicitada.
- La facturación es compleja (en principio factura por tiempo, por lo cual se adapta a navegación continua y no a ráfagas –navegación–).
- Reduce los recursos por servicios de voz.
- Es poco reutilizable por UMTS.
- En España no lo soporta ningún operador. El GPRS ha influido en su poca aceptación.

### GPRS (*general packet radio service*)

Es una transmisión de datos en **modo paquete** en la interfaz de radio. La voz sigue yendo por circuitos y, por lo tanto, los paquetes se basan en el protocolo Internet (IP). En general, se definen para GPRS las ranuras sobrantes de GSM (lo cual va muy bien a los operadores, ya que pueden asignar más o menos recursos en la parte GPRS dependiendo de los recursos que está consumiendo la parte GSM). También se pueden definir ranuras de uso exclusivo GPRS, pero en general la telefonía siempre es prioritaria.

- Ventajas de la conmutación de paquetes con respecto a la de circuitos:
  - Varios usuarios podrán compartir un canal.
  - Podremos tener velocidades asimétricas.

### EDGE (*enhanced data rates for GSM evolution*)

Su principal objetivo es obtener velocidades de hasta 384 kbps [típicamente, 236 kbps de bajada y 177 kbps de subida] (aproximadamente, triplica la del GPRS). Además de este incremento de velocidad, también incrementa la capacidad del sistema, ya que en la misma ranura temporal podrá haber más usuarios.

Una operadora lo puede introducir con dos objetivos:

- Para mejorar el GSM (ECSD, *enhanced circuit-switched data*).
- Para mejorar el GPRS (EGPRS, *enhanced general packet radio service*). Ésta es la que ha tenido mejor aceptación.

Se puede entender como un paso intermedio entre GPRS y UMTS.

Requiere cambios en las estaciones base (BTS) y sus controladores (BSC), pero no afectan al núcleo de la red (MSC...). También se necesitan nuevos terminales (que son duales GSM, GSM/EDGE), ya que básicamente cambian características de la capa física: nuevas modulaciones y nuevos codificadores.

La mayoría de BTS/BSC GSM es compatible con GSM/EDGE.



En Estados Unidos también tienen sistemas 2.5G. En 1992 teníamos el IS-95 (sistema 2G). En 1995, al IS-95 se le mejoró el codificador de voz y dio lugar al IS-95a, que permite una velocidad de 14,4 kbps. El IS-95b permite unir ocho canales de 14,4 kbps, al estilo del HSCSD, y sigue utilizando conmutación de circuitos. El IS-95c (parecido al GPRS) utiliza conmutación de paquetes y permite hasta 144 kbps.

En este apartado describiremos el GPRS, que es, sin duda, el más popular de los sistemas 2.5G.

## 2.2. GPRS

Este sistema es útil para aplicaciones que requieren muchas transmisiones de pocos datos o pocas transmisiones de un volumen medio de datos. GPRS permite más velocidad que GSM. Eso es posible porque:

- Utiliza hasta cuatro esquemas diferentes de codificación, dependiendo de lo que permita el canal.

	Bits de datos en cada bloque de 456 bits	Bits de CRC	Velocidad por ranura (bruta)	Velocidad por ranura (neta)
CS1	184	40	9,05 kbps	8 kbps
CS2	272	16	13,4 kbps	12 kbps
CS3	320	16	15,6 kbps	14,4 kbps
CS4	440	16	21,4 kbps	20 kbps

Así, el modo CS4 sólo es posible en canales con una relación señal-ruido muy elevada, puesto que no tiene redundancias. En cambio, el modo CS1 tiene más redundancias de las que GSM aplicaba a la voz. Se considera que CS4 es aplicable si la relación señal-interferencia ( $C/I$ ) es superior a 16 dB; CS3 es aplicable si  $C/I > 10$  dB y CS2 si  $C/I > 6$  dB. Si  $C/I < 6$  dB sólo podemos optar al modo CS1. Es la red la que escoge el sistema de codificación. Cada radiobloque (456 bits) se puede transmitir con un modo diferente.

- Permite unir ranuras (hasta ocho ranuras teóricamente). Un terminal no puede usar ranuras de diferentes portadoras y las ranuras tienen que ser consecutivas. Por eso se empiezan a asignar las ranuras de voz a partir del 0 (y aumentando) y de GPRS a partir del 7 (y disminuyendo).

En el mejor de los casos (CS4, ocho ranuras) podríamos llegar a  $21,4 \cdot 8 = 171,2$  kbps de velocidad teórica.

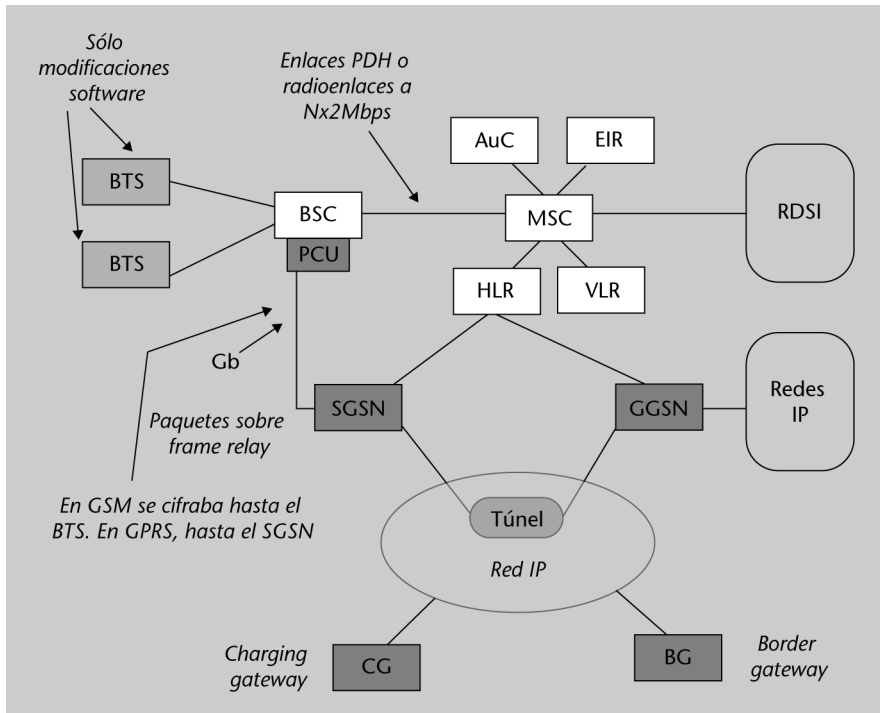
### 2.2.1. Arquitectura

Para disponer de GPRS sobre una arquitectura GSM, hay que añadir dos elementos:

- **SGSN** (nodos de soporte de servicio GPRS, *serving GPRS support node*), que encamina los datos entre el troncal GPRS y las EB. Todo terminal tendrá un SGSN que lo va siguiendo.
- **GGSN** (pasarela GPRS, *gateway GPRS support node*), que es una pasarela entre las redes externas y la red GPRS. Establece el proceso de *tunneling*.

Además, se añade un bloque **PCU** al **BSC**, que gestiona el uso de las ranuras para poder transmitir los paquetes. También se dispone de un elemento llamado **BG**, que conecta de manera segura la red GPRS con otras redes GPRS y del **CG**, que le facilita el trabajo al *billing system* de GSM. En la figura siguiente tenemos todos los elementos.

Arquitectura GPRS



- **Funciones del SGSN:**

- Gestionar la autenticación. Si tiene éxito, se hace el registro en la red GPRS y su gestión de movilidad.
- Recoger datos de facturación (los envía al CG) y estadísticas de tráfico.
- Enrutar los datos al GGSN adecuado.
- Hacer la búsqueda (*paging*) de los terminales (para que el móvil pase de un estado de reposo a un estado activo).

- **Funciones del GGSN:**

- Recoger datos de facturación (los envía al CG) y estadísticas de tráfico.
- Encaminar paquetes generados por el móvil.
- Cuando el GGSN recibe datos por un determinado usuario, mirar si la dirección está activa. Si lo está, el GGSN da los datos al SGSN que sigue el móvil. Si no, se descartan (antes, procura activarlo).
- Proporcionar direcciones IP a los terminales GPRS cuando se emplea direccionamiento dinámico.

Hay tres tipos de terminales:

- **Clase A** (los más sofisticados): uso simultáneo de GSM y GPRS.

- **Clase B** (los más habituales): el terminal está registrado en los dos servicios, pero cuando uno de ellos está activo, el otro queda en suspenso y se prioriza la voz (si hablamos, las comunicaciones de datos están suspendidas).
- **Clase C**: tenemos que escoger manualmente GSM o GPRS (típico de los módems GPRS).

También pueden clasificarse los terminales en función del número de ranuras que pueden utilizar y cómo las distribuyen para las comunicaciones de base a móvil o de móvil a base:

clase	down	up	max
1	1	1	2
2	2	1	3
3	2	2	3
4	3	1	4
5	2	2	4
6	3	2	4

clase	down	up	max
7	3	3	4
8	4	1	5
9	3	2	5
10	4	2	5
11	4	3	5
12	4	4	5

Así, un terminal de clase 6 puede destinar hasta tres ranuras para las comunicaciones *down* (de base a móvil) y hasta dos ranuras para las *up* (de móvil a base) pero simultáneamente no puede utilizar más de cuatro.

### Ejemplo

Un terminal clase 8 (también llamado 4 + 1) puede emplear cuatro ranuras para recibir. Si el esquema de codificación es el CS2, puede recibir a  $13,4 \cdot 4 = 53,6$  kbps teóricos (frente a los 9,6 kbps de GSM).

Se tarifa por cantidad de información transmitida y recibida (no por tiempo de conexión), cosa que permite al usuario estar siempre conectado. Se habilitan mecanismos de aceptación de información (ya hemos dicho que también nos facturan por la información recibida).

### 2.2.2. Contexto PDP

El contexto PDP (*packet data protocol*) contiene la información para que un móvil pueda enviar o recibir datos mediante GPRS. Siempre es el móvil el que solicita la activación de un contexto PDP, que consta de lo siguiente:

- *PDP address*: dirección IP (que se ha asignado al terminal).
- *PDP type*: tipo de contexto (X25, IPv4, IPv6...).
- *QoS profile*: calidad de la conexión negociada (extremo a extremo). Hay cinco parámetros que definen la QoS:
  - Prioridad: hay tres clases (tres niveles) de prioridad.
  - Fiabilidad (probabilidad de pérdida, duplicación... de paquetes): tres clases.
  - Retardo (hay cuatro colas entre BSS y SGSN): cuatro clases (colas).

- Caudal máximo: 9 clases.
  - Caudal medio: 19 clases.
- Además, dependiendo de si este contexto lo utiliza el móvil, el SGSN o el GGSN, todavía hay otro parámetro:
    - *GGSN address* y TID: indica la dirección del GGSN y el identificador del túnel. Lo utilizan el SGSN y el móvil.
    - *SGSN address* y TID: indica la dirección del SGSN y el identificador del túnel. Lo utiliza el GGSN.

#### Túnel

El túnel es el camino que se establece entre el SGSN y el GGSN dentro de la red IP.

El APN (*access point name*) es un parámetro enviado desde el terminal al activar un contexto PDP o es escogido por el SGSN en el mismo proceso. Es una referencia del nodo GGSN que se ha de utilizar. El APN, o punto de salida, tiene dos partes:

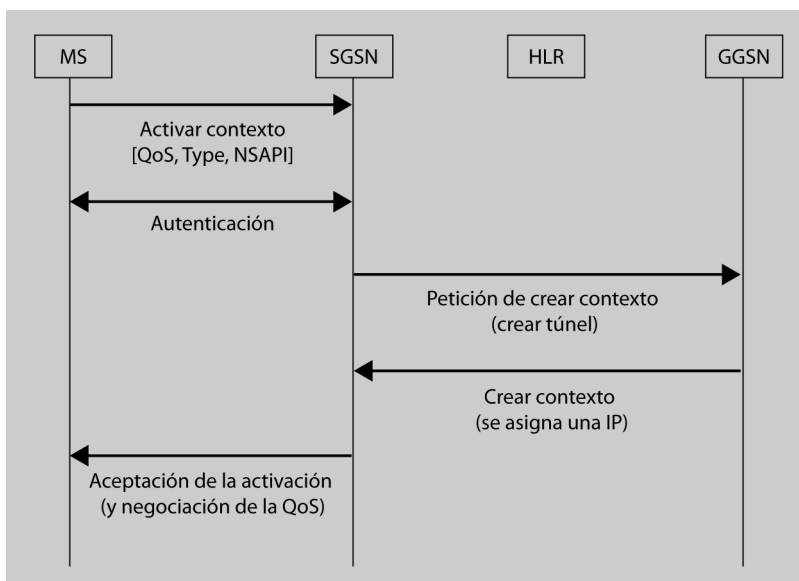
- *APN network identifier*: Es obligatorio. Es habitual asignar los mismos nombres que dominios de Internet (p. ej., apn1.uoc.edu).
- *APN operator identifier*: Opcional, identifica el operador al que estamos suscritos. Finaliza en gprs (p. ej., MNC01.MCC214.gprs).

Los DNS permiten convertir los APN (nombre de máquina) a direcciones IP.

Para que un terminal móvil pueda hacer un intercambio de datos con otro equipo, es imprescindible activar el contexto PDP con el GGSN correspondiente. Los GGSN deben tener funcionalidades de cortafuego *–firewall–* para evitar recibir paquetes no deseados. El usuario puede decir qué tipo de paquetes y de qué direcciones quiere recibir.

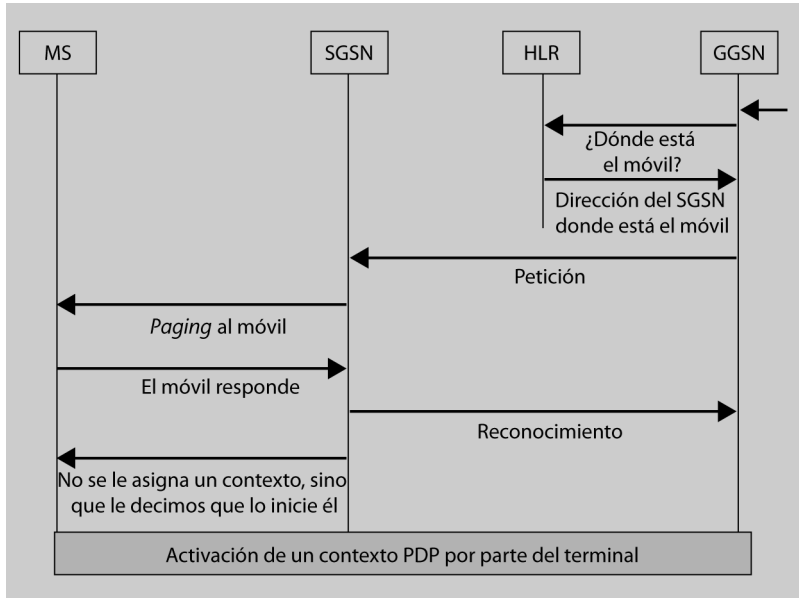
La activación de un contexto PDP por parte del terminal (figura siguiente) se inicia con la petición de activación que el terminal hace al SGSN. Una vez autenticado el usuario, el SGSN pide un túnel al GGSN, quien le asigna una IP. Finalmente, el SGSN confirma la activación al terminal y negocian la QoS.

Contexto PDP activado por un terminal



Si es la red la que quiere activar un contexto PDP (figura siguiente), el GGSN consulta en las bases de datos dónde está el usuario que buscamos y pide al SGSN que haga un *paging*. Una vez que el terminal ha sido localizado, se le pide que sea él quien inicie la activación del contexto PDP.

Contexto PDP activado por la red



### 2.2.3. Gestión de la movilidad

El SGSN es el elemento encargado de esta gestión. La información del contexto de movilidad reside en este elemento. Un contexto de movilidad consta de lo siguiente:

- IMSI.
- *Routing area*: nos dice en qué grupo de celdas está el terminal.
- *Cell ID*: nos dice en qué celda está el terminal.
- *MM state*: hay tres estados de movilidad:
  - *idle*: desocupado/inactivo.
  - *ready*: preparado/activo. Está actualizado el *cell ID*.
  - *standby*: espera/reposo. Sólo está actualizada la *routing area*.
- TLLI (*temporary logical link identity*) + NSAPI (*network layer service access point identifier*). Nos permite identificar perfectamente la aplicación y el usuario.
  - TLLI: identidad del móvil (32 bits), diferente para los móviles bajo un SGSN.
  - NSAPI: podríamos tener dos aplicaciones diferentes (p. ej., sobre X25 y IP), cada una con un NSAPI diferente.
- También consta de los diferentes contextos PDP. Por eso no puede haber contextos PDP si no estamos activos en cuanto a movilidad.

Para actualizar el túnel debido al movimiento del terminal (figura siguiente), hace falta una coordinación entre los SGSN implicados. El identificador del túnel lo crea el SGSN y lo envía al GGSN. El TID también se utiliza para enviar datos de un SGSN a otro después de una actualización de la *routing area*.

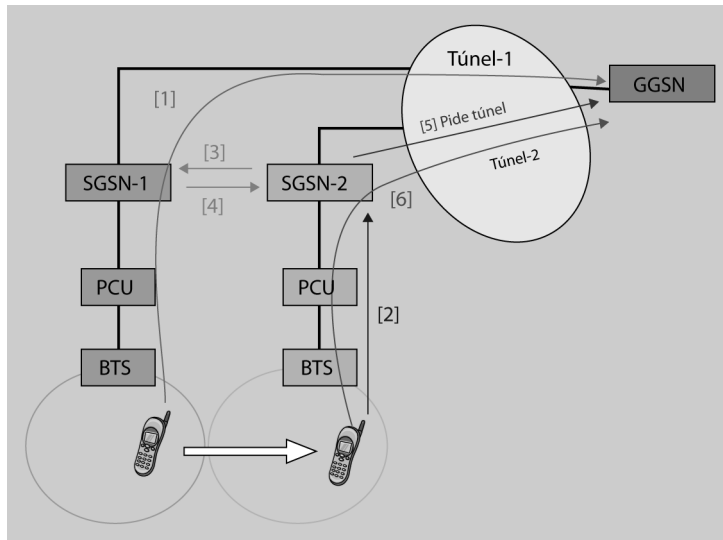
#### Un móvil está siempre...

... en una determinada célula, que tiene un *cell ID* propio. Pero para evitar actualizar la base de datos cada vez que se cambia de célula, lo que se hace cuando el móvil está en reposo es conocer sólo en qué grupo de células se encuentra (y si alguien lo busca, el *paging* se hará en todas las células de este grupo).

#### Observación

El identificador del túnel contiene el IMSI y el NSAPI.

## Actualización de un túnel



### 2.2.4. Funciones de la PCU

La PCU es la unidad que está en el BSC y que discrimina si las informaciones tienen que ir por la red GSM o por la red GPRS.

Si los datos van hacia el terminal, la red parte los paquetes en radiobloques y la PCU decide cuándo los envía a cada terminal (al ser asimétrico, subida y bajada se tratan de forma separada). Hay un identificador de flujo (*temporary flow identity*, TFI, 5 bits) que asigna la red para que cada terminal sepa cuál es su información. Este TFI se incluye en los paquetes para permitir una repetición selectiva.

Si los datos se generan en el terminal, el terminal pide capacidad, la red confirma la petición, el terminal explicita los recursos solicitados, sus capacidades, el TLLI y el número de bytes y finalmente se asigna la capacidad.

Una vez que la red ha asignado la capacidad, surge un problema. En el *downlink* no había ningún problema porque la PCU tenía toda la información, pero ahora, ¿cómo sabe el terminal en qué momento puede transmitir? Para solucionarlo, en las negociaciones de solicitud de capacidad, el usuario recibe un USF (*uplink state flag*, 3 bits), único en aquella célula.

Cada radiobloque *downlink* lleva un USF que indica que el usuario con aquel USF podrá utilizar el siguiente radiobloque *uplink*. Si USF = FREE, el siguiente radiobloque *uplink* está destinado al acceso (P-RACH).

En un radiobloque *downlink* la red nos dice:

- Para quién es aquel radiobloque *downlink* (TFI). Máximo: 32 TFI.
- Quién podrá transmitir en el siguiente radiobloque *uplink* (USF). Máximo: 8 USF.

Observamos que disponemos de dos prestaciones que GSM no tenía:

- 1) posibilidad de definir calidades de servicio
- 2) asimetría en el envío/recepción de datos

### 2.3. Servicios sobre GSM/GPRS

Sobre GSM y GPRS podemos tener varios servicios, además del servicio de voz:

- **Servicio de datos:** velocidades de hasta 9.600 bps (en el caso de GSM), aunque puede variar si entre los dos extremos establecemos protocolos de corrección de errores y/o de compresión.
- **Servicio de mensajes cortos (SMS, *short message service*):** puede ser punto a punto (hasta 160 caracteres, con la posibilidad de enviar mensajes más largos encadenando varios SMS), pero también puede ser punto a multi-punto (por ejemplo, una autopista que envíe mensajes con el estado del tráfico a los móviles que están circulando por una determinada zona conflictiva). Más adelante, en este mismo apartado, hablaremos de los SMS.
- **Datáfono:** servicio dirigido a empresarios que no tienen a su alcance una línea telefónica fija y que necesitan disponer de la posibilidad de cobrar con tarjeta de crédito.
- **Servicios de posicionamiento:** como la red GSM sabe en qué estación base estamos y las operadoras saben las coordenadas de las estaciones base, hay servicios que aprovechan esta información para poder localizar el terminal. Más adelante, en este mismo apartado, hablaremos de estos servicios.
- **Pago por móvil:** son sistemas en los cuales escribimos el número de móvil en el terminal punto de venta –TPV– en lugar del número de la tarjeta. El número de móvil recibe un mensaje en el que se pide autorización.
- **Otros:** correo electrónico, servicio de fax, acceso a Internet, telemedicina, etc.

#### 2.3.1. Servicios de mensajes

Desde que en diciembre de 1992 se envió el primer SMS, han surgido necesidades de transmitir algo más que texto. Veamos a continuación las ventajas e inconvenientes del SMS y de los sistemas emergentes:

##### SMS (*short message service*)

La utilidad del SMS es enviar (y recibir) mensajes de **texto**.

##### El primer SMS...

... se utilizó para felicitar la Navidad.

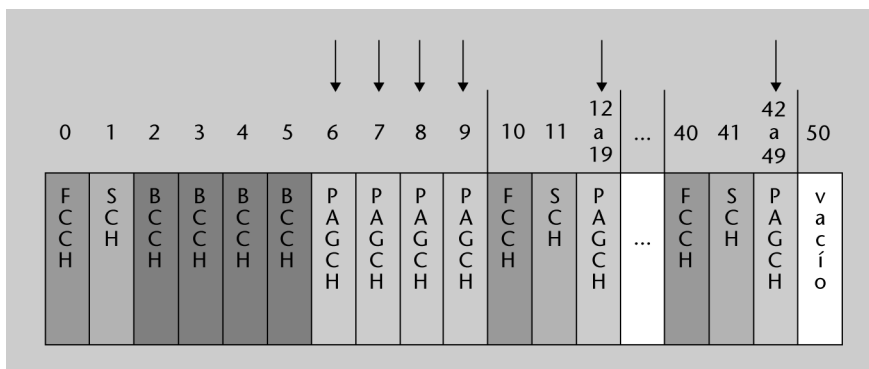
### a) Las ventajas son:

- Los mensajes van a un *SMS center*, que los guarda por si el destino no está disponible. Cuando lo está, se le hace llegar (sistema *store and forward*).
- Dado que **guarda todos los mensajes**, el sistema puede confirmar si la entrega se ha realizado o no.

### b) Los inconvenientes son:

- Sería más óptimo que el sistema fuera *store and forward* sólo cuando el destino no está disponible, y que en el resto de los casos fuera sólo *forward*.
- Por limitaciones de los canales de señalización de la red GSM (que es por donde van los SMS), no pueden tener más de 140 bytes (son 160 caracteres españoles a 7 bits/carácter –o 70 japoneses a 16 b/c–).
- En los **canales de señalización** van las señalizaciones GSM y los SMS, por lo cual podemos tener sobrecarga:
  - Cuando hay una conversación activa, los SMS van en la señalización lenta (SACCH) asociada a la conversación (multitrama de 26).
  - Cuando no hay una conversación activa, los SMS van en la multitrama de 51 (figura siguiente), que sustituye canales PAGCH. En este caso los SMS se transmiten más rápido que cuando hay conversación activa.

Multitrama de 51



### EMS (*enhanced messaging service*)

La utilidad del EMS es enviar (y recibir) mensajes con texto que tiene formato (negrita, centrado, subrayado...), dibujos (en blanco y negro y de dimensiones reducidas –máximo de 96 x 64 píxeles–), sonidos (hay estándares sobre cómo definir estos sonidos) y animaciones básicas (tamaño máximo de 16 x 16 píxeles).

Forma parte de la especificación 3GPP (UMTS). Con respecto al operador, se comporta como **varios SMS encadenados** (una melodía o un logo no siempre



caben en un mensaje). A causa de sus propiedades multimedia, los distintos fabricantes (Nokia...) tienen protocolos propietario exclusivos para sus terminales.

### MMS (*multimedia messaging service*)

Además de todo lo que permitía EMS –y sin tantas restricciones–, también permite enviar (y recibir) **vídeo**.

MMS introduce **nuevos elementos** en la infraestructura de red. Los terminales tendrán que ser nuevos (MMS no es compatible con terminales anteriores). Uno de los nuevos elementos es una base de datos que guarda el perfil de los usuarios (tipos de mensajes que quiere bajar instantáneamente...).

#### El primer terminal MMS...

... estuvo disponible en el año 2000, pero no fue hasta finales del 2002 cuando los terminales MMS fueron masivos.

Aunque está pensado para redes 3G, es aplicable a GPRS. Como estas redes son de gran capacidad, eso permite que los mensajes no vayan por canales de señalización sino por **canales de tráfico**.

El principal atractivo para las operadoras es que un MMS se factura a un precio unas cuatro veces superior a un SMS. El tamaño máximo del mensaje depende del terminal pero también de la operadora. Con 30 kB tenemos suficiente para una foto, pero si queremos transmitir varias fotos o un pequeño vídeo podemos necesitar 100 kB o más.

El lenguaje de presentación de los mensajes es el SMIL (*synchronized multimedia integration language*), que está basado en XML. Sitúa los archivos de *media* en el orden en que queremos que aparezcan y los combina en un flujo. En la figura siguiente podemos ver uno de estos editores de MMS.

#### Editor de MMS



#### WEB

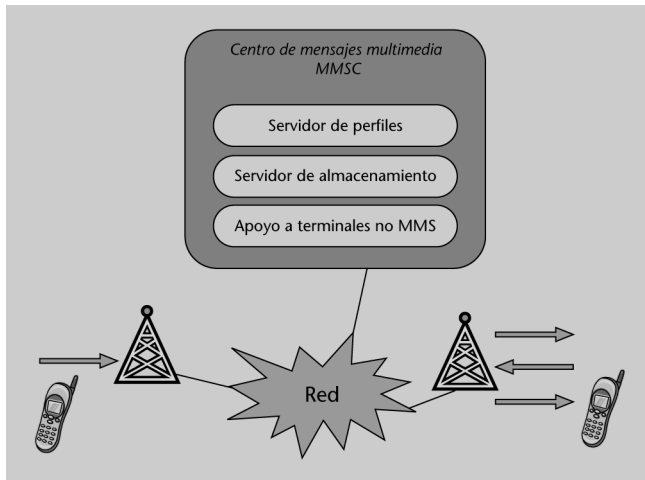
Se puede encontrar la versión SMIL 2.1 (diciembre del 2005) en [w3.org/TR/smil2](http://w3.org/TR/smil2).

La arquitectura básica se fundamenta en un centro de mensajes multimedia (figura siguiente):

**Observación**

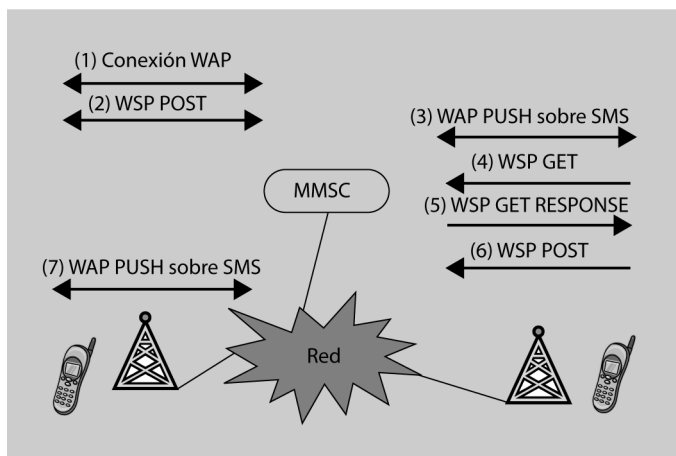
Wapforum, en el UAPROF (*user agent profile*), ha definido un vocabulario de capacidades de los dispositivos (CPU, tipo de navegador, tamaño de la pantalla...).

Centro de mensajes multimedia



Si se envía un MMS, éste irá al MMSC. Si el destinatario está disponible, se le envía un SMS que se lo notifica (le dice el número de origen y el tamaño). El receptor lo puede leer, eliminar... El emisor puede recibir una confirmación de entrega. Tenemos todo el proceso en la figura siguiente.

Envío de un MMS



El servidor de perfiles contiene las preferencias de los usuarios; el servidor de almacenamiento es donde se guardan los mensajes y el soporte a terminales no MMS es por si enviamos un MMS a un terminal que no puede leerlos. En este caso, al receptor le llega un SMS que le dice que puede ver el MMS en una determinada web.

Los mensajes cortos ofrecen muchas posibilidades para hacer negocios. Como ejemplo, en el 2004 en España se enviaron 52 millones de mensajes al día y las operadoras ingresaron 2.000 millones de euros por este concepto.

**Observación**

En la Nochevieja del 2006 en España se enviaron más de 100 millones de mensajes.

Una empresa que quiera hacer negocio con los mensajes puede conectarse mediante un W-ASP (*wireless application service provider*) o conectarse a la plataforma de mensajería de los operadores, donde se paga un coste de conexión, cuotas mensuales y el coste de los mensajes. Esta última opción sólo es factible

cuando la empresa piensa gestionar muchos mensajes. A continuación se enumeran algunos ejemplos de aplicaciones empresariales operativas:

- envío diario del resumen de ventas de una empresa a los directivos
- envío de un mapa con la posición de todos los camiones de una flota
- cámara detectora de movimiento que envía un MMS cuando se activa
- votaciones y concursos (uso habitual en las televisiones)
- recetas de cócteles
- envío de mapas solicitados previamente con un SMS

### 2.3.2. Servicios de posicionamiento

Veremos aquí algunas técnicas de posicionamiento basadas en GSM (sin la intervención directa de sistemas de posicionamiento como el GPS...). Son los llamados *LBS (location based services)*, que pueden detectar la posición de un móvil sin que éste tenga que llamar.

Los criterios más importantes para decidir entre técnicas basadas en GSM y en GPS son:

- Economía del receptor: un receptor GPS es más caro que un GSM.
- Cobertura: GPS no tiene cobertura en interiores.
- Resolución: GPS da más resolución.

#### COO (*cell of origin*) o *cell\_ID*

No requiere modificar ni los terminales ni la red. Es poco preciso en general (nos dice a qué antena estamos conectados). Tiene una precisión entre 80 y 500 m (ciudad) y 0,5 y 20 km (carretera). La precisión mejora si se utiliza el *time advance* (en un factor  $2^6$ ). Así, de 35 km de precisión podemos ir a 500 metros. Existe software que nos permite saber el *cell\_ID* y el TA.

#### Observación

Se utiliza para servicios de emergencia (protocolo POSIC-112) y en el 010 de los ayuntamientos que lo soliciten a las operadoras.

Quando llamamos al servicio 112, se traduce el número 112 al número completo del centro de emergencias de la zona donde está el usuario, se calcula la posición de quien llama y se envía al centro de emergencias.

#### AOA (*angle of arrival*) o DOA (*direction of arrival*)

Es como lo anterior pero en torres que disponen de antenas sectoriales. Al conocer la dirección en la que está el usuario, se puede tener aún más precisión.

#### E-CGI (*enhanced cell global identity*)

En GSM, el terminal dice cuál es el nivel de señal de la celda que está usando y el de las estaciones vecinas. Con estos niveles de señal, si estimamos las pérdidas de propagación (hace falta un modelo adecuado), podemos estimar la posición.

### 3. Redes 3G

En este apartado hablaremos de las redes de tercera generación. Aunque mencionaremos los distintos estándares existentes, nos centraremos en el estándar europeo UMTS.

#### 3.1. Panorámica de las redes 3G

Las características que se piden a los sistemas de tercera generación (llamados *IMT-2000* por la ITU) son:

- Alta densidad de usuarios.
- Igual calidad y coste que la red fija para voz.
- Teléfonos de bolsillo con varias prestaciones.
- Terminales de alta velocidad para servicios multimedia en tiempo real.
- Velocidades de hasta 2 Mbps.
- Integración de servicios en entornos cerrados y celulares en un solo equipo (por ejemplo, un terminal GSM/DECT único).
- Diseño flexible para permitir futuras ampliaciones.
- Acceso de usuarios y trasposos gestionados de manera eficiente.
- Facilidad de itinerancia entre operadores.
- Seguridad.
- Cobertura universal en tierra, mar y aire (uso de satélites, si se da el caso).

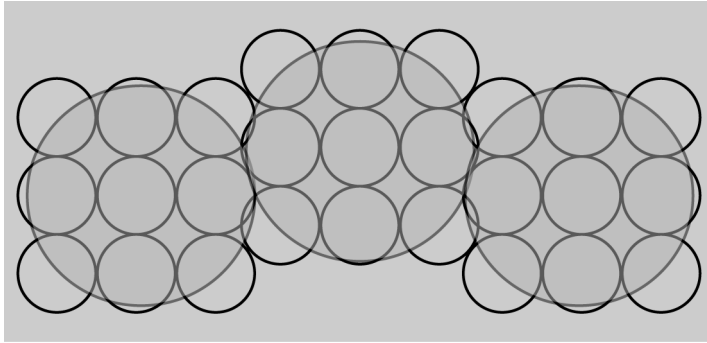
Algunos aspectos de estos nuevos sistemas son:

1) **Tipos de células:** estas células deben interconectarse y funcionar de forma coordinada.

- **Picocélulas:** se utilizarán en interiores (radio aproximado: 30 m). Cubrirán un pasillo o una sala grande. Habrá muchas, por lo cual será necesario definir unas buenas arquitecturas de interconexión.
- **Microcélulas:** se utilizan en autopistas o áreas densas de ciudad (radio aproximado: 1 km). Típicamente se ponen en las farolas o en los puentes. El uso de antenas direccionales hará que la señal no salga de su zona.
- **Macrocélulas:** radio menor a los 40 km. Sus dos principales aplicaciones son dar cobertura en áreas rurales o como célula paraguas en ciudades, como en la figura siguiente.

2) **Banda frecuencial:** en 1992 se acordó reservar, a partir del año 2000, las bandas frecuenciales 1.885-2.025 GHz y 2.110-2.200 GHz. En Estados Unidos eso no fue posible.

Tres células paraguas



3) **Control de potencia:** haremos que los móviles trabajen en la potencia justa que necesitan para asegurar que la probabilidad de error está dentro de unos límites. Así, los móviles próximos a la base emitirán con menos potencia.

4) **Asignación de canales:** dinámica, en función del tráfico. Pueden preverse más canales en caso de acontecimientos especiales.

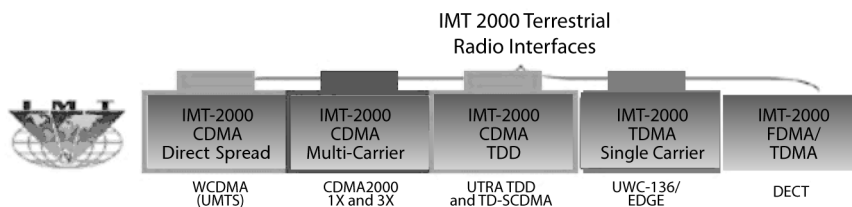
Actualmente, el IMT-2000 abarca tres estándares (figura siguiente):

1) **UMTS** (también 3GPP WCDMA): es la propuesta del ETSI para actualizar el GSM (y el PDC japonés). Define dos estándares: UMTS-FDD y UMTS-TDD. El grupo 3GPP está formado por el ETSI y otros organismos del resto del mundo.

2) **UWC-136** (*universal wireless communications*): es la propuesta de la TIA (Agencia de Telecomunicaciones de Estados Unidos) para actualizar el IS-136. De los tres estándares, es el menos importante.

3) **CDMA2000:** es la propuesta de la TIA para actualizar el IS-95a de manera que llegue a 2 Mbps. El grupo 3GPP2 está formado por la TIA y otros organismos del resto del mundo.

Estándares del IMT-2000



El estándar para Europa es UMTS, que lo veremos en el apartado 3.3. En Estados Unidos es el CDMA2000, cuyas principales características ya mencionamos (en el apartado 3.2 veremos su significado):

- Ancho de banda de 1,25 MHz. Tiene la misma canalización que el IS-95, por lo cual podremos utilizar bandas de IS-95 para CDMA2000. Los americanos querían aprovechar las bandas frecuenciales de que disponían.

- Velocidad de chip: 1,2288 M chips/segundo ( $x1$ ,  $x3$ ,  $x6$ ,  $x9$  o  $x12$ ) en función de que se cojan 1, 3, 6, 9 o 12 bandas consecutivas de 1,25 MHz.
- Control de potencia a 800 Hz (se controla la potencia transmitida por los terminales unas 800 veces por segundo).
- Utilización de códigos Walsh y M.

### 3.2. CDMA

El acceso múltiple en los sistemas multiusuario que utilizan técnicas de espectro ensanchado (*spread spectrum*) se conoce como *CDMA*. Los sistemas de espectro ensanchado empezaron a desarrollarse a mediados de la década de los cincuenta. Las primeras aplicaciones se produjeron en el campo militar por la robustez que presentaba ante las interferencias.

El *spread spectrum* es un modo de transmisión en el que la señal ocupa un ancho de banda mayor que el estrictamente necesario para enviar la información. El ensanchamiento en frecuencia se lleva a cabo con el uso de una secuencia de código independiente de la secuencia de información. Para la compresión en frecuencia de la señal recibida y posterior recuperación de la información, se hace una recepción sincronizada con la secuencia de código en el receptor.

#### 3.2.1. Ventajas de un acceso CDMA

Una de sus características básicas es la inmunidad y diversidad inherentes que presenta frente a las interferencias. El plan de reuso de frecuencias es más sencillo y flexible que con otras técnicas, ya que el mismo conjunto de frecuencias puede ser reutilizado en cada célula (mejor eficiencia espectral).

El traspaso (*handover*) es suave, ya que, al pasar de una estación base a otra, se sustituye gradualmente el código de la antigua EB por el de la nueva. En TDMA o FDMA era brusco, ya que células adyacentes usaban canales diferentes.

Permite convivir con otros sistemas de banda estrecha ya existentes (ni les afectamos ni nos afectan). La señal CDMA es vista como un ruido por los sistemas analógicos. El CDMA verá la señal analógica como una interferencia de banda estrecha que se eliminará al correlar.

Para demostrar su viabilidad, en 1992 se realizaron cuatro pruebas de un sistema con acceso CDMA en San Diego (California), Münster (Alemania), Ginebra y Washington. Esta prueba permitió ver que la capacidad era diez veces la que soportaba el sistema móvil analógico que operaba en Estados Unidos (AMPS)

Se puede conseguir ensanchar el espectro haciendo uso de técnicas de secuencia directa (DS-CDMA) o de saltos en frecuencia (FH-CDMA):

### *Direct-sequence CDMA*

A la estación base le llegan  $N$  señales al mismo tiempo y que utilizan la misma banda. Para separarlas se usará el producto escalar.

Cuando se utiliza un esquema DS-CDMA, la ortogonalidad entre las señales recibidas se consigue modulando la señal de información (de periodo  $T_{bit}$ ) con una secuencia código (de periodo  $T_{chip}$ ). A cada usuario se le asigna una secuencia código diferente y “ortogonal” en el resto de las secuencias.

Al modular la señal de información con la secuencia código, se amplía el espectro de potencia en un factor  $G_p = T_{bit} / T_{chip}$ , conocido como *ganancia de procesado* o *spreading factor* (SF).

En el resto del apartado hablaremos de la *direct-sequence*, que es la que utiliza UMTS.

### *Frequency hopping*

El transmisor varía su frecuencia de portadora de una manera pseudoaleatoria de un canal a otro. Consta de un sintetizador de frecuencia gobernado por un generador de código pseudoaleatorio. Para poder demodular, el receptor debe utilizar el mismo código (para que el sintetizador esté sincronizado).

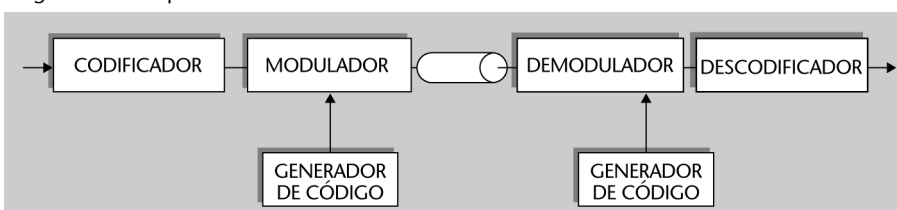
A causa de estos cambios frecuenciales, la señal ocupa un ancho de banda mayor, tal como pasaba en el DS.

Hablamos de *slow frequency hopping* si en uno o más tiempos de símbolo no hay salto de portadora, y de *fast frequency hopping* si en un tiempo de símbolo la portadora cambia. El FFH es más robusto a interferencias pero complejo de implementar. Por ejemplo, en un FFH donde los bits vayan a 2 Mbps y tengamos 1.000 saltos por bit, tendremos que cambiar la frecuencia a 200 Msaltos/segundo.

### 3.2.2. Diagrama de bloques

En la figura siguiente tenemos el diagrama de bloques de un acceso CDMA.

Diagrama de bloques de un acceso CDMA



#### Observación

Dos señales  $s_1(t)$  y  $s_2(t)$  de período  $T$  son ortogonales cuando

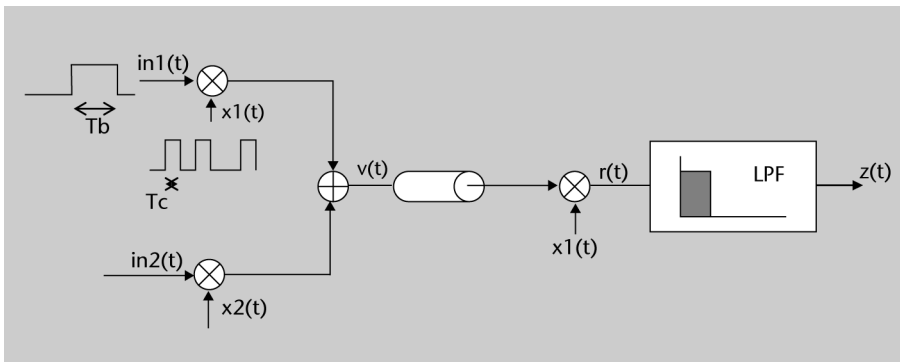
$$\int_T s_1(t) \cdot s_2(t) \cdot dt = 0$$

El codificador (y decodificador) es común a cualquier sistema de comunicaciones. El codificador tiene dos funciones:

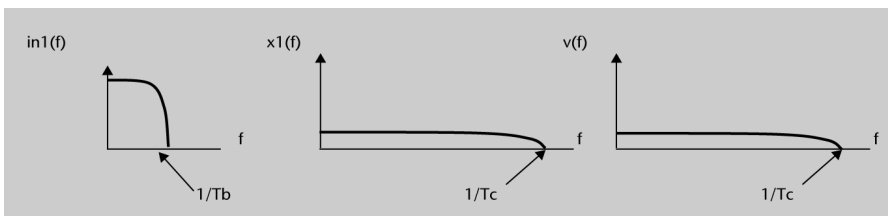
- 1) Añadir redundancia, para detectar o corregir errores.
- 2) Entrelazar, para que los bits consecutivos a la salida del codificador no sean consecutivos a la entrada del canal. Con ello, rompemos posibles ráfagas de error causadas por el canal.

Analizamos ahora (primera figura siguiente) la parte de CDMA para dos usuarios y un receptor que quiere recuperar la información del primer usuario (in1). Como vemos en la segunda figura siguiente, una señal con un espectro ancho, pero de poco nivel, va a parar al canal.

Esquema para dos usuarios



Espectros asociados a la figura anterior



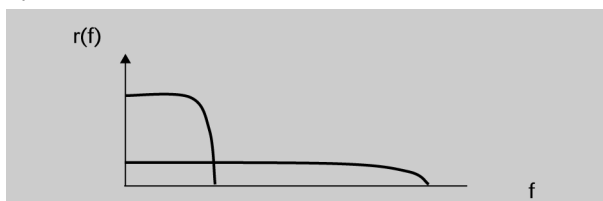
Veamos qué recupera el primer usuario:

$$v(t) = in1(t) \cdot x1(t) + in2(t) \cdot x2(t)$$

$$r(t) = x1(t) \cdot v(t) = in1(t) \cdot x1^2(t) + in2(t) \cdot x2(t) \cdot x1(t)$$

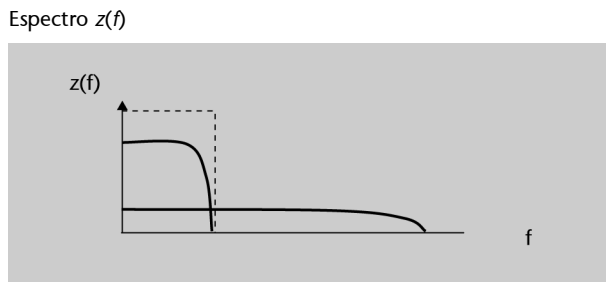
El primer término es  $in1(t)$  (señal de banda estrecha). Como  $x1(t) = \pm 1$ , entonces  $x1^2(t) = 1$  y  $in1(t) \cdot x1^2(t) = in1(t)$ . El segundo término idealmente vale 0, ya que  $x2(t)$  y  $x1(t)$  son ortogonales (su producto vale 0). En la práctica, serán casi ortogonales y este valor será muy pequeño pero de banda ancha. En la figura siguiente tenemos su espectro:

Espectro  $r(f)$





Como vemos en la figura siguiente, el filtro de paso bajo hace que sólo quede  $in_1(f)$ . Si queremos reducir el nivel de la señal de banda ancha, deberemos hacer que la señal de alta frecuencia sea muy rápida (así su nivel será inferior).



Observamos que una persona que esté escuchando el medio no sabe si estamos transmitiendo (aplicaciones militares). Además, si nos interfieren, no nos molestan (útil para comunicaciones móviles).

El sistema analógico afecta al sistema digital como una interferencia más, y la distribuirá en el espectro. La señal CDMA afecta al sistema AMPS como un ruido blanco. Por eso, son compatibles.

### 3.2.3. Problemática de un acceso CDMA

Hay algunos aspectos de los sistemas CDMA que requieren una atención especial:

- Debemos tener tantas secuencias pseudoaleatorias (PN) como usuarios. Además, deben ser ortogonales.
- La secuencia recibida debe estar sincronizada con la que se genera localmente en el receptor.
- Fenómeno *near-far*: consiste en el enmascaramiento de la señal de un usuario más alejado de la EB por parte de las señales de usuarios situadas cerca de la EB (eso no ocurriría si las secuencias fueran perfectamente ortogonales). Eso no pasa en TDMA ni FDMA porque en CDMA las señales no se separan ni en tiempo ni en frecuencia. Para evitarlo, debe habilitarse un **control de potencia**. El objetivo es que cada móvil transmita la potencia justa para que la potencia recibida en la base sea la misma para todos los móviles. Así, un móvil alejado de la base deberá transmitir más potencia que uno que esté próximo. Para CDMA hay dos tipos de control de potencia:
  - En lazo abierto: la base emite un tono piloto de potencia conocida y el móvil ajusta su potencia en función de la potencia que recibe del piloto. UMTS funciona con un lazo abierto a 1.500 Hz.

- En lazo cerrado: la base envía pedidos al móvil, que le dicen a qué potencia debe transmitir. CDMA2000 (el sistema 3G americano) funciona con un lazo cerrado a 800 Hz.

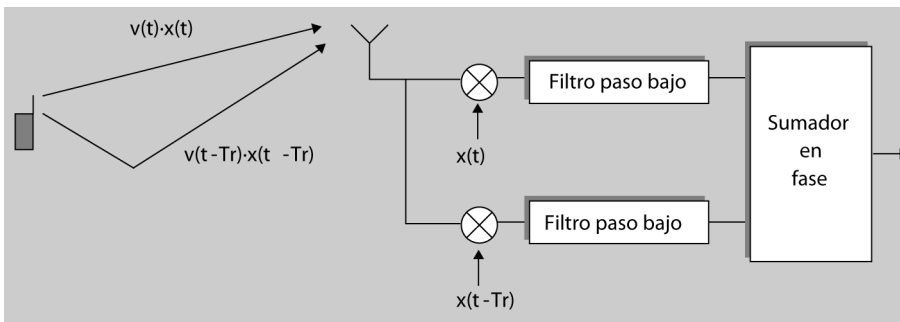
### 3.2.4. Macrodiversidad

En el entorno móvil, la propagación multicamino es habitual. El CDMA puede aprovechar el multicamino de manera constructiva. Para hacerlo, utiliza un receptor *rake* ('rastrillo') que deberá funcionar como un sistema de diversidad MRC, combinando las copias de señal de las que disponga.

Vimos que los códigos PN de dos usuarios tenían que estar incorrelados. Además, exigiremos que cada código esté incorrelado consigo mismo cuando lo desplazamos un periodo de chip.

Con este receptor, si un camino se obstaculiza, nos quedan otros. Veamos de manera muy simplificada en la figura siguiente la estructura de un receptor *rake* con dos ramas (en la práctica tienen más).  $T_R$  es un retardo ajustable dependiendo del entorno:

Receptor *rake*



El aprovechamiento de las señales procedentes de reflexiones recibe el nombre de *microdiversidad*. CDMA, además de *microdiversidad*, soporta **macrodiversidad**. Un sistema tiene *macrodiversidad* cuando recibimos de más de una EB y transmitimos a más de una EB.

Un inconveniente es que, como la interferencia es doble, la capacidad es la mitad. En realidad la capacidad se reduce menos de la mitad porque la diversidad hace que no sea necesario que llegue tanta potencia al terminal.

Una ventaja es que podemos hacer *soft-handover* (traspaso suave). En CDMA no podemos liberar un canal y coger otro, ya que en CDMA un canal es un código. Las secuencias son largas y están sincronizadas, por lo cual necesitamos un tiempo de adaptación a la nueva secuencia.

La *macrodiversidad* permite crear multicaminos de manera artificial, ya que un móvil puede ser servido al mismo tiempo por más de una estación base (co-

sa que en GSM no es posible). El receptor *rake* de UMTS permite la recepción de hasta seis estaciones base al mismo tiempo.

### 3.2.5. Secuencias pseudoaleatorias

Se llaman **pseudoaleatorias** porque la secuencia se va repitiendo (parecen aleatorias pero se generan de manera determinista). La secuencia requerida en CDMA debe cumplir:

- Que los valores 0 y 1 sean equiprobables (condición de aleatoriedad).
- Que cuando esté alineada consigo misma, la autocorrelación tenga un pico grande, y valga 0 cuando esté desplazada (lo llamaremos **condición de buena autocorrelación**, útil para sincronizar secuencias).
- Fácil de generar electrónicamente.

También buscamos familias de secuencias PN que cumplan las siguientes condiciones:

- Que cada secuencia cumpla las tres propiedades anteriores.
- Que cada secuencia pueda ser fácilmente distinguible de otra secuencia de la misma familia (lo llamaremos **condición de buena correlación cruzada**).

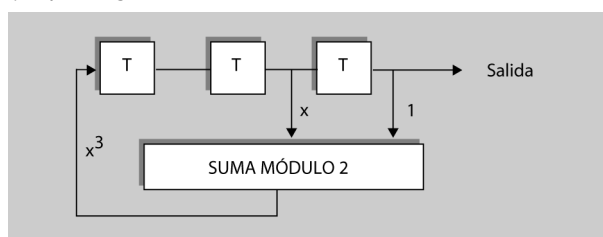
Las secuencias más usadas son las secuencias M, las secuencias Gold y las secuencias de Walsh. Veamos en qué consisten:

#### Secuencias M

Estas secuencias se generan mediante un registro de desplazamiento realimentado con un polinomio primitivo. No entraremos en la descripción de lo que es un polinomio primitivo, pero sí diremos que hay tablas con un polinomio primitivo de cada grado (en la práctica hay más de uno).

Por ejemplo, el polinomio  $x^3 + x + 1$  es primitivo. Con este polinomio y un registro podemos hacer un generador de secuencia M según la figura siguiente, donde  $T$  es un retardador de 1 bit:

Ejemplo de generador de secuencia M



En un caso general, el registro tendrá  $m$  bits. El número máximo de estados será de  $2^m$ . El periodo máximo de una secuencia será  $2^m - 1$  ya que, en nuestro

ejemplo, si entramos un 000 (la salida de los tres retardadores es 0) siempre se quedará en el 000. Así, estos registros se pueden inicializar con cualquier valor excepto el que sea todo 0.

Si cargamos un 001, la secuencia de salida es

0010111001011100101110010111.....

Observamos que se va repitiendo la secuencia 0010111 (longitud 7). Ésta es precisamente la máxima longitud que podíamos hacer con un registro de tres bits.

Por lo tanto, podemos concluir diciendo que, si las realimentaciones del registro son un polinomio primitivo, la secuencia resultante es de longitud máxima, y se le llama *secuencia M*.

Un inconveniente es que el número es limitado (tantas secuencias como polinomios generadores). Una secuencia  $M$  construida con un registro de longitud  $m$  tiene las siguientes características:

- En cada periodo tiene  $2^{m-1}$  "1" y  $2^{m-1} - 1$  "0".
- No tiene un comportamiento demasiado bueno en términos de correlación cruzada (no son fácilmente distinguibles secuencias de la misma familia).

### Secuencias Gold

Se vio que ciertos pares de secuencias  $M$  de longitud  $N$  tenían una correlación cruzada que tomaba tres valores:  $-1$ ,  $-t(m)$  y  $t(m) - 2$ , donde  $t(m) = 2^{(m+1)/2} + 1$  para  $m$  impar y  $t(m) = 2^{(m+2)/2} + 1$  para  $m$  par.

Así, por ejemplo, para un registro de  $m = 10$  bits  $\Rightarrow t(10) = 2^6 + 1 = 65 \Rightarrow$  La correlación cruzada toma los valores  $-65$ ,  $-1$  y  $63$ .

Podemos construir un conjunto de secuencias de longitud  $N$  haciendo la suma módulo 2 de la primera secuencia  $M$  con las  $N$  versiones desplazadas de la otra secuencia  $M$ . Así obtenemos  $N$  nuevas secuencias, que se demuestra que son de longitud máxima ( $N$ ). Se llaman *secuencias de Gold* el conjunto de estas  $N$  secuencias más las dos secuencias  $M$  de origen. Por lo tanto, obtenemos  $N + 2$  secuencias de Gold.

Por lo tanto, hemos solucionado dos de los inconvenientes de las secuencias  $M$ : el limitado número de secuencias y el mal comportamiento de la correlación cruzada.

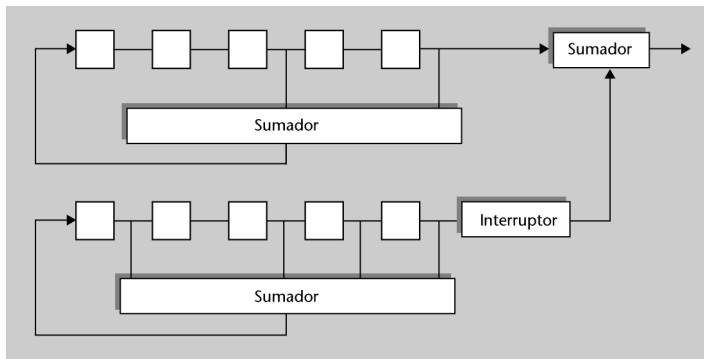
Un parámetro que sirve para evaluar la bondad de una secuencia es el cociente entre el pico de la autocorrelación y el pico máximo de la correlación cruzada. Interesa que sea grande.

Por ejemplo, si tenemos un registro de  $m = 8$  bits, podemos generar una secuencia  $M$  donde el pico de la autocorrelación vale  $2^8 - 1 = 255$  y el pico máximo de la correlación cruzada vale 95 (este dato se saca de tablas). El cociente es  $255 / 95 = 2,68$ . Si lo que generamos son códigos de Gold, el pico de la autocorrelación es el mismo (255), pero el

de la correlación cruzada es  $t(m) = 2^5 + 1 = 33$  (también lo podríamos sacar de tablas). Ahora el cociente es  $255 / 33 = 7,33$  (ha mejorado el comportamiento).

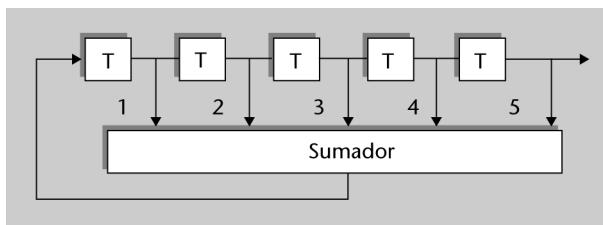
Veamos un ejemplo de código Gold: con los polinomios  $p1(x) = 1 + p^2 + p^5$  y  $p2(x) = 1 + p + p^2 + p^4 + p^5$ , generamos  $32(+2)$  secuencias Gold de longitud 31. El diagrama de conexionado lo tenemos en la figura siguiente, donde los elementos con forma de cuadrado son retardadores de 1 bit.

Ejemplo de generador de secuencia Gold



Es muy importante no olvidar que, si los polinomios son primitivos, la secuencia será Gold. Por ejemplo, para  $m = 5$  (ver figura siguiente), los polinomios que conectan 3,5 (polinomio 1) y 2,3, 4,5 (polinomio 2) forman un Gold. Eso quiere decir que la autocorrelación tiene dos valores y su pico máximo es  $2^5 - 1 = 31$ , y que la correlación cruzada tiene tres valores y su máximo es  $2^3 + 1 = 7$ . En cambio, los polinomios que conectan 5,4 y 5,1 no son primitivos, y la autocorrelación y correlación cruzada toman muchos valores.

Conexiones genéricas



### Secuencias de Walsh

Con estas secuencias podemos obtener códigos de longitud  $K = 2^n$  ( $n$  entero). Podremos obtener  $K$  códigos de longitud  $K$ . El inconveniente es que la autocorrelación es pobre.

Las secuencias de Walsh se obtienen a partir de las matrices de Hadamard. Estas matrices se obtienen de forma iterativa a partir de la matriz  $2 \times 2$ :

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad H_K = H_{K/2} \otimes H_2$$

⊗: producto de Kronecker. Se obtiene multiplicando cada elemento de la matriz  $H_{K/2}$  por la matriz  $H_2$ .

Ejemplo:

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Si reordenamos las columnas de menos a más cambios, obtenemos las cuatro secuencias de Walsh:

$$W_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

### 3.2.6. Capacidad

Definimos la ganancia de procesamiento  $G_p$  como el cociente entre el periodo de bit y el de chip. La interferencia que provocan otros usuarios viene ponderada por  $G_p$ . Pero el inconveniente es que, si queremos que  $G_p$  sea grande, el ancho de banda también lo será.

Si tenemos un sistema con  $N$  móviles (1 útil y  $N - 1$  interferentes),

$$P_{\text{útil}} = S; \quad P_{\text{interferente}} = J = (N - 1) \cdot S \quad \Rightarrow \quad \frac{J}{S} = N - 1$$

(Suponiendo que todas las señales llegan a la EB con el mismo nivel  $S$ .)

donde  $W$  es el ancho de banda de la señal ampliada [Hz],  $R_b$  es la velocidad de la señal [bps] y  $E_b / N_0$  depende de la modulación (para una cierta calidad ( $p_b$ ) necesitamos una cierta  $E_b / N_0$  en función de la modulación).

Por lo tanto,

$$N - 1 = \frac{J}{S} = \frac{W \cdot N_0}{R_b \cdot E_b} = \frac{W}{R_b} \cdot \frac{1}{E_b / N_0} \quad \Rightarrow \quad N = 1 + \frac{W}{R_b} \cdot \frac{1}{E_b / N_0}$$

Por ejemplo, el sistema CDMA americano de segunda generación ocupaba un ancho de banda de 1,25 MHz, requería una  $E_b / N_0 = 5$  y ofrecía 9.600 bps por usuario. Según la fórmula anterior, su capacidad es  $N = 27$ . La gran ventaja es que no hay que hacer planificación frecuencial, ya que en células contiguas podemos utilizar los mismos canales. En cambio, en los sistemas FDMA había que dejar unos márgenes de separación para evitar interferencias (por eso definíamos los clústers).

Si en un sistema FDMA queremos poner canales de 30 KHz de ancho de banda en los 1,25 MHz anteriores, podemos poner hasta 41 canales. Pero como hay que definir clústers, el número real será menor (con clústers típicos de siete células, nos quedamos con una capacidad de  $41 / 7 = 6$ , frente a los 27 de CDMA).

Finalmente, debemos comentar que otra ventaja de las técnicas CDMA es que empeorando la calidad siempre podemos poner algún usuario más. En las técnicas FDMA, estamos limitados por el ancho de los canales. Así, si la capacidad FDMA es 7, un octavo usuario no puede entrar porque no hay ancho de banda disponible; en CDMA, si la capacidad es 27, un 28º usuario podría entrar, pero a costa de reducir la velocidad a la cual se puede transmitir, como nos indica la fórmula de la capacidad.

### 3.3. UMTS

UMTS es el estándar europeo de tercera generación para las redes de gran alcance sin hilos. El 3GPP (*3rd generation partnership project*) es un grupo de trabajo del ETSI que va actualizando las versiones de UMTS.

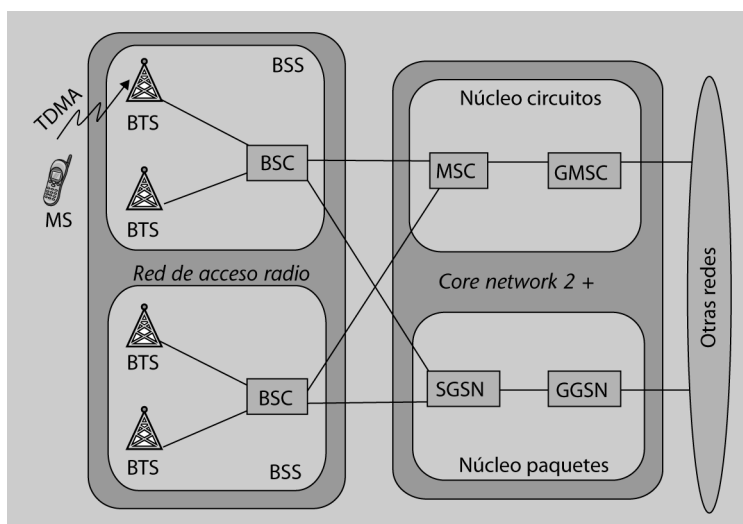
En la actualización de 1999 (R99), la red troncal de UMTS era la de GPRS. Desde el año 2000 las actualizaciones no se nombran por el año sino de manera continua (R4 es la versión de marzo del 2001, R5 es la de diciembre de 2001...).

Las especificaciones de UMTS son 5 MHz de ancho de banda por canal, tasa de chips de 3,84 Mcps y ganancias de procesamiento ( $G_p$ ) entre 4 y 512.

#### 3.3.1. Arquitectura

En la figura siguiente tenemos la arquitectura GSM/GPRS.

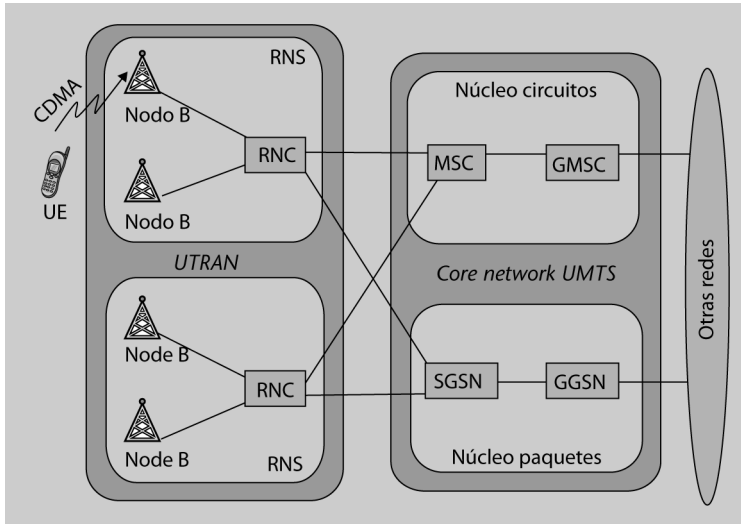
Arquitectura GSM/GPRS



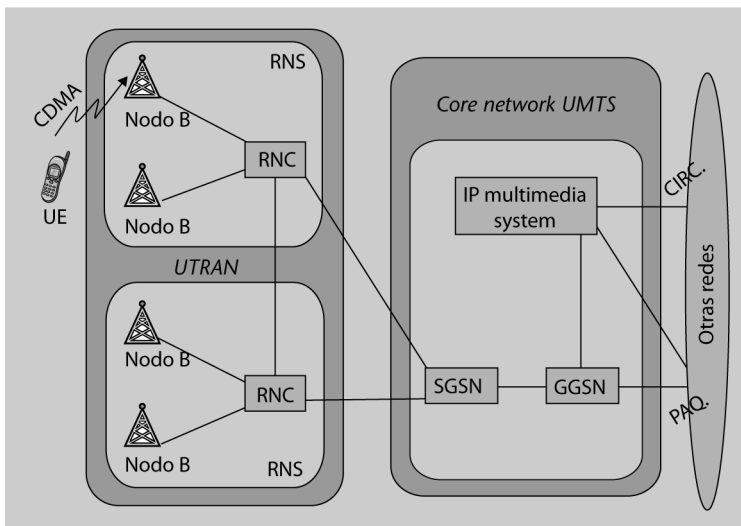
#### WEB

La web del 3GPP es [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org).  
La versión actual la encontraremos en [www.3gpp.org/ftp/specs/latest](http://www.3gpp.org/ftp/specs/latest).  
El significado de la numeración lo encontramos en [www.3gpp.org/specs/numbering.htm](http://www.3gpp.org/specs/numbering.htm).

La arquitectura UMTS de la *release 99* (la que se basaba en GPRS) aporta un cambio de nomenclatura en los elementos (lo que eran *BTS* ahora se llaman *nodo B* y lo que se llamaban *BSC* ahora se llaman *RNC*) y añade enlaces directos entre los *RNC*. La tenemos en la figura siguiente.

Arquitectura UMTS *release 99*

En la *release 5 y 6* desaparece el *MSC* y sus funciones quedan integradas en el *IMS*, que maneja todo el tráfico (voz y datos) como tráfico IP. Lo vemos en la figura siguiente.

Arquitectura UMTS *release 5 y 6*

Básicamente, UMTS contiene:

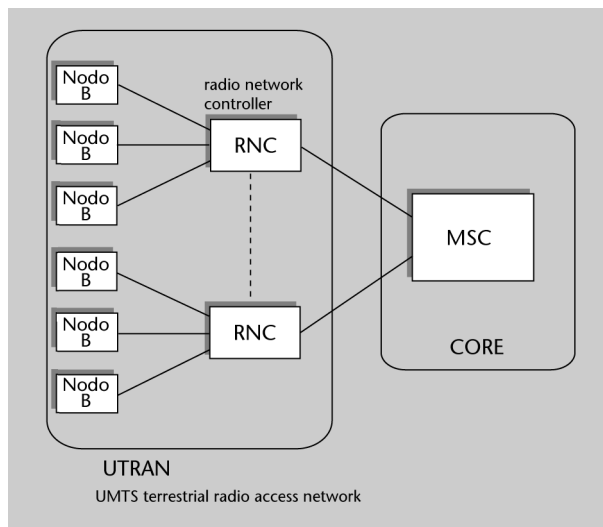
- Los elementos de las fases 1 y 2 de GSM (*MSC/IMS*, *VLR*, *HLR*, *AuC*, *EIR*). Es posible algún cambio de nomenclatura (p. ej., la tarjeta *SIM* ahora se llama *USIM*).
- Las mejoras de la fase 2+:
  - GPRS (*SGSN*, *GGSN*).  
*SGSN*: parecido al *VLR* (gestor de movilidad).  
*GGSN*: parecido al *GMSC*.



- *CAMEL service environment (CSE)*: acceso a servicios específicos de cada operador.
- Nuevo acceso radio UMTS: *UTRAN (UMTS terrestrial radio access network)*:
  - *RNC (radio network controller)*: parecido al BSC.
  - *Nodo B*: parecido al BTS.

En la figura siguiente tenemos la arquitectura UMTS básica.

Arquitectura UMTS básica



Los elevados costes del despliegue UMTS por parte de las operadoras plantean las posibilidades de compartir infraestructuras. Así, si se comparten todos los elementos, el ahorro puede ser de un 55%; si compartimos RNC y nodo B podemos ahorrar el 40% y si sólo compartimos los nodos B el ahorro puede ser de hasta el 25%, dependiendo de si compartimos emplazamiento, antenas o transmisión. Las ventajas de una compartición son claras (ahorro en inversión y en personal, más cobertura, posibilidad de ofrecer precios más bajos), pero también hay inconvenientes, como la dificultad de controlar la capacidad que usa cada operador y los problemas que podemos tener si necesitamos más capacidad a medio plazo.

Con respecto a la velocidad, podemos tener más o menos velocidad en función de la celda que nos da servicio (2 Mbps en picoceldas, 384 kbps en microceldas, 144 kbps en macroceldas, 9,6 kbps si hacemos uso de satélites), pero también podemos decir que tenemos más o menos velocidad en función de la movilidad:

- Hasta 2 Mbps (multimedia) con baja movilidad (10 km/h).
- Hasta 384 kbps (Internet) con media movilidad (120 km/h).
- Hasta 144 kbps (voz de alta calidad) con alta movilidad (500 km/h).

Los sistemas 2G suelen ser simétricos. Los 3G pueden ser asimétricos (eso implica que en el enlace de más velocidad habrá que emitir con más potencia). Por ejemplo, un sistema a 384 kbps (DL) y 64 kbps (UL), se dice que es un sistema a 384KbpsDL & 64KbpsUL.

Las funciones del nodo B son:

- Convertir datos a la interfaz de radio y desde la interfaz de radio: corrección de errores, hacer el ensanchamiento de espectro, modular y adaptar velocidades.

- Medir calidad y potencia y transmitirlo al RNC (que gestiona los traspasos y la macrodiversidad).
- Hacer el *softer-handover* (*soft-handover* entre sectores del nodo B). Se puede dar *softer-handover* en el 10%-15% de los enlaces.
- Permitir al móvil ajustar su potencia a partir de órdenes de control de potencia que le envía por el *downlink* (a 1.500 Hz en lazo cerrado en modo FDD).

Las funciones del RNC son:

- Gestionar y optimizar los recursos de radio (control de potencia, establecer y liberar conexiones...).
- Controlar la movilidad de los terminales.
- Hacer el *soft-handover*, decidiendo a qué nodos B (hasta cuatro) conecta el móvil. Se puede dar *soft-handover* en el 30%-40% de los enlaces.

### 3.3.2. Interfaces UMTS

Es muy importante la definición de interfaces para asegurar la interoperatividad de sistemas de diferentes fabricantes. Se definen cuatro interfaces (figura siguiente):

1) **Uu:** de móvil (*user equipment*) a nodo B (con dos modos: WCDMA o TD-CDMA)

Gestiona *broadcasts*, conexiones, cifrados, control de potencia, *time advance*, *paging*...

2) **Iub:** de nodo-B a RNC

Gestiona los recursos, la sincronización...

3) **Iur:** de RNC a RNC (a causa de la diversidad, un móvil puede ser ayudado por más de un RNC)

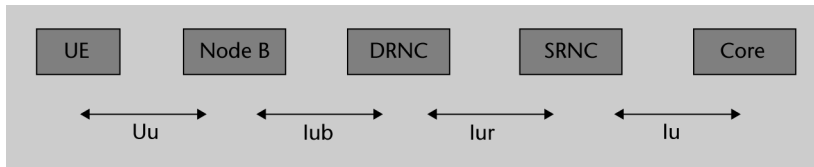
Un RNC se puede comportar como *drift-RNC* (DRNC) o como *serving-RNC* (SRNC) dependiendo de si está conectado al nodo B o al MSC.

Gestiona los *pagings*, la macrodiversidad (permite *soft-handover* entre bases de diferentes RNC), mide recursos...

4) **Iups:** de RNC al núcleo

Hace la gestión de portadoras, *pagings*, gestión de errores...

## Interfases UMTS



### 3.3.3. Canales y estructura de tramas

UMTS define los siguientes canales lógicos (después se hace el mapeo a canales físicos):

a) De tráfico

- DTCH (*dedicated traffic channel*):
  - Voz del códec a 12,2, 10,2, 7,95,..., 4,75 kbps
  - Voz de códecos GSM
  - Datos en conmutación de circuitos y/o paquetes
- CTCH (*common traffic channel*):
  - Mensajes *cell broadcast*
  - Etc.

b) BCCH (*broadcast control channel*)

- Información de sistema (frecuencia, *ID\_cell*, *max uplink power*...).

c) PCCH (*paging control channel*)

- Para localizar un terminal.

d) DCCH (*dedicated control channel*)

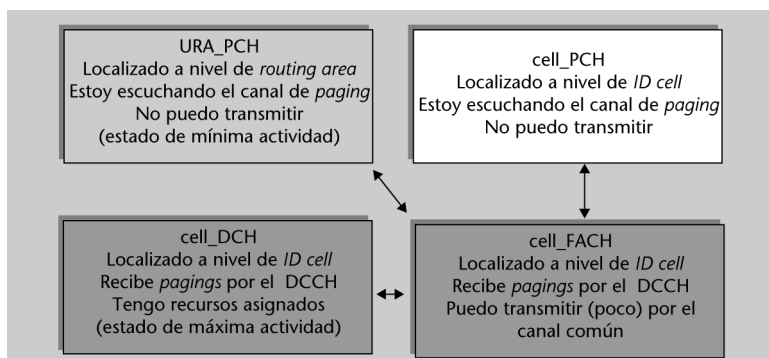
- Para enviar mensajes a un móvil concreto (traspasos, *pagings* a móviles con conexión establecida...).

e) CCCH (*common control channel*)

- Asignación de identificadores temporales C-RNTI y U-RNTI (*cell/user radio network temporary identifier*) para terminales que acceden por primera vez.

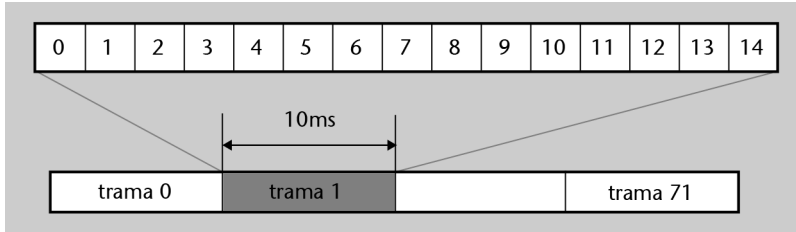
Un terminal móvil puede hallarse en estado *idle* o en estado dedicado. Cuando está en *idle*, el móvil se comunica con el nodo B. Cuando se encuentra en estado dedicado, el móvil se comunica con el SRNC y puede estar en cuatro posibles estados, en la figura siguiente (desde el URA\_PCH, de mínima actividad, hasta el cell\_DCH, de máxima actividad):

## Estados de un terminal móvil



Al igual que GSM, UMTS también tiene una estructura de tramas. Para el caso UTRAN-FDD (una portadora para las comunicaciones de base a móvil y otra para las de móvil a base), la estructura es la de la figura siguiente:

Estructura de tramas



Una ranura consta de 2.560 chips. Como la velocidad de chip es 3,84 Mchips/segundo, una ranura dura 0,66 ms. Una trama consta de 15 ranuras (o sea, dura 10 ms). Una supertrama consta de 72 tramas y dura 720 ms.

Se hace control de potencia por cada ranura:

(15 ranuras/trama y 10 ms/trama  $\Rightarrow$  control de potencia a 1.500 Hz).

En la siguiente tabla tenemos el número de bits que hay en cada ranura dependiendo de la ganancia de procesado. Por ejemplo, podemos conseguir  $G_p = 512$  poniendo sólo 5 bits en cada ranura. La velocidad será muy pequeña pero la comunicación será muy robusta.

$G_p$	bits/ranura
4	640 (960 kbps)
8	320
16	160
...	...
512	5 (7,5 kbps)
$G_p$ (UL)	4 a 256
$G_p$ (DL)	4 a 512

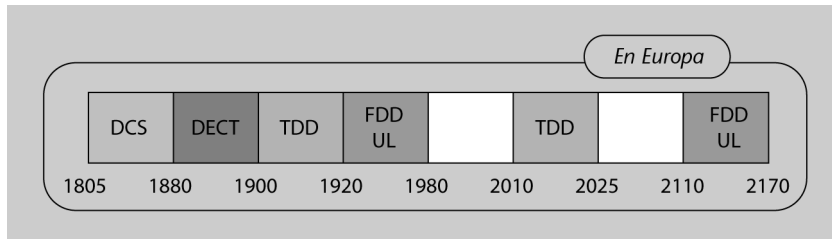
### 3.3.4. Penetración 3G

España fue el segundo país europeo (Finlandia fue el primero) en otorgar las licencias de tercera generación. Lo hizo el 10 de marzo del 2000. Se hacía la previsión inicial de que los cuatro operadores (Movistar, Vodafone, Orange, Yoigo) pudieran dar servicio a 23 ciudades de más de 200.000 habitantes en agosto del 2001, con una asignación de banda de 20 MHz para cada uno (figura siguiente):

3 canales UMTS FDD (de 5 + 5 MHz cada uno) y

1 canal UMTS TDD (de 5 MHz)

## Espectro 3G en Europa



En la práctica, el lanzamiento fue en el 2004, excepto Yoigo, que no tenía red GSM propia y no lo hizo hasta el 2006. En todos los casos, el UMTS instalado es el FDD. En febrero del 2006, en España había 1,3 millones de usuarios de UMTS. La velocidad de transmisión/recepción de datos que se podía conseguir era de 384 kbps.

Si miramos al resto del mundo, la primera llamada UMTS (experimental) se hizo de Madrid a Tokio el 20 de diciembre del 2001. De todas maneras, en Japón tenían un sistema llamado *FOMA* y a finales del 2005 había 99 redes UMTS en 45 países, con 50 millones de usuarios.

## 4. LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*)

Las redes de tipo LPWAN, como indica la sigla, se caracterizan por un bajo consumo energético. Esta propiedad hace que sus elementos puedan tener una autonomía muy elevada y, por lo tanto, se puedan implantar con muchos elementos que no necesitan tener cerca una fuente externa de energía. Esta característica, en general, se dará cuando se transmitan pocos datos y de manera no continua; en caso contrario, el consumo energético será más grande y, por lo tanto, la autonomía del dispositivo será menor.

En los últimos años, la importancia de estas redes ha aumentado en paralelo con aplicaciones conocidas como *smart*. Es fácil imaginar aplicaciones relacionadas: *smart meters*, para que las compañías suministradoras de electricidad no tengan que ir físicamente a los contadores a recoger las lecturas; *smart lighting*, para que la encendida de luces de una calle no dependa solo de la hora, sino de otros factores, como por ejemplo celebraciones especiales en la vía pública, o *smart water*, para controlar la calidad del agua de las fuentes, etc.

Han surgido muchas tecnologías para cubrir este nicho: son algunos ejemplos de ello SigFox, LoRa, RPMA, DASH7 o Weightless-P, cada una con sus particularidades. En este apartado describiremos los más usados: SigFox y LoRa.

Sigfox y LoRa son dos ejemplos de redes de área global (cómo sería GSM), pero con la característica de que necesitan poca potencia y permiten bajas velocidades de datos. Para lo cual utilizan técnicas que inicialmente eran propias de las redes de área personal.

**SigFox** es una compañía francesa que se posiciona como proveedor de red IoT. En esta red, los dispositivos envían sus datos a través de la red SigFox hacia un *backend* Sigfox. SigFox es una tecnología *ultra-narrowband* que funciona con frecuencias de sub-GHz en bandas de radio: 868MHz en Europa y 902MHz en Estados Unidos. La compañía despliega sus antenas con la ayuda de compañías locales de telecomunicaciones alrededor del mundo, de forma que el proveedor IoT no tiene que preocuparse por la creación de la infraestructura.

El acceso al medio de SigFox (capa MAC) está basado en ALOHA en dos dimensiones: tiempo y frecuencia. En concreto, cada transmisión de un dispositivo SigFox se hace en un canal de 100 Hz aleatorio dentro de la banda correspondiente. Esta transmisión se repite tres veces (en diferentes canales dentro de la banda) para cada paquete. Con la utilización de canales extremadamente estrechos (100 Hz), la selección aleatoria del canal y las tres repeticiones se minimiza la probabilidad de colisión. Con todo, para evitar una situación de congestión que pueda hacer crecer excesivamente la probabilidad de colisión,

SigFox impone una serie de restricciones en los mensajes transferidos a través de la red, donde cada dispositivo puede enviar solo 140 mensajes por día con un límite de siete mensajes por hora (cada mensaje puede tener hasta 12 bytes de longitud). Los módulos de radio también son capaces de recibir cuatro transmisiones entrantes por día.

SigFox gestiona completamente la comunicación entre el dispositivo IoT y el *backend* de la aplicación, por lo cual la integración del módulo de radio es un proceso bastante sencillo para los desarrolladores. Para interactuar con el módulo de radio se proporciona una sola API y no se requiere ninguna configuración. Para empezar a integrar SigFox hay que adquirir un módulo de radio compatible y un plan de suscripción renovable para el dispositivo.

**LoRa** es un estándar patentado de tecnología inalámbrica de largo alcance que opera en el espectro de frecuencias radioeléctricas: 863-870 MHz en Europa y 902-928 MHz en Estados Unidos. Es un protocolo de capa física que ofrece un medio de comunicación de largo alcance y baja potencia para aplicaciones de máquina a máquina (M2M) y IoT.

La tecnología LoRa fue desarrollada originalmente por Semtech, pero ahora pertenece a la «Alianza Lora». Cualquier fabricante de hardware puede construir módulos LoRa, pero tiene que obtener un certificado de cumplimiento de la alianza. A diferencia de SigFox, LoRa Alliance no desea posicionarse como proveedor de red, sino que su objetivo es desarrollar un estándar y vender chips.

LoRaWAN es un protocolo abierto construido sobre la capa física LoRa. Mientras que LoRa ofrece una entrega simple de mensajes punto a punto, el protocolo LoRaWAN gestiona la comunicación de los dispositivos con *el backend* de la aplicación y proporciona un esquema de cifrado y autenticación de extremo a extremo. LoRaWAN accede al medio mediante una variación del protocolo ALOHA. En concreto, se trata del protocolo ALOHA (sin ranura), pero con restricciones *de duty-cycle* (un tiempo mínimo sin transmitir entre dos transmisiones consecutivas). Además, gracias a la capa física LoRa, es posible evitar colisiones entre transmisiones simultáneas de diferentes dispositivos mediante el uso de varios *spreading factors*.

A diferencia de SigFox, los módulos estándar LoRa pueden funcionar de manera bidireccional. Con el mismo módulo radio, un receptor puede hacer de transmisor. Por lo tanto, LoRa está más adaptado a los escenarios de mando y control.

LoRaWAN define tres clases de dispositivos: clase A, clase B y clase C. Todas las redes LoRaWAN tienen que soportar los dispositivos de la clase A. La principal diferencia entre las tres clases radica en la posibilidad de transmitir paquetes en el enlace descendente.

- **Clase A.** Los dispositivos solo pueden recibir paquetes en el enlace descendente después de la transmisión de un paquete en el enlace ascendente. Así, después de la transmisión de un paquete en el enlace ascendente, el dispositivo abre dos ventanas de recepción para recibir (no es obligatorio) paquetes en el enlace descendente. Durante el resto del tiempo, el dispositivo no podrá recibir paquetes. Esta característica permite reducir el consumo de energía.
- **Clase B.** El funcionamiento de los dispositivos de clase B es igual que el de los dispositivos de clase A. Aun así, los dispositivos de clase B se sincronizan con el *gateway*/servidor para recibir paquetes de *beacon* transmitidos en el enlace descendente. Estos paquetes de *beacon* permiten que el *gateway* anuncie transmisiones en el enlace descendente sin la necesidad de que se transmita un paquete en el enlace ascendente. Fuera de los periodos de *beacon* y después de las transmisiones en el enlace ascendente, el dispositivo no puede recibir paquetes en el enlace descendente. El aspecto negativo es que los dispositivos de clase B tienen un consumo más alto de energía.
- **Clase C.** Los dispositivos de clase C siempre escuchan el canal. De este modo, siempre se pueden recibir paquetes en el enlace descendente. Como consecuencia del alto consumo energético de estos dispositivos, se trata de dispositivos que acostumbran a estar conectados a una fuente de energía.

Si se quiere utilizar LoRa, hay dos opciones:

- **Desplegar una red propia.** Cualquiera puede comprar chips y crear su propia red de dispositivos, pasarelas y *backends*. Además, tendrá que implementar y mantener tanto las pasarelas como los dispositivos, pero tendrá un control total sobre su red. Podrá adaptarlo y modificarlo a medida que crezca su producto y podrá cambiar sus necesidades.
- **Utilizar la red de un operador de red.** Varios operadores ofrecen redes LoRaWAN en ciertas áreas.

Tal como se ha podido observar, las redes LPWAN tienen los objetivos siguientes:

- bajo consumo energético
- bajo coste de los dispositivos

Los dos objetivos se logran mediante la simplificación de los protocolos de acceso al medio. Gracias a esto, los dispositivos pueden ser simples (bajo coste) y tener bajo consumo (periodos cortos de transmisión y recepción). Ahora bien, hay un compromiso entre los objetivos de coste y ahorro energético, y la capacidad de la red (cantidad de paquetes que se pueden transmitir en cada una de las direcciones) y la fiabilidad de las transmisiones (probabilidad de que el paquete sea recibido correctamente).



## 5. Comunicaciones por satélite

En este apartado hablaremos de los sistemas donde los usuarios no se conectan a estaciones base terrenales, sino a satélites que orbitan en torno a la Tierra.

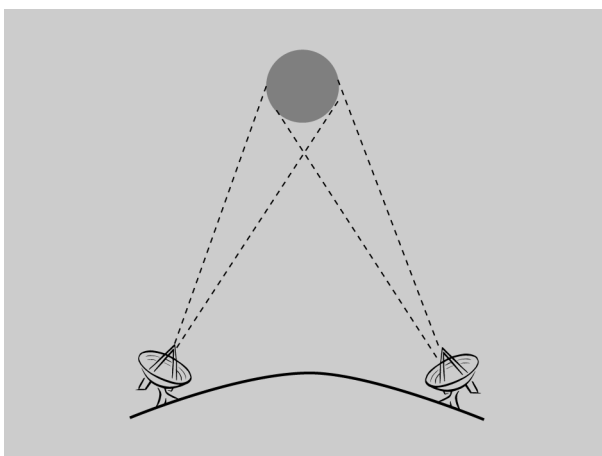
### 5.1. Antecedentes históricos

Podríamos decir que las comunicaciones por satélite se inician el año 1945. Aquel año, Clarke (escritor de ciencia ficción) publica un artículo en el que propone situar un satélite a 42.000 km de altura con respecto al centro de la Tierra y en un plano coincidente con el ecuador (lo que ahora llamamos *órbita geoestacionaria*). Sólo es una idea, pero el rápido desarrollo de la electrónica en los siguientes años (primer ordenador con válvulas en 1946 y descubrimiento del efecto transistor en 1948) propició la construcción de satélites.

En 1957 se produce el lanzamiento del primer satélite (Sputnik-I, URSS), que no es útil para comunicaciones civiles, sino sólo para usos militares. En 1958 se crea la NASA, y lanza el primer satélite americano (Score) también exclusivo para usos militares.

En 1960 se lanza el **primer satélite pasivo** (satélite ECHO). Es un globo de 31 m de diámetro que sólo refleja la señal (figura siguiente). Se quedó a 10.000 km de la Tierra por la poca potencia de los cohetes de la época. A esta altura, **el satélite va más rápido que la Tierra** y las estaciones terrenales deben reorientar continuamente sus antenas. Presenta como problema la gran atenuación en el trayecto Tierra-satélite-Tierra.

Satélite pasivo



El **primer satélite activo** (Telstar-I) se lanzó en 1962. Ya era útil para comunicaciones entre Europa y América. El problema es que, al ser satélites de órbita baja, la comunicación sólo puede establecerse en ciertos instantes de tiempo

(cuando dos estaciones terrenales lo tenían a la vista, cursaban sus comunicaciones). Para que la comunicación pueda ser continua, los americanos toman la idea de Clarke y en 1963 lanzan el Syncom-I (no funcionó) y el Syncom-II. En 1964 se lanza el Syncom-III, gracias al cual los americanos pudieron ver imágenes de los Juegos Olímpicos de Tokio.

En 1964 se crea la organización Intelsat (Organización Internacional de Telecomunicaciones por Satélite). Los propietarios son los 114 países miembros, que utilizan el sistema para comunicaciones internacionales o nacionales. COMSAT (Communications Satellite Corporation) representa a Estados Unidos y es uno de los miembros más importantes. Dispone de catorce satélites, y el seguimiento se hace desde Washington. Quizás por eso casi no hay representantes de países del Este. En 1965 se inaugura la serie de satélites Intelsat con el lanzamiento del satélite geoestacionario comercial *Intelsat-I* (2.400 canales de voz o uno de televisión). El mismo año se lanza el primer satélite comercial soviético de la serie Molnya.

Hay unas tablas que dicen, por cada satélite, a qué ángulo de elevación debemos tener la antena dependiendo del lugar del mundo donde estemos.

Los satélites sobre el plano ecuatorial van bien cuando los países están cerca del ecuador. Éste no es el caso de la URSS, y por esto lanzaron un satélite de órbita elíptica HEO (*heliptic earth orbit*) (la Tierra es uno de los focos de la elipse) con una declinación de 64° sobre el ecuador (64° entre el plan ecuatorial y el plan orbital). Esta órbita está casi todo el tiempo por encima de la URSS (una de las leyes de Kepler dice que, a igual área barrida, igual tiempo para recorrer el perímetro). Lo malo es que el satélite no se ve como estático desde la Tierra, y es preciso que las antenas terrenales lo sigan. Al poco tiempo, la URSS lanzó dos satélites más para tener siempre alguno visible.

En 1966 se hace el lanzamiento de la serie Intelsat-II y en 1968 el de la serie Intelsat-III. En 1969 se vio la llegada del ser humano a la Luna gracias a Intelsat.

A partir de aquí, el desarrollo de satélites internacionales fue muy rápido: Intelsat-IV (4.000 canales telefónicos y dos de televisión), Intelsat IV-A (6.000 canales telefónicos y dos de televisión), Intelsat V (12.000 canales telefónicos y dos de televisión), Intelsat-VI (36.000 canales telefónicos y dos de televisión)...

Hasta entonces, las tecnologías de satélite las utilizaban las operadoras de comunicaciones. En 1983 se dispuso del **primer satélite con servicios DTH** (*direct-to-home*), que ofrece servicios de televisión que llegan directamente al hogar. Las primeras plataformas de televisión digital en España llegaron en 1997.

En el 2002 tuvimos la **primera red DVB-RCS** (*digital video broadcasting - return channel system*) en España. Estas redes se caracterizan porque el usuario puede enviar información directamente al satélite. En el 2005 dispusimos de la primera red DVB-RCS con procesado a bordo, que abarataba los equipos que necesitamos en el hogar para hacer comunicaciones por satélite.

Todos los sistemas anteriores son geoestacionarios (el satélite y cualquier punto de la Tierra siempre mantienen la misma posición relativa), que hace que

la antena apunte hacia un punto del cielo donde siempre está el satélite. Pero también se han desarrollado sistemas en que los satélites están más cerca de la Tierra (órbita media u órbita baja) y garantizan que desde cualquier punto de la Tierra tengamos visible algún satélite. Hablaremos de estos sistemas en la parte final de este capítulo.

## 5.2. Conceptos básicos

Los sistemas tradicionales vía radio requieren un enlace visual directo entre emisor y receptor, por lo cual a veces hay que situar repetidores o utilizar la propiedad de reflexión de las ondas en la ionosfera (a 100 km de la Tierra). Eso podría evitarse con un satélite (repetidor) situado en una órbita geoestacionaria.

La transmisión se origina en un solo punto: desde una estación terrestre se envía hacia el satélite (repetidor), el cual envía la señal hacia toda una zona. Existe un retardo entre el momento en el que se genera la señal y el momento en el que se recibe (72.000 km), por lo cual habrá que tomar precauciones en las transmisiones bidireccionales (teléfono, datos) colocando canceladores de eco.

Los satélites llevan entre 6 y 30 transpondedores o *transponders* (un transpondedor es un repetidor que recoge la señal, la traslada de frecuencia y la reenvía) y, por lo tanto, se pueden tratar varias señales al mismo tiempo. Debe tenerse claro que, si el satélite es pasivo, las bandas frecuenciales ascendente y descendente son la misma. Se trasladan las frecuencias para evitar interferencias.

Las ventajas de las comunicaciones por satélite son:

- Hasta 3.000 canales por repetidor (y entre 6 y 30 repetidores por satélite).
- Coste independiente de la distancia emisor-receptor (especialmente útil para países con poca población y mucha extensión).
- Se puede cubrir toda la Tierra con sólo tres satélites.
- Gran ancho de banda.
- Muy adecuado:
  - Cuando hay pocos datos de retorno (datos web).
  - Cuando deben enviarse muchos datos (imágenes en movimiento...) a lugares remotos.
- Puede ser afectado por barreras naturales.

También hay inconvenientes:

- Hay que codificar los datos si queremos seguridad.
- Existe un retardo importante entre el instante de emitir y el de recibir.
- Problemas de funcionamiento cuando hay eclipses en el satélite:
  - Hay que activar unas baterías cuando no llega la luz solar al satélite.

Eso ocurre cuando la Tierra se interpone entre el Sol y el satélite. Estos eclipses sólo se dan 21 días antes o después de los equinoccios y pueden durar hasta 70' ( $17,4^\circ / 360^\circ \cdot 24 \text{ h} = 70'$ ).

### Órbita geoestacionaria

Un satélite en órbita geoestacionaria es aquel que está a 36.000 km de la Tierra. A esta altura, el satélite da una vuelta a la Tierra por encima del ecuador en 24 horas.

- Hay que desconectar el enlace cuando el Sol y el satélite se encuentran dentro del haz de radiación de la antena terrenal (conjunción solar).

Por ejemplo, para una antena terrenal con un haz de 2°, como máximo durante todo el año habrá 80' de conjunción. Pensemos que la temperatura de ruido del Universo es de 3 °K, pero cuando pasa el Sol por delante es de 3.000 °K.

- Un error en el lanzamiento es muy caro (hay que tener un satélite de reserva).
- Un posible impacto de meteoritos puede acabar con el satélite.
- En un enlace por satélite, además de las pérdidas debidas a la distancia, deben considerarse pérdidas por desapuntamiento del haz, pérdidas debidas a la atenuación de la lluvia y pérdidas debidas a la absorción de los gases O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. La potencia recibida es determinada por la siguiente expresión, donde  $P_r$  es la potencia recibida,  $P_t$  la potencia transmitida,  $G_t$  la ganancia del transmisor,  $G_r$  la ganancia del receptor,  $\lambda$  la longitud de onda y  $R$  la distancia:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \frac{\lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \cdot \frac{1}{\text{Pérdidas}}$$

- Son sistemas de vida limitada a los que no tenemos un acceso directo. El desgaste está determinado, principalmente, por dos aspectos:
  - De vez en cuando hay que hacer correcciones de órbita en los satélites (la Tierra no es una esfera homogénea perfecta ni el satélite tampoco). Esto se hace activando unos motores que consumen combustible. Antes de que se acabe el combustible, hay que llevarlo a una órbita que caiga a la Tierra.
  - Las placas solares se desgastan rápidamente a causa de las diferencias de temperatura y del polvo cósmico.

Todos estos inconvenientes hacen que, en comunicaciones transoceánicas, los satélites actualmente convivan con los cables submarinos.

Normalmente se utiliza la banda C (enlace descendente *downlink* entre 3,7 y 4,2 GHz y enlace ascendente *uplink* entre 5,9 y 6,4 GHz), que permite *full-duplex* y además no lo afecta la lluvia. Se incorporan entre 6 y 20 repetidores con un ancho de banda de 35 MHz cada uno. Para evitar interferencias entre satélites, hay que separarlos un mínimo de 720 km si utilizan la misma banda. Si aumentamos la frecuencia, hay menos interferencia, y eso nos permite tener más satélites, ya que pueden estar más cerca. Por contra, las estaciones terrenales tienen que estar perfectamente orientadas al satélite deseado.

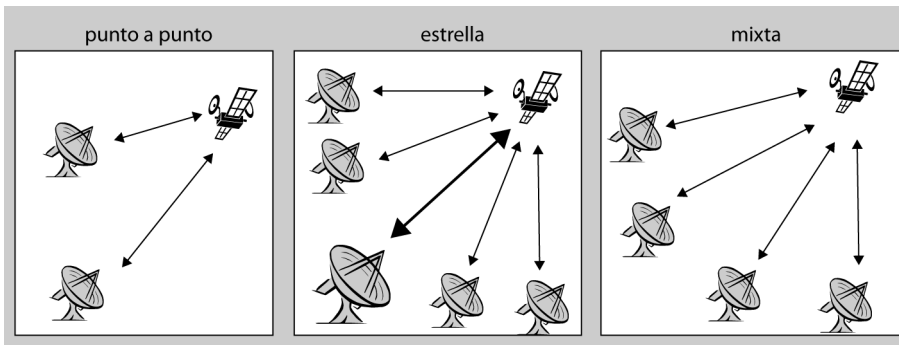
Otra ventaja es que, cuanto más frecuencia, se requieren antenas más pequeñas. Por el contrario, tenemos más pérdidas (la lluvia afecta). Así, para 6 GHz ( $\lambda = 5$  cm), se necesita un diámetro de antena de 5 m. En cambio, a 15 GHz ( $\lambda = 2$  cm), el diámetro requerido es de 2 m.

En comunicaciones por satélite se utilizan las bandas UHF (*ultra high frequency*; 0,3-3 GHz) y SHF (*super high frequency*; 3-30 GHz). Dentro de estas bandas hay otra partición a partir de 1 GHz (a partir de 1 GHz, los efectos de la refracción y la atenuación ionosférica son negligibles): banda *L* de 1 a 2 GHz, *S* de 2 a 4 GHz, *C* de 4 a 8 GHz, *X* de 8 a 12 GHz, *Ku* de 12 a 18 GHz, *K* de 18 a 27 GHz y *Ka* de 27 a 40 GHz.

En la banda *C*, las antenas deben tener un diámetro de entre 2 y 3 metros. En la banda *Ku* ( $\lambda = 21$  mm aproximadamente), las antenas son de unos 50 cm de diámetro y la lluvia atenúa 1 dB/km. En la banda *Ka* ( $\lambda = 10$  mm aproximadamente) las antenas no es necesario que sean parabólicas y la lluvia atenúa unos 5 dB/km.

En los sistemas VSAT (*very small aperture terminal*) se trabaja con tres configuraciones básicas (figura siguiente): la punto a punto, donde se establece un enlace entre dos estaciones de tierra mediante un satélite; la de estrella, donde están una estación de tierra que controla las distintas transmisiones punto a punto; y la mixta, que es como la de estrella pero sin estación de coordinación.

Configuraciones básicas VSAT



Los sistemas que viajan dentro de un satélite de comunicaciones son:

- **Subsistemas de comunicación** (carga útil):
  - Repetidores: su función es amplificar las señales que le llegan y trasladar los espectros. A veces, también pueden regenerar la información, con lo cual eliminamos el ruido del enlace de subida. Estos circuitos deben generar poco ruido y ser capaces de dar potencia.
  - Antenas: deben recibir y transmitir las señales. Los parámetros en juego son la ganancia y la cobertura. Si la cobertura debe ser muy grande, la ganancia no podrá serlo, puesto que seguramente cogeríamos mucho ruido.
- **Subsistemas de misión** (control de orientación y órbita del satélite):
  - Propulsión: con cohetes, se proporcionan incrementos de velocidad.
  - Telemando: envía y recibe información de control. Debe ser muy seguro.
  - Control térmico: debe permitir regular la temperatura.
  - Energía eléctrica: placas solares y baterías.

En función del tipo de órbita, los satélites pueden ser de órbita geoestacionaria, de órbita media o de órbita baja:

- **GEO** (*geosynchronous earth orbit*):
  - Están a 36.000 km de la Tierra y ya sabemos que a esta altura, el satélite puede girar a la misma velocidad que la Tierra. Por lo tanto, las antenas te-

renales saben dónde han de apuntar (siempre al mismo lugar). Su principal inconveniente es que el retardo entre que se emite y se recibe es grande (250 ms). Una ventaja es que con tres satélites se puede cubrir toda la Tierra.

Como la distancia del satélite al centro de la Tierra es de 42.164 km, éste debe recorrer  $2\cdot\pi\cdot 42.164$  km en un día. O sea, su velocidad es de 3 km/s.

- La vida útil de estos sistemas está entre los 10 y los 15 años.
  - No dan servicio a latitudes elevadas (expediciones a los polos, plataformas de petróleo...).
- **MEO** (*medium earth orbit*):
    - Situada entre el primer y el segundo cinturón de Van Allen, presenta una órbita circular entre 10.000 y 20.000 km. A estas distancias se puede tener una cobertura total de la Tierra con unos diez satélites.
    - Retardo: 100 ms (no interfiere notablemente una conversación).
  - **LEO** (*low earth orbit*):
    - Presenta una órbita baja, inclinada respecto al plano ecuatorial, situada entre 500 y 1.500 km. Las principales ventajas de que los satélites estén cerca de la Tierra son que los terminales de la Tierra pueden ser más pequeños (no necesitan emitir con tanta potencia como en los GEO) y que los retardos son también pequeños (50 ms).
    - El inconveniente es que al haber más satélites para cubrir una zona, el control es más difícil (un punto fijo sobre la Tierra cambiará de satélite en unos cuantos minutos). La proximidad a la Tierra también hace que su vida útil quede reducida a unos 5-10 años.
    - Pueden dar cobertura a los polos.
    - Lanzamiento económico debido a la distancia y al menor peso de los sistemas.

#### Los cinturones de Van Allen...

... son ciertas zonas de la atmósfera donde se concentra gran cantidad de partículas cargadas (protones y electrones).

### 5.3. Sistemas de órbita media

El **GPS** (*global positioning system*) es un sistema de órbita media unidireccional. Es el sistema más extendido para localizar la posición de un móvil en cualquier punto del planeta.

En 1950 aparecía el sistema **LORAN** como un sistema donde varias estaciones terrenales informaban de su posición a los terminales LORAN que hubiera por la zona. Éstos, por triangulaciones, podían calcular su posición. El sistema LORAN:

- No dispone de satélites y por lo tanto no calcula altura.
- Sólo cubre un 5% de la Tierra, ya que, para dar cobertura a un área, hay que colocar cerca estas estaciones terrenales.
- Tiene una precisión de unos 250 metros.

Estos inconvenientes hicieron ver la necesidad de un sistema de satélites para ayudar a obtener la posición.

Es un sistema de 24 satélites (seis planos de cuatro satélites inclinados  $55^\circ$  con respecto al horizonte) situados en una órbita MEO (20.000 km con un periodo orbital de 12 h) que transmiten continuamente información de identificación (número del satélite e instante de tiempo), llamada *efemérides*. Con estos datos, el usuario podrá calcular su latitud, longitud, altura, rumbo y velocidad. Para hacerlo, se basa en el tiempo que tardan en llegar las señales de los satélites (triangulación) y en la desviación de la frecuencia recibida (Doppler). Este sistema asegura que desde cualquier punto (con más de  $5^\circ$  de elevación sobre el horizonte) se ven como mínimo cuatro satélites de manera simultánea.

Un GPS tarda minutos a encontrar la primera posición, ya que en principio desconoce en qué parte de la Tierra se encuentra. Combinado con GSM, este tiempo es menor (porque la red GSM, mediante el canal BCCH –ver el apartado 1.2.4 de este mismo módulo– ya le dice en qué país se encuentra). Además, aumenta la autonomía, ya que pueden conectar y desconectar el equipo y así se reduce el consumo.

Como hay que conocer exactamente donde están los satélites en cada momento para poder hacer la triangulación, los **relojes** de los satélites y los terminales GPS son un punto clave.

En los satélites se ponen relojes atómicos ( $10^{-12}$  segundos de error cada 3 horas). Para reducir todavía más este error, se monitorizan desde la Tierra con estaciones de control que disponen de diez relojes atómicos. Por motivos de coste, en los terminales no se ponen relojes atómicos.

El reloj de un receptor GPS tiene un error aproximado de 1  $\mu$ s por cada segundo. Por este motivo, para hacer la triangulación no basta con tener visión de tres satélites (para las tres incógnitas de la posición), sino que hace falta un cuarto satélite que permita reducir los efectos del error en el reloj.

La triangulación es más correcta si los satélites que se están siguiendo están alejados entre sí (por eso los actuales receptores GPS tienen capacidad para seguir más de cuatro satélites, siempre que los tengan en su campo de visión).

El GPS tiene un error de unos 15 metros. El GPS diferencial (**DGPS**) consigue precisión en torno a los 3-5 metros combinando las señales de los satélites con señales procedentes de **estaciones terrenales perfectamente conocidas**.

La idea del DGPS está dando lugar a muchos sistemas en los que, gracias a tener estaciones terrenales de posición conocida cerca de donde está el receptor, podamos estimar qué errores está introduciendo el sistema GPS. Los más importantes son los disturbios ionosféricos y los errores en las órbitas. Estos tipos de sistemas pueden tener errores de un metro aproximadamente. Comentaremos dos: el RASANT y el WAAS.

#### El primer satélite GPS...

... se lanzó en 1978, y en 1986 se dio luz verde a todo el sistema. En 1991, pese a no estar del todo operativo, fue de mucha utilidad en la guerra del Golfo. La URSS dispone del suyo propio (GLONASS, *global orbitography navigation satellite system*)

#### Observación

Un retardo de 1 ns representa  $3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9} = 0,3$  m de error ( $e = v \cdot t$ , donde  $v = c$ , que es la velocidad de propagación de la onda electromagnética).

El Instituto Cartográfico de Cataluña difunde mediante el estándar **RASANT** (*radio aided satellite navigation technique*) las correcciones (error y velocidad del error en cada satélite) que calcula en la estación de Bellmunt de Segarra, equipada con GPS. Podemos tener errores de **un metro** con una degradación adicional de 0,5 m por cada 100 km de distancia en la estación de Bellmunt (que está situada cerca del centro geográfico de Cataluña). Lo difunde con el *radio data system* (RDS). Varios organismos europeos quieren que RASANT sea el sistema europeo para la difusión de correcciones diferenciales GPS a partir del RDS de las emisiones FM.

**RASANT**

El sistema RASANT fue desarrollado en Alemania e inició su actividad en 1996, con un uso intensivo para servicios topográficos y flotas de barcos a partir de 1999.

La estación de Bellmunt calcula el error de cada satélite y la velocidad de cambio de este error y lo empaqueta en un formato RTCM SC-104. Este formato se envía mediante el RDS (*radio data system*) de alguna emisora de FM. En el caso de Cataluña, se utiliza Catalunya Música, que abarca el 90% del territorio y al 95% de la población.

Para posicionar necesitamos un receptor RASANT (receptor FM con capacidad RDS y capacidad de descompresión de datos RASANT) y un receptor GPS con capacidad de entradas RTCM SC-104. Hay aparatos integrados.

El sistema **WAAS** está inicialmente pensado para Estados Unidos, pero es extrapolable a cualquier territorio. Veinticinco estaciones base sobre Estados Unidos monitorizan los datos de los satélites. Dos estaciones base recogen los datos de las veinticinco anteriores y crean un mensaje de corrección que envían en satélites geoestacionarios. Estos satélites geoestacionarios envían la información a los receptores GPS.

Las tres aplicaciones básicas del GPS son:

- **Navegación marítima:** a los terminales les basta con calcular dos dimensiones y, por lo tanto, son económicos.
- **Navegación aérea:** los terminales deben calcular tres dimensiones.
- **Control de flotas:** para redirigir vehículos (carreteras colapsadas), localizar vehículos perdidos, localizar vehículos que han activado un estado de emergencia, optimizar la logística en empresas de transporte de mercancías...

EGNOS es una mejora del GPS disponible desde marzo del 2003. Recibimos correcciones desde unos satélites geoestacionarios, que dan **integridad** a GPS. Así, mientras con GPS la resolución es baja en todo el mundo, con GPS y EGNOS la resolución mejora en la zona de Europa y con GPS, EGNOS y Galileo la resolución es buena en todo el mundo.

El sistema Galileo constará de treinta satélites a 24.000 km (el primero fue lanzado en el 2005). Este sistema, que se espera que en el 2013 ya tenga un



uso comercial, ofrecerá tres niveles de servicio con precisiones hasta 1 cm para servicios de pago:

- 1) Básico (y gratuito): pensado para el mundo del ocio. Su objetivo es que sea tan fácil saber la hora como la posición.
- 2) De pago y con mejores prestaciones, para el mundo empresarial.
- 3) Muy restringido con QoS el 100% del tiempo, para aplicaciones de seguridad.

#### Ventajas:

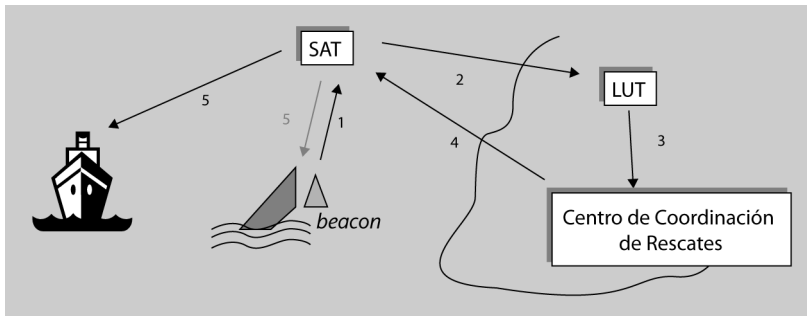
- **Independiza** a Europa respecto del GPS, que es propiedad del Departamento de Defensa de Estados Unidos.
- Dará **integridad** (no se necesitará el vídeo como soporte legal).

Con GPS, se necesita el vídeo como soporte legal. Con Galileo podrán establecerse sistemas de peaje automático, sin riesgo de confundir carreteras.

- Se podrá combinar con GLONASS y GPS para reducir los efectos de la propagación multicamino en las ciudades. Por ejemplo, puede mejorar los sistemas de guía para invidentes.
- Mejorará los sistemas de búsqueda y rescate **SAR** (*search and rescue*).

En la figura siguiente vemos la estructura general de un sistema SAR.

Estructura general de un sistema SAR



A grandes rasgos, cuando llega la petición de ayuda al satélite (1), se traslada a la unidad LUT de tierra (2), que la deriva al centro de coordinación de rescates (3). Este centro, además, puede comunicarse con el elemento que ha pedido ayuda mediante el satélite (4,5).

Galileo ofrecerá dos mejoras a los actuales sistemas:

- 1) Aumenta el número de satélites que pueden recibir una alarma (hasta ahora teníamos los GPS y Glonass; con Galileo tendremos treinta satélites más) y así se reduce el tiempo de recepción de las alertas.
- 2) Mejora lo que se llama *return link*. Este canal permite comunicar el centro de coordinación de rescates con el elemento que ha activado la alarma y así se puede detectar una falsa alarma o dar ayuda psicológica a las personas que han solicitado auxilio. Actualmente, este canal existe pero es de muy baja velocidad.

WEB

Podemos encontrar más información en [http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport/galileo/](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/).

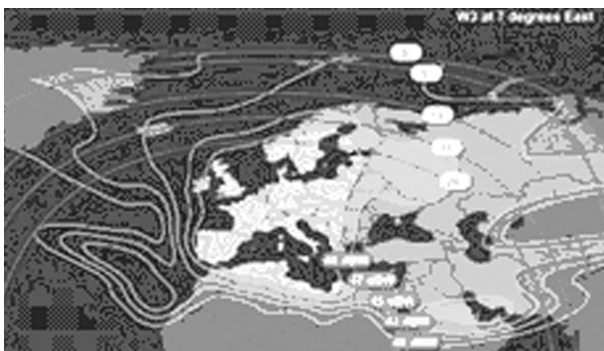
## 5.4. Sistemas de órbita geoestacionaria

En este apartado describiremos algunas de las constelaciones de satélites geoestacionarios existentes actualmente.

### Eutelsat

Eutelsat es una constelación de veintidós satélites creada en 1977. Al ser geoestacionarios, con uno de ellos se puede cubrir casi un tercio de la superficie terrestre. En la figura siguiente se muestra la cobertura de uno de ellos.

Cobertura de un satélite Eutelsat



La constelación Eutelsat permite ofrecer servicios por satélite a diferentes sistemas:

- **Euteltracs** presta servicios de datos a baja velocidad (p. ej., posición). Fue implantado en Estados Unidos por Qualcomm como Omnitrac. Utiliza un satélite.
- **Aramiska**, empresa belga que permite acceder a banda ancha por satélite para pymes europeas. A finales del 2006 ofrecía hasta 1.024 kbps en el enlace ascendente (*uplink*) y 3.072 kbps en el descendente (*downlink*).
- **OpenSky** ofrece hasta 2 Mbps en el *downlink*, con diferentes tarifas dependiendo de la velocidad mínima que garantiza. Requiere una antena parabólica y una unidad de recepción de satélite DVB.
- Hay otros sistemas que usan Eutelsat, como Flash10 ([www.flash10.com](http://www.flash10.com)), Satconxion ([www.satconxion.es](http://www.satconxion.es)), Divona ([www.divona.com](http://www.divona.com)), Web-Sat ([www.web-sat.com](http://www.web-sat.com))...

### Inmarsat

Inmarsat (International Maritime Satellite Organization) es una organización constituida en 1979 a escala mundial para dar servicio a toda la superficie marítima, aunque después se amplió también a tierra y aire. El sistema Inmarsat funciona desde 1982.

WEB

Podemos encontrar más información en [eutelsat.com](http://eutelsat.com).

WEB

Podemos encontrar más información en [www.aramiska.com](http://www.aramiska.com).

WEB

Podemos encontrar más información en [eutelsat.net](http://eutelsat.net), [broadcat.com](http://broadcat.com) y [opensky.net](http://opensky.net).

Dispone de once satélites en cuatro ubicaciones, de los cuales siete son de reserva. Como es un sistema GEO, no puede cubrir los polos. Dispone de unas treinta y nueve estaciones terrestres que unen los satélites con las redes nacionales e internacionales. Las comunicaciones satélite-móvil están en la banda L (en unos 1,6 GHz) y las satélite-Tierra en la banda C (3,2 GHz en un sentido y 6,4 GHz en el otro).

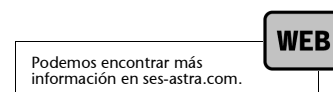
Inmarsat tiene definidos diferentes estándares. Algunos de ellos son:

- Inmarsat-A (1982): sistema analógico que ofrece telefonía bidireccional, fax y datos a 9,6 kbps. Algunos modelos tienen opción de datos de alta velocidad (64 kbps). Se necesitan parábolas de un metro (si están encima de un vehículo en movimiento, deben orientarse electrónicamente).
- Inmarsat-B (1992): es un sistema digital que sustituirá completamente el Inmarsat-A: tiene más capacidad de usuarios y es más económico para el usuario.
- Inmarsat-C: sistema *store and forward* de mensajería (600 bps) para el control de flotas. Es muy sencillo hacer llamadas de grupo. Los mensajes pueden ser de hasta 32 KB. Evoluciona hacia el mini-C.
- Inmarsat-D: sistema de mensajería bidireccional (no simétrico). El D+ incluye GPS.
- Inmarsat-E: sistema para emergencias (p. ej., hundimientos de barcos). Al contacto con el agua, y combinado con GPS, emite mensajes de socorro.
- Inmarsat mini-M (1997): ofrece telefonía, fax y datos a 2,4 kbps, pero puede utilizarse en tierra, mar y aire. Dimensiones como un PC portátil.
- Inmarsat también tiene estándares sólo aeronáuticos.

En los últimos años, Inmarsat está definiendo nuevos sistemas que llama GAN (velocidades hasta 64 kbps) y BGAN (*broadband* GAN, hasta 492 kbps).

### Astra

ASTRA fue, en 1988, el primer satélite privado de Europa. Dispone de trece satélites geoestacionarios en cuatro posiciones y ofrece servicios de radio, televisión y datos (2 Mbps de subida y 12 Mbps de bajada).



### Hispasat

En 1989 se crea Hispasat (hispatat.com). Dispone de seis satélites (B, C, D, Amazonas, Xtar-Eur, Spainsat). Cubre Europa, América y parte de Asia y África.



Algunos de los servicios que ofrece son:

- Redes VSAT de telecontrol (Repsol, Cepsa, Unión Fenosa...) y corporativas (Loterías, Aena, Correos...).

- Redes de distribución de datos de radio (RNE, SER, COPE...) y televisión (distribución de señal entre cadenas, Digital+, RTVE...).
- Enlaces punto a punto y troncales (Península-Baleares, Península-Canarias...).
- Internet de banda ancha.

Los servicios de banda ancha SmartBand ofrecen acceso a Internet unidireccional (retorno por línea telefónica) pero también punto a punto con DVB-RCS (ideal para lugares donde no hay ningún acceso a red, como gasolineras o cabinas telefónicas rurales).

**WEB**

Podemos encontrar más información en [www.satconxion.es](http://www.satconxion.es).

## Thuraya

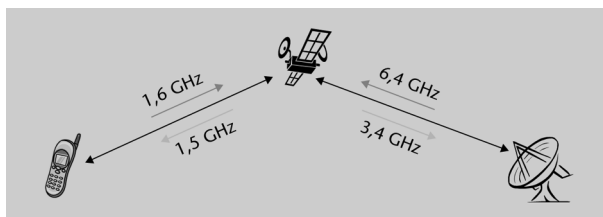
En el 2000 se lanza un satélite que da lugar al sistema Thuraya. Da cobertura a Europa, Asia central y África del Norte.

Las principales prestaciones de **Thuraya** son una calidad de voz GSM, datos de hasta 9.600 bps, SMS y otros servicios típicos de GSM, prepago o pospago, GPS y transmisión de posición GPS vía GSM. En la figura siguiente vemos las bandas frecuenciales de trabajo.

**WEB**

Podemos encontrar más información en [satlink.es](http://satlink.es) y [thuraya.com](http://thuraya.com).

Sistema Thuraya



## 5.5. Sistemas de órbita baja

En este apartado describiremos algunas de las constelaciones de satélites de órbita baja existentes actualmente.

### Iridium

La teoría de los sistemas LEO data de 1987. Iridium fue el primer sistema LEO impulsado por Motorola. Pensado inicialmente con setenta y siete satélites, se quedó con sesenta y seis. Al ser sistemas de órbita baja, los satélites pueden tener más peso y el procesado se hace a bordo.

Dispone de sesenta y seis satélites en órbita circular polar a 765 km de altura distribuidos en seis planos. A esta altura, el satélite va más rápido que la Tierra.

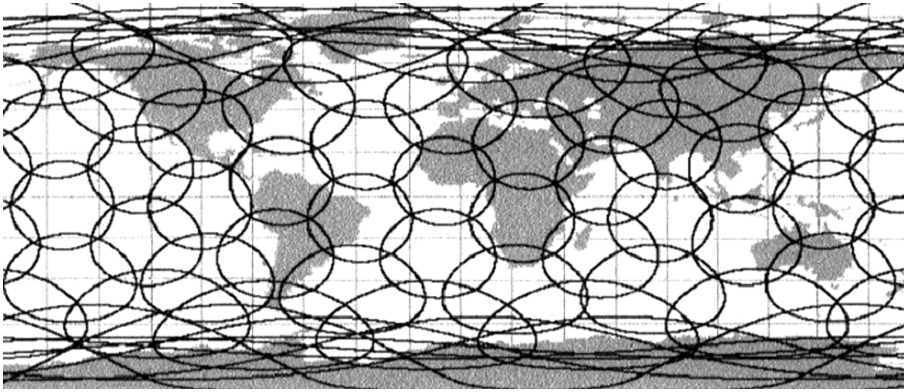
Cada satélite proyecta cuarenta y ocho haces (con un diámetro de la célula de 650 km) en la banda *L*. En esta banda (1 GHz) la lluvia no influye. Además de estas comunicaciones entre móviles y satélite, también se hacen comunicaciones entre satélites, y entre satélites y estación fija en la banda *Ka*. En total, cada satélite proyecta un haz global de 4.400 km de diámetro.

No necesita frecuencias emparejadas como el Inmarsat; aquí la misma banda se utiliza para transmitir en los dos sentidos.

Las celdas (de dimensión constante, como vemos en la figura siguiente) se mueven junto con los satélites. Por lo tanto, es la celda la que pasa de unos usuarios a otros y no al contrario como hasta ahora. Las celdas se mueven sobre la superficie a 23.760 km/h y, por lo tanto, hay que hacer traspasos continuamente.

Si las celdas se mueven a 23.760 km/h y el diámetro del haz es de 650 km, hay que hacer unos  $23.760 / 650 = 40$  traspasos en una hora.

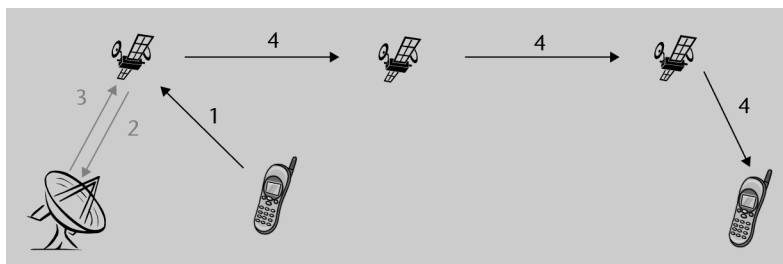
Celdas Iridium



Cuando un móvil quiere establecer una llamada, se sigue el proceso de la figura siguiente:

- 1) Su señal llega al satélite más cercano (1).
- 2) El satélite reenvía la señal a la Tierra para ver si este usuario tiene el acceso permitido (2,3).
- 3) Después reenvía la señal por tierra o bien por aire mediante los otros satélites (4).

Comunicaciones Iridium



WEB

Podemos encontrar más información en [iridium.com](http://iridium.com) y [fibertel.es](http://fibertel.es).

Iridium inició el servicio de voz en 1998, en 1999 presentó la suspensión de pagos y un año después se declaró en bancarrota. En el año 2001 reemprendieron las actividades con el nombre de **Iridium Satellite**.

## Globalstar

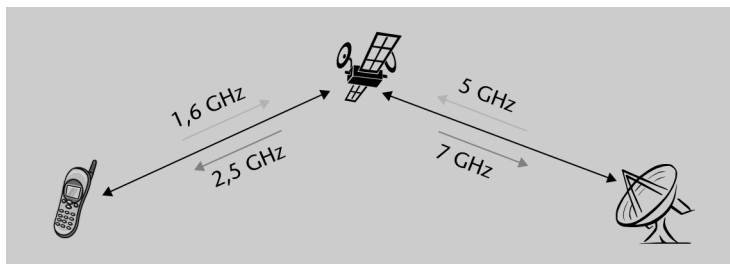
Mientras que el consorcio Globalstar existe desde 1991, el servicio se ha puesto en marcha en 1999. Globalstar es un sistema de cuarenta y ocho satélites operativos (ocho planos de seis satélites) y cuatro de reserva, a 1.400 km, muy parecida a Iridium pero con la diferencia de que, mientras que Iridium era una red independiente, Globalstar es un complemento de otras redes. Globalstar utiliza la red móvil terrestre del lugar más próximo al usuario, y por eso **los terminales son duales** (GSM por defecto). Los satélites sólo son repetidores. La señal va desde el terminal hasta el satélite, y éste lo rebota a la estación más próxima (*gateways*), que es el que hace la conexión (figura siguiente).

El sistema funciona con unos cincuenta *gateways* (aproximadamente) y ofrece cobertura entre las latitudes 70° Norte y 70° Sur, a excepción de buena parte de África y Asia.

**WEB**

Podemos encontrar más información en [globalcom-insa.com](http://globalcom-insa.com).

Globalstar



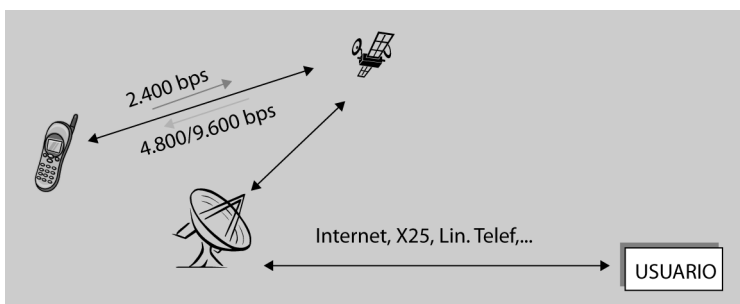
## Orbcomm

Orbcomm es una constelación de satélites LEO que ofrece mensajería bidireccional (de 6 a 250 bytes) y localización precisa de móviles. En la figura siguiente vemos las velocidades en el enlace de usuario.

**WEB**

Podemos encontrar más información en [globalcom-insa.com](http://globalcom-insa.com).

Orbcomm



## Actividades

**1.** Uno de los elementos del sistema GSM son las BTS (*base transceiver station*). Estos elementos hacen de enlace entre los terminales móviles y la red GSM y básicamente constan de antenas para transmitir/recibir, amplificadores y equipos de radiofrecuencia. Las antenas son la parte más visible (suelen ser la parte más elevada de la BTS) y el resto de los equipos están cerca, típicamente en un armario de comunicaciones dentro de una caseta.

Hay diferentes tipos de BTS dependiendo del lugar al que se quiera dar cobertura.

- BTS móviles que pueden servir para reforzar la cobertura en lugares que tienen puntas de tráfico (grandes celebraciones deportivas...).
- BTS para lugares con características especiales de propagación (metro, túneles largos, parkings...).
- BTS repetidoras, pensadas para poner en lugares donde la cobertura está muy ajustada y que hacen la función de aumentar el nivel de señal.
- BTS clásicas (cobertura en ciudades, cobertura de carreteras...).

Muy a menudo los equipos son los mismos y las diferencias entre BTS están sólo en las antenas.

Se pide que hagáis una investigación de cómo son por dentro las BTS (equipos y antenas) de los diferentes tipos que se encuentran en el mercado (atendiendo a las necesidades de los lugares donde se quiere dar cobertura). Algunos de los datos que podéis averiguar son:

- Las potencias de transmisión (en W y/o dBm).
- Las ganancias típicas de las antenas más habituales, los diagramas de radiación y la forma de estas antenas.
- El precio de estas instalaciones.
- El número de portadoras GSM que pueden manejar (y, por lo tanto, el número de usuarios a los cuales pueden dar servicio).
- Si son sistemas válidos para 900 y 1.800 MHz al mismo tiempo.
- Etc.

**2.** El sistema de telefonía móvil GSM ha sido en Europa el gran dinamizador de las comunicaciones móviles. El gran número de redes instaladas en toda Europa hace que la tecnología GSM sea muy robusta, e incluso se han creado algunas variantes de aplicación en sectores más específicos.

Una de ellas es la llamada *GSM-R (GSM-railway)*. Este sistema, basado en GSM, pretende dar solución a las cada vez mayores necesidades de comunicación de las empresas ferroviarias. Así, por ejemplo, en junio del 2003 saltó a la luz el caso de un accidente mortal de tren en Chinchilla (Albacete) en un tramo de vía única en el que el sistema de comunicación no estaba operativo.

El GSM-R ha sido adoptado por varios países europeos (entre los cuales, España) y actualmente está en una fase inicial de implantación.

Este ejercicio pretende que os introduzcáis en este tema, y que habléis del sistema GSM-R y de su situación en España. Algunos de los temas para tratar son:

- Con respecto al sistema GSM-R: sus orígenes, países que lo adoptan, ventajas, fundamentos técnicos...
- Con respecto a su situación en España: plazos de implantación, pruebas que se están realizando, suministradores de los equipos...

## Ejercicios de autoevaluación

**1.** Suponed una estación base en la que hay un único operador GSM transmitiendo con tres portadoras. Para cumplir la normativa de distancias de seguridad, suponed que este operador tiene que garantizar una distancia de seguridad de cinco metros. Si doblamos el número de portadoras, ¿se doblará también la distancia?

**2.** Suponed que en un país existe una operadora que sólo dispone de licencia GSM900 y otra operadora que sólo dispone de licencia DCS1800. Suponiendo que las dos operadoras tienen un número de estaciones base similar, razonad cuál estará en mejores condiciones de dar servicio en áreas rurales alejadas de núcleos de población y cuál lo estará para dar servicio en zonas urbanas con alta demanda de tráfico.

**3.** El sistema GSM, mediante el canal SCH, nos da información de sincronización. Una de las informaciones más importantes es decirnos en qué trama de la hipertrama estamos situados.

Recordemos que en GSM una hipertrama está formada por 2.048 supertramas, y cada supertrama está formada por 26 multitramas de 51 tramas. Con 19 bits tiene suficiente para decirnos en qué trama estamos. Básicamente la hipertrama es tan larga por motivos de seguridad. Suponed ahora que una mejora en los algoritmos de seguridad nos permitiera reducir la medida de la hipertrama y, en concreto, fuera suficiente con 250 supertramas. ¿Cuántos bits nos harían falta para decirnos en qué trama estamos?

**4.** En GSM, los algoritmos de autenticación, conocidos como A3 y A8, pueden ser diferentes entre distintos operadores. Cuando vamos a un país extranjero con nuestro móvil y nos autenticamos, el operador extranjero no conoce nuestra clave secreta ni los algoritmos A3 y A8 que se utilizan, pero es capaz de hacer la autenticación todas las veces que le haga falta. ¿Cómo lo hace?

**5.** Las antenas de las estaciones base GSM pueden ser orientables manualmente, eléctricamente o remotamente. Explicad las diferencias entre ellas.

**6.** Para protegernos de las radiaciones de radio hay varias normativas, una de las cuales hace referencia al parámetro llamado SAR (*specific absorption rate*). Los fabricantes de terminales móviles deben dar el valor del SAR de sus equipos. Por ejemplo, el Nokia 6610i tiene un SAR de 0,73 W/kg y el Nokia 7280 tiene un SAR de 0,83 W/kg. Explicad qué es el SAR y decid cuál de los dos terminales anteriores es mejor en cuanto a las radiaciones que ocasiona.

**7.** El PAGCH (*paging access grant channel*) es uno de los canales de GSM. Explicad qué informaciones van en este canal y decid también si va de base a móvil o de móvil a base.

**8.** Explicad entre qué entidades de GPRS se establece el proceso de *tunneling*, dejando clara cuál de las entidades hace la solicitud del túnel y cuál es la utilidad del túnel.

**9.** En el enlace descendente de GPRS, la red transmite en los terminales el TFI (*temporary flow identity*, 5 bits) y el USF (*uplink state flag*, 3 bits). Explicad qué son estos dos parámetros.

**10.** A continuación se mencionan cuatro sistemas de localización mediante GSM: a) COO; b) COO + TA; c) COO + TA + AOA; d) COO + AOA. Recordad que COO indica *cell of origin*, TA quiere decir *time advance* y AOA indica *angle of arrival*. Razonad cuál de los sistemas anteriores es más adecuado para localizar a un usuario que se encuentra en un entorno rural y cuál es más adecuado para localizar a un usuario que se encuentra en un entorno urbano.

**11.** En GPRS se habla del contexto PDP y del contexto de movilidad. ¿Cuál de las entidades GPRS (SGSN y GGSN) tiene más responsabilidad en la creación de cada uno de estos contextos? Razonadlo.

**12.** Otra manera de llamar un terminal GPRS de clase 9 es decir que se trata de un terminal GPRS 3+2. ¿Cuál es el significado de este 3+2?

**13.** ¿En un sistema CDMA con 20 dB de ganancia de procesamiento ( $G_p = 20$  dB), cuántos bits se generan en la salida del emisor cuando la secuencia que debe transmitirse es 0 0 1 1 0 1? Razonadlo.

**14.** UMTS define una interfaz que une los RNC (interfaz Iur). En GSM esta interfaz no era necesaria (entre los elementos que hacían funciones similares a las del RNC). ¿Por qué?

**15.** Comentad las funciones de los dos elementos básicos del acceso de radio UMTS (RNC y Nodo B) e identificad los elementos de GSM con funciones similares.

**16.** Los sistemas RASANT y WAAS sirven para mejorar las prestaciones del sistema GPS. ¿Cuáles son las diferencias entre estos dos sistemas?

**17.** En el sistema GPS es fundamental tener los receptores perfectamente sincronizados, pero no pueden ponerse relojes atómicos por su elevado precio (entre otras consideraciones). ¿Qué se hace para que los receptores puedan funcionar correctamente sin disponer de estos relojes atómicos?

**18.** Indicad las ventajas del futuro sistema de posicionamiento Galileo con respecto al actual sistema GPS.



## Solucionario

1. No, ya que  $d = \sqrt{\frac{PIRE}{S_{LIM} \cdot 4\pi}}$

Doblar el PIRE implica multiplicar la distancia por 1,41 ( $\sqrt{2}$ ).

2. Cuanta más frecuencia, más dificultades para la propagación. Así, la operadora que tiene licencia en DCS1800 tendrá más dificultades para disponer estaciones base con un gran radio de cobertura. A cambio, en la banda de 1.800 MHz hay más canales que en la banda de 900 MHz, y se podrán tener más comunicaciones simultáneas en entornos que lo requieran. Así, GSM900 está en mejores condiciones de dar servicio en áreas rurales alejadas de núcleos de población y DCS1800 lo está para dar servicio en zonas urbanas con alta demanda de tráfico.

3. Observamos que, entre el caso de GSM y el caso que nos plantean, sólo cambia el número de supertramas. Donde antes teníamos que codificar 2.048 supertramas, ahora sólo tenemos que codificar 250. En el primer caso, nos hacen falta 11 bits ( $2^{11} = 2.048$ ), pero ahora sólo hacen falta 8 ( $2^8 = 256$ ). Hemos podido reducir 3 bits y, por lo tanto, en lugar de 19 bits, con  $19 - 3 = 16$  bits nos basta.

4. La autenticación se realiza gracias a las tripletas, que independizan los algoritmos. Así, el operador extranjero pedirá tripletas a la red propia del usuario. Estas tripletas se habrán construido con los algoritmos propios, que tienen que coincidir con los de la SIM del terminal.

5. La orientación manual se realiza cuando movemos físicamente la antena; la eléctrica, cuando desde la antena ajustamos una señal para que cambie la orientación del haz sin mover la antena; la remota es como la eléctrica, pero sin que haya que hacer la operación sobre la misma antena.

6. El SAR indica los watts que llegan a cada kilogramo de masa corporal. Las pruebas se hacen en laboratorio, poniendo el terminal al lado de un cuerpo artificial y midiendo las radiaciones que le llegan. Así, un móvil con un SAR de 0,73 W/wg es menos nocivo que otro con un SAR de 0,83 W/kg.

7. Este canal lo envía la base hacia todos los móviles y lleva los *pagings* (cuando la red busca teléfonos móviles porque, por ejemplo, los están llamando) y las confirmaciones de acceso (cuando un móvil ha pedido un acceso y la red le dice que lo ha conseguido).

8. Un túnel se hace entre el SGSN y el GGSN a petición del primero. Si un terminal GPRS quiere acceder a redes externas, se comunica con la entidad que lo va siguiendo (SGSN) y le pide que se comunique con un GGSN (que son los que tienen contacto con las otras redes).

9. El TFI indica para qué terminal es aquel bloque *downlink*, y el USF indica qué terminal puede transmitir en el siguiente bloque *uplink*.

10. En un entorno urbano las distancias son muy cortas, y el *time advance* no nos da una buena aproximación de la distancia a la que estamos de la base. Además, en estos entornos las células suelen ser sectoriales, y el mejor método sería el COO + AOA. En un entorno rural, no se suele aplicar sectorización, y el método COO + TA sería el más adecuado.

11. El contexto PDP lo pide el terminal móvil para poder enviar o recibir datos por GPRS. El GGSN (elemento en contacto con las redes externas) es el que tiene una responsabilidad mayor.

El contexto de movilidad depende del SGSN, ya que es el elemento que va siguiendo el terminal aunque éste se mueva.

12. Significa que el terminal puede hacer uso de tres ranuras de bajada y dos de subida. Si la velocidad por ranura es de 13,4 kbps (aproximadamente), este terminal podría recibir datos a  $13,4 \times 3 = 40,2$  kbps y enviar a  $13,4 \times 2 = 26,8$  kbps.

13. Una ganancia de procesamiento de 20 dB se corresponde con una ganancia de 100 ( $10^{20/10}$ ). Eso quiere decir que cada bit de datos se multiplicará por 100 chips. Como en la entrada tenemos 6 bits, en la salida tendremos  $6 \times 100 = 600$  chips.

14. En UMTS es muy importante la coordinación entre los RNC porque un terminal puede estar conectado a más de un RNC (macrodiversidad). En GSM, un terminal sólo está conectado a un BSC y no hace falta coordinación.

**15.** El nodo B hace funciones similares al BTS de GSM. Adapta las señales en la interfaz de radio y desde la interfaz de radio, mide calidad y potencia, hace *handover* entre sectores del mismo nodo B y gestiona el control de potencia.

El RNC hace funciones similares al BSC de GSM. Gestiona los recursos de radio (traspasos...), controla la movilidad de los terminales y hace el *handover* entre diferentes nodos B. Para facilitar este trabajo, los RNC están unidos entre sí con una interfaz propia.

**16.** Tanto RASANT como WAAS pretenden informar a los terminales GPS de posibles errores introducidos por el medio. Para hacerlo, hay unas estaciones de referencia que disponen de terminales GPS y, como conocen su posición exacta, pueden determinar el error existente y transmitirlo a los receptores GPS. En RASANT, esta transmisión se hace mediante emisoras FM por RDS, mientras que en WAAS se hace mediante satélites geoestacionarios que informan de estas correcciones a los receptores.

**17.** En el sistema GPS se considera que, además de las tres incógnitas de la posición ( $X, Y, Z$ ) hay una cuarta incógnita, que es el error del reloj del terminal. Al tener cuatro incógnitas, el sistema necesita trabajar con los datos de cuatro satélites, que debe tener en visión de manera simultánea. Si el error de los receptores fuera cero, con los datos de tres satélites tendría suficiente.

**18.** GPS se pensó para uso militar y después se adaptó para uso civil, mientras que Galileo está pensado para uso civil (de pago y gratuito). La resolución de Galileo será superior a la del actual GPS. Además, todavía tendrá mejor resolución si el receptor recibe datos de la constelación Galileo y de la constelación GPS al mismo tiempo.

## Glosario

**AuC** *m* Centro de autenticación del estándar GSM.

**BSC** *m* Controlador de estaciones base del estándar GSM.

**BTS** *f* Estación base del estándar GSM.

**CDMA** *m* Acceso múltiple por división en código.

**CEPT** *f* Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones. Es un organismo europeo que agrupa a los reguladores de comunicaciones.

**DCS** *m* Estándar de telefonía móvil similar a GSM pero que trabaja a 1.800 MHz.

**DL** *m* Enlace descendente.

**DS** *f* Secuencia directa (uno de los dos tipos de CDMA).

**EDGE** *m* Estándar de telefonía móvil similar a GSM pero que consigue velocidades de transmisión más elevadas (384 kbps).

**EMS** *m* Servicio de mensajes cortos ampliado (tiene más prestaciones que el SMS).

**ETSI** *m* Instituto de Estándares Europeos de Telecomunicaciones.

**FACCH** *m* En GSM, es el canal rápido de control en modo dedicado.

**FDD** *m* Duplexado en frecuencia.

**FDMA** *m* Acceso múltiple por división en frecuencia.

**GEO** *m* Satélite en órbita geoestacionaria.

**GGSN** *m* Nodo de soporte pasarela en el estándar GPRS.

**GPRS** *m* Servicio de radio de paquetes. Es una evolución de la red GSM.

**GPS** *m* Sistema de posicionamiento global con satélites.

**GSM** *m* Sistema global de comunicaciones móviles. Es el estándar europeo de comunicaciones móviles de segunda generación.

- HLR** *f* Base de datos de usuarios locales en GSM.
- HSCSD** *f* Mejora del GSM que permite asignar más de un canal a un usuario, garantizando la velocidad.
- HSDPA** *m* Acceso de paquetes de alta velocidad en el enlace descendente. Es una evolución de la red UMTS.
- IMEI** *m* Identificador del equipo móvil en GSM.
- IMSI** *m* Identificador del abonado móvil en GSM.
- ITU** *f* Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- LEO** *m* Satélite en órbita baja.
- MEO** *m* Satélite en órbita media.
- MMS** *m* Servicio de mensajes multimedia
- MSC** *m* Centro de conmutación en el estándar GSM.
- OMS** *f* Organización Mundial de la Salud.
- OVM** *m* Operador móvil virtual.
- PAGCH** *m* Canal de *paging* en el estándar GSM.
- PCU** *f* Unidad de control de paquetes en el estándar GPRS.
- PDP** *m* El contexto PDP, en el estándar GPRS, contiene toda la información para que un terminal pueda comunicarse con otro.
- PIRE** *f* Potencia isotrópica radiada equivalente.
- QoS** *f* Calidad de servicio.
- RACH** *m* Canal de acceso aleatorio en GSM.
- RAM** *f* Memoria de lectura y escritura.
- RNC** *m* Controlador de radio de UMTS, con una función similar al BSC de GSM.
- ROM** *f* Memoria sólo de lectura.
- SACCH** *m* En GSM, es el canal lento de control en modo dedicado.
- SAR** *f/m* En telefonía móvil, el SAR es la tasa de absorción específica de un terminal. En sistemas por satélite, los SAR son los sistemas de búsqueda y rescate.
- SAT** *f* Herramientas para crear aplicaciones basadas en la tarjeta SIM de los terminales móviles.
- SGSN** *m* Nodo de soporte de seguimiento en el estándar GPRS.
- SIM** *m* Módulo que se inserta en un terminal móvil y que contiene los datos del abonado.
- SMS** *m* Servicio de mensajes cortos.
- TA** *m* En GSM, es el *time advance* y da una idea de la distancia entre el terminal y la estación base que le está dando servicio.
- TDD** *m* Duplexado en tiempo.
- TDMA** *m* Acceso múltiple por división en tiempo.
- TIA** *f* Agencia Industrial de las Telecomunicaciones de los Estados Unidos.
- TMSI** *m* En GSM, es una versión abreviada y temporal del identificador de abonado IMSI.
- TRAU** *f* Unidad adaptadora de velocidad definida en el estándar GSM.

**UL** *m* Enlace ascendente.

**UMTS** *m* Estándar europeo de telefonía móvil de tercera generación.

**VLR** *f* Base de datos de usuarios visitantes en GSM.

**VSAT** *m* Sistema de satélites que pueden recibirse con antenas de pequeño diámetro.

**WAP** *m* Protocolo de acceso sin hilos, pensado para redes que no permiten grandes velocidades, como por ejemplo GSM.

## **Bibliografía**

**Lluch, C.; Rábanos, J. M.** (2001). *Comunicaciones móviles 3G UMTS* (vol. 1 y 2). Madrid: Telefónica Móviles.

**Calvo, M.** (2004). *Sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación*. Madrid: Fundación Airtel-Vodafone.