



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR



Trabajo integrador

Global System for Mobile Communications

Instituto de Ingeniería Eléctrica - Facultad de Ingeniería
Universidad de la República
2023

Grupo

Arimón Ravazzani, Analía - (5.040.376-5)
Vázquez Sánchez, Tomás - (5.020.594-1)

Índice

1. Introducción	2
2. Descripción de la tecnología	4
2.1. Esquema general de transmisión y recepción	4
2.2. Multiple Access	4
2.2.1. FDMA	5
2.2.2. TDMA	5
2.2.3. SDMA	7
2.3. Canales lógicos	7
2.3.1. Canales de tráfico	7
2.3.2. Canales de señalización	8
2.3.3. Establecimiento de una conexión	9
2.4. Tramas	10
2.5. Codificación de fuente	10
2.5.1. Speech encoder	11
2.6. Codificación de canal	13
2.6.1. Full-rate speech	13
2.6.2. Mensajes de control y datos	14
2.6.3. Interleaving	15
2.7. Modulación	16
2.8. Ecualización	17
2.9. Esquema completo	19
3. Conclusiones	20
Referencias	21

1. Introducción

La telefonía móvil de segunda generación nace alrededor de los años 90 y se caracteriza principalmente por digitalizar la comunicación, modificando los sistemas que hasta entonces eran analógicos. La digitalización permite mejorar defectos de los sistemas analógicos, tales como la mala utilización del espectro (una frecuencia se le asignaba a un único usuario) y la poca flexibilidad (solo se admitían señales de voz).

En contraste, las tecnologías 2G mejoran la eficiencia de la utilización del espectro, tanto permitiendo utilizar el mismo ancho de banda para varios usuarios simultáneamente, como utilizando la misma tecnología para otros servicios como los mensajes de texto, fax, etc. A su vez, la digitalización permite encriptar los mensajes ofreciendo un protocolo seguro, disminuir costos dado el avance de los componentes digitales y disminuir el tamaño de los equipos, permitiendo mayor portabilidad.

GSM (*Global System for Mobile Communications*) es un estándar de segunda generación desarrollado en Europa como un acuerdo entre varios países, con la finalidad de crear un protocolo común, permitiendo utilizar los mismos dispositivos en varios países y lograr conectividad en todo Europa (los protocolos de primera generación solían ser nacionales). A su vez generar un estándar común también permite justificar la gran inversión industrial en equipos y disminuir costos. La primera implementación fue lanzada por la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) en 1991.

Los objetivos de GSM fueron :

- Mejorar la calidad del audio
- Mejorar la eficiencia espectral
- Roaming internacional
- Brindar servicios de telefonía y datos básicos (SMS, fax, etc.) y ser flexible frente a futuros cambios
- Que pueda ser útil tanto en áreas muy pobladas como poco pobladas.
- Brindar servicios de ISDN (Red Digital de Servicios Integrados)
- Bajo costo (principalmente en los dispositivos móviles)
- Fácil transición desde los sistemas vigentes al momento
- Seguridad (encriptación de los datos)
- Interconexión con la PSTN (Red Telefónica Pública Conmutada) utilizando los sistemas de señalización existente.

Desarrollando en alguno de ellos se puede ver que la digitalización permite mejorar la calidad del audio con sistemas correctores de errores, así como compartir el canal dividiéndolo en frecuencia mediante *slots* temporales.

A su vez al enviarse bits de información, se flexibiliza el origen de los mensajes enviados, dato no menor ya que, aunque en la época seguía predominando la comunicación por voz, con el crecimiento de internet existía poca certeza respecto al futuro y se buscaba que el protocolo se pueda adaptar a las nuevas necesidades.

ISDN y PSTN son redes diseñadas para transmitir datos y voz a través de teléfonos. ISDN es para servicios digitales (de voz y datos) y PSTN es una red telefónica tradicional. El servicio pretendía ser compatible con las comunicación existentes tanto de datos o de voz, analógicas o digitales.

El sistema GSM tuvo mucho éxito, ya que se convirtió en un estándar global, lo cual permitió interoperabilidad y Roaming entre distintas redes y países. Esto facilitó la comunicación global y

el uso de servicios móviles en múltiples ubicaciones. Una gráfica de crecimiento de usuarios en Europa se presenta en la [Figura 1](#).

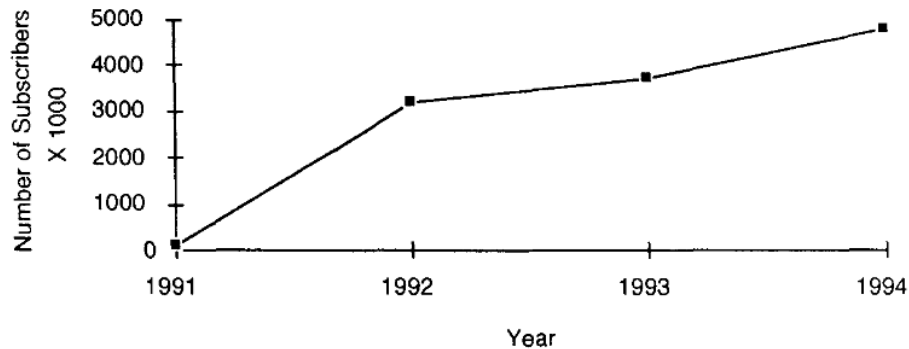


Figura 1: Gráfica extraída de la referencia [1], que muestra el crecimiento de usuarios GSM en Europa durante los primeros años.

El presente documento se limitará a la descripción de la comunicación entre la radio-base y el dispositivo móvil. En este contexto se abordarán los siguientes procesos: codificación de fuente, codificación de canal, *interleaver* y modulación, además de una descripción general de la tecnología. Por otro lado se trabajará sobre el ecualizado y el entramado de los datos. Todo esto será abordado para el caso de los mensajes de información que contienen un discurso humano.

2. Descripción de la tecnología

El sistema GSM es digital y esta basado en tecnología de acceso múltiple en el tiempo TDMA *narrowband*, donde cada canal en frecuencia se compartirá entre varios usuarios. Posee 200kHz de separación entre portadoras, de las cuales cada una de ellas se divide en el tiempo para 8 usuarios. La implementación de TDMA mejoró la capacidad de GSM, y redujo los costos de las estaciones base comparado con el sistema de primera generación, que utilizaba únicamente FDMA.

La primera versión de GSM desarrollada para Europa tenía asignado un ancho de banda total de 25MHz, que iban desde los 890MHz hasta 915MHz en el caso de uplink, y desde los 935MHz hasta los 960MHz para downlink, como se puede observar en la [Figura 2](#). Esto permite una cantidad de 125 canales, cada uno con 200kHz de ancho de banda. Asignando slots temporales a los usuarios mediante la tecnología TDMA, se logra un máximo de 1000 canales a ser utilizados.

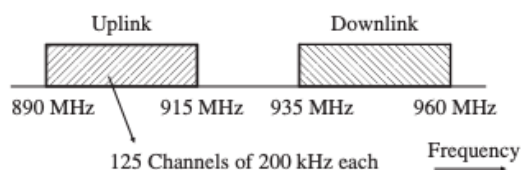


Figura 2: Anchos de banda para *uplink* y *downlink* en la primera versión de GSM. Imagen extraída de la referencia [3].

Luego de que el sistema tomó protagonismo en Europa, se necesitaron más canales disponibles, por lo cual se añadió un rango de frecuencias que iba desde los 1710MHz hasta los 1785MHz para *uplink* y desde los 1805MHz hasta 1880MHz para *downlink*. Estos 75MHz extra proporcionaron otros 375 canales. En la [Figura 3](#), se puede observar una tabla con la evolución de los rangos de frecuencia asignados para las distintas versiones.

Band	ARFCN	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
GSM 900 (primary)	0–124	890–915	935–960
GSM 900 (extended)	975–1023, 0–124	880–915	925–960
GSM 1800	512–885	1710–1785	1805–1880
GSM 1900 (North America)	512–810	1850–1910	1930–1990
GSM 850 (North America)	128–251	824–849	869–894
GSM-R	0–124, 955–1023	876–915	921–960

Figura 3: Anchos de banda asignados para las distintas versiones. Imagen extraída de la referencia [3].

2.1. Esquema general de transmisión y recepción

En la [Figura 4](#) se puede observar un diagrama de bloques simplificado del sistema GSM para el caso de señales de voz transmitidas desde la radio-base hasta la MS (*Mobile Station*).

A grandes rasgos la información pasa por 5 procesos antes de ser enviada. Primeramente se comprime con el *speech encoder* para eliminar información redundante (codificación de fuente). Luego pasa por un proceso de codificación de canal con el objetivo de corregir y detectar errores y por un *interleaver* que mezcla varios “paquetes” de información para disminuir el largo medio de los errores de ráfaga. Después se pasa por un proceso de cifrado para garantizar la seguridad de los datos, y finalmente se modula para transmitir la señal.

2.2. Multiple Access

El objetivo de las técnicas *Multiple Access* es permitir que varios usuarios tengan un recurso asignado para poder comunicarse de una manera eficiente y sin experimentar interferencia. Esta

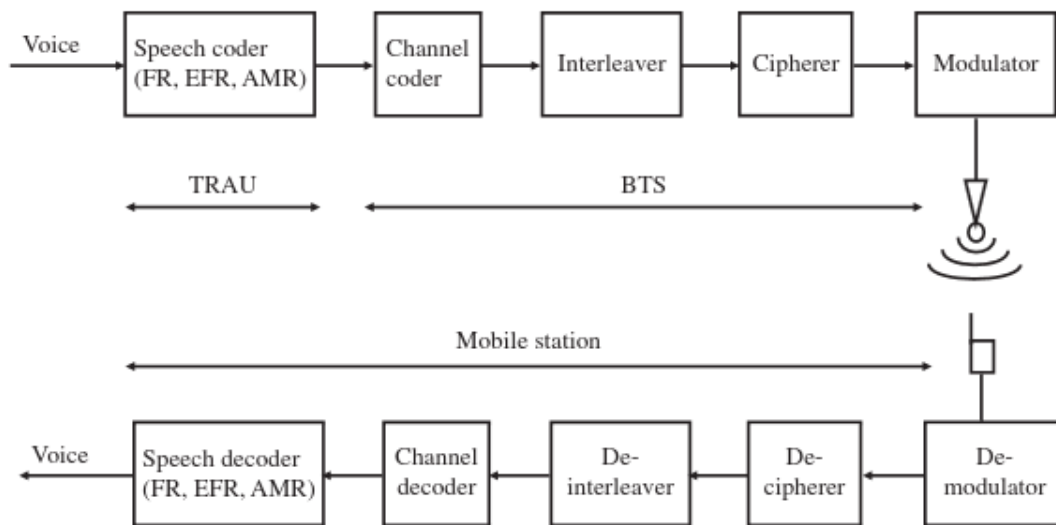


Figura 4: Diagrama de bloques del sistema GSM. Imagen extraída de la referencia [3].

fue la motivación principal de estas tecnologías. Los recursos disponibles son tiempo y frecuencia, por lo cual se utilizan distintas técnicas que los aprovechen de la manera más eficiente posible.

2.2.1. FDMA

En FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), a cada usuario se le asigna un rango de frecuencias durante toda la conversación, como se puede observar en el ejemplo de la Figura 5. Esto quiere decir que dado un ancho de banda disponible, existe una cantidad fija de usuarios que pueden usar el espectro. Esta era la tecnología utilizada en primera generación, donde en principio esto no era un problema, dada la baja cantidad de usuarios que habían. Pero a medida que comenzaron a haber más usuarios, esto se volvió una restricción, que motivó a la búsqueda de nuevas estrategias.

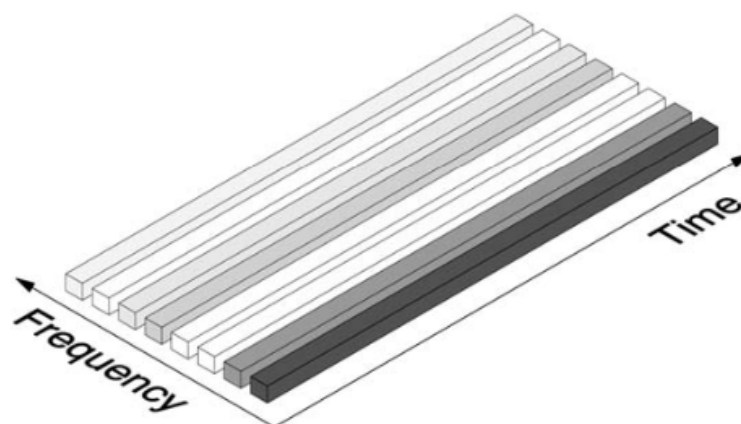


Figura 5: División en frecuencia para múltiple acceso. Imagen extraída de la referencia [2].

2.2.2. TDMA

En las tecnologías *Multiple Access* llamadas TDMA (*Time Division Multiple Access*), se le asigna a los usuarios un *timeslot*, en el cual estos tienen acceso a todo el ancho de banda del

sistema en el caso de *wideband* TDMA, o únicamente a una parte del espectro para *narrowband* TDMA.

El sistema GSM utiliza *narrowband* TDMA, en donde el ancho de banda total se divide en sub-bandas, utilizando TDMA en cada una de ellas. Termina siendo una combinación entre FDMA y TDMA. De esta manera, los usuarios pueden compartir el canal de comunicación de manera ordenada y sin interferirse entre sí.

Cabe destacar que el uso de *timeslots* requiere sincronización entre transmisor y receptor para los distintos *frames*, tema que se abordará en otra sección. El rango de frecuencia disponible en GSM se divide en canales de 200kHz, cada uno de ellos dividido en 8 *timeslots*. En la [Figura 6](#), se puede observar un esquema FDMA/TDMA, con un período de 4 *timeslots* y 3 frecuencias portadoras.

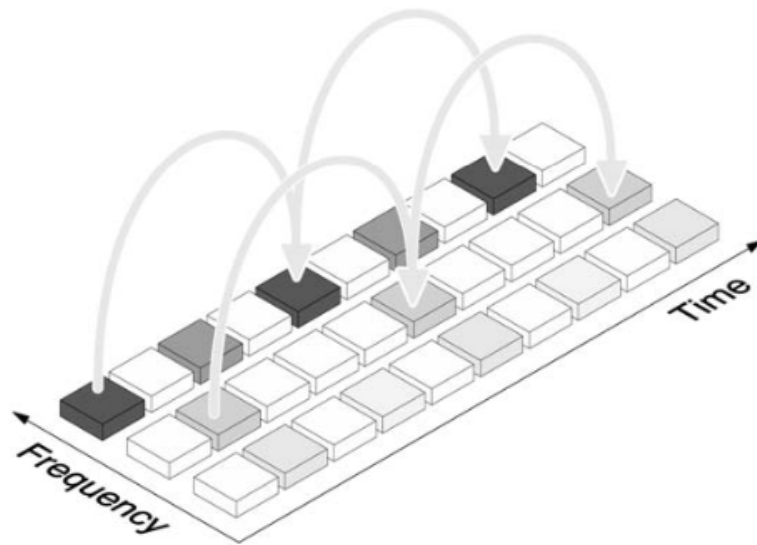


Figura 6: Esquema FMDA/TDMA. Imagen extraída de la referencia [2].

Estos sistemas son susceptibles a *fading* selectivo en frecuencia, lo cual significa que existe un valle en una zona del espectro. Por esto mismo, se utiliza la técnica *frequency hopping*, en donde cada unidad de transmisión se transmite en diferentes portadoras, como se puede observar en la [Figura 7](#).

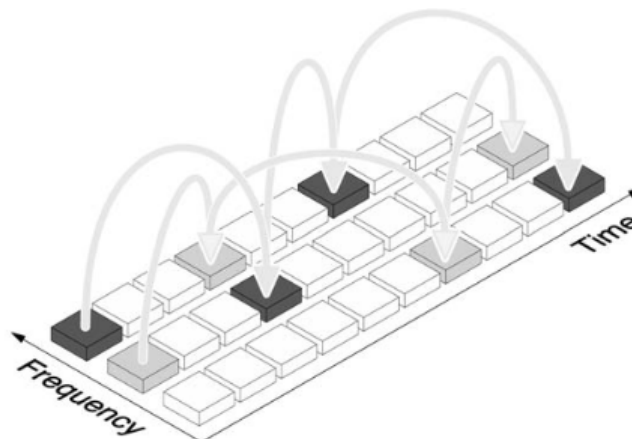


Figura 7: Esquema FMDA/TDMA con *frequency hopping*. Imagen extraída de la referencia [2].

2.2.3. SDMA

Para poder lograr un servicio a una cantidad grande de usuarios, las frecuencias son reutilizadas espacialmente. Por lo tanto, el área de cobertura se divide en celdas, como se puede observar en la [Figura 8](#), en donde celdas vecinas jamás pueden usar las mismas frecuencias para evitar interferencia entre ellas. Solo a una distancia D determinada pueden volver a utilizarse.

GSM utiliza diversas técnicas que quedan por fuera del alcance de este trabajo, para garantizar la continuidad de la llamada (o transferencia de datos) durante la transición entre celdas.

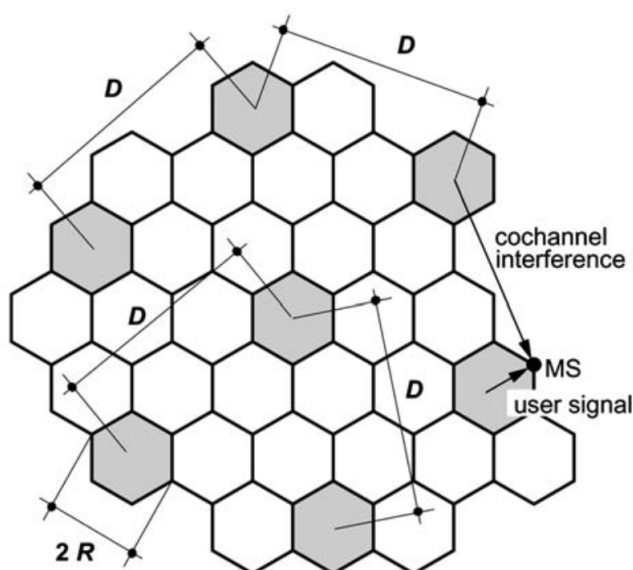


Figura 8: Modelo de celdas con reutilización de frecuencias.

2.3. Canales lógicos

GSM no tiene una distribución marcada con un canal específico para transmitir información y otro canal para control (exceptuando algunos casos), es decir que cada *slot* temporal puede tener muchos usos. Pero sí utiliza una distinción de canales lógicos entre canales de tráfico (TCH - Traffic Channels) y canales de señalización (SC - Signaling Channels) mostrada en la [Figura 9](#).

2.3.1. Canales de tráfico

Los canales de tráfico se utilizan tanto para datos como para voz y pueden dividirse según su capacidad en *full rate* o *half rate*. Los *full rate* envían información a 22,8Kbps para audio (13Kbps de audio crudo) o datos a 12Kbps, 6Kbps o 3Kbps (9,6Kbps, 4,8Kbps, y 2,4Kbps de datos crudos).

A su vez también se puede enviar en "*half rate*", con la mitad de la frecuencia, es decir a 11,4Kbps para audio (6,6Kbps) o 4,8Kbps y 2,4Kbps de tamaños aceptados de datos crudos.

A modo de resumen, se listan los distintos canales de tráfico.

- Full rate speech (TCH/F)
- Half rate speech (TCH/H)
- 9.6 Kbps full rate data (TCH/F9.6)
- 4.8 Kbps full rate data (TCH/F4.8)
- 2.4 Kbps full rate data (TCH/F2.4)
- 4.8 Kbps half rate data (TCH/H4.8)

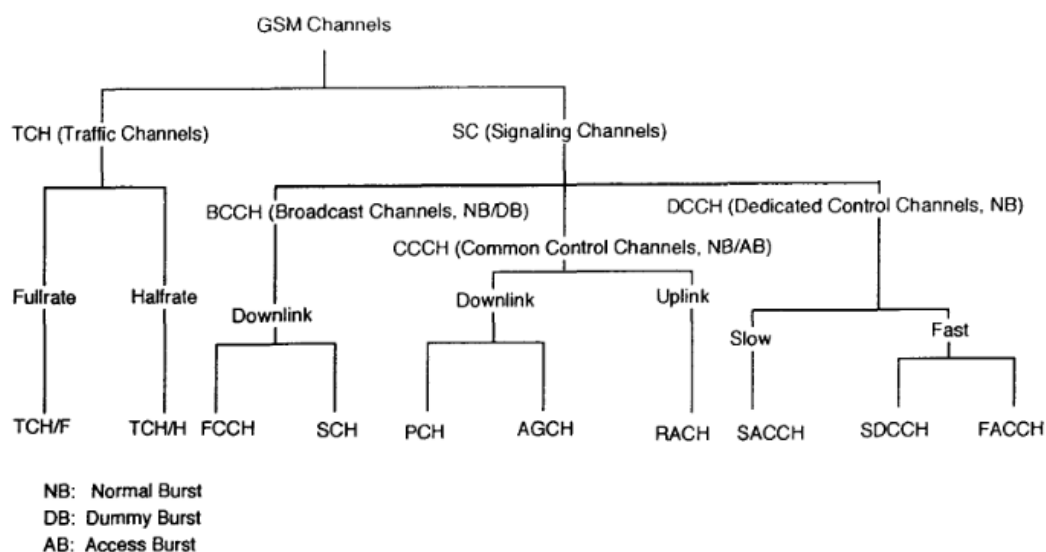


Figura 9: Imagen extraída de la referencia [1], que muestra los distintos tipos de canales lógicos.

■ 2.4 Kbps half rate data (TCH/H2.4)

2.3.2. Canales de señalización

Por otra parte, los canales de señalización transportan información para la sincronización y otro tipo de información (asignación de canales, etc). Estos pueden dividirse en 3 tipos : canales de *broadcast* (BCCH - *Broadcast Channels*), canales de control común (CCCH - *Common Control Channel*) y canales de control dedicados (DCCH - *Dedicated Control Channels*).

■ Canales de *broadcast*

Los canales de *broadcast* BCCH son unidireccionales, emitidos por la radio-base y recibidos por las unidades móviles. En estos mensajes se encuentra el canal de corrección de frecuencia (FCCH - *Frequency Correction Channel*), el cual es utilizado para que los sistemas móviles se puedan alinear en frecuencia y fase con la radio-base. También se encuentra el canal de sincronización en el tiempo (SCH - *Synchronization Channel*) con objetivos análogos. Cuando el sistema recibe y procesa los canales SCH y FCCH, está sincronizado. Estos canales son fijos (es decir, no realizan *frequency hopping*).

En este canal también se envía información para que el dispositivo móvil pueda registrarse. Algunos ejemplos se listan a continuación: código de país, código de red, código de área, canales de radiofrecuencia utilizados en la celda en la que se encuentra el móvil, celdas cercanas, número para el algoritmo de *frequency hopping*, entre otros.

■ Canales de control dedicados

Los canales de control dedicados (DCCH), son canales de control entre la radio-base y un móvil en particular, donde ambas partes hablan en la misma frecuencia. Hay dos tipos de canales DCCH: “*Stand Alone*” (SDCCH) y “*associated control*” (ACCH).

Los canales SDCCH no están asociados a la ubicación del canal de transferencia de datos, ya que se utiliza antes de que este sea asignado. Este canal es utilizado para el registro, la autenticación y seguimiento de la ubicación de un sistema móvil. También se utiliza para asignar el canal de transferencia de datos.

Los canales ACCH están relacionados con la frecuencia del canal de transmisión de información, y se dividen a su vez en SACCH (*Slow Associated Control Channel*) y FACCH (*Fast*

Associated Control Channel). Los SACCH continuamente envían información como reportes de medidas, potencia recibida en esa celda y en las adyacentes, etc. Este canal se utiliza principalmente para asistir al sistema móvil sobre la potencia a la que debe enviar y sobre su ajuste temporal.

SACCH tiene un ancho de banda de la mitad que el de un canal de transmisión de datos, por lo cual si en determinado momento se precisa intercambiar información a una velocidad mayor, los canales FACCH “roban” cuadros de 20ms de información y se utilizan para este propósito, dado que esta interrupción no será notada por el usuario.

■ Canales de control común

El canal de control común es bidireccional entre la radio-base y los MS, y tiene la función de manejar el acceso de nuevos usuarios. En la misma línea este tiene principalmente 2 canales.

El primer canal es *Random Access Channel* (RACH), una porción del uplink utilizada por los nuevos usuarios para pedir iniciar una transmisión. Para esto se utiliza en protocolo *Aloha*. Luego está el *Access Grant Channel* (AGCH) que es *downlink* utilizado para asignar SDCCH a un MS.

2.3.3. Establecimiento de una conexión

Cuando una estación móvil desea iniciar una conexión, debe solicitar un recurso. Para ello primeramente ubica el canal de broadcast y obtiene la información de la celda correspondiente, además de sincronizarse en tiempo y frecuencia.

Luego manda una trama de acceso (*Acces Burst*) mediante el canal RACH (canal de control común). La solicitud de un canal debe realizarse de forma aleatoria mediante el protocolo Aloha, por lo tanto, puede suceder que dos usuarios usen el mismo slot temporal para intentar establecer una comunicación. Por esta razón tienen un tiempo de espera, en donde son enviados nuevamente en caso de no tener respuesta. Un esquema de inicio de conexión para solicitar un canal de señalización (SDCCH) puede visualizarse en la [Figura 10](#).

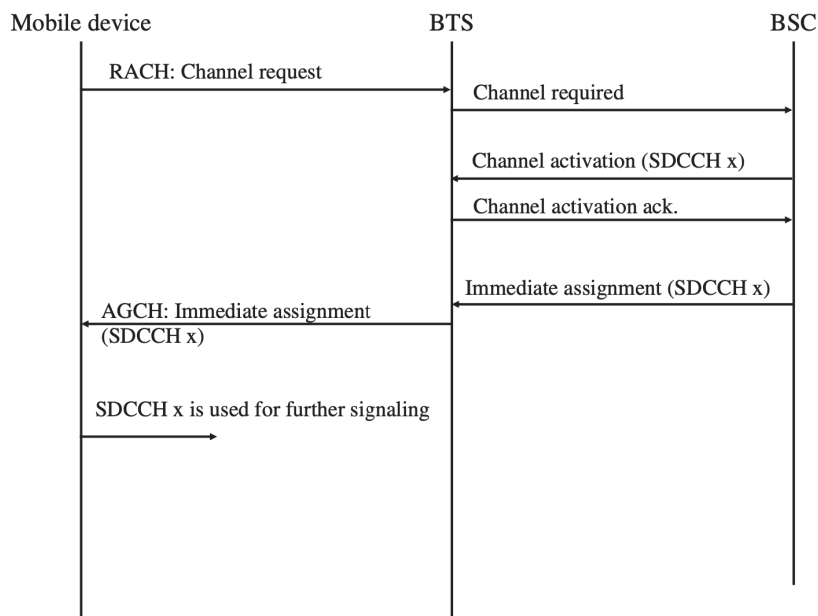


Figura 10: Esquema de inicio de una conexión de señalización. Imagen extraída de la referencia [3].

A través del SDCCH se realiza la autenticación del usuario y de le asigna un canal de tráfico y un SACCH pudiendo entonces iniciar (o atender) una comunicación con otro usuario.

2.4. Tramas

Como fue mencionado anteriormente, cada uno de los canales de 200kHz están divididos en 8 *slots* temporales. Estos 8 *slots* forman en conjunto un cuadro TDMA, como el de la [Figura 11](#). Cada *slot* de un cuadro TDMA tiene una duración de $576,9\mu s$ (duración correspondiente a 156,25 bits), por lo que cada cuadro dura $4,615ms$. Existen 5 tipos de tramas, las cuales se pueden ver en la [Figura 12](#):

- Trama normal: se utiliza para transmitir información en los canales de tráfico y control. Estos tienen una guarda al final en donde no se transmiten bits, mientras que al inicio y al final hay 3 bits que siempre son 0. También lleva 2 banderas, llamadas *Stealing Flags*, que indican si la trama contiene data de tráfico o de control. Luego tiene 2 bloques de 57 bits cada uno, los cuales ya fueron pasados previamente por el código protector de errores y la codificación de canal. Entre medio lleva 26 bits, correspondientes a una secuencia utilizada para la estimación de canal, para luego poder ecualizar y sincronizar. Con la ecualización se logra reducir o eliminar la interferencia inter-simbólica causada por el multi-camino, y se puede compensar un *delay spread* de hasta $16\mu s$.
- Trama de corrección de frecuencia: esta trama se utiliza para la sincronización en frecuencia de un MS (*Mobile Station*). Nuevamente contiene los 3 bits al inicio y al final como 0. Se envía una portadora para *broadcast* con un *shift* de $1625/24kHz$ por encima de la frecuencia de la portadora. Esta señal es emitida periódicamente por la BS (*Base Station*).
- Trama de sincronización: sirve para que la MS pueda sincronizarse en el tiempo con la radio-base. Contiene también el número correspondiente a la trama TDMA, entre otros.
- Trama “*dummy*”: es transmitida en una única frecuencia, cuando no hay ninguna otra trama siendo transmitida. Sirve para asegurar que el canal BCCH transmite una trama en cada *slot* de tiempo, lo cual permite a la MS realizar mediciones de potencia de la señal, proceso conocido como monitoreo de calidad.
- Trama de acceso: se usa para el acceso random al canal RACH sin reserva. Tiene un tiempo de guarda mucho mayor que las otras tramas, para reducir la probabilidad de colisiones dado que las MS que compiten por el RACH no están todavía sincronizadas.

Cada usuario tiene 33,9kbit/s de bit rate, siendo el rate total 270,83kbit/s para los 8 usuarios. Considerando una trama normal, 9,2kbit/s son utilizados para sincronización, estimación del canal, flags, encabezados y tiempo de guarda. Los 24,7kbit/s restantes quedan disponibles para transmisión de datos en la capa física.

2.5. Codificación de fuente

Como se mencionó en la introducción, mas allá de que en la época había una fuerte incertidumbre respecto a el formato de las comunicaciones en el futuro (si serían de voz u otros tipos), en la fecha la gran mayoría de las comunicaciones móviles eran llamadas, y por lo tanto se considera un formato de codificación de fuente específico para la compresión de señales de voz humana, llamado RPE-LTP (*Regular Pulse Excitation - Long-Term Prediction*). En este documento se abarcará el caso *full-rate*. Tanto los mensajes de datos como los mensajes de señalización no presentan compresión.

A medida que GSM fue evolucionando nuevas técnicas aparecieron. En las últimas versiones se utilizaba un proceso de compresión mas óptimo llamado AMR (*Adaptive Multi-Rate* que innova ajustando dinámicamente la tasa de bit. Este trabajo profundizará únicamente en RPE-LTP.

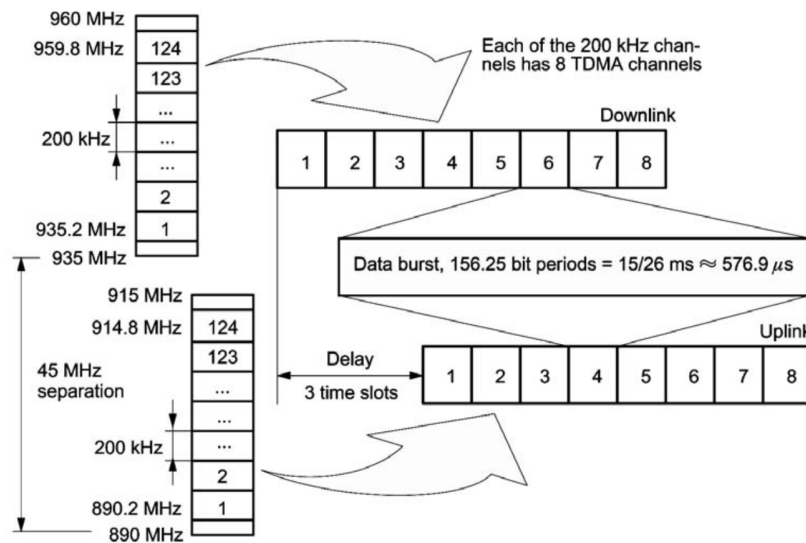


Figura 11: Frecuencias portadoras para uplink y downlink, y tramas TDMA. Imagen extraída de la referencia [2].

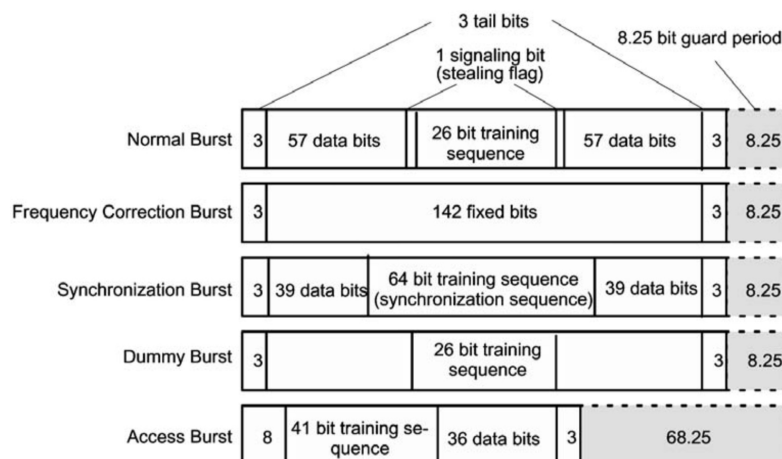


Figura 12: Tipos de tramas TDMA. Imagen extraída de la referencia [2].

2.5.1. Speech encoder

Para transmitir una señal de voz utilizando GSM, primero se debe convertir la señal analógica en digital. Luego, se debe codificar esa señal para transmitirla, usando la menor tasa de bits posible, ya que el ancho de banda es limitado para cada usuario. Para esto, GSM utiliza RPE-LTP para comprimir el mensaje a enviar. En este protocolo, la entrada es la señal analógica muestreada a una tasa de 8K muestras/s, con una cuantización de 13 bits, resultando en una tasa de 104Kbit/s, mientras que la tasa de salida es 13Kbit/s (8 veces menor).

Este protocolo utiliza VAD (*Voice Activity Detection*), que tiene como objetivo detectar cuándo el usuario no está hablando para evitar enviar ruido. Obsérvese que este tiempo es por lo menos el 50 % del total, asumiendo que las dos partes rara vez hablan al mismo tiempo.

De esta forma se evita enviar estos silencios, lo cual es beneficioso aunque el canal quede sin uso, pues mejora la calidad de la llamada, ya que al no enviarse datos disminuye el ISI con los canales cercanos. Esto, a su vez, permite no separar a los canales tanto en frecuencia (eficiencia espectral). Además, disminuye el consumo de energía, lo que prolonga la duración de la batería de los dispositivos móviles.

Para mejorar la experiencia del usuario, considerando que no es ameno al tener una conver-

sación que fluctúa entre voz con mucho ruido de fondo y silencio absoluto, el receptor rellena estos blancos de información con ruido sintético de fondo, llamado *comfort noise*. Para realizar este ruido, el transmisor hace mediciones continuas del ruido de fondo de la señal y al terminar un bloque de información y empezar uno de silencio, se envía un *SID* (*Spatial Silence Descriptor*) con ciertos parámetros, para que el receptor pueda reconstruir el ruido de forma de generar continuidad en la percepción del usuario receptor. Además, esto permite “avisar” al receptor que el próximo bloque será de silencio.

La codificación de voz realizada mediante RPE-LTP, es un proceso de compresión con pérdida, que se compone de 4 partes:

- Preprocesamiento
- Filtro LPC (*Linear Predictive Coder*), también llamado *short-term prediction*
- Filtro LTP (*Long-Term Prediction*)
- Filtro RPE (*Regular Pulse Excitation*)

organizados como se muestra en la [Figura 13](#). Estos filtros se aplican a bloques de 160 muestras de 13 bits por vez (20ms de audio), resultando en 260 bits: 188 de procesamiento de los datos y 36 de configuración de cada uno de los filtros LPC y LTP.

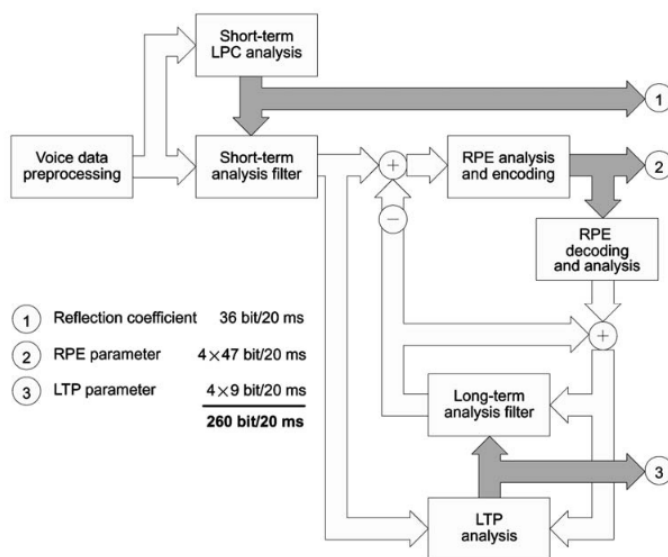


Figura 13: Esquema RTE-LTP. Imagen extraída de la referencia [2].

Al ingresar la señal, esta pasa por un preprocesamiento que filtra la frecuencia DC y aplica un filtro *preemphasis*. Luego se calculan los coeficientes del filtro LPC con el bloque *Short-Term LPC Analysis*, y con esos coeficientes se realiza el filtrado en el bloque *Short-Term Analysis Filter*.

Luego de terminado el procesamiento LPC, se recalculan los coeficientes del filtro LTP utilizando la nueva información, y la salida de los bloques anteriores. Luego se aplica el filtro LTP resultando en una señal que se resta a la salida del LPC y es esa señal diferencial la que ingresa finalmente al bloque RPE.

Es en este último bloque que se elimina información que se considera no necesaria para en entendibilidad y calidad del resultado. De los 260 bits que salen de la codificación de fuente, 188 son la salida del RPE *encoder*, y 36 son los coeficientes calculados para los filtros LTP y LPC que también son enviados.

La decodificación es inversa a la codificación, utilizando los coeficientes que se envían en el mensaje con un diagrama como el mostrado en la [Figura 14](#).

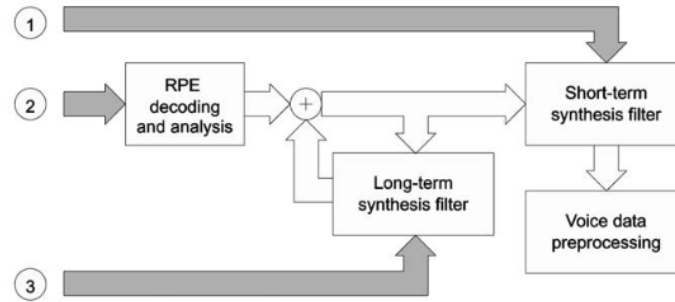


Figura 14: Esquema de decodificador RTE-LTP. Imagen extraída de la referencia [2].

2.6. Codificación de canal

La codificación de canal es la técnica que se utiliza para proteger a la información de posibles errores en el canal, añadiendo redundancia para poder corregir o detectar errores.

2.6.1. Full-rate speech

En un esquema *full rate*, caso en el cual de la codificación de fuente salen 260 bits, estos se dividen en 3 tipos, dependiendo de su importancia para la inteligibilidad del discurso. Estos tipos son:

- Clase 1a: Primeros 50 bits, si estos no son correctos, el resto del mensaje no se podrá decodificar correctamente. Pasan por un código de bloque y por un código convolucional
- Clase 1b: Sigüientes 132 bits, pasan únicamente por el código convolucional
- Clase 2: Últimos 78 bits, no son tan importantes cada uno en particular y por lo tanto van sin codificar

El primer código es el código de bloque cíclico. Su función es poder detectar errores que el código convolucional no haya corregido (en los primeros 50bits) y en tal caso descartar la trama. Para este bloque se utiliza la siguiente función generadora:

$$g(x) = 1 + x + x^3$$

agregando 3 bits al mensaje.

En caso de que una trama fuese descartada, el sistema es capaz de predecir a partir de los datos anteriores hasta 16 tramas consecutivas (0,320s).

De esta forma, al código convolucional entran 185 bits (50 + 3 + 132). Este tiene un retardo de 4 tiempos de bits y rate 1/2 y su función es poder corregir errores. Los bits se procesan con las siguientes funciones:

$$G_0 = 1 + D^3 + D^4$$

$$G_1 = 1 + D + D^3 + D^4$$

formando un mensaje de 378 bits (185 bits de mensaje + 4 bits de cola para volver al estado 0 por cada función).

A esto se le agregan los 78 bits que van sin codificar, resultado en un mensaje de 456 bits. Un esquema general se muestra en la [Figura 15](#).

Los códigos convoluciones son buenos para detectar ráfagas de errores, pero no son infalibles. Para evitar que las ráfagas de errores sean muy largas, luego de la codificación de canal, se realiza *interleaving* con los 456 bits resultantes.

Por otro lado, la codificación de un canal *half-rate* es análoga.

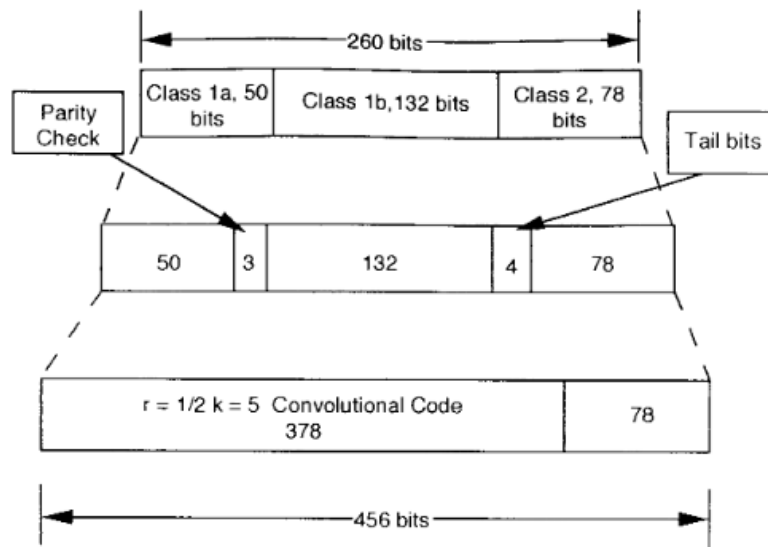


Figura 15: Esquema de codificación de canal, extraído de la referencia [1].

2.6.2. Mensajes de control y datos

Esquemas similares se utilizan también en los mensajes de datos y de control. En estos casos todos los bits son tratados de igual forma con códigos convolucionales para corrección y de bloque para detección.

En el caso de la mayoría de los canales de señalización (SACCH, FACCH, SDCCH, BCCH, PCH y AGCH), se utiliza un código de detección particularmente fuerte llamado “fire code” el cual presenta 40 bits de redundancia con el siguiente polinomio generador $g(x) = (x^{23} + 1)(x^{17} + x^3 + 1)$. En la Figura 16 se muestra un diagrama de estos casos.

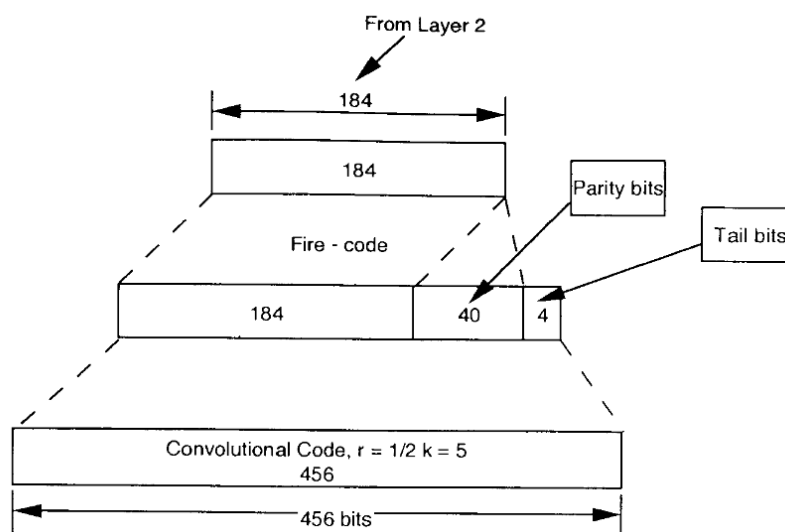


Figura 16: Esquema de codificación de canal para mensajes de señalización SACCH, FACCH, SDCCH, BCCH, PCH y AGCH. Imagen extraída de la referencia [1].

El caso de los mensajes de control restantes y los mensajes de datos, utilizan un esquema similar con los siguientes polinomios generadores para el código de bloque.

- RACH: $x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$
- SCH: $x^{10} + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

- Mensaje de datos: $1 + x + x^3$

Los polinomios utilizados en cada caso para el código convolucional se muestran en la [Figura 17](#).

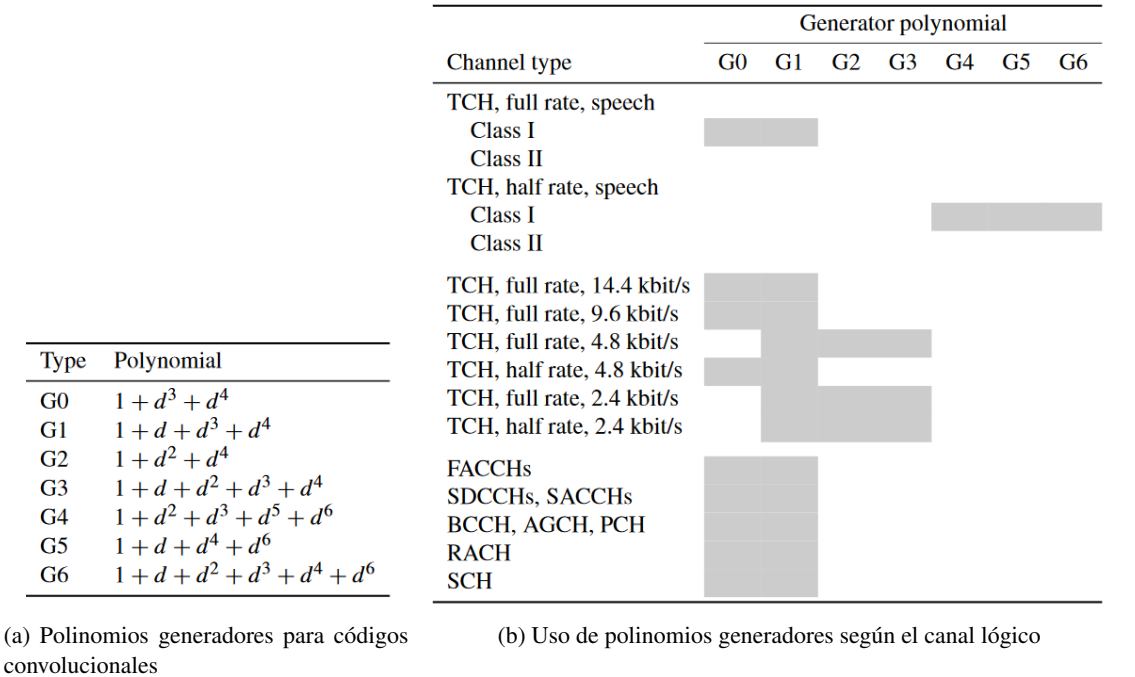


Figura 17: Polinomios generadores para códigos convolucionales y sus usos en los diferentes mensajes. Imagen extraída de la referencia [2].

2.6.3. Interleaving

Como se mencionó previamente, el *interleaving* tiene la función de volver a el sistema más robusto contra errores de ráfaga. Aún con la protección ofrecida por la codificación de canal, y aún sabiendo que los códigos convolucionales son especialmente buenos en corregir este tipo de errores, estos tienen un limite, por lo cual es beneficioso combinarlo con otras estrategias como esta.

En el caso de discursos *full rate*, estos 456 bits se podrían enviar en 4 *timeslots* (ya que cada *timeslot* puede enviar 114 bits de información codificada). Sin embargo en GSM se decide “mezclar” el mensaje de 456 bits con el siguiente y el previo, de forma de “dividir” la ráfaga de errores y lograr mensajes con errores corregibles.

Cada *timeslot* se dividirá en dos bloques de 57 bits con información y un bloque de 26 bits conteniendo la *training sequence*. Para enviar un mensaje, se utilizarán los primeros 57 bits de los primeros 4 *timeslots* y los últimos 57 bits de los últimos 4 *timeslots*, proceso que se repetirá luego de cada 4 *timeslots* con el siguiente mensaje, logrando una configuración como la mostrada en la [Figura 18](#).

Observar que esto es beneficioso, ya que por ejemplo, si se produjese una ráfaga de 114 errores, en cada mensaje habría solamente 57 errores.

Al llegar al receptor, este reagrupa los bloques de 57 bits y reconstruye las secuencias originales para seguir con el proceso de identificación. El *interleaving* tiene como desventaja que aumenta en 4 *timeslots* la recepción del primer bloque se voz, además de precisar mas memoria para ir almacenando los mensajes entrantes.

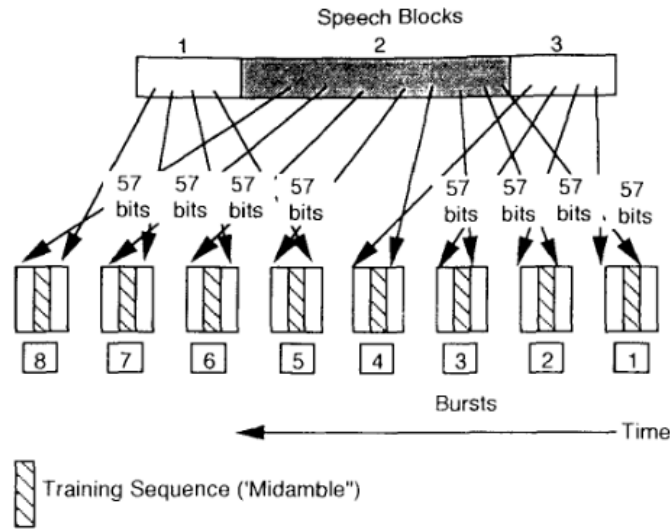


Figura 18: División de mensajes en los distintos timeslots. La imagen fue extraída de la referencia [1].

2.7. Modulación

La primera versión de GSM utilizaba una modulación GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) que tiene una tasa de 1bit/símbolo. Nuevas versiones de GSM implementaron 8-PSK (3bits/símbolo).

GMSK se puede ver como un caso particular y continuo de FSK (*Frequency Shift Keying*), en donde la información de el dato a enviar está en la frecuencia de la señal. En una modulación MSK, el mensaje modulado es

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \Phi(t, \alpha)), \quad (1)$$

con $nT \leq t \leq (n+1)T$, f_0 la frecuencia portadora y α tomando los valores 1 o -1 según si se quiere enviar un 1 o un 0 en el momento t .

A su vez, la función $\Phi(t, \alpha)$ se define de la siguiente forma:

$$\Phi(t, \alpha) = 2\pi h \sum_{i=0}^n \alpha_i q(t - iT),$$

con $q(t - iT)$ una señal moduladora que sirve para volver a la señal $s(t)$ continua en el tiempo, y $h = \frac{\Delta f}{r_{bit}}$.

En el caso de GMSK se elige como función $q(t)$ a la integral de la respuesta al impulso de un filtro gaussiano $g(t)$, el cual tiene menor ancho de banda que MSK (utiliza un pulso rectangular) y permite disminuir la distancia entre portadoras.

De esta forma

$$q(t - iT) = \int_{-\infty}^{t-iT} g(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t g(\tau + iT) d\tau$$

Operando

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos \left(2\pi f_0 t + 2\pi h \sum_{i=0}^n \alpha_i \int_{-\infty}^t g(\tau + iT) d\tau \right) = \\ &= A \cos \left(2\pi f_0 t + 2\pi h \int_{-\infty}^t \sum_{i=0}^n \alpha_i g(\tau + iT) d\tau \right) \end{aligned}$$

Se puede observar que esto es equivalente a modular en FM a la señal $\sum_{i=0}^n \alpha_i g(t + iT)$, resultando en el diagrama de modulación de la [Figura 19](#).

De esta forma, en el receptor en una primera instancia se baja la señal a bandabase. Luego, dependiendo del sentido de giro, se determina si el bit enviado es un 0 o un 1, como se muestra en el diagrama de la [Figura 20](#).

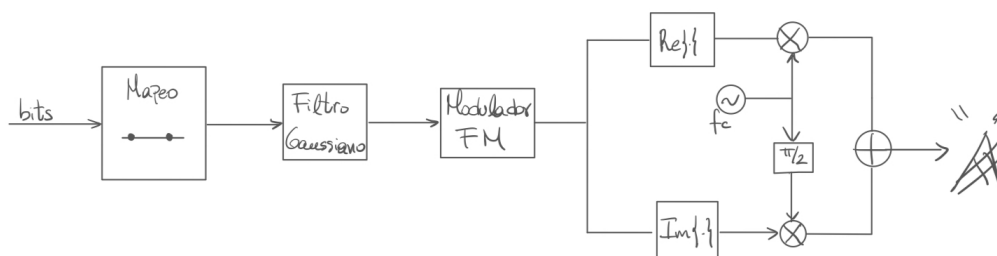


Figura 19: Diagrama de modulación GMSK. V.C.O. (Voltage-Controller Oscillator) que modula en FM a la señal.

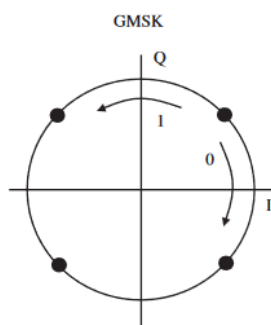


Figura 20: Diagrama IQ en recepción. Imagen extraída de la referencia [3].

2.8. Ecualización

La señal analógica se ve distorsionada por el canal, de forma de que al llegar al receptor podría identificarse incorrectamente. La transferencia del canal cambia continuamente, pues depende de la posición del dispositivo móvil, además de aspectos climáticos, movimiento de autos, etc. Aunque el canal no pueda conocerse por completo, sí puede estimarse y utilizar esa información para mejorar la calidad de la señal recibida. Esta es la tarea del ecualizador, quien crea un modelo del canal, y calcula cuál es el símbolo que más probablemente haya sido enviado.

Para estimar el canal, en cada *timeslot* se envía la llamada “*training sequence*”. Esta secuencia se coloca en la mitad del *timeslot* (y se utilizará para ecualizar sólo ese), de forma de minimizar la distancia máxima hacia los bits útiles. De esta forma, se asume al canal prácticamente constante durante todo un *timeslot*.

En la [Figura 21](#) se muestran los 8 posibles “*training sequences*”. Es importante tener varias, ya que las frecuencias son reutilizadas por las distintas radio-bases, y puede llegar a haber interferencia. Variando el “*training sequence*” entre estas celdas se pueden detectar colisiones. Estas secuencias tienen la particularidad de estar poco correlacionadas.

Los extremos de la comunicación conocen la secuencia que fue enviada, por lo tanto al recibirla pueden estimar la respuesta al impulso del canal. En esencia, conociéndose la transferencia y los mensajes posibles, solo resta encontrar cuál de los mensajes posibles al pasarse por el modelo del canal es más cercano al mensaje recibido. Este proceso es realizado por el ecualizador de Viterbi (que utiliza el algoritmo de Viterbi), con un esquema general como el mostrado en la [Figura 22](#).

Training Sequence Code (TSC)	Actual Bit Configuration of Training Sequence
0	00100101110000100010010111
1	00101101110111100010110111
2	01000011101110100100001110
3	01000111101101000100001110
4	00011010111001000001101011
5	01001110101100000100111010
6	10100111110110001010011111
7	11101111000100101110111100

Figura 21: *training sequences* utilizadas. Imagen extraída de la referencia [1].

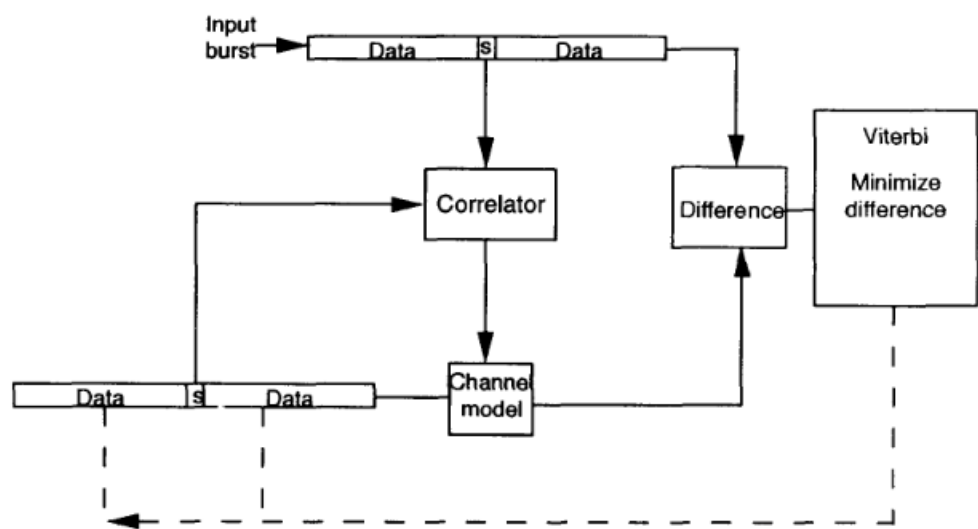


Figura 22: Imagen extraída de la referencia [1] que muestra el proceso realizado por el ecualizador.

2.9. Esquema completo

Para finalizar, a modo de resumen, se incluye un diagrama completo (Figura 23) de la tecnología, incluyendo con más detalle las secciones descriptas anteriormente para una señal de voz *full rate*.

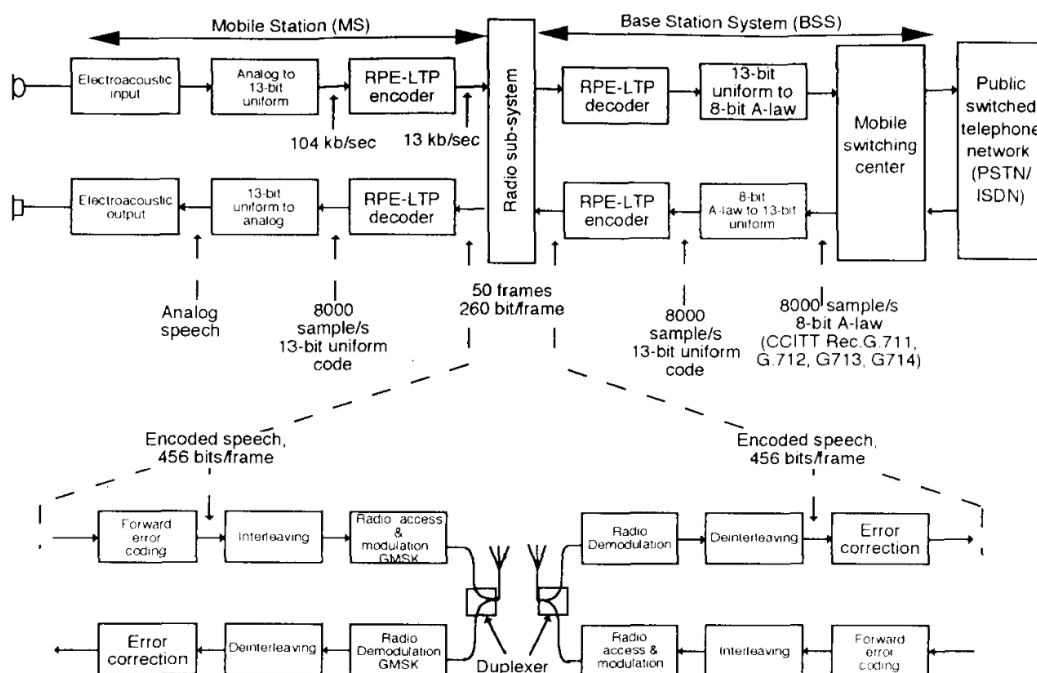


Figura 23: Esquema completo de GSM. La imagen fue extraída de la referencia [1].

3. Conclusiones

Mediante este trabajo se logró vincular los conocimientos adquiridos en el curso a una tecnología que tuvo mucho éxito en su momento. La tecnología es muy compleja, por lo cual se optó por abarcar los temas más relevantes que describen la tecnología. Además, se intentó identificar las distintas motivaciones de la época que llevaron a la implementación de las distintas técnicas utilizadas.

Luego de haber estudiado la tecnología, se procedió a buscar una implementación en GNU-radio [4] de un receptor. No se logró encontrar ningún mensaje GSM para poder recibir, por lo tanto se decidió limitarse a identificar los bloques que realizan las funciones descritas en el documento, de manera de poder aplicar los conocimientos adquiridos.

Referencias

- [1] Mehrotra, A. (1996) GSM system engineering. Boston: Artech House.
- [2] Vögel, H.-J. (2009) GSM - architecture, protocols and services 3E. John Wiley Sons Incorporated
- [3] Sauter, Martin (2014) From GSM to LTE-advanced: an introduction to mobile networks and mobile broadband 2nd Edition.
- [4] Implementación GNU: <https://github.com/bkerler/gr-gsm>