

Capítulo 1

Introducción a los Sistemas de Telecomunicación

El objeto de este capítulo es presentar las nociones básicas relacionadas con los sistemas eléctricos de comunicaciones, partiendo de los conceptos básicos e introduciendo las ideas fundamentales sobre los componentes genéricos de todo sistema de comunicaciones¹: transmisores, receptores, medios de transporte, etc. y se resumen las principales clasificaciones de estos sistemas, de acuerdo a sus diversas características y aplicaciones. Se introduce también el concepto de modulación y la necesidad de su empleo en el transporte de información, así como los aspectos básicos relativos al uso del espectro radioeléctrico.

1.1 Conceptos generales

El concepto de *comunicación* no es fácil de definir y con frecuencia se asume que todos tenemos intuitivamente la idea de lo que es. Para las personas y animales, puede definirse como el intercambio de *información* entre individuos mediante un sistema común de símbolos, bien sea mediante lenguaje, signos o gestos². La definición anterior puede extenderse también a la comunicación entre máquinas, en cuyo caso los símbolos que representan la información deben reunir características especiales. La *ingeniería de telecomunicación* o *ingeniería de comunicaciones* es la rama de la ingeniería que se ocupa de la generación, transmisión, recepción y procesado de *señales* ya sea por medios eléctricos, electromagnéticos, electroacústicos, ópticos, etc., y los *sistemas de telecomunicación*³ son aquéllos que mediante el empleo de técnicas y dispositivos adecuados realizan el transporte de información entre una fuente y uno o más destinatarios finales.

Información. Aunque también intuitivamente se tiene el concepto de *información*, el significado puede ser muy diferente según el contexto en que se maneje. Así, para una buena cantidad de gente el término se asocia generalmente con el campo periodístico, radiofónico o televisivo. De hecho, en numerosas instituciones se cursan carreras designadas como *Ciencias de la Comunicación* o *Ciencias y Técni-*

¹ Aquí se emplearán indistintamente los términos *sistema de comunicaciones*, *sistema de comunicación* y *sistema de telecomunicación*.

² Webster's Third New International Dictionary of the English Language. Unabridged. Enciclopedia Britannica, Inc. 1981.

³ Aquí se emplearán indistintamente los términos *sistemas de telecomunicación*, *sistemas de comunicación* y *sistemas de comunicaciones* con el mismo significado y sin entrar en posibles diferencias semánticas de escasa o nula importancia.

cas de la Información que poco o nada tienen que ver con la ciencia o la ingeniería de comunicaciones. No es extraño, por tanto, que Jurgen Ruesch⁴ haya identificado 40 variedades de los enfoques interdisciplinarios para el tema, incluyendo tópicos tan variados como los aspectos informales de la comunicación, implícitos en la atracción sexual o en el comportamiento ante el juego e identificando al menos 50 modos de comunicación interpersonal. Entre los aspectos de importancia tratados en este contexto cabe mencionar la importancia que se da en los medios masivos de comunicación (radio, televisión, prensa y actualmente Internet) al efecto de los mensajes sobre la audiencia y al estudio de técnicas de persuasión con el fin de influir en la disposición de los individuos hacia la modificación de hábitos de consumo, simpatía política o creencias religiosas entre otros. Con excepción de la prensa escrita, los sistemas de comunicaciones transportan información para estos y otros fines. En este caso puede decirse que el ingeniero de telecomunicación se ocupa de diseñar, instalar y mantener el vehículo, pero no tiene influencia alguna sobre lo que dicho vehículo transporta, es decir, el contenido. En algunos casos, el ingeniero de telecomunicación debe ocuparse también del contenido, por ejemplo en algunos sistemas de comunicación entre máquinas.

Dada la variedad de interpretaciones que se pueden dar al término *información*, conviene definirlo con algo más de precisión para los fines y objetivos de un curso de sistemas de comunicaciones. Así, por *información* se entiende aquí el conjunto de *señales*, producidas por fenómenos físicos, registrados, clasificados, organizados y relacionados, con un significado preciso para un destinatario específico.

Con frecuencia se habla también de *elementos de información*. En una comunicación de voz la información fluye de manera continua entre el transmisor y el receptor. Los elementos de información son en este caso los aumentos infinitesimalmente pequeños entre dos instantes, también infinitesimalmente pequeños, de la presión del aire producida por las cuerdas vocales del locutor o sobre el tímpano del oyente. En estas condiciones la información da lugar a una *señal continua* en el tiempo, o *señal analógica* y los elementos de información pueden asociarse con elementos silábicos de la voz; sin embargo en el caso de música esta asociación resulta más difícil. En los sistemas *digitales*, por otra parte, los elementos de información son discretos y fáciles de identificar. Un ejemplo simple de un sistema digital de comunicaciones es la telegrafía y es interesante notar que éste fue anterior a la telefonía en varias décadas⁵. En telegrafía los elementos de información son pulsos de corta y larga duración (puntos y rayas) que, combinados de diversas formas representan

⁴ The New Enciclopedia Britannica, 15th Edition, 1981.

⁵ El teléfono fue inventado por Alexander Graham Bell (1847-1922) en 1875 y patentado en 1876. La primera compañía telefónica en el mundo fue la Bell Telephone, fundada en 1877.

de manera discreta los caracteres alfabéticos y numéricos, así como algunos símbolos ortográficos y de control en la forma que se ilustra en la Tabla 1.1.

El conjunto de varios elementos de información constituye un *símbolo* y, a su vez, el conjunto de varios símbolos constituye un *mensaje*. El alfabeto Morse, utilizado desde hace más de 150 años, no es más que una de las muchas formas posibles de *codificar* los caracteres alfabéticos mediante elementos discretos⁶. En términos muy simples, puede decirse que un mensaje está compuesto por elementos de información y que ésta puede fluir de forma continua o discreta entre el transmisor y el receptor. Asimismo, un mensaje es algo que el receptor o el destinatario de la información *entiende* y que, en general no conocía previamente. Esta es una de las características fundamentales de la información, es decir, el desconocimiento previo de su contenido o, expresado en términos más técnicos, su aleatoriedad. Un mensaje contiene más información cuanto más impredecible sea ésta. Algo que se conoce de antemano, en realidad contiene muy poca o ninguna información.

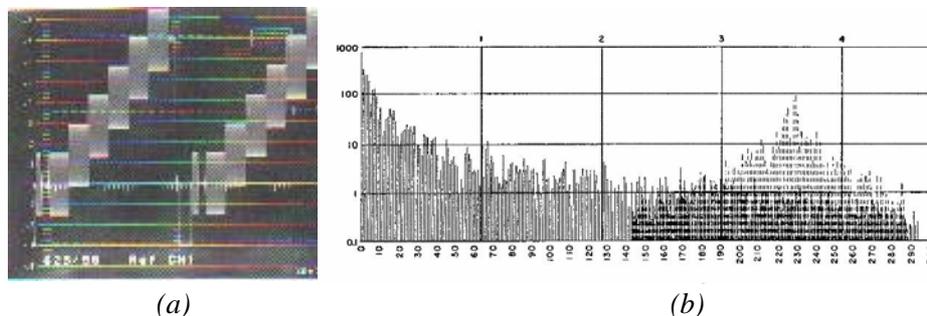
A	● —	N	— ●	1	● — — —
B	— ● ● ●	O	— — —	2	● ● — — —
C	— ● — ●	P	● — — ●	3	● ● ● — —
D	— ● ●	Q	— — ● —	4	● ● ● ● —
E	●	R	● — ●	5	● ● ● ● ●
F	● ● — ●	S	● ● ●	6	— ● ● ● ●
G	— — ●	T	—	7	— — ● ● ●
H	● ● ● ●	U	● ● —	8	— — — ● ●
I	● ●	V	● ● ● —	9	— — — — ●
J	● — — —	W	● — —	0	— — — — —
K	— ● —	X	— ● ● —		
L	● — ● ●	Y	— ● — —		
M	— —	Z	— — ● ●		

Tabla 1.1. Alfabeto Morse. Los puntos representan señales de cortaduración y las rayas, de mayor.

⁶ En el alfabeto Morse los caracteres que ocurren con mayor frecuencia en inglés, se codifican con muy pocos elementos de información, así la *e* se codifica sólo mediante un punto o un pulso de corta duración. En los caracteres de uso menos frecuente se utilizan más elementos de información. La razón de esto, aún cuando Morse no lo sabía explícitamente, se estudia en la Teoría de Información, debida entre otros, a Shannon.

Señales. Asimismo, por *señal* se entiende la representación de una magnitud física, detectable, variable en el tiempo, el espacio o ambos, a la que se puede asignar un determinado significado o contenido de información. Aquí, el término *señal* se refiere a señales eléctricas, aunque en su forma original sean de otra naturaleza; por ejemplo, acústicas, mecánicas, ópticas, etc., que, en general, pueden convertirse a señales eléctricas mediante transductores⁷ adecuados.

Las señales pueden caracterizarse en el *dominio del tiempo* o en el de *frecuencia*. Ambas caracterizaciones representan el mismo fenómeno. En los sistemas de telecomunicación es usual la representación en el dominio de frecuencia, ya que ésta proporciona información sobre el ancho de banda en que está contenida la energía de la señal. En general, cuando aquí se habla del dominio de frecuencia, se entiende por él la transformada de Fourier de la función que describe a la señal en el dominio del tiempo. En algunas aplicaciones, principalmente de procesado de señales se emplean otras transformaciones como las del coseno discreto, la de Hilbert, Haddamard, etc., que también suele hablarse de *frecuencia*. El tratamiento de estas otras transformadas queda fuera del contexto de este curso y siempre que se hable de frecuencia se entenderá que la transformación aplicable es la de Fourier. Debido a que la transformada de Fourier es compleja, la representación completa de la señal en el dominio de frecuencia debe hacerse en términos de amplitud y de fase, si bien en la mayor parte de los casos prácticos, es suficiente la representación del espectro de amplitud. El aparato utilizado para esto se designa como *analizador de espectro*. En la figura 1.1 se muestra una señal de televisión de color en el dominio del tiempo, como se vería en un osciloscopio y en el de frecuencia, como se vería en un analizador de espectro.



(a) (b)
Fig 1.1. Señal de televisión, de barras de color, en el dominio del tiempo (a) y en el de frecuencia (b).

⁷ Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Por ejemplo, un micrófono convierte la energía acústica en eléctrica.

Las señales generadas por una fuente de información y convertidas a señales eléctricas, por ejemplo la voz o una imagen son señales de *paso bajo* y a menudo se designan también como señales en *banda base*. Sin embargo las señales en banda base en los sistemas de comunicaciones tienen un significado más amplio, ya que pueden estar constituidas por combinaciones de señales de paso bajo. Tal es el caso de la telefonía multicanal en que la señal en *banda base multicanal* puede estar formada por centenares de señales de voz. La señal en banda base de televisión contiene al menos tres señales: vídeo monocromático o luminancia, color y sonido. Aquí se entenderá por señal en banda base aquella que se aplica a la entrada del modulador de un transmisor.

Transmisión en banda base. Cuando se tiene más de una señal en banda base, por ejemplo señales de voz, no pueden transmitirse simultáneamente por un mismo canal de comunicación utilizando el mismo espectro de frecuencia, a menos que se las separe de alguna forma, ya que no hacerlo se interferirían mutuamente y el receptor sería incapaz de discernir cada señal individual. Esta situación se aprecia claramente cuando varias personas hablan a la vez, en el mismo espacio y con el mismo nivel de voz. Lo mismo ocurriría si varias personas utilizan simultáneamente una misma línea telefónica. De esto se infiere que si la transmisión se realiza en banda base, se requieren tantos canales de comunicación independientes como señales haya.

1.2 El concepto de canal de comunicaciones.

El canal de comunicaciones puede definirse en términos generales, como el conjunto de recursos en espectro, espacio, tiempo y equipos, necesarios para realizar una comunicación. En su forma más general, se reduce a un transmisor, un receptor y un medio de transporte de la energía electromagnética como se ilustra en la figura 1.2



Fig. 1.2. Canal genérico de comunicaciones.

Transmisor. Su función es acondicionar las señales de información en ancho de banda y potencia para entregarlas al medio de transporte.

Receptor. Su función es capturar las señales en el medio de transporte, amplificarlas y acondicionarlas a fin de que resulten inteligibles al usuario final, bien sea este una persona, un animal, una máquina, etc.

Medio de transporte. Puede ser el vacío, el aire, un cable, el agua u otro medio material. La mayoría de las comunicaciones eléctricas emplean como medio de transporte el aire, cables metálicos o fibras ópticas.

La definición anterior del canal de comunicaciones es muy amplia y en la práctica, con frecuencia se habla de “canal” para hacer referencia sólo a una parte de la totalidad del sistema, a menudo, al medio de transporte, lo que da lugar a las siguientes definiciones, entre otras:

Canal de Radio. En el canal de radio, la energía electromagnética generada en el transmisor es radiada al medio de transmisión y transportada hasta el receptor, sin conexión física entre éste y el transmisor. La radiodifusión sonora, la televisión y la telefonía móvil son los ejemplos más comunes de canales de radio. La estructura general del canal de radio se ilustra en la figura 1.3 y comprende desde la salida del transmisor a la entrada del receptor, incluyendo las respectivas líneas de transmisión y antenas. La porción del canal de radio que comprende sólo el medio de transporte, es decir, el vacío, el aire u otro medio material en el que se propaga la energía electromagnética, suele designarse como *canal de propagación* en cuyo caso no se incluyen ni las antenas ni las líneas de transmisión.

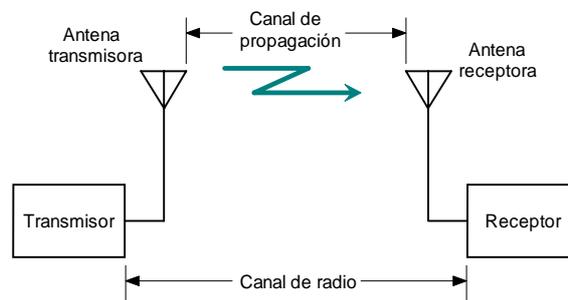


Fig. 1.3. Canal de radio y canal de propagación.

Canal de Radiofrecuencia (RF). En la literatura se designa también como *canal de modulación* y comprende, desde la salida del modulador en el transmisor, hasta la entrada del demodulador en el receptor. Su linealidad depende de los circuitos y

dispositivos posteriores al modulador en el lado transmisor y anteriores al demodulador en el lado receptor. No es un canal lineal ni recíproco.

Canal Digital. En sistemas digitales, comprende desde la entrada de la secuencia digital no modulada a la salida del codificador en el transmisor, hasta la secuencia regenerada a la salida del demodulador, es decir la entrada del decodificador en el receptor. No es lineal ni recíproco.

1.3 Modulación

En los sistemas analógicos de comunicaciones, la única forma posible de separar señales distintas que ocupan el mismo espectro en banda base (sonido, imagen, etc), para su transmisión por el mismo medio de transporte, ya sea éste una línea telefónica, un cable o el aire, es trasladándolas en el espectro de frecuencia, de modo que cada señal individual ocupe una “ranura” específica en el espectro. El receptor deberá tener, a su vez, capacidad para seleccionar cada una de esas ranuras y recuperar las señales individuales sin interferencia de las demás.

El proceso mediante el cual se traslada una señal en banda base en el espectro de frecuencia es la *modulación* y a la señal así trasladada se designa como *señal modulada*. Una forma simple de analizar este proceso es suponer una señal en banda base constituida por un tono senoidal de frecuencia única,

$$f_m: x(t) = A \cos(\omega_m t) \quad (1.1)$$

Donde $\omega_m = 2\pi f_m$ es la frecuencia angular en radianes por segundo. A $x(t)$ se le designa como *señal moduladora*.

Supóngase ahora que se tiene otra señal senoidal, de frecuencia f_c , mucho mayor que f_m y a la que designaremos como *portadora*:

$$y(t) = B \cos(\omega_c t) \quad (1.2)$$

Donde $\omega_c = 2\pi f_c$.

El espectro de éstas está representado por dos líneas a las frecuencias f_m y f_c , ya que se trata de señales senoidales puras con una sola componente espectral, como se muestra en la figura 1.4

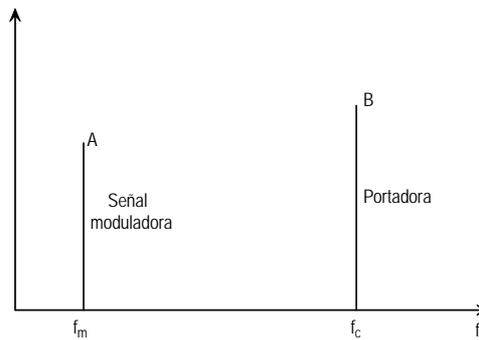


Fig. 1.4 Espectro de las señales moduladora y portadora asumiéndolas como senoidales puras.

Si las señales (1.1) y (1.2) se multiplican mediante algún dispositivo que no se analizará de momento, se tiene una nueva señal:

$$z(t) = \frac{AB}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t] \quad (1.3)$$

La señal anterior tiene dos componentes espectrales, una de frecuencia $f_c + f_m$ y otra de $f_c - f_m$. Las señales originales f_c y f_m han desaparecido en este proceso de multiplicación y el espectro resultante tiene la forma ilustrada en la figura 1.5. La señal moduladora se ha “desdoblado” en dos componentes alrededor de la frecuencia correspondiente a la portadora. Estas dos componentes tienen la información de amplitud y frecuencia de la señal en banda base original.

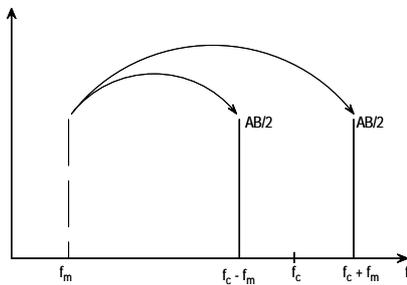


Fig. 1.5. Espectro de la señal modulada.

De hecho, mediante el proceso de modulación, lo que se ha hecho es variar los parámetros (amplitud y frecuencia) de la portadora, de acuerdo a la amplitud y frecuencia de la señal moduladora. La nueva frecuencia a la que se ha trasladado la señal moduladora está determinada por el valor de la frecuencia de la portadora y a la señal modulada también se le designa como *señal en banda de paso*.

Este ejemplo, en el que como señal moduladora se ha utilizado un tono senoidal puro⁸ se puede extender a toda una banda de frecuencias, por ejemplo de la voz. También es conveniente hacer notar que este tipo de modulación, que se conoce como *modulación de amplitud, con doble banda lateral y portadora suprimida*, no es el único posible. En la modulación de amplitud se tienen diversas variantes y, por otra parte, también es posible la modulación de frecuencia y la de fase, que se tratarán con mayor amplitud en el capítulo 6. Estos tipos de modulación son básicamente analógicos. En el dominio digital se tienen varios tipos de modulación que, aunque se designan de diferente forma, son substancialmente similares a los anteriores.

Conviene ahora analizar, aunque sea someramente, la función que debe realizar el receptor para recuperar la señal original. El proceso inverso de la modulación es la *demodulación* o *detección* y para el caso del ejemplo, una forma de conseguirlo es multiplicando la señal modulada por una señal senoidal, generada localmente en el receptor, de la misma frecuencia y fase que la portadora. Este tipo de demodulación se designa como *demodulación síncrona* o *coherente* y se ilustra en la figura 1.6.

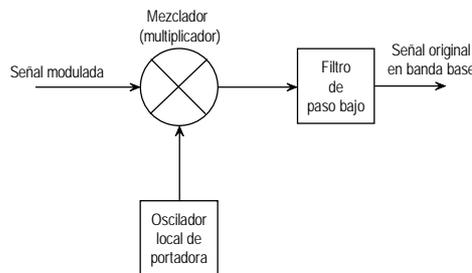


Fig. 1.6. Demodulador síncrono

Así si la señal (1.3) se multiplica nuevamente por la portadora (1.2) y, por simplicidad y sin pérdida de generalidad se omiten los términos de amplitud se tiene:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= y(t) z(t) = [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t] \cos \omega_c t \\
 &= 2 \cos^2(\omega_c t) \cos(\omega_m t) \\
 &= \cos(\omega_m t) + \cos(2\omega_c t) \cos(\omega_m t)
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

⁸ Un tono puro prácticamente no contiene información, excepto la frecuencia, que una vez conocida puede reproducirse en el propio receptor mediante un oscilador, y la amplitud, que también puede reproducirse en el receptor con amplificadores o atenuadores adecuados.

La señal anterior contiene dos términos; el primero corresponde a la señal original en banda base y el segundo corresponde a la señal modulada, ahora alrededor de una portadora del doble de frecuencia de la original ($2f_c$). Si a la salida del multiplicador se coloca un filtro de paso bajo, esta componente quedará eliminada y se obtendrá a la salida, la señal original deseada.

Basándonos en el mismo ejemplo anterior, es evidente que si se tienen varias señales de información en la misma banda base, éstas pueden trasladarse a diferentes posiciones en el espectro, si con ellas se modula a portadoras de frecuencias diferentes. Supóngase que se tienen tres señales de voz, cada una de las cuales ocupa un espectro de 300 a 3400 Hz y que se tienen tres portadoras, una de 100 KHz, otra de 200 KHz y otra de 300 KHz. Es claro que las tres señales pueden transmitirse por radio o por cable sin interferirse. Este proceso de combinar varias señales para transmitir las por un mismo medio se designa como *multiplexado* o *multicanalización en frecuencia*.

Ahora bien, el multiplexado no es la única razón para la modulación. En los sistemas radioeléctricos de comunicaciones se utilizan antenas, tanto para transmitir como para recibir las señales. Estas antenas, para que funcionen de manera eficiente, deben ser de dimensiones del orden de media longitud de onda. Si se pretendiera transmitir por medios radioeléctricos una señal de voz, será necesaria una antena de varias decenas de km, lo cual es impensable. Si esa señal de voz modula a una portadora, por ejemplo de 10 MHz, se puede transmitir con una antena de poco más de diez metros que es ya fácilmente realizable.

En resumen, la modulación es indispensable para los sistemas de radiocomunicación, a fin de poder usar antenas de dimensiones razonables y, por otra parte, es necesaria para combinar señales de igual banda base, que deban transmitirse por el mismo medio.

Conversión. De forma similar al traslado en frecuencia de una señal en banda base, es igualmente posible trasladar señales moduladas a porciones diferentes del espectro. Este proceso recibe el nombre de *conversión* y puede ser *ascendente* cuando la señal trasladada es de frecuencia superior a la de la original, o *descendente* cuando es de frecuencia inferior.

Ancho de banda. El ancho de banda de una señal es la porción del espectro en que está contenida su energía. En algunos casos no es necesario transmitir todo el espectro de las señales; por ejemplo, la voz humana tiene componentes que pueden alcanzar hasta unos 10 KHz, sin embargo la energía contenida a estas frecuencias es muy pequeña y, en la práctica, es suficiente transmitir solamente hasta unos 3.5

o 4 KHz. Algo similar ocurre en bajas frecuencias y solamente se transmiten las frecuencias superiores a unos a unos 300 Hz. Las señales de vídeo tienen componentes frecuenciales significativas hasta alrededor de 5 MHz. Las señales telegráficas, por el contrario, tienen anchos de banda muy reducidos, del orden 100 Hz o menos. Estos anchos de banda son en paso bajo o banda base. El ancho de banda de las señales moduladas o *ancho de banda del canal*, depende tanto del ancho de banda base, como del tipo de modulación empleado y en general es superior al ancho de banda base. Por ejemplo, en radiodifusión sonora en ondas medias, el ancho de banda del canal es de 10 KHz, en televisión terrestre, es de 6 a 8 MHz, dependiendo del estándar utilizado, en televisión por satélite, en que la señal va modulada en frecuencia (FM), el ancho de banda del canal puede ser de 24 a 36 MHz. y en radiodifusión sonora en FM, es de 250 KHz.

1.4 Arquitectura genérica de los sistemas de comunicaciones

Claude Shannon y Warren Weaver en la década de los 1940s concibieron un modelo lineal de comunicación suficientemente general que, en su forma original contenía cinco elementos: fuente de información, transmisor, canal de transmisión, receptor y destinatario final, todos dispuestos linealmente como se ilustra en la figura 1.7. Este modelo básico constituye el punto de partida para el estudio de los sistemas de comunicación y alrededor de él se desarrolla la mayor parte del material de este curso.

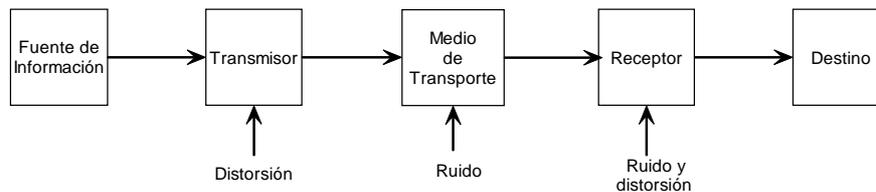


Fig. 1.7. Modelo lineal del sistema de comunicación

Con el transcurso del tiempo y la evolución de los sistemas de comunicación, particularmente en los sistemas digitales, el modelo anterior ha sufrido algunas modificaciones, con el fin de especificar mejor algunos elementos constitutivos de cada uno de los bloques anteriores y proporcionar un rango mayor de aplicaciones. Una versión de tal modelo modificado es la que se muestra en el digrama de bloques de la figura 1.8. Este modelo es también suficientemente general y el papel de cada uno de los bloques se describe mediante el ejemplo siguiente.



Fig. 1.8. Modelo del sistema de comunicación modificado

Considérese un sistema telefónico muy simple, formado por dos aparatos telefónicos, de aquellos antiguos, conectados entre sí por una línea de dos alambres de cobre y con una batería para suministrar la energía necesaria al circuito. En uno de los extremos de la línea una persona utiliza el teléfono para hablar con la que está al otro extremo. La persona que habla es, en este caso, la fuente de información. Las ideas generadas en su cerebro se transmiten como señales electroquímicas a las cuerdas vocales en la garganta del locutor, y constituyen el transductor que convierte la energía electroquímica en movimiento vibratorio de las cuerdas vocales. Esta vibración de las cuerdas se traslada a las moléculas del aire de la cavidad bucal y del exterior de la boca dando lugar a una onda acústica. Las cuerdas vocales y la boca juegan aquí el papel del codificador en la figura 1.2.

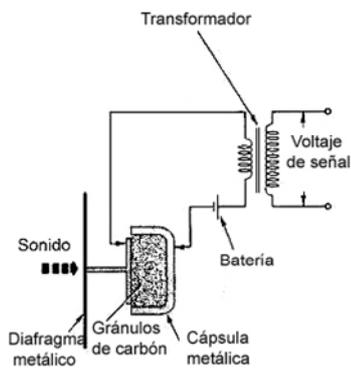


Fig. 1.9. Circuito básico de un micrófono de carbón

En la figura 1.9 se ilustra el proceso de conversión de una onda sonora como la producida por la voz, en una señal eléctrica mediante un micrófono simple, utilizado extensamente en telefonía hasta bien avanzado el siglo XX. El micrófono consiste de una cápsula metálica que contiene granulos de carbón y está cerrada en un extremo por una placa que está unida rígidamente a un diafragma metálico sobre el que inciden las ondas acústicas y que se mueve de acuerdo a las compresiones y rarificaciones de éstas, aumentando o reduciendo la presión entre los granulos de carbón. Cuando los granulos están poco presionados el contacto entre ellos es débil y la resistencia total que ofrecen es relativamente alta. Al ser comprimidos, la superficie de contacto aumenta y la resistencia total disminuye, de modo que el conjunto de dichos granulos puede considerarse como una resistencia cuyo valor varía según la presión de la onda sonora incidente. La placa del diafragma y la cápsula metálica, aisladas entre sí, se conectan a la carga mediante una batería en serie. La carga puede ser un auricular telefónico o, como en el caso de la figura, un transformador para producir una señal de salida de mayor nivel hacia la línea que conecta con el receptor.

Uno de los receptores más simples es el audífono o auricular telefónico, mostrado en la figura 1.10 y del que hay diversas variantes que no trataremos aquí. El auricular de la figura está constituido por una cápsula que contiene un imán permanente hueco y en cuyo interior se encuentra una bobina conectada mediante el circuito correspondiente al transmisor, en este caso el micrófono.

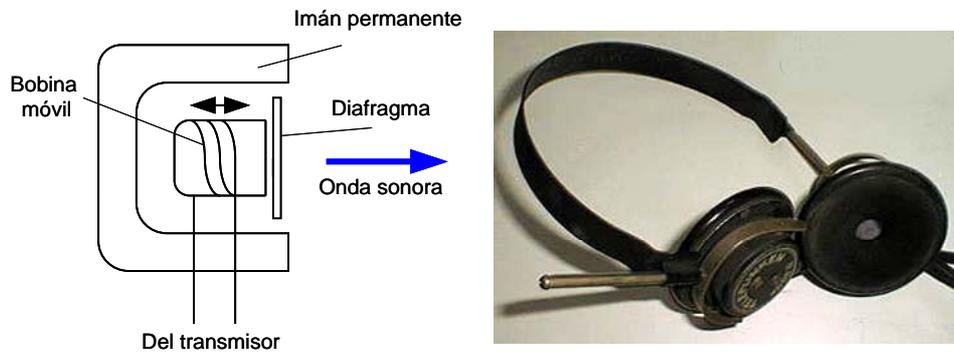


Fig. 1.10. Auricular o audífono.

La persona que habla mantiene el auricular en contacto con su oído y el micrófono en la cercanía de su boca, de modo que la onda acústica, es decir, la onda mecánica producida por las cuerdas vocales, incide sobre el micrófono. La resistencia variable que representa el micrófono queda en serie con la línea de transmisión y la batería de alimentación, con lo que en la línea se tendrá una corriente variable cuya magnitud será proporcional a la intensidad sonora y cuya frecuencia será también variable según la frecuencia del sonido incidente sobre el micrófono. El micrófono juega aquí el papel del transmisor. La señal eléctrica viaja por la línea de transmisión, que es aquí el medio de transporte, hasta el auricular o audífono. Aquí, esa señal se aplica a la bobina del auricular. La vibración de la placa del auricular se transmite al aire en forma de una onda acústica y viaja hasta el tímpano del oído de la persona que escucha. El tímpano, que también es una membrana que vibra mecánicamente transporta esas vibraciones al delicado mecanismo del oído interno, que finalmente las convierte de nuevo en señales electroquímicas que viajan al cerebro y son interpretadas por el oyente. El oído desempeña aquí el papel del decodificador y el cerebro el de destino de la información.

Ahora bien, entre el transmisor y el receptor, conectados mediante una línea de dos alambres conductores, pueden producirse efectos que den lugar a que la persona que escucha no reciba fielmente la información original. Uno de tales efectos es la

atenuación en la línea, que no es igual en toda la banda de frecuencias de voz. En este caso percibirá la voz distorsionada. Otro efecto es el ruido que se genera en todos los elementos del sistema como consecuencia de la agitación térmica de los electrones en los conductores y en el propio micrófono. En estas condiciones la voz se oirá con ruido de fondo que puede ser semejante a un “siseo” o similar al efecto de cascar nueces. Otro efecto puede ser un zumbido producido por líneas de alimentación de corriente alterna a 50 o 60 Hz, cercanas a la línea telefónica, o bien la percepción de otras conversaciones que transcurren en líneas telefónicas contiguas, debido a que los campos electromagnéticos alrededor de una de las líneas se inducen sobre la otra. Todos estos efectos reducen la calidad de la señal recibida y, en ocasiones, pueden hacer ininteligible el mensaje.

Este ejemplo ilustra algunos de los conceptos inherentes todo sistema de comunicaciones. Primero, la fuente de información puede generar señales de naturaleza muy distinta a la eléctrica. La conversión de la señal original en una señal eléctrica requiere de procesos que pueden ser sumamente complejos. En este ejemplo se ha usado al ser humano como la fuente y destinatario de la información y, aunque esto es cierto en la mayor parte de los sistemas de comunicaciones, se dan muchos casos en que la información no se transmite entre personas, sino entre dispositivos mecánicos, eléctricos, químicos, etc. En cualquier caso, es claro que los conceptos de *información* y *mensaje* pueden aplicarse de forma similar.

1.5 Señales indeseables.

En el ejemplo del sistema telefónico en la sección 1.3, se indicó que en los sistemas de comunicaciones pueden producirse efectos que deterioren la comunicación, en otras palabras, que den lugar a que la señal recibida no sea tan “limpia” como la transmitida. Entre estos efectos se cuentan el *ruido*, la *distorsión* y las *interferencias*

Ruido. En cualquier sistema de comunicaciones, se producen fluctuaciones de corriente ajenas a las señales que maneja el sistema. Estas fluctuaciones son de tipo aleatorio y pueden tener diversos orígenes; al agregarse a la señal, deterioran la calidad de la comunicación. Esta situación algunas veces puede evitarse o reducirse y en otras es inevitable, de modo que al diseñar un sistema de comunicaciones es imprescindible tener en cuenta los efectos del ruido de modo que resulten mínimos. Un tipo de ruido que está presente siempre en todos los circuitos eléctricos es el *ruido térmico*, debido a la agitación electrónica en los conductores y semiconductores como consecuencia de la temperatura; se trata, por tanto de un ruido de origen natural. Otras fuentes naturales de ruido son, por ejemplo, el propio universo que

nos rodea, el sol, algunas estrellas, etc. Este ruido se designa como *ruido cósmico* y es importante en los sistemas radioeléctricos de comunicaciones, ya que es captado por las antenas receptoras juntamente con la señal. La atmósfera también es fuente de ruido eléctrico, en especial los rayos. Este tipo de ruido se denomina *ruido atmosférico*.

Otras fuentes de ruido son de origen humano. Entre ellas se encuentran los motores eléctricos en que se producen pequeñas chispas entre las escobillas y el colector, las chispas actúan como pequeñas antenas transmisoras y la energía emitida es captada también por las antenas de los receptores. Lo mismo ocurre con los motores de combustión interna a gasolina, en que las bujías también producen chispas. En zonas industriales y urbanas los niveles de ruido de origen humano pueden ser muy elevados.

En general, no es posible eliminar el ruido térmico, si bien algunas técnicas de procesado digital de señales permite, en algunos casos, reducirlo considerablemente. Los ruidos de origen humano también son difíciles de eliminar, aunque algunas medidas pueden reducir su efecto, por ejemplo blindando o apantallando los circuitos y utilizando algunos tipos de antenas altamente direccionales. El filtrado no suele surtir efecto más que en algunos casos, ya que el ruido, y en particular el térmico, tiene componentes espectrales a todas las frecuencias, de modo que si se utilizan filtros para dejar pasar solamente la banda de una señal, inevitablemente en esa banda también habrá ruido y lo único que se eliminará será el ruido fuera de la banda de interés.

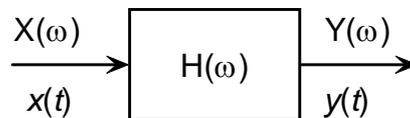
Distorsión. Por distorsión se entiende la alteración, no deseada, de la forma de onda de una señal. Esto ocurre en cualquier circuito cuya respuesta en frecuencia no sea plana, es decir, que no deje pasar por igual todos los componentes espectrales de una señal. Supóngase, por ejemplo, un amplificador de sonido en que las frecuencias superiores a, digamos, 5 KHz, se amplifican a la mitad del valor que las frecuencias inferiores a ese valor. El amplificador puede resultar adecuado para la voz humana en que es suficiente un ancho de banda del orden de 4 KHz, pero no será satisfactorio para amplificar música en que el ancho de banda requerido es del orden de 12 a 15 KHz. En este caso, el sonido de algunos instrumentos perderá su tonalidad, como consecuencia de la amplificación desigual de los componentes frecuenciales del sonido de esos instrumentos. Esa amplificación desigual de los componentes frecuenciales de una señal da como lugar una alteración de sus características espectrales originales y por tanto, a distorsión. En un circuito, la distorsión puede ser el resultado del funcionamiento de algunos dispositivos del circuito en regiones no lineales de sus características, que da lugar a una forma de distor-

sión de interés particular en los sistemas de comunicaciones, designada como *distorsión por intermodulación*.

Interferencia. Por interferencia se entiende la presencia de señales indeseables en un sistema de comunicaciones determinado, originadas por otros sistemas de comunicaciones. En sistemas radioeléctricos, esto ocurre cuando en una misma zona se reciben simultáneamente señales de dos o más sistemas que funcionan en la misma banda de frecuencia, o cuando uno de los sistemas produce señales indeseadas fuera de su banda de trabajo y cuyas frecuencias caen dentro de la banda de otro sistema. En los sistemas de cable las interferencias son causadas por las inducción del campo electromagnético producido por la señal en un cable y que abarcan el espacio ocupado por otro cable. En telefonía ocurren formas de interferencia de este tipo que reciben el nombre de *diafonía* o de *modulación cruzada*.

1.6 Transmisión sin distorsión.

En general, todos los circuitos alteran la señal en la banda de paso. Lo importante es que el circuito, o en general el sistema, cumpla la condición de *transmisión sin distorsión*.⁹ Para ello, la señal a la salida debe ser una réplica exacta de la señal de entrada, es decir, debe tener *la misma forma*, aunque no necesariamente la misma amplitud; puede estar amplificada o atenuada y retrasada en el tiempo respecto a la señal de entrada. En otras palabras, la configuración espectral de la señal de entrada no debe alterarse.



En el sistema de la figura anterior, si la señal de entrada es $x(t)$, con espectro $X(\omega)$, y la de salida $y(t)$, con espectro $Y(\omega)$, la condición de transmisión sin distorsión se cumple si:

Donde K representa la ganancia (o atenuación) y τ el retardo que sufre la señal a su paso por el sistema. En el dominio de frecuencia se tiene que:

$$Y(\omega) = K X(\omega) e^{-j\omega\tau} \quad (1.7)$$

donde $H(\omega)$, la función de transferencia del sistema, se identifica fácilmente con:

⁹ Véase por ejemplo: Carlson, A.B. *Communication Systems*. 3rd edition. pag. 80. Mc Graw-Hill Book Co. 1986.

$$H(\omega) = Ke^{-j\omega\tau} \quad (1.8)$$

La respuesta de amplitud es decir, $|H(\omega)|$, debe ser constante (K) y la respuesta en fase debe ser lineal y negativa:

$$\arg H(\omega) = -\omega\tau \pm \pi \quad (1.9)$$

Las condiciones anteriores deben cumplirse en la banda de paso, aunque no necesariamente fuera de ella. Cuando en un sistema no se cumple la condición de transmisión sin distorsión, es necesario *predistorsionar* la señal a su entrada para compensar las alteraciones que sufra. Este proceso de predistorsión recibe también el nombre de *ecualización* y puede realizarse en amplitud, fase, o ambos. Es importante tener en cuenta que aunque las distorsiones pueden corregirse con esta técnica, en general no puede eliminarse el ruido.

1.7 Clasificación de los Sistemas de Telecomunicación

Los sistemas de telecomunicación pueden clasificarse según criterios diversos, dependiendo de características o aplicaciones específicas. Sería muy difícil intentar una clasificación exhaustiva, por lo que utilizaremos sólo algunos de los criterios más usuales con base en lo tratado en las secciones anteriores.

Desde el punto de vista del tipo de señales que manejan, pueden clasificarse en *analógicos y digitales*. En el primer caso la fuente en la figura 2, entrega una señal analógica, que puede caracterizarse mediante una función continua variable en el tiempo. El codificador, en este caso, puede considerarse como el *modulador* del transmisor, o algún otro dispositivo que procese la señal en el dominio analógico. En el extremo receptor, el demodulador realiza la función inversa, en este caso, la demodulación. En los sistemas digitales la fuente entrega por lo general una señal digital, aún cuando la entrada al sistema sea analógica. El codificador, en este caso puede realizar una variedad de funciones entre las que se incluyen la codificación de fuente, la codificación de canal y la modulación. El decodificador en el extremo receptor realiza la función inversa para recuperar la señal original.

- a) Según el medio físico de transporte de señales, los sistemas pueden clasificarse principalmente como de *cable, fibra óptica o radioeléctricos*.

- b) Según el tipo de usuarios, en sistemas *punto a punto* o *punto a multi-punto*. Entre los primeros se cuentan, por ejemplo, la telefonía y entre los segundos, los de radiodifusión sonora.
- c) Según el tipo de comunicación, en *unidireccionales* o *bidireccionales*.
- d) Según la banda de frecuencias, en *sistemas de banda estrecha* o *banda ancha*.

Es claro que se pueden establecer muchas otras definiciones igualmente válidas; sin embargo, las anteriores resumen las principales características de interés para este curso.

Sistemas analógicos y digitales. En los sistemas analógicos, las señales transportadas son continuamente variables en el tiempo y constituyen una representación eléctrica de las magnitudes físicas originales, tales como voz, imagen, presión, temperatura, etc. En los sistemas digitales las señales transportadas son discretas y su forma eléctrica no guarda relación con la magnitud física original más que a través de una codificación matemática de dichas señales discretas. Si bien hay numerosos aspectos comunes en el tratamiento de ambos tipos de sistemas, las diferencias son de importancia y su estudio requiere atención separada.

Sistemas de cable o fibra óptica. Utilizan como medio físico de transporte de las señales alguno de los siguientes:

Línea abierta: formada por uno o más hilos conductores. Si son dos hilos se designa como *línea de pares*, si está formada por cuatro hilos, se conoce como de *cua-dretes*. Se utiliza principalmente en telefonía, telegrafía y transmisión de datos a baja velocidad.

Cable telefónico de pares múltiples: consiste de un cable, protegido contra la intemperie y usualmente apantallado o blindado eléctricamente, en cuyo interior se confinan numerosos pares de hilos. A diferencia de la línea abierta puede instalarse en conductos subterráneos y se emplea principalmente en telefonía y transmisión de datos a baja velocidad. Tanto este cable como la línea abierta pueden considerarse como medios de transporte de *banda estrecha*.

Cable coaxial: formado por un conductor rodeado por una funda metálica y aislado de ella, que actúa como pantalla electromagnética contra señales externas. Se utili-

za en sistemas de *banda ancha*, como telefonía multicanal, televisión y transmisión de datos a elevada velocidad.

Fibra óptica: aunque el principio físico de funcionamiento es completamente diferente al de los cables anteriores y merecería clasificación aparte, el tipo de servicio a que se destina es semejante y puede considerarse como un medio de transmisión por cable. Se emplea en sistemas de *banda ancha* y sus prestaciones son, en general, muy superiores a las de los cables metálicos.

A excepción de la fibra óptica, la transmisión por cable puede realizarse en *banda base* o en *radiofrecuencia*.

1.8 Sistemas Radioeléctricos

Por *radio* se entiende la transmisión de señales a través del espacio, mediante *ondas electromagnéticas*, sin que haya conexión física entre transmisor y receptor. El medio de propagación de las ondas electromagnéticas es, en este caso, el aire o el vacío. En el trabajo con sistemas radioeléctricos es frecuente emplear el término *radiofrecuencia (RF)*, y por tal, se entiende la frecuencia a la que la radiación de energía electromagnética es útil para propósitos de comunicación. Así, las radiofrecuencias abarcan desde unos pocos KHz hasta más de 100 GHz. Sin embargo, el contexto en que se emplea a veces el término *radiofrecuencia* se presta a algunas confusiones. Por ejemplo se puede hablar de una señal de radiofrecuencia de 70 MHz o de una señal de *FI (frecuencia intermedia)* también de 70 MHz; en el primer caso se trata de una señal radioeléctrica, que se propaga en el espacio e incide sobre una antena, o bien que es radiada por una antena al espacio. Si se habla de *FI*, se trata de una señal generada internamente en un equipo y que *no es radiada* en forma de onda electromagnética.

1.8.1 Espectro Radioeléctrico

Los sistemas de telecomunicación utilizan el espectro radioeléctrico, que comprende las bandas de frecuencias útiles para los servicios de radiocomunicación y abarca, desde frecuencias inferiores a 1 KHz hasta alrededor de 300 GHz. Los sistemas de comunicaciones ópticas funcionan a frecuencias superiores, correspondientes al espectro visible y en el infrarrojo. Las principales bandas del espectro radioeléctrico suelen definirse en términos de las longitudes de onda, según la designación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, de la forma que se indica en la Tabla 1.2

Abreviatura	Significado	Frecuencias	Longitud de onda	Designación
ELF	Extra-low freq.	0.3 a 3 KHz.	1000 a 100 Km	Megamétricas
VLF	Very-low freq.	3 a 30 KHz	100 Km a 10 Km	Miriamétricas
LF	Low frequency	30 a 300 KHz	10 Km a 1 Km	Kilométricas
MF	Medium freq.	300 a 3000 KHz	1000 m a 100m	Hectométricas
HF	High frequency	3 a 30 MHz	100 m a 10 m	Decamétricas
VHF	Very-high freq.	30 a 300 MHz	10 m a 1 m	Métricas
UHF	Ultra-high freq.	300 a 3000 MHz	1 m a 10 cm	Decimétricas
SHF	Super-high freq.	3 a 30 GHz	10 cm a 1 cm	Centimétricas
EHF	Extra-high freq.	30 a 300 GHz	10 mm a 1 mm	Milimétricas

Tabla 1.2 Nomenclatura de las Bandas de Frecuencias

La designación anterior es sumamente general, ya que cada una de las bandas se subdivide, a su vez, en numerosas bandas, o subbandas asignadas a diferentes tipos de servicios. En particular, las bandas de frecuencias de microondas son designadas de forma especial, con diferentes letras, como se indica en la Tabla 1.3.¹⁰

Banda	Rango de frecuencias
P	0.225 a 0.390 GHz
L	0.390 a 1.550 GHz
S	1.550 a 5.200 GHz
X	5.200 a 10.90 GHz
K	10.90 a 36.00 GHz
Q	36.00 a 46.00 GHz
V	46.00 a 56.00 GHz
W	56.00 a 100.0 GHz

Tabla 1.3 Designaciones de las Bandas de Microondas.

A su vez, las bandas anteriores se dividen en más subbandas, por ejemplo S_e , que comprende de 1.55 a 1.65 GHz, K_p , de 10.9 a 12.25 GHz, etc.

¹⁰ Reference Data for Radio Engineers: Radio, Electronics, Computer, and Communications. 7th. Edition. Edward C. Jordan, Editor in Chief. Howard W. Sams & Co. Indianapolis, 1966.

1.8.2 Tipos de Servicios.

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones, los tipos de servicios de radiocomunicación que se asignan en las diferentes bandas se definen como sigue:¹¹

Servicios fijos. Son servicios de radiocomunicación entre puntos fijos específicos. Por ejemplo, circuitos de alta frecuencia punto a punto y radioenlaces de microondas.

Servicios móviles. Servicios de radiocomunicación entre estaciones que pueden utilizarse cuando están en movimiento, paradas en lugares no especificados, o bien entre estaciones móviles y estaciones fijas.

Servicio móvil aeronáutico. Servicios de radiocomunicación entre estaciones terrestres y aeronaves o entre aeronaves.

Servicio móvil marítimo. Servicios de radiocomunicación entre estaciones costeras y barcos o entre barcos navegando.

Servicio móvil terrestre. Servicios de radiocomunicación entre una estación de base y una estación terrestre móvil, o entre estaciones móviles terrestres.

Radionavegación. Servicios para determinar la posición de naves mediante las propiedades de propagación de las ondas radioeléctricas.

Radionavegación aérea. Servicios de radionavegación para la navegación aérea, por ejemplo: VOR, Tacan, radiofaros, sistemas de aterrizaje por instrumentos, radio-altímetros, radares de indicación de obstrucciones, etc.

Radionavegación marítima. Servicios de radionavegación para la navegación marítima, por ejemplo: radiofaros costeros, estaciones de radiolocalización, radares a bordo, etc.

Radiolocalización. Servicios para determinación de la posición de naves con propósitos diferentes a los de navegación, por ejemplo: radares terrestres, radares costeros, sistemas de seguimiento, etc.

Radiodifusión. Servicios de radiocomunicación cuyo propósito es la recepción directa por el público en general. Como ejemplos pueden citarse la ra-

¹¹ Reglamento de Radiocomunicación de la UIT. Artículo 8, Secciones 391-412.

diodifusión en ondas medias (AM), frecuencia modulada (FM) y Televisión.

Radioficionados. Servicios de radiocomunicación llevados a cabo por personas interesadas en las técnicas radioeléctricas, únicamente por interés personal y sin interés comercial alguno.

Espaciales. Servicios de radiocomunicación entre estaciones o vehículos espaciales.

Tierra-espacio. Servicios de radiocomunicación entre estaciones terrestres y estaciones o vehículos espaciales, por ejemplo, la comunicación entre una estación terrestre y un satélite.

Radioastronomía. Astronomía basada en la recepción de ondas radioeléctricas de origen cósmico.

Estándares de frecuencia. Transmisiones de radio de frecuencias específicas y alta precisión, cuyo propósito es la recepción con fines científicos, técnicos o de otra índole.

1.8.3 Gestión del Espectro Radioeléctrico

El espectro radioeléctrico, es decir, el conjunto de bandas de frecuencia que pueden utilizar los diversos servicios de radiocomunicación, constituye un *recurso natural limitado de propiedad nacional*, es decir, no puede utilizarse libremente por cualquier persona, ya que las emisiones en una frecuencia y lugar específicos deben ser únicas. De otra forma interferirían con otros servicios que funcionaran en la misma región y, además, serían interferidos por ellos.

El organismo que, a nivel internacional se encarga del estudio y asignación de las frecuencias en el espectro electromagnético es la *Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)*, con sede en Ginebra, Suiza y de la que son miembros prácticamente la totalidad de los países del mundo. Los aspectos relacionados con el espectro de frecuencias son tratados en el seno de un Comité de la UIT, el *Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicación (CCIR)*, designado actualmente como *UIT-R* que, a través de sus *Grupos de Estudio*, emite estándares, normas y recomendaciones a escala internacional y que generalmente son suscritas por los países miembros. La UIT tiene, además, otro Comité, el *CCITT (Comité Consultivo Internacional de Telefonía y Telegrafía)*, ahora designado como *UIT-T*, cuya acti-

vidad está más orientada a los sistemas no radioeléctricos. Evidentemente hay puntos comunes en las actividades de ambos Comités.

Por lo general, las Recomendaciones del CCITT y del CCIR cubren aspectos relacionados con los circuitos internacionales de comunicaciones, pero en aspectos esenciales, tratan también de las características relevantes de los sistemas nacionales que pueden formar parte de conexiones a circuitos internacionales. Para la asignación de frecuencias y administración del espectro radioeléctrico, la UIT considera tres regiones en el mundo, según se muestra en la figura 1.7. La Región 1 comprende Europa, África y la porción asiática del antiguo territorio de la Unión Soviética. La Región 2 incluye a todo el Continente Americano y, finalmente la Región 3, comprende la parte restante de Asia y Oceanía.

Si bien las Recomendaciones del CCIR no tienen por sí mismas fuerza legal en los países miembros de la UIT, una buena parte de ellas son incorporadas en las legislaciones nacionales en materia de telecomunicaciones, adecuándolas a las características nacionales y regionales. Son las Administraciones Nacionales de Telecomunicaciones las directamente responsables de la gestión y control del espectro radioeléctrico

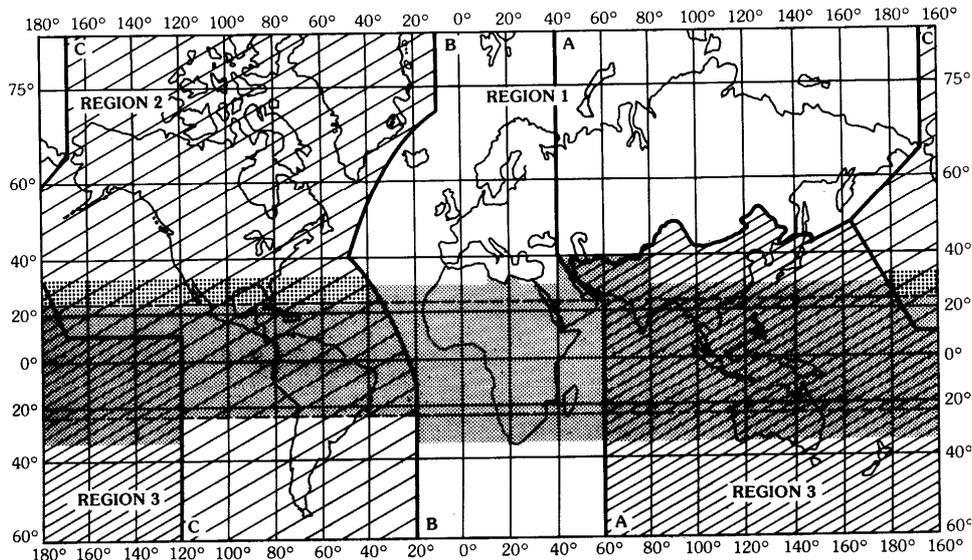


Fig. 1.7. Regiones para la administración del espectro radioeléctrico según la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Las regiones sombreadas corresponden a la zona tropical.

1.8.4 Designación de las emisiones

En el artículo 8 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT se establece que las emisiones deben designarse de acuerdo a su *clasificación* y *ancho de banda necesario*. Para una clase dada de emisiones, el ancho de banda necesario se define como la banda de frecuencias necesaria para asegurar que es justamente suficiente para asegurar la transmisión de información con la calidad específica del tipo de servicio de que se trate (telefonía, televisión, datos, etc.). El ancho de banda necesario incluye aquellas emisiones necesarias para el funcionamiento satisfactorio del equipo receptor, por ejemplo, portadora reducida, banda lateral vestigial, etc.

En la clasificación de la UIT, el ancho de banda necesario debe expresarse por tres cifras y una letra, que ocupa la posición del punto decimal y representa la unidad en que se mide el ancho de banda (Hz, KHz, MHz o GHz), como se indica en la lista siguiente:

Banda de frecuencias	Designación
0.001 a 999 Hz	H
1.0 a 999 KHz	K
1.0 a 999 MHz	M
1.0 a 999 GHz	G

Por ejemplo, una emisión cuyo ancho de banda sea de 0.002 Hz se designa por H002, una con ancho de banda de 4.5 MHz, como 4M5, etc.

1.8.5 Clasificación de las emisiones.

Esta se da por tres símbolos adicionales, alfabéticos o numéricos, el primero de los cuales denota el tipo de modulación de la portadora principal, el segundo, el tipo de información que modula a dicha portadora y, el tercero, el tipo de información a transmitir.

Primer símbolo: Tipo de modulación de la portadora principal.

Símbolo	Significado
N	Portadora sin modulación (onda continua).
A	Portadora modulada en amplitud, con doble banda lateral y portadora completa, incluyendo casos con subportadoras moduladas en frecuencia

Símbolo	Significado
H	Banda lateral única, con portadora completa.
R	Banda lateral única, con portadora reducida o de nivel variable.
J	Banda lateral única con portadora suprimida.
B	Bandas laterales independientes.
C	Banda lateral vestigial
G	Modulación angular (frecuencia).
G	Modulación angular (fase).
D	Emisiones en que la portadora principal está modulada en amplitud y ángulo (frecuencia o fase), ya sea simultáneamente o de acuerdo a una secuencia preestablecida.
P	Secuencia de pulsos sin modulación
K	Secuencia de pulsos modulados en emplitud.
L	Secuencia de pulsos modulados en anchura o duración.
M	Secuencia de pulsos modulados en posición (fase).
Q	Secuencia de pulsos en que la portadora está modulada en ángulo durante el período del pulso.
V	Combinaciones de las anteriores modulaciones de pulsos, o modulación de pulsos producida por otros medios.
W	Casos de modulación de pulsos no cubiertos en los anteriores, en los que la emisión consiste de la portadora principal modulada, ya sea simultáneamente o en una secuencia preestablecida, en combinación de dos más de los modos siguientes de modulación: amplitud, angulo o de pulsos.
X	Casos de modulación no cubiertos

Segundo símbolo: Tipo de señales que modulan a la portadora principal.

Símbolo	Significado
0	Ausencia de modulación (onda continua).
1	Un canal con información digital o cuantizada, sin emplear una subportadora modulada, excluyendo al multiplexado por división de tiempo.
2	Un canal, con información digital o cuantizada, empleando una subportadora modulada, excluyendo al multiplexado por división de tiempo.
3	Un canal con información analógica.
7	Dos o más canales con información digital o cuantizada.
8	Dos o más canales con información analógica.

Tercer símbolo: Tipo de información a transmitir.

Símbolo	Significado
N	Ausencia de información
A	Telegrafía para recepción acústica.
B	Telegrafía para recepción automática.
C	Facsimil.
D	Transmisión de datos, telemetría, telecomando.
E	Telefonía, incluyendo radiodifusión sonora.
F	Televisión (vídeo).
W	Combinaciones de las anteriores.
X	Casos no cubiertos por los anteriores.

El Apéndice 6 del Reglamento de Radiocomunicaciones sugiere la inclusión de dos símbolos adicionales a los descritos antes a fin de dar una descripción más completa de la emisión. Así, un cuarto símbolo proporciona detalles de la señal y el quinto, la naturaleza del multiplexado. Si no se emplea el cuarto símbolo, debe substituirse por un guión. El significado de dichos símbolos es el siguiente:

Cuarto símbolo: Detalles de la señal.

Símbolo	Significado
A	Código de dos niveles o condiciones, cuyos elementos pueden variar en número y/o duración.
B	Código de dos niveles o condiciones, con el mismo número de elementos y duración, sin corrección de errores.
C	Código de dos niveles o condiciones, con el mismo número de elementos y duración, con corrección de errores.
D	Código de cuatro niveles o condiciones, en que cada nivel representa un elemento de señal de uno o más bits.
E	Código de múltiples niveles o condiciones, en el que cada nivel representa un elemento de señal de uno o más bits.

Símbolo	Significado
F	Código de múltiples niveles o condiciones, en el que cada nivel o combinación de éstos, representa un carácter.
G	Sonido monoaural con calidad de radiodifusión.
H	Sonido con calidad de radiodifusión, estereofónico o cuadrafónico.
J	Sonido de calidad comercial.
K	Sonido de calidad comercial, con empleo de inversión de frecuencia o división de bandas.
L	Sonido de calidad comercial con señales separadas, moduladas en frecuencia, para controlar los niveles de las señales demoduladas.
M	Vídeo monocromático.
N	Vídeo cromático (color).
W	Combinación de los casos listados antes.
X	Casos no cubiertos entre los anteriores.

Quinto símbolo: Tipo de multiplexado.

Símbolo	Significado
N	Ninguno
C	Multiplexado por división de código.
F	Multiplexado por división de frecuencia.
T	Multiplexado por división de tiempo.
W	Combinación de FDM y TDM.
X	Otros tipos de multiplexado.

Algunos ejemplos de empleo de la nomenclatura anterior son los siguientes:

Designación	Significado
2K10A2AAN	Telegrafía por modulación de portadora con un tono. Código Morse.
8K00A3EGN	Radiodifusión sonora, doble banda lateral.

Designación	Significado
2K70J3EJN	Telefonía. Un canal con modulación en banda lateral única y portadora suprimida.
2K89R7BCW	Telegrafía multicanal a frecuencia de voz con corrección de errores y algunos canales multiplexados en tiempo. Banda lateral única y portadora reducida.

1.9 Sistemas de Comunicaciones por Cable

Las comunicaciones que emplean como medio de transporte de información cables metálicos o fibras ópticas abarcan una inmensa variedad de aplicaciones, entre las que incluye no sólo la telefonía tradicional o la televisión por cable, sino aún la conexión mediante cable de computadoras entre sí, con redes informáticas o con equipos periféricos y puede decirse que forman parte de nuestra vida cotidiana. Desde el punto de vista de ingeniería, cada sistema de comunicación por cable debe cumplir determinados requisitos para su correcto funcionamiento, entre los que se encuentran la impedancia, ancho de banda, atenuación, aislamiento, etc., muchos de los cuales están definidos en diversos estándares y recomendaciones. Resultaría muy extenso y, fuera del alcance de estas notas, entrar en los detalles de los diversos sistemas, por lo que aquí nos limitaremos a resumir algunos aspectos históricos y las principales características de los sistemas de cable empleados en telecomunicaciones, es decir en comunicaciones a distancia. Por otra parte, al hablar de sistemas de comunicaciones por cable no se entiende únicamente el medio de transporte, que es una *línea de transmisión*, sino también los equipos y sistemas asociados, necesarios para realizar la comunicación.

1.9.1 Aspectos históricos

Puede decirse que los primeros sistemas de comunicaciones por cable fueron los sistemas telegráficos que se iniciaron alrededor de 1840 y hasta 1870, fueron los únicos sistemas de comunicaciones a larga distancia. Al principio, las líneas telegráficas se construían paralelas a las líneas ferroviarias y en su etapa inicial, se utilizaron alambres de hierro o acero, con el inconveniente de la menor conductividad de estos materiales respecto a otros como el cobre, así como la facilidad de corrosión por oxidación con el consecuente deterioro de las características eléctricas de la línea. Hay que tener en cuenta que la tecnología de materiales hace ciento cincuenta años no era, ni remotamente, la que hoy tenemos a nuestra disposición. En 1861, los Estados Unidos contaban con un sistema de transmisión telegráfica que unía la costa atlántica con la del Pacífico.



Fig. 1.12. Tendido telegráfico

Sin embargo hay que hacer notar que, con frecuencia al hablar de telegrafía se asume que se desarrolló en los Estados Unidos y que su inventor fue Samuel Morse. Por una parte, Morse patentó el sistema, pero buena parte de sus invenciones, incluido el alfabeto designado con su nombre se debieron en buena medida a su socio Alfred Vail. Por otra parte en Europa se desarrollaron sistemas telegráficos en la misma época, en particular el debido a Charles Wheatstone¹² en 1837 y estuvieron un tiempo en funcionamiento, también alrededor del ferrocarril. El sistema de Morse resultó ser superior y paulatinamente fue adoptándose en el mundo.

Desde 1856 se hicieron intentos de utilizar cables submarinos para comunicaciones de larga distancia. El primero de ellos entre Dover, Inglaterra y Calais, Francia. Aunque los primeros intentos no tuvieron éxito, antes de 1860 ya estaban en funcionamiento cables submarinos para comunicación telegráfica entre Inglaterra y Francia e Irlanda.

En 1866 consiguió ponerse en funcionamiento el primer cable trasatlántico entre Inglaterra y los Estados Unidos. A lo largo de lo restante del siglo XIX ya había numerosas comunicaciones por cable submarino que unían todos los continentes como se ilustra en el siguiente mapa de 1901.

En la actualidad, continúan en funcionamiento bastantes sistemas de cable submarino metálico, si bien los sistemas submarinos de fibra óptica van en aumento y compiten con los sistemas de satélite.

Con la proliferación de los sistemas telefónicos alrededor de 1870, rápidamente se notó que las líneas para telegrafía no eran adecuadas para telefonía y por esa época se empezaron a utilizar conductores de cobre. En esto, además de las características eléctricas de los materiales de las líneas, hay que tener en cuenta que la telegrafía es un sistema de comunicaciones de banda estrecha, y aún podríamos decir muy

¹² Como hecho curioso, Wheatstone también inventó, entre otras cosas, el acordeón en 1829.

estrecha. En esa época la telefonía venía a ser un sistema de *banda ancha*, aunque sólo se tratara de canales de voz con un ancho de banda de unos 3 kHz y en ese ancho de banda la distorsión sobre la señal, debida a la atenuación dependiente de la frecuencia, era notoria.

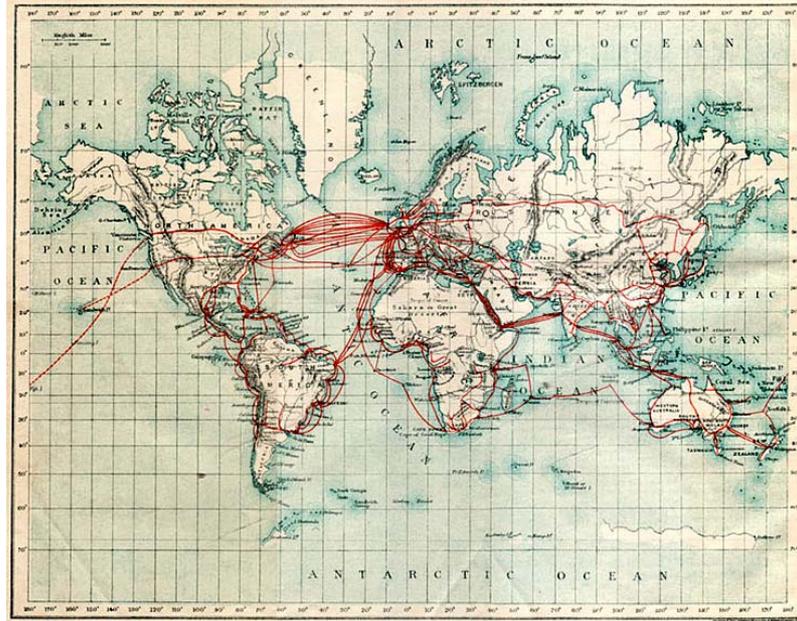


Fig. 1.13. Tendido de cables submarinos en 1901

El teléfono tardaría casi cuarenta años en seguir al telégrafo, ya que se empezó a usar alrededor de 1870. Una razón para este retraso es, sin duda, el tipo de señales que se manejan en uno y otro sistema. En telegrafía las señales son discretas, es decir se detecta la presencia o ausencia de corriente en el circuito, de modo que para producir las señales telegráficas sólo es necesario un interruptor para transmitir y un dispositivo electromecánico que responda a la corriente, para recibir. En telefonía, por otra parte, se manejan señales continuas y es necesario un transductor que convierta, en el caso de la voz, la energía acústica en energía eléctrica de forma que aquí ya no hay sólo presencia o ausencia de corriente en el circuito, sino una corriente variable cuya amplitud y frecuencia deben corresponder a la señal de voz. Cuando esto se consiguió, aunque de manera rudimentaria, fue posible la transmisión de señales de voz.

También en el caso del teléfono, su invención se atribuye por lo general a Alexander Graham Bell, aunque éste fue sólo uno de los inventores que tuvo la fortuna de

presentarse a la oficina de patentes diez minutos antes que otro inventor de un sistema similar, Elisha Gray. En cualquier caso, la invención del teléfono puede atribuirse con cierta justicia a Antonio Meucci, en Italia, en 1849 y a Philip Reis en Alemania que en 1861, diez años antes que Bell, desarrolló el primer teléfono con posibilidad de transmisión de unos 90 metros usando como micrófono una membrana animal excitada por un contacto eléctrico para producir sonidos, la recepción se lograba con un inductor galvánico oscilando de la misma forma que la membrana.

El teléfono rápidamente ganó popularidad a partir de la segunda mitad de la década de 1870 y fue evolucionando considerablemente gracias a la contribución de numerosos inventores. La conexión entre abonados, inicialmente manual, fue dando paso a los sistemas automáticos, si bien hasta no hace muchos años las conversaciones de larga distancia, nacionales o internacionales había que hacerlas a través de operadora. Para finales de la década de 1980, es posible la comunicación nacional e internacional mediante marcado directo del número del abonado, excepto en algunos países en vías de desarrollo o bajo sistemas totalitarios en que toda comunicación al exterior debe pasar necesariamente por un sistema de control.



Fig. 1.14. Central telefónica manual

1.9.2 Características generales de los sistemas de cable

Los sistemas de cable ofrecen ventajas y desventajas respecto a los sistemas radioeléctricos de comunicaciones. Entre las ventajas se tiene que la energía electromagnética está confinada por el cable con lo que los problemas de interferencia se reducen considerablemente y es posible tener dos sistemas paralelos de cable que utilizan el mismo espectro de frecuencias sin interferirse, lo que no es posible con sistemas radioeléctricos en que la energía no está confinada estrictamente a un espacio físico determinado. Cabe aclarar aquí que el término *cable* se utiliza aquí de forma genérica, tanto para una línea de uno o dos hilos como para un cable coaxial, pero no para designar otros medios de transporte confinado de la energía electromagnética, como las guías de onda o las fibras ópticas.

Los sistemas de cable, por otra parte, requieren de una infraestructura física compleja y costosa, bien sea que se instalen en postes o se canalicen de forma subterrá-

nea. El tendido de sistemas de cable con frecuencia requiere de negociaciones con los propietarios de los terrenos por los que debe pasar, lo que no ocurre con los sistemas radioeléctricos. En cualquier caso, cada tipo de sistema encuentra un vasto campo de aplicaciones y no puede hablarse estrictamente de que uno sea mejor que otro.

Una característica importante de los cables es su *atenuación* en función de la frecuencia. Esto es consecuencia de su resistencia intrínseca y del efecto pelicular (véase capítulo 3). Esto obliga a emplear técnicas de ecualización, de modo que la atenuación sea uniforme en toda la banda de frecuencias que transporte el cable. En el caso particular de la telefonía esta ecualización se consigue mediante la inserción de bobinas cada 800 m aproximadamente y esta técnica se designa como *pupinización*, en honor de su inventor, Michel Pupin. También es necesario introducir *amplificadores de línea* para compensar la atenuación.

1.9.3 Tipos de cables

Para el caso que aquí nos ocupa, desde el punto de vista de una introducción a los sistemas de comunicaciones por cable, podemos clasificar los cables metálicos en dos tipos:

Cable telefónico de pares. En telefonía, la conexión entre la central y el abonado se realiza mediante dos hilos conductores, es decir un par. Puesto que el número de abonados a una central es considerable, la instalación de estas líneas en postes no resulta práctico, por que se emplean cables de pares múltiples o multipar, como los ilustrados en la figura 1.15.

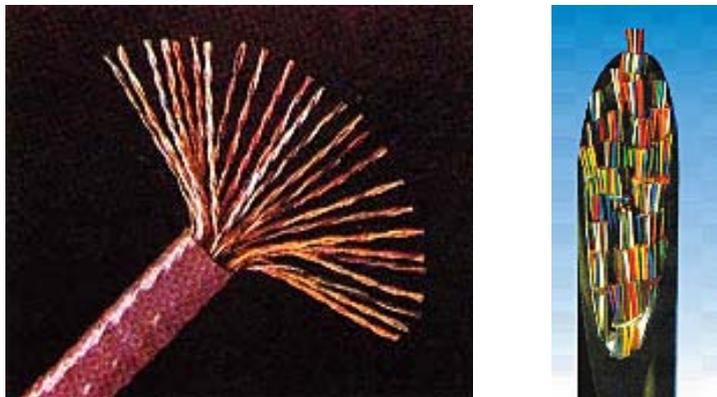


Fig. 1.15. Dos tipos de cables multipar.

Estos cables conectan la central con cajas localizadas en el vecindario de los abonados y, de estas cajas se hace la distribución a los abonados mediante líneas individuales. Este tipo de cables, en forma de manguera puede contener hasta de varios miles de pares.

Cables coaxiales. Estos cables tienen anchos de banda considerablemente mayores que las líneas de pares, hasta del orden de 1 GHz, como es el caso de las líneas utilizadas en los sistemas de televisión por cable. Un cable coaxial es cilíndrico, con un conductor en el centro, rodeado por un conductor externo y separados por un dieléctrico que puede ser sólido, de aire, u otro gas, como se ilustra en la figura 1.16. Estas líneas se tratan con mayor amplitud en el capítulo 9.

En banda base, una línea de pares sólo puede transportar una señal o canal de voz. Sin embargo, mediante técnicas de multiplexado que se tratan en el capítulo 5, es posible transportar por una de estas líneas hasta 12 o 24 canales. En cables coaxiales, esta capacidad aumenta hasta más de 1200 canales telefónicos, cada uno de 3.4 kHz de ancho de banda, o hasta unos 50 o más canales de televisión analógica de 8 MHz de ancho de banda cada uno.

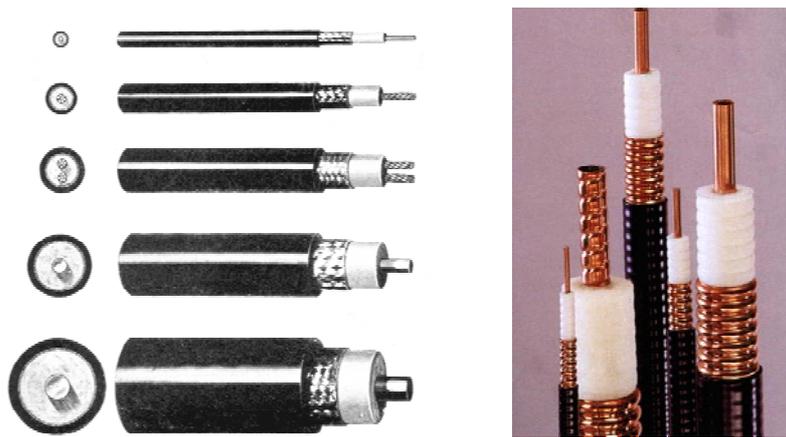


Fig. 1.16. Cables coaxiales con dieléctrico sólido

Los sistemas de cable pueden usarse para interconectar centros de comunicaciones, por ejemplo, centrales telefónicas, o bien pueden usarse para conectar a un gran número de usuarios. En cualquier caso, las señales se inyectan en un extremo del cable con el nivel de potencia y tipo de modulación adecuados y se transportan por uno o varios cables principales designados como *troncales*. De estas troncales se extraen las señales para su distribución a los usuarios o abonados del sistema,

mediante circuitos de distribución. Es claro que los amplificadores de línea deben compensar también las atenuaciones o pérdidas introducidas por los distribuidores.

1.10. Comunicaciones por Satélite

Desde los inicios de la llamada “era espacial”, con la puesta en órbita del primer satélite artificial, el *Sputnik I* en 1957, hace ya prácticamente medio siglo, los avances han sido impresionantes y sus aplicaciones abarcan tanto aspectos civiles como científicos y militares. Los satélites de comunicaciones tienen varias características importantes¹³. Una, su considerable ancho de banda y, otra, la posibilidad de cobertura global. Hay que mencionar que el tema de comunicaciones por satélite es muy amplio y no es posible abarcarlo en esta introducción a los sistemas de telecomunicación, por lo que aquí nos limitaremos únicamente a dar una visión panorámica, necesariamente superficial.

1.10.1 La órbita geostacionaria

En la actualidad, prácticamente todos los satélites de comunicaciones se sitúan en la *órbita geostacionaria*, de modo que el satélite aparece como un punto fijo en el firmamento. Para que un satélite aparezca como un punto fijo sobre la superficie terrestre es necesario que se sitúe en una órbita circular sobre el ecuador y que su período de traslación sea exactamente igual al de rotación de la tierra, es decir de un día sideral.

El período de un satélite en órbita elíptica terrestre está dado por:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{A^3}{\mu}}$$

Donde A es el semieje mayor de la elipse y μ es la constante gravitacional, $3.99 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$. Para la órbita circular geostacionaria es necesario que el período de traslación del satélite sea igual al de rotación de la tierra, es decir, 23h, 56 min, 4.09 s, a una altura de 35803 km en el plano ecuatorial. En otros planos, a esta

¹³ Pritchard, W. L. *Satellite Communication – An Overview of the Problems and Programs*. Proc. IEEE, Vol. 65, pp. 294-307, Mar. 1977.

altura, el satélite puede designarse como *geosíncrono*¹⁴, pero no aparecerá estacionario sino que la trayectoria que se apreciará desde la superficie terrestre será describiendo figuras en forma de ocho. Una estación terrestre puede trabajar con un satélite en órbita geoestacionaria o con varios si su antena tiene haces múltiples, sin necesidad de sistemas de seguimiento o de conmutación.

Aunque los orígenes de la idea de las comunicaciones satélite por satélite es oscura, tradicionalmente se atribuye a Arthur C. Clarke¹⁵, conocido escritor de ficción científica, la proposición de un sistema de satélites en órbita geoestacionaria, para conseguir cobertura mundial. Se pueden configurar tres posiciones para conseguir una cobertura casi total de la tierra con satélites geoestacionarios, a excepción de las regiones polares. *Intelsat*¹⁶, organismo en el que participan más de cien países es, desde su fundación en 1964, el mayor operador de servicios de comunicaciones por satélite, con una considerable flota de satélites situados en órbita geoestacionaria, con separación de 120° entre ellos y localizados sobre los océanos Atlántico, Pacífico e Indico.

La órbita geoestacionaria es única en el sentido de que su radio es independiente de la masa del satélite, por lo que todos los satélites geoestacionarios de comunicaciones tienen que situarse en ella en posiciones asignadas a cada país, que se coordinan internacionalmente por la UIT. Las antenas terrestres para comunicación con estos satélites no requieren de sistemas de seguimiento y se mantienen fijamente apuntando al satélite. Las comunicaciones, en principio, pueden mantenerse de forma continua durante las veinticuatro horas.

1.10.2 Cobertura

Una posible clasificación de los satélites de comunicaciones es en términos de su cobertura. En términos generales puede hablarse de cobertura regional o hemisférica y depende de la configuración de las antenas a bordo del satélite, como se ilustra en la figura 1.17 para el caso de cobertura regional.

En este caso la antena a bordo del satélite, que cumple las funciones de receptora y transmisora, debe mantenerse absolutamente rígida, ya que cualquier desviación de ésta, considerando la distancia entre la tierra y el satélite, haría que el satélite dejara de apuntar a la zona deseada.

¹⁴ Los términos *geoestacionario* y *geosíncrono* suelen tomarse con frecuencia como equivalentes. Estrictamente hablando, una órbita geosíncrona es aquella con un período igual a un día terrestre, pero un satélite en ella no es necesariamente geoestacionario.

¹⁵ Clarke, A.C. "Extraterrestrial Relays". *Wireless World*, October 1945. pp. 305-308.

¹⁶ *International Telecommunications Satellite Consortium*.

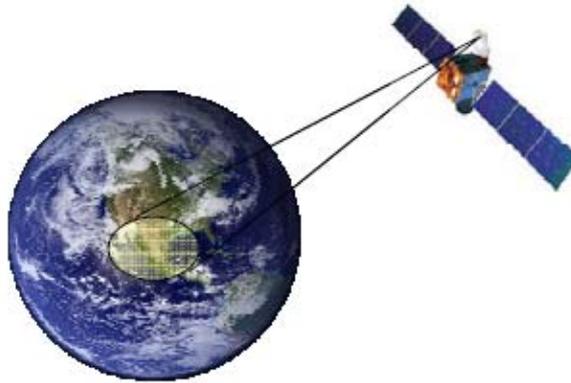


Fig. 1.17. Cobertura de un satélite.

En el caso de cobertura hemisférica el ancho del haz de la antena debe iluminar toda la porción visible de la tierra, con lo que el ángulo de abertura del haz debe ser de unos 18° . Las regiones polares en un radio de unos 5° quedan fuera de la cobertura del satélite.

Una vez que el vehículo espacial alcanza su posición en la órbita geoestacionaria, su posición debe mantenerse fija, a fin de que su antena o antenas, altamente direccionales apunten siempre en la dirección deseada. Sobre el satélite actúan diferentes fuerzas tales como el gradiente gravitacional, es decir, la diferencia en la atracción gravitacional causado por la diferencia de distancia del centro de masa de la tierra a las diversas partes del vehículo, el campo magnético terrestre, la presión de la radiación solar y el movimiento no compensado de los motores inerciales, engranajes y palancas. Aunque dichas fuerzas sean pequeñas, actúan de forma continua sobre el vehículo y es necesario compensarlas o corregirlas.

La forma más simple de estabilización es giroscópica, en que el vehículo completo gira alrededor de su eje vertical como una peonza a una velocidad de 30 a 100 rpm. Esto hace que el satélite se comporte como un volante giroscópico con elevado momento de inercia que le proporciona rigidez en la posición. Sin embargo esto obliga a que las antenas tengan rotación opuesta (*despun*), es decir, localizadas en una plataforma de, relativamente, baja inercia, de modo que el efecto total sea que la antena apunte su haz de forma estacionaria hacia la tierra.

Un satélite no estabilizado giroscópicamente y apuntando a una región fija en la tierra como se ilustra en la figura, tiene tres tipos de movimiento, similares a los de

un barco navegando: desviación, cabeceo y rotación¹⁷. La desviación sería en este caso en el plano horizontal, semejante a las desviaciones de la proa de un barco respecto a una dirección fija. El cabeceo sería en este caso en el plano vertical, similar al cabeceo de un barco cuando la proa y la popa suben y bajan mientras navega. Finalmente, la rotación sería lateral, perpendicular a la dirección de apuntamiento, como en el caso de un barco sujeto a oleaje lateral que se inclinara de babor a estribor.

Los satélites estabilizados en tres ejes tienen pequeños volantes giratorios, llamados volantes de reacción o de momento, que giran para mantener al satélite en la posición deseada respecto a la tierra y al sol. Si los sensores del satélite detectan desviaciones respecto a la posición correcta, los volantes de reacción aumentan o reducen su velocidad para regresar al satélite a la posición correcta. Algunos vehículos utilizan también pequeños impulsores de propulsión, para proporcionar empujes suaves y corregir así los desvíos de posición. Tanto este sistema como el de estabilización giroscópica tienen ventajas y desventajas. En la actualidad los satélites de comunicaciones tienden más a ser del tipo de estabilización por tres ejes que giroscópica. Una ventaja de los satélites estabilizados por tres ejes es que pueden desplegar paneles solares de gran tamaño, por ejemplo de hasta 20 metros de longitud, una vez que se encuentran en su posición orbital y generar más energía que los satélites cilíndricos giratorios.

1.10.3 Suministro de energía

La fuente primaria de energía en los satélites de comunicaciones son las celdas solares de silicio. Estas pueden estar fijas al cuerpo del vehículo espacial o montadas de forma que puedan orientarse continuamente para capturar la máxima energía del sol.

Durante los equinoccios de primavera y otoño, en que la desviación del eje terrestre es menor que en los solsticios, los satélites geoestacionarios quedan eclipsados por la tierra, alrededor de 70 minutos por día, dependiendo de la inclinación de la órbita y del número de días anteriores o posteriores al equinoccio. Para mantener el funcionamiento durante esos períodos, es necesario utilizar baterías. El peso de las baterías es importante y constituye un serio compromiso entre la potencia, el peso y el rendimiento. Los satélites actuales de comunicaciones pueden consumir hasta varios kw a pleno funcionamiento, por lo que las baterías no pueden proporcionar toda la potencia necesaria durante los eclipses. En esos intervalos las baterías su-

¹⁷ Los respectivos términos en inglés son *yaw*, *pitch* y *roll*.

ministran la energía necesaria a los circuitos de mayor prioridad a bordo del satélite, dejando de funcionar los de menor prioridad.

1.10.4 El sistema de comunicaciones

Un satélite de comunicaciones es, básicamente, un repetidor o retransmisor que, en el caso del satélite se designa como *transpondedor* y que en su configuración más simple puede representarse esquemáticamente mediante la figura 1.18 y cuya arquitectura es, prácticamente, la misma de los retransmisores empleados en sistemas radioeléctricos terrestres de comunicaciones. En el caso de comunicaciones por satélite se habla de dos segmentos: ascendente y descendente¹⁸. El primero corresponde a la señal transmitida desde tierra hacia el satélite y el segundo a la señal transmitida del satélite a la tierra.

La señal ascendente, procedente de la tierra y en una determinada banda de frecuencias, es amplificada y trasladada a otra banda de frecuencias, para ser de nuevo amplificada hasta un nivel suficiente para su transmisión hacia tierra.

La razón de utilizar dos bandas de frecuencias diferentes para la señal de entrada y la de salida es la misma que en el caso terrestre y es evitar la retroalimentación que causaría que el sistema oscilara o quedara interferido haciendo inútil la comunicación.

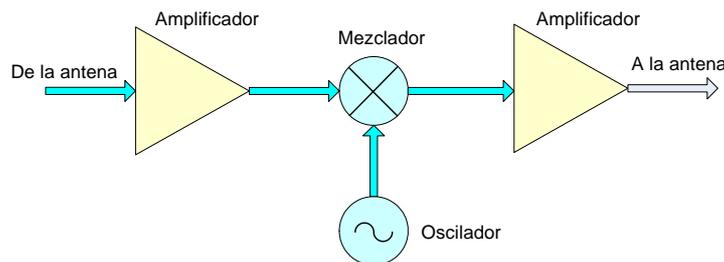


Fig. 1.18. Diagrama esquemático simplificado de la porción de radio de un satélite de comunicaciones.

En las comunicaciones por satélite, la frecuencia del enlace ascendente es superior a la del enlace descendente. La razón de esto es que, en las bandas de frecuencias empleadas en las comunicaciones por satélite, casi todas superiores a 3 GHz, la atenuación por distancia es considerable y mayor cuanto mayor sea la frecuencia, además de otros efectos que contribuyen a la atenuación como la atenuación por

¹⁸ Uplink y downlink.

hidrometeoros, en particular la lluvia¹⁹ y la absorción por gases atmosféricos vapor de agua. La potencia del transmisor a bordo del satélite está limitada principalmente por la fuente de energía, además de otros factores como el peso y el volumen del amplificador de potencia, en tanto que la potencia transmitida desde tierra puede ser tan alta como sea necesario para llegar al satélite con un nivel adecuado. Como consecuencia de lo anterior, es preferible que la frecuencia del enlace ascendente sea mayor que la del descendente, al que la atenuación será algo menor. Las bandas de frecuencias asignadas a los servicios de comunicaciones por satélite están definidas por el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Comunicaciones (UIT) y como ejemplo, a continuación se muestran las frecuencias utilizadas para servicios fijos de comunicaciones por satélite²⁰.

Hay algunas otras bandas, relativamente estrechas, asignadas también a los servicios fijos de comunicaciones por satélite, en particular, alrededor de 2.6, 3.6 y 6.6 GHz, así como bandas anchas por encima de 30 GHz, si bien estas bandas son poco usadas actualmente.

Enlace ascendente	Enlace descendente
5.85 -6.425 GHz	3.625 – 4.2 GHz
6.725 – 7.025 GHz	10.7 – 10.95 y 11.2 – 11.45 GHz
14.0 – 14.5 GHz	10.95 – 11.2 y 11.45 – 11.7 GHz
27.5 – 29.5 GHz	17.7 – 19.7 GHz
29.5 – 30 GHz	19.7 – 20.2 GHz

Adicionalmente hay otras bandas asignadas para sistemas móviles comunicaciones y reservadas para satélites que no están en órbitas geoestacionarias, entre se encuentran algunas para comunicaciones marítimas, aéreas y terrestres.

El número de transpondedores a bordo de éste, determina el ancho de banda y depende de la aplicación a que se destine el satélite. Así, algunos satélites, de los

¹⁹ Hogg, D.C. and Chu, T.-H. *The Role of Rain in Satellite Communications*. Proc. IEEE, Vol. 63, pp. 1308-1331, Sept. 1975.

²⁰ Pascall, S.C. *Communication Satellites and Systems*, Cap. 58, en *Telecommunications Engineer's Reference Book*. F. Mazda, Editor. Focal Press, 2001.

lanzados en 2005, el Galaxy tiene 15 transpondedores y el AMC-12, de la empresa SES Americom²¹ tiene 72, de los cuales el consorcio Astra utiliza 33 (Astra 4A). Cada transpondedor tiene un ancho de banda de 36 MHz, capaz de transportar un canal de televisión analógica y hasta de cinco a diez de televisión digital²², o varios miles de canales de voz o datos. La modulación utilizada en los transpondedores es en frecuencia (FM) para las señales analógicas, o bien QPSK y 8PSK para las digitales. El ancho de banda de los transpondedores no es necesariamente el mismo y algunos de éstos pueden tener anchos de banda hasta de más de 100 MHz.

La cantidad de transpondedores a bordo del satélite hace necesaria una gestión adecuada de los mismos, por lo que además de éstos se tienen circuitos para la canalización adecuada de las señales a bordo del satélite. Además, en un momento dado es posible que no todos los transpondedores están ocupados con tráfico y mantenerlos encendidos representa un consumo innecesario de potencia. Otro aspecto a considerar en el diseño del satélite es la previsión de que alguno o algunos de los transpondedores pueden fallar, por lo que es necesario contar con transpondedores de reserva para estos casos, de modo que el tráfico pueda canalizarse del transpondedor averiado a uno de reserva o a otro que no esté siendo utilizado o que maneje tráfico de menor prioridad. El sistema es, básicamente, muy similar al empleado en los radioenlaces terrestres de microondas.

1.10.5 Potencia radiada por el satélite

Como se verá en el capítulo 10, la potencia radiada está dada por el producto de la potencia de entrada a la antena, multiplicada por la ganancia de la antena. La potencia de entrada a la antena es la suministrada por el amplificador final del transpondedor, de tal manera que la potencia radiada debe ser suficiente para recibir en tierra una señal de buena calidad, o dicho más correctamente, con una relación señal a ruido elevada.

Los amplificadores de potencia en el satélite suelen utilizar en su mayoría tubos de onda progresiva (TWT), estos TWT son válvulas de vacío capaces de funcionar a frecuencias de microondas. En los inicios de las comunicaciones por satélite estos dispositivos podían proporcionar potencias del orden de 6 a 10 w y, actualmente los desarrollos realizados permiten obtener potencias hasta del orden de 100 w, dependiendo de la frecuencia, de modo que la potencia suministrada a la antena, dependiendo del satélite, puede situarse en ese rango. Para conseguir radiar una

²¹ <http://www.ses-amicom.com/amicom/siteSections/tools/index.php>

²² <http://www.samhassan.com/Satellite.html>

potencia elevada es necesario utilizar antenas muy directivas, de ganancia elevada, del orden de 40 dB o más en la banda K_u . Una ganancia de 40 dB significa que la potencia radiada en la dirección deseada será 10^4 o diez mil veces la potencia suministrada a la antena, de modo que si ésta es de sólo 10 w, hacia la tierra se radiará el equivalente a $10 \times 10^4 = 100000$ watts (véanse capítulos 2 y 10 para una explicación más amplia de este tema) y, con eso se consigue en tierra una recepción satisfactoria.

En los primeros satélites, la cobertura era hemisférica mediante un solo haz radiado por la antena, sin embargo el desarrollo de éstas ha hecho posible la radiación en varios haces y aún la conformación de éstos de acuerdo a la forma de la región geográfica que se cubre con la señal. Así por ejemplo un satélite como *Hispatat* radia varios haces, uno dirigido a la Península Ibérica, otro a las Islas Canarias y otros hacia el continente americano.

1.10.6 Vida útil

Actualmente la vida útil de los satélites más recientes se estima superior a los 15 años. En la vida útil influyen, además de las posibles averías, una serie de factores como el deterioro de las celdas solares y, de manera importante, el agotamiento del combustible necesario para mantener la posición del satélite de forma precisa. Cuando el combustible se agota, el satélite ya no puede corregir la deriva causada por los campos gravitatorios de la tierra, el sol, la luna y otros cuerpos en órbita así como la presión de la radiación solar y queda en tales condiciones, inútil para las comunicaciones.

Según se mencionó, la órbita geoestacionaria es única y esta a unos 36000 km de la superficie terrestre, de modo que todos los satélites de comunicaciones tienen que situarse en esa órbita. En otras palabras, la órbita geoestacionaria equivale a un estacionamiento con un número limitado de plazas y constituye por tanto un recurso limitado. Actualmente hay miles de objetos en dicha órbita, la mayor parte “basura espacial” que incluye tanto satélites inoperativos como restos de cohetes. Teniendo que los viajes espaciales tripulados, con excepción del Proyecto Apolo a la luna a finales de la década de 1960 y años siguientes, no alcanzan órbitas superiores a unos centenares de kilómetros de la tierra, los satélites de comunicaciones, hasta ahora y en el futuro previsible, no pueden ni recuperarse ni repararse en órbita, de modo que constituyen literalmente basura.

Cuestiones para repaso

- 1.1. ¿Qué se entiende por comunicación?
- 1.2. ¿Qué se entiende por información?
- 1.3. ¿Por qué es necesario modular la señal en banda base para su transmisión por un canal de radio?
- 1.4. ¿Qué instrumento se utiliza para medir las señales en el dominio del tiempo?
- 1.5. ¿Qué instrumento se utiliza para medir las señales en el dominio de frecuencia?
- 1.6. ¿Qué se entiende por ancho de banda?
- 1.7. ¿Qué diferencia hay entre un mezclador y un conversor?
- 1.8. ¿Cuáles son las principales componentes de un sistema de comunicaciones?
- 1.9. ¿Qué se entiende por distorsión y qué tipos hay?
- 1.10. ¿Qué tipos de señales indeseables ocurren en los sistemas de comunicaciones?
- 1.11. ¿Qué tipo de ruido está siempre presente en todos los sistemas de comunicaciones?
- 1.12. ¿Cómo debe ser la función de transferencia de un sistema para que la transmisión sea sin distorsión?
- 1.13. ¿Qué propósito tiene la ecualización?
- 1.14. ¿Qué se entiende por “radio”?
- 1.15. ¿Qué diferencia hay entre una onda sonora y una onda electromagnética?.
¿Pueden ambas ser de la misma frecuencia?
- 1.16. ¿Qué rango de frecuencias abarca el espectro de radiofrecuencia?

- 1.17. ¿Qué organismo internacional se encarga de gestionar el espectro de frecuencias?
- 1.18. Explique algunas de las razones por las que el teléfono no pudo desarrollarse sino hasta más de treinta años después del telégrafo.
- 1.19. ¿Qué ventajas y desventajas tienen los sistemas de comunicaciones or cable respecto a los sistemas radioeléctricos?
- 1.20. ¿En qué consiste, básicamente, la ecualización en un sistema de cable?
- 1.21. ¿En que forma se consigue la ecualización en el caso particular de los cables o líneas telefónicas.
- 1.22. Mencione diferencias importantes entre los sistemas de cables de pares y de cables coaxiales.
- 1.23. ¿Qué características tiene la órbita geoestacionaria?
- 1.24. ¿Qué es un transpondedor?
- 1.25. ¿Cuáles son las principales bandas de frecuencias que utilizan los satélites civiles de comunicaciones?
- 1.26. ¿Qué tipos de cobertura se pueden tener con los satélites de comunicaciones?.
- 1.27. ¿Qué formas de estabilización se emplean para los satélites en órbita geoestacionaria?.
- 1.28. Explique en qué forma se obtiene la energía para alimentar un satélite.
- 1.29. Por qué razón la frecuencia del canal ascendente es superior a la del descendente.
- 1.30. ¿Cuáles son los componentes básicos de un transpondedor?
- 1.31. ¿Qué diferencia hay entre la potencia radiada por un satélite y la potencia de salida de un transpondedor?
- 1.32. ¿De qué depende la vida útil de un satélite?