

# Introducción a los sistemas de comunicaciones

Margarita Cabrera  
Francesc Tarrés Ruiz

Revisión a cargo de  
Francesc Rey Micolau  
Francesc Tarrés Ruiz

PID\_00184995



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

# Índice

<b>Introducción</b> .....	5
<b>Objetivos</b> .....	6
<b>1. Introducción a los sistemas de comunicaciones</b> .....	7
<b>2. Transmisor, canal y receptor</b> .....	9
<b>3. Canal de comunicaciones</b> .....	12
3.1. El medio físico .....	12
3.1.1. Medios de transmisión guiados .....	13
3.1.2. Medios de transmisión no guiados: comunicaciones sin hilos .....	16
3.2. Degradación de la señal recibida .....	20
3.2.1. Ruido e interferencias .....	20
3.2.2. La relación señal a ruido .....	21
3.2.3. Distorsión .....	21
3.2.4. Modelo de canal lineal .....	22
3.2.5. Efectos no lineales en el canal .....	23
<b>4. Modulador (en el transmisor)</b> .....	25
<b>5. Desmodulador (en el receptor)</b> .....	27
5.1. Procesado inverso .....	27
5.2. Compensación de los efectos provocados por el canal .....	28
5.3. Funciones de sincronismo .....	29
5.4. Medidas de calidad .....	29
<b>Anexo: Un poco de historia</b> .....	31
<b>Bibliografía</b> .....	34



## Introducción

En este módulo de “Introducción a los sistemas de comunicaciones” nos centraremos en la estructura básica de todos los sistemas de comunicación e intentaremos exponer las diferentes funcionalidades que tienen cada uno de los bloques del emisor y del receptor. Los tres elementos básicos de un sistema de comunicaciones son el transmisor, el medio de transmisión o canal, y el receptor, que se exponen con detalle en los diferentes apartados de este módulo. Empezaremos por tanto con un esquema genérico de las funcionalidades y características de cada uno de estos tres elementos: transmisor, canal y receptor.

Posteriormente, analizaremos con cierto detenimiento el canal, ya que es éste quien nos determina cómo se degradará la señal transmitida y, por tanto, en qué grado deberemos protegerla o acondicionarla antes de su transmisión para que pueda ser recibida en la forma correcta. Observad que si el canal no introdujera ninguna distorsión sobre la señal enviada, la recepción consistiría en identificar cuál es la señal transmitida. No obstante, en un sistema real las señales se degradan, por lo que el receptor obtendrá una versión degradada de la señal transmitida. Estudiaremos las características del canal y los diferentes tipos de medios en el apartado 3.

En los apartados 4 y 5 comentaremos las funciones del modulador y desmodulador, ubicadas físicamente en el transmisor y receptor, respectivamente. Además, en recepción es importante valorar la calidad de la señal recibida, por lo que deberemos definir medidas que nos permitan cuantificar esta calidad. Todos estos elementos de recepción también se exponen en el apartado 5.

## Objetivos

Este módulo didáctico pretende que los estudiantes, una vez lo hayan estudiado, sean capaces de:

- 1.** Identificar los elementos básicos de un sistema de comunicaciones y sus funciones.
- 2.** Conocer los diferentes tipos de medios de transmisión y sus características.
- 3.** Diferenciar los conceptos de ruido, interferencias y distorsión. Identificar las causas que pueden producirlos.
- 4.** Definir diferentes medidas que permitan valorar la calidad de un sistema de comunicaciones.
- 5.** Identificar los bloques básicos que constituyen un modulador y sus funciones.
- 6.** Identificar los bloques que constituyen un desmodulador y sus funciones.

## 1. Introducción a los sistemas de comunicaciones

En este texto, se presentan los principios básicos que soportan tanto el diseño, como el análisis de los sistemas de comunicación actuales. El diseño de un sistema de comunicaciones hace referencia a la transmisión de una determinada información, y consiste en determinar un conjunto de procedimientos que garanticen la correcta recepción de estos mensajes en un lugar remoto. En función de la naturaleza analógica o digital de la información, hablaremos de comunicaciones analógicas o digitales, respectivamente.

El inicio de los sistemas de comunicación data de finales del siglo xix con la telegrafía, que es en sí un sistema de comunicaciones digitales. Sin embargo, posteriormente, con los inicios de la telefonía, la radio y la difusión de televisión, se establecen los principales sistemas de telecomunicaciones que predominan hasta la década de los sesenta y setenta (siglo xx), y se basan en sistemas de comunicaciones analógicos. A partir de estos años, con el continuo avance de la tecnología se han ido desarrollando dispositivos con mayores posibilidades de almacenamiento de datos en superficies cada vez más pequeñas, mayores posibilidades de cálculo de operaciones en coma flotante y en menores tiempos, mejores técnicas de procesado de señal para comprimir información y combatir efectos no deseados que sufre la señal al ser transmitida y menores consumos de potencia. Todas estas características han permitido el desarrollo y establecimiento de sistemas de comunicaciones basados en modulaciones digitales que han transformado completamente las comunicaciones existentes y han dado lugar a muchos nuevos sistemas.

Una característica de particular importancia en el diseño de los sistemas de comunicación es el canal o medio físico a través del cual se va a transmitir la información. Esto significa que utilizar un cable convencional, una fibra óptica o directamente el medio aéreo afecta directamente al diseño de los diferentes bloques que componen el sistema de comunicaciones. En efecto, si la comunicación se realiza mediante cable, los efectos de las posibles interferencias y ruidos sobre la señal útil suelen ser menores que cuando la transmisión se realiza a través de redes de radioenlaces terrenas (medio aéreo). De modo parecido, cuando se realiza una comunicación vía satélite, la señal transmitida desde la estación terrestre debe recorrer un camino de 36.000 km sin ningún tipo de amplificación, hasta llegar al satélite donde se reenvía a la Tierra. En definitiva, desde su emisión al satélite hasta su recepción en las antenas parabólicas de nuestros hogares, la señal ha recorrido un largo camino, se ha atenuado de forma considerable y ha estado expuesta a diferentes tipos de ruidos e interferencias. Todo esto significa que el diseño de un sistema de comunicaciones debe tener en cuenta las condiciones en las que se realiza esta comunicación. Estas condiciones determinan el tipo de modulaciones que se

utilizan en cada caso y el procesado que se realiza sobre la señal a transmitir, para protegerla de las posibles distorsiones y ruidos que introducirá el medio. En definitiva, se trata de que el transmisor adapte la señal al medio.

Si se utiliza el medio aéreo, la información viaja entre el transmisor y el receptor en forma de onda electromagnética; si se utiliza un cable, la información se transmite como una diferencia de tensión entre dos hilos paralelos. El medio que se utiliza para la comunicación establece también una primera clasificación de los sistemas de comunicación. Así, por ejemplo, es habitual referirse a los sistemas de televisión terrestre, por cable o por satélite, haciendo mención específica del medio utilizado para la transmisión.



## 2. Transmisor, canal y receptor

En este apartado vamos a considerar los elementos básicos que constituyen un sistema de comunicaciones y que pueden descomponerse en el transmisor, el canal de comunicaciones y el receptor.

Existen múltiples y diferentes sistemas de comunicaciones. En ningún caso, se considera como objetivo de este módulo realizar una descripción detallada de las partes individuales que componen un sistema en particular. Al contrario, se pretende dar una visión general de todos los elementos básicos que debe contener un sistema de comunicaciones, enfatizando la función que realiza cada uno de ellos. Especialmente, se analiza el procesado o transformación que experimentan las señales a través de bloques básicos, y se facilitan diferentes criterios y estrategias para analizar y/o evaluar la calidad de las señales en cada uno de ellos.

Desde un punto de vista muy general, podemos definir que un sistema de comunicaciones es el mecanismo por el cual se envía la información generada por una **fuentes a un destinatario** situado a una determinada distancia.

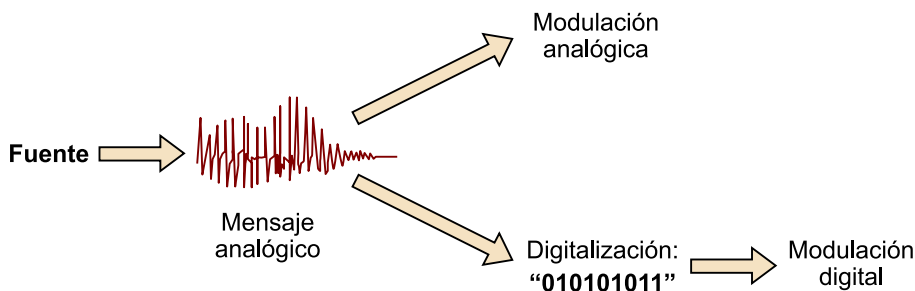
El **mensaje** es la manifestación física generada por la fuente de información. El objetivo final de la comunicación es que el destinatario reproduzca una réplica del mensaje con la mayor fidelidad posible respecto al generado por la fuente.

El mensaje se representa mediante una señal que se describe en términos probabilísticos, ya que es de naturaleza aleatoria. Por ejemplo, en una emisión de radio el mensaje emitido es una señal de audio, pero el contenido que transmite en particular una determinada emisora y a una hora dada no queda determinado hasta que no se produce.

Las fuentes de información se dividen entre las que generan **mensajes analógicos** y las que generan **mensajes digitales**. Un mensaje analógico es una cantidad física que varía con el tiempo de forma continua. También se suele decir: "El mensaje es una señal continua en tiempo". Ejemplos de mensajes analógicos son: la presión acústica de una señal de audio, la luminosidad de un punto de una imagen de televisión, etc. Un mensaje digital consiste en una secuencia ordenada de símbolos. Cada símbolo se selecciona de entre un conjunto finito de elementos. Como ejemplo de mensajes digitales se pueden dar las letras impresas de una página, un listado de temperaturas medidas siempre a la misma hora y con una precisión de décima de grado o un conjunto de contraseñas bancarias, el número de coches que han pasado por un peaje en un día, el valor de cierre de las acciones en bolsa, etc.

Cuando el mensaje es de naturaleza digital, se transmite mediante una modulación digital. Cuando es de naturaleza analógica, se tienen dos estrategias diferenciadas para su transmisión, mediante una modulación analógica y mediante una modulación digital. Esta idea básica se representa en la figura 1, donde se distingue que un mensaje de naturaleza analógica puede ser transmitido directamente con una modulación analógica, o digitalizarlo previamente y transmitirlo mediante una modulación digital.

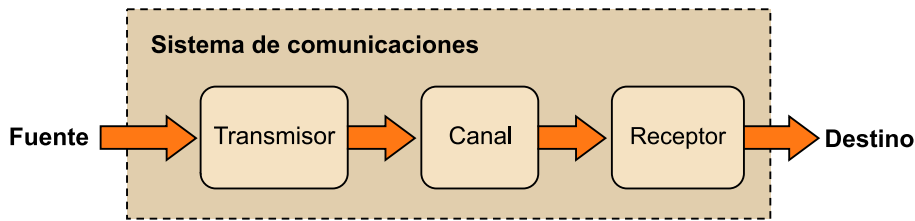
Figura 1. Alternativas de modulación cuando el mensaje a transmitir es analógico



Hemos comentado que en general un sistema de comunicaciones está formado por tres componentes elementales, que son el transmisor, el canal de comunicaciones y el receptor. Estos tres componentes se representan mediante un diagrama de bloques, en el esquema de la figura 2. Podemos definir cada uno de estos elementos:

- El **transmisor** procesa la señal del mensaje generada por la fuente de información y proporciona la señal transmitida adecuada al canal o medio de transmisión. A su vez, está formado por diferentes subsistemas entre los que se destacan las etapas de codificación y de modulación.
- El **canal** de transmisión es el medio eléctrico que cubre la distancia entre el transmisor y el receptor. Puede estar formado por un cable, una fibra óptica o el espacio radioeléctrico (onda electromagnética). Una característica inherente al canal de comunicaciones es que la señal transmitida se degrada al ser propagada por el medio. Cuanto mayor es la distancia física entre el transmisor y el receptor, la señal sufre una mayor atenuación. Además, aparecen otros efectos no deseados como el ruido o la distorsión que se describen con detalle en el subapartado 3.2.
- El **receptor** opera sobre la señal resultante a la salida del canal de comunicaciones, su misión es doble. Por un lado es el encargado de eliminar en la medida de lo posible los efectos producidos por el canal, por el otro debe adecuar la señal recibida al destinatario realizando las operaciones inversas al transmisor, por lo que incluirá etapas de decodificación y de demodulación.

Figura 2. Partes Principales de un sistema de comunicaciones



Aunque no se describen en este módulo, entre la fuente y el transmisor se utiliza un transductor que convierte la señal generada por la fuente en una señal eléctrica. Por ejemplo, si el mensaje es de audio, este dispositivo es un micrófono y si el mensaje es de vídeo, el dispositivo es una cámara de vídeo. Análogamente, entre el receptor y el destinatario otro transductor convierte la señal eléctrica resultante en la forma adecuada para que pueda ser captada por el destinatario, que normalmente es un ser humano. Por ejemplo, si el mensaje es de audio, este dispositivo es un altavoz y si el mensaje es de vídeo, el dispositivo es una pantalla de televisión.

Una forma de establecer una comunicación es hacerlo con un sistema que funciona desde un transmisor hasta un receptor y se denomina punto a punto. La telefonía es un ejemplo de comunicación punto a punto que normalmente se establece en ambos sentidos. Una estrategia de comunicación diferente se desarrolla mediante radiodifusión o *broadcasting*, como es el caso de los sistemas de radio y de televisión. En radiodifusión hay un único transmisor y muchos receptores independientes que reciben simultáneamente la misma señal. Es un ejemplo por tanto de comunicación punto a multipunto.

En el siguiente apartado nos concentraremos en el canal de comunicaciones, ya que es el elemento que define el grado de calidad con el que puede transmitirse la señal y, por tanto, es un elemento clave en el diseño de la complejidad que deberemos introducir en cada uno de los módulos del transmisor o del receptor para garantizar una correcta recepción de la señal.

### 3. Canal de comunicaciones

Hemos comentado que el canal de comunicaciones determina la calidad con la que podemos transmitir y/o recibir las señales. En este apartado estudiaremos los diferentes medios que pueden utilizarse para la transmisión de las señales y las causas que pueden originar una pérdida de calidad en la señal transmitida.

Para establecer la comunicación entre un emisor y un receptor, es necesaria la existencia de un canal a través del cual se realiza el intercambio de información. El canal es, pues, el medio físico que permite el envío de señales entre los usuarios del sistema. Estas señales representan la información que deseamos transmitir y pueden verse deterioradas por las características del medio físico que se utiliza para la transmisión y por la presencia de otros sistemas de comunicación.

En efecto, intuitivamente resulta evidente que algunos medios de transmisión estarán más protegidos frente a la aparición de efectos de degradación de la señal que otros. Así, un sistema de transmisión de señales por cable coaxial o fibra óptica parece en principio más protegido, frente al ruido y las interferencias, que un sistema de transmisión vía radio. Por este motivo, el medio de transmisión condiciona todo el diseño del sistema de comunicaciones, ya que tanto el transmisor como el receptor deberán adecuar las características de las señales a las del sistema. La modulación que utilizará un sistema de transmisión vía radio deberá ser más robusta que la de un sistema por cable o por fibra óptica, ya que a priori las señales enviadas vía radio experimentarán una mayor degradación (pensemos en las múltiples reflexiones y/o bloqueos que podrá sufrir la señal electromagnética).

En los siguientes subapartados vamos a considerar los posibles medios físicos para la transmisión de las señales (3.1) que dividiremos en medios de transmisión guiados (3.1.1) y medios no guiados (3.1.2). Los primeros se corresponden a medios que utilizan algún tipo de material distinto del aire como soporte físico de la comunicación (cable coaxial, fibra óptica), mientras que los medios no guiados utilizan el aire como soporte físico de la transmisión. Finalmente, en el subapartado 3.2 detallaremos las posibles causas que pueden deteriorar la forma de onda de la señal recibida.

#### 3.1. El medio físico

La elección de un medio físico u otro para el establecimiento de las comunicaciones depende de varios factores, entre los que destacan las razones históricas, las económicas, las tecnológicas y las propias características de la aplicación. Podemos considerar un ejemplo que ilustra la incidencia de estos factores en las redes y tecnologías de comunicación actuales. En efecto, la mayor parte de

conexiones entre el abonado al servicio telefónico fijo y la central telefónica son de par trenzado. El par trenzado se ha utilizado históricamente, ya que es económico y proporciona una calidad suficiente para el establecimiento de las comunicaciones de voz. Una vez existe una conexión entre cada usuario y la central, resulta muy caro modificar todas las infraestructuras. Con el advenimiento de los nuevos sistemas de transmisión de datos y la necesidad de conectar ordenadores en los hogares (aplicación), se ha hecho necesario recurrir a sofisticadas soluciones tecnológicas, como el ADSL, con la que a través de una sofisticación del sistema de modulación y demodulación de las señales se consiguen velocidades de transmisión que hace algunos años, con los módems convencionales, eran totalmente impensables.

Los medios de transmisión pueden clasificarse en medios de transmisión guiados y medios de transmisión aéreos (*wireless*: inalámbricos o no guiados). En general, los medios guiados ofrecen una mayor protección de la señal. Sus principales inconvenientes son la necesidad de instalar las infraestructuras necesarias para cubrir a los diferentes usuarios y que no pueden ser utilizados cuando el emisor y/o el receptor son móviles.

### 3.1.1. Medios de transmisión guiados

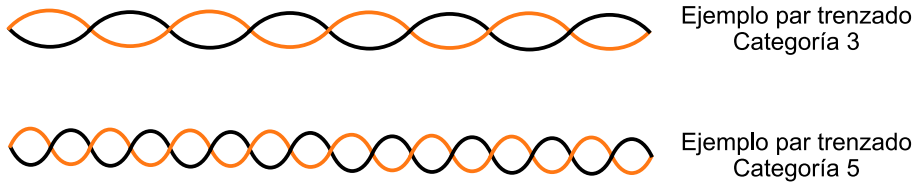
Los medios de transmisión guiados utilizados con mayor profusión son el par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica.

#### **Par trenzado**

El **par trenzado** está formado por dos cables de cobre, del orden de 1 mm de diámetro, que están trenzados en una forma de hélice, parecida a una molécula de ADN. La razón por la que se realiza el trenzado del cable es que los cables paralelos se comportan como una antena, por lo que son susceptibles de captar señales interferentes y, además, radian la señal que circula por ellos. Al realizar el trenzado de los cables, se disminuyen estos dos efectos siendo posible disponer de un mayor número de cables que salen juntos de una central.

El ancho de banda del par trenzado depende del grosor del cable y de la distancia que deba cubrirse sin amplificar. Es típico que puedan transmitirse varios Mbps (1-5 Mbps) para distancias del orden de 1-3 km. El coste del par trenzado suele ser bajo y tiene excelentes prestaciones para cubrir distancias en interiores de edificios. Los cables trenzados más utilizados se conocen como categoría 5. Estos cables fueron introducidos en 1988 y tienen un ancho de banda de 100 MHz. También están siendo cada vez más populares los de la categoría 6 (250 MHz) y la categoría 7 (600 MHz). Esencialmente, la diferencia entre las diferentes categorías es el grosor del cable y sobre todo el paso del trenzado, tal y como se ilustra en la figura 3.

Figura 3. Comparativa entre el paso del trenzado en cables de categoría 3 (16 MHz) y de categoría 5 (100 MHz)



## Cable coaxial

El **cable coaxial** está formado por un núcleo central de cobre recubierto de material aislante, que a su vez está recubierto por una malla metálica. Todo ello está protegido por una cubierta aislante de plástico. Esta cubierta aislante está apantallada por una malla de cobre, que recubre a otra cubierta plástica, que se encarga de aislar la malla del núcleo central del cable de cobre. El cable coaxial se utiliza principalmente en aplicaciones de televisión por cable y para redes de área metropolitana o sistemas de telefonía para largas distancias, aunque la tendencia es la de sustituirlos por cables de fibra óptica en la mayoría de aplicaciones. Los coaxiales actuales tienen un ancho de banda aproximado de 1 GHz.

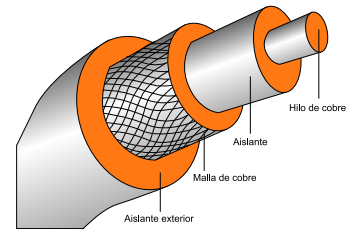


Figura 4. Composición de un cable coaxial

## Fibra óptica

La **fibra óptica** es el medio físico que actualmente soporta una mayor capacidad para la transferencia de datos, lo que, junto con otras excelencias como su protección frente a ruidos e interferencias y su reducido peso y tamaño, hace que sea el medio guiado más utilizado. En la figura 5 se muestra una fotografía de un cable de fibra óptica. En este ejemplo el cable está formado por varios hilos de fibra, donde cada uno de ellos puede contener varias comunicaciones de forma simultánea.



Figura 5. Ejemplo de cables con varias fibras ópticas

La fibra óptica se fabrica a partir de vidrio, siendo este vidrio el medio a través del cuál se propaga la luz que transporta la información. Para transmitir una secuencia de bits a través de una fibra óptica, deberemos introducir pulsos de luz en uno de sus extremos y detectarlos en el otro. La presencia de luz representará el símbolo lógico 1 y la ausencia, el símbolo 0. La distancia a la que puede propagarse el haz de luz a través de la fibra óptica depende de su transparencia, que a su vez depende de la calidad del vidrio.

### Fabricación del vidrio

La fabricación del vidrio se realiza mediante la fusión de sílice y potasas y es conocida desde los antiguos egipcios, que la fabricaban mediante la cocción en hornos utilizando arena, materiales alcalinos y cal. Para que el vidrio tuviera cierta transparencia, su espesor debía ser inferior a 1mm; en caso contrario, la luz quedaba completamente absorbida por el material. En el Renacimiento se perfecciona la fabricación del vidrio incoloro, pudiendo utilizarlo para la construcción de ventanas.

### Atenuación

Una atenuación de  $X$  dB significa que la relación entre la potencia de salida y la de entrada es de:

$$X = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

donde  $P_{out}$  representa la potencia en la salida y  $P_{in}$ , la potencia de entrada. Según esta ecuación, una atenuación de 0,35 dB representa que la potencia de salida es la potencia de entrada multiplicada por un factor de 0,92257.

Actualmente, las fibras ópticas utilizadas para los sistemas de comunicación tienen una atenuación del orden de 0,35 dB por km, lo que significa que la cantidad de luz sólo se reduce aproximadamente a la mitad después de recorrer 10 km. Esto significa que si se cambiara el agua de los océanos por el material de la fibra óptica, sería posible ver el fondo marino desde un avión.

La atenuación de la fibra óptica depende de la longitud de onda de la luz. Si se representa en un gráfico la atenuación por km en función de la longitud de onda, se observa que existen unas regiones en las que la atenuación es mínima. Estas regiones se denominan ventanas y determinan las longitudes de onda en las que se trabaja. Las longitudes de onda correspondientes a las tres primeras ventanas son 0,85 nm, 1,30 nm y 1,55 nm. El ancho de banda teórico que puede obtenerse en cada una de estas bandas de frecuencia oscila entre 25.000 GHz y 30.000 GHz.

No obstante, con la tecnología actual no es posible alcanzar estos límites teóricos debido, principalmente, a la velocidad de los dispositivos transductores de señal eléctrica a luz y viceversa. El orden de magnitud que puede conseguirse con la tecnología actual está alrededor de los 50 Gbps en tramos de 100 km de fibra óptica sin amplificar. Para conseguir tramos de gran longitud, es necesario interconectar fragmentos más pequeños de fibra. La conexión entre dos tramos puede realizarse mediante diferentes técnicas basadas en el alineamiento de las terminaciones o en su soldadura. En cualquier caso, siempre aparecen algunas pérdidas por reflexión de energía en los puntos de conexión.

La generación de la luz puede realizarse mediante dispositivos láser o mediante diodos electroluminiscentes (LED). Los primeros dispositivos tienen una velocidad de conmutación mayor, por lo que pueden ofrecer tasas de datos superiores, cubriendo también longitudes mayores que con los LED. No obstante, el láser es sustancialmente más caro y tiene una vida útil menor.

La fibra óptica ofrece múltiples ventajas respecto al cobre, entre las que destaca su inmunidad frente a las interferencias producidas por otros sistemas, la capacidad de cubrir mayores distancias sin amplificación y, sobre todo, su menor peso y volumen. Un cable con mil pares trenzados de un km de longitud tiene un peso aproximado de 8.000 kg, mientras que dos fibras que puedan soportar el mismo número de canales pesan sólo unos 100 kg. Este hecho representa que todas las nuevas infraestructuras de redes de cable se realicen principalmente en fibra óptica. Además, cuando una red ya existente debe ser ampliada, también suele sustituirse el cobre por fibra, ya que debido a que el volumen ocupado por la fibra es mucho menor pueden aprovecharse las canalizaciones existentes aumentando el número efectivo de canales. Por otra parte, la fibra ofrece también comunicaciones más seguras debido a que es mucho más complejo “pinchar” las comunicaciones que con los cables de cobre.

### 3.1.2. Medios de transmisión no guiados: comunicaciones sin hilos

Las comunicaciones sin hilos resultan indispensables en todas aquellas aplicaciones en las que el transmisor o el receptor deben tener cierta movilidad. Los servicios de comunicaciones a transportes públicos (radio-taxi, tren, etc.), la telefonía móvil y las redes de datos sin hilos para ordenadores portátiles son ejemplos típicos de sistemas de comunicación sin hilos. Sin embargo, las comunicaciones sin hilos también pueden ser competitivas en aplicaciones donde los terminales están fijos, especialmente en aquellos casos donde el coste de dar servicios de cobertura al usuario mediante infraestructuras de cable es especialmente elevado.

Los sistemas de transmisión sin hilos se basan en el principio de que al producir un movimiento sobre los electrones se crean ondas electromagnéticas que pueden propagarse a través del espacio. Este fenómeno fue previsto por el físico inglés J. C. Maxwell en 1865 y confirmado experimentalmente por H. Hertz en 1887. Cuando una antena con el tamaño y diseño apropiado se conecta a un circuito eléctrico, se facilita la radiación de las ondas electromagnéticas que pueden ser recibidas por receptores con las antenas adecuadas situadas a cierta distancia. Todas las comunicaciones sin hilos se basan en este principio. Las distancias que pueden cubrirse, el tamaño de las antenas y la potencia de los circuitos eléctricos que deben conectarse al transmisor y al receptor dependen de la frecuencia y longitud de onda del sistema de comunicaciones.

En la figura 6 se representa una división del espectro radioeléctrico que incluye una distribución de sus bandas de frecuencia y sus usos en los sistemas de comunicación. Las bandas de frecuencia más bajas se denominan LF<sup>1</sup>, MF<sup>2</sup> y HF<sup>3</sup>. Históricamente, estas tres bandas fueron las primeras en utilizarse.

**Ejemplos**

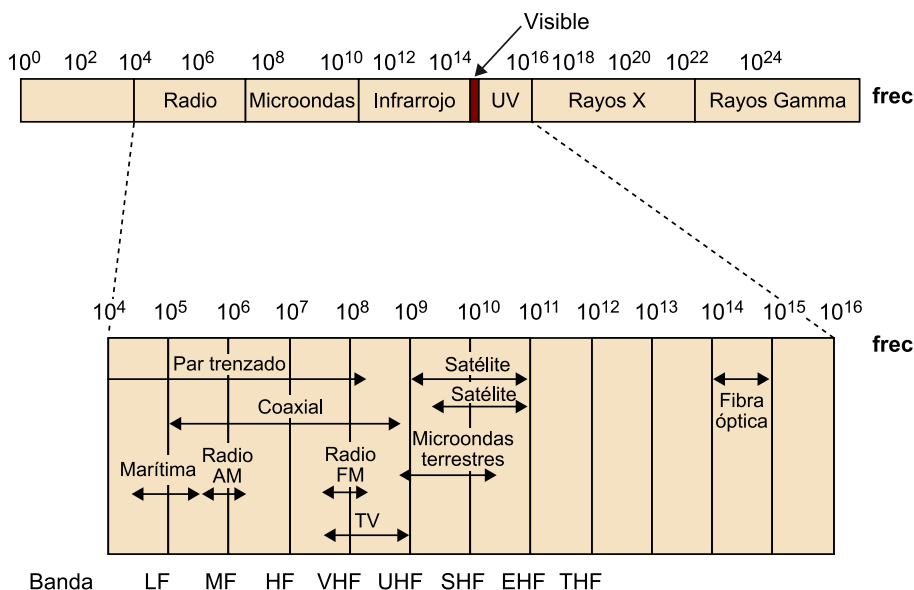
Ejemplos de sistemas de comunicación sin hilos a usuarios fijos son los servicios de televisión por satélite o por redes de radioenlaces terrestres.

<sup>(1)</sup>Del inglés *low frequency*.

<sup>(2)</sup>Del inglés *medium frequency*.

<sup>(3)</sup>Del inglés *high frequency*.

Figura 6. Espectro electromagnético y distribución en bandas





Posteriormente, cuando empezaron a utilizarse servicios de comunicaciones en bandas de mayor frecuencia, los nombres que se vinieron utilizando fueron superlativos cada vez más “sofisticados”: VHF<sup>4</sup>, UHF<sup>5</sup>, SHF<sup>6</sup>, EHF<sup>7</sup>, THF<sup>8</sup>. De momento no existen más denominaciones para las bandas más altas, lo que probablemente se debe a la falta de imaginación para utilizar superlativos todavía más sofisticados.

<sup>(4)</sup>Del inglés *very high frequency*.

<sup>(5)</sup>Del inglés *ultra high*.

<sup>(6)</sup>Del inglés *super high frequency*.

<sup>(7)</sup>Del inglés *extra high frequency*.

<sup>(8)</sup>Del inglés *tremendously high frequency*.

En general, para frecuencias bajas, las ondas de radio se propagan sin dificultades a través de los obstáculos como edificios o accidentes geográficos y su potencia se atenúa al aumentar la distancia con la fuente, de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Al aumentar la frecuencia, las ondas electromagnéticas tienden a propagarse en línea recta (como la luz), siendo bloqueadas por los obstáculos y absorbidas por fenómenos atmosféricos como la lluvia o la niebla.

En las bandas VLF, LF y MF, las ondas se propagan próximas a la superficie de la Tierra y pueden alcanzar, en la banda VLF, distancias de 1.000 km. Para frecuencias mayores, las distancias que pueden alcanzarse son más pequeñas. Así, esto nos indica por qué las emisoras de AM tienen un alcance mayor que las emisoras de FM. En las bandas de HF y VHF, las ondas tienden a ser absorbidas por la Tierra. No obstante, en estas frecuencias, si las ondas alcanzan la ionosfera, las partículas eléctricas de la misma se comportan como un reflector de señal que produce un efecto de sucesivas reflexiones de la señal en la ionosfera y en la superficie de la Tierra pudiendo llegar a cubrir toda la superficie de la misma. Éstas son las bandas utilizadas por los radioaficionados y algunos sistemas militares. En todas las bandas de frecuencias, las ondas son susceptibles de sufrir interferencias y ruidos, procedentes de otros sistemas de comunicaciones o de radiaciones electromagnéticas naturales.

En la tabla siguiente se muestra la clasificación del espectro en función de las frecuencias de emisión, ya sea para canales de tipo radio o para canales a través de un medio guiado, popularmente también denominado alámbrico.

Espectro	Canal alámbrico	Canal radio
Ultravioleta 750 THz: 20.000 THz	Fibra óptica	Rayo láser
Visible 384 THz: 750 THz		
Infrarrojos 300 GHz: 384 THz		
EHF ( <i>extra high frequency</i> ) 30 GHz: 100 GHz	Guía ondas	Radio de visión directa o microondas > 100 MHz
SHF ( <i>super high frequency</i> ) 3GHz: 30 GHz		
UHF ( <i>ultra high frequency</i> ) 300 MHz: 3 GHz		

Espectro	Canal alámbrico	Canal radio
VHF ( <i>very high frequency</i> ) 30 MHz: 300 MHz	Cable coaxial	Radio de onda corta > 3 MHz
HF ( <i>high frequency</i> ) 3 MHz: 30 MHz		
HF ( <i>high frequency</i> ) 3 MHz: 30 MHz		
MF ( <i>medium frequency</i> ) 300 KHz: 3 MHz	Par de hilos	Radio de onda larga > 10 KHz
LF ( <i>low frequency</i> ) 30 KHz: 300 KHz		
VLF ( <i>very low frequency</i> ) 3 KHz: 30 KHz		
Audio < 10 KHz		

Debido a la capacidad de las ondas radio de viajar largas distancias, pueden producirse interferencias entre los propios usuarios de los sistemas de comunicaciones. Por este motivo, los Gobiernos de los diferentes países deben licenciar el uso de las transmisiones y las aplicaciones en las diferentes bandas de frecuencia, restringiendo y regulando su uso. Los Gobiernos nacionales se encargan de asignar los espectros y bandas de frecuencia para las aplicaciones de radio AM y FM, la difusión de señales de TV, telefonía móvil, transmisión de portadoras en telefonía fija, servicios marítimos, policiales, militares, etc. A nivel internacional, el organismo ITU-R (Internacional Telecommunications Union – Radio) trata de coordinar estas asignaciones con el objetivo de que los equipos de transmisión y recepción puedan ser compatibles en varios países. No obstante, este último objetivo no siempre se consigue, debido a que muchos organismos nacionales no siguen las especificaciones marcadas por la ITU-R.

Las estrategias para asignar portadoras o bandas de frecuencia a determinados servicios comerciales pueden resultar muy polémicas y con un contenido altamente político. En algunos casos, los Gobiernos organizan concursos de propuestas para que los distintos candidatos propongan su estrategia y modelo de negocio para explotar los servicios. La decisión de la concesión del servicio se realiza teniendo en cuenta la calidad de las propuestas. No obstante, estas decisiones suelen resultar polémicas y generalmente están marcadas por los objetivos políticos de los Gobiernos. La concesión de una licencia de telefonía móvil o de un canal de TV a una compañía u otra es un tema muy importante desde el punto de vista económico y suelen ser polémicas por unos u otros motivos. Otras posibles estrategias de concesión pueden ser la presentación de candidaturas a la explotación de los servicios y su posterior sorteo. En este caso, la polémica surge cuando el beneficiario decide no explotar directamente el servicio y comercializar los derechos de explotación con terceras compañías. Finalmente, otra posible estrategia es la de subastar los servicios a la compa-

ña o *holding* de compañías que más dinero ofrezcan. Esta última estrategia es el modelo que se ha seguido para la concesión de licencias de sistemas de telefonía de tercera y cuarta generación en muchos países. Los altos precios alcanzados en las subastas han provocado la quiebra de muchas compañías de telefonía.

No todos los servicios de comunicaciones están regulados por el Gobierno. En algunas aplicaciones se asignan bandas que los usuarios pueden usar libremente, sin necesidad de solicitar permisos especiales. En estos casos, las regulaciones suelen estar en las potencias de transmisión y recepción de los equipos terminales, que intentan garantizar que los sistemas no se interfieran entre ellos en distancias largas. Se pueden encontrar ejemplos de este tipo de sistemas en aplicaciones científicas, industriales, médicas, bandas ciudadanas, en las comunicaciones entre terminales avanzados mediante Bluetooth o redes Wifi 802.11, en los mandos a distancia de los equipos de TV, etc.

Finalmente, cabe comentar que un tipo de sistemas de comunicaciones no guiadas son las comunicaciones por satélite. La primera idea para mejorar las comunicaciones a larga distancia fue la de lanzar globos con elementos metálicos que actuaran como reflectores de señal, intentado aumentar la distancia a la que podía establecerse la comunicación. Estos sistemas fueron poco estables y fiables, por lo que se descartaron rápidamente. En la década de los cincuenta, los militares utilizaron la Luna como satélite natural en sistemas para establecer comunicaciones entre la costa y los barcos.

La primera propuesta para utilizar satélites de comunicación artificiales se debe al físico, matemático y escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke, que en 1945 propuso utilizar satélites geoestacionarios, es decir, que no modificaran su posición relativa con respecto a la Tierra de modo que no fuera necesario efectuar el apuntamiento de forma constante. Arthur C. Clarke calculó que los satélites deberían situarse a 35.800 km de la Tierra y describió con cierto detalle los sistemas de alimentación por paneles solares, las frecuencias de radio que podrían utilizarse y los posibles mecanismos para lanzarlos al espacio. Clarke descartaba la aplicación práctica de esta idea debido al gran peso que deberían tener los satélites equipados con válvulas de vacío. No obstante, con la aparición del transistor estas condiciones cambiaron radicalmente y en julio de 1962 fue posible lanzar el primer satélite de comunicaciones. Los satélites de comunicaciones han sido una fuente de gran negocio para empresas de comunicaciones y centros de investigación espacial, creándose una enorme competencia entre países por la guerra de precios para el lanzamiento al espacio de estos satélites.

La idea básica de un satélite de comunicaciones es parecida a la de un repetidor de microondas convencional en una red de radioenlaces terrestre. En síntesis, se trata de recibir la señal procedente de la Tierra, amplificarla, trasladarla de banda de frecuencia y reemitirla hacia la Tierra. La estación terrena que envía la señal al satélite utiliza, por lo general, antenas muy direccionales que apun-

tan al satélite dirigiendo toda la energía al mismo. El satélite recibe la señal y la amplifica. La señal recibida se traslada a otra banda de frecuencia (*transponder*) con el objeto de minimizar las interferencias entre las señales de subida y de bajada. Cuando la señal se retransmite hacia la Tierra, suele cubrir un área muy importante, de manera que con unos pocos satélites es posible cubrirla toda.

### Las órbitas de los satélites de comunicaciones

El periodo orbital del satélite depende de su distancia a la Tierra, cuanto más cerca, más rápida es la orbitación. En la práctica sólo se utilizan tres órbitas. Los satélites geoestacionarios (GEO) están situados a 35.800 km y su periodo orbital coincide con la rotación de la Tierra (24 horas). Con tres satélites GEO es posible dar cobertura a toda la Tierra. Estos satélites se usan para muchas aplicaciones de comunicaciones, entre las que destacan los servicios de televisión y los de telefonía.

Los satélites MEO (*medium earth orbit*) están situados entre los 5.000 y los 15.000 km. Su periodo orbital es de unas seis horas y son necesarios unos diez satélites para cubrir la Tierra completamente. Este tipo de satélites no se utilizan en aplicaciones de comunicaciones. Su aplicación actual más importante es el servicio de posicionamiento global por satélite (GPS, *global positioning system*). Finalmente, los satélites LEO (*low earth orbit*) están situados a una distancia aproximada (depende del servicio) de unos 1.000 km y son necesarios unos cincuenta satélites para cubrir la Tierra. Estas órbitas se utilizan en aplicaciones de voz y servicios de Internet. Las diferentes órbitas están bien diferenciadas debido a la presencia de los cinturones de Van Allen, formados por conjuntos de partículas eléctricamente cargadas y atrapadas por el campo magnético de la Tierra que impiden posicionar satélites artificiales en estas zonas (entre los 2.000 y 5.000 km y entre los 15.000 y los 20.000 km), debido a que serían dañados reduciendo de forma considerable su periodo de vida útil.

## 3.2. Degradación de la señal recibida

Independientemente del medio de transmisión utilizado, la señal enviada puede verse afectada por diferentes fenómenos físicos, que degradan su forma de onda y dificultan su recepción. Las causas que degradan la forma de onda de la señal transmitida pueden clasificarse, en función de la naturaleza del fenómeno físico que la produce, en tres tipos: ruido, distorsión e interferencias. Definiremos brevemente cada uno de ellos.

### 3.2.1. Ruido e interferencias

En general, podemos considerar como **ruido** toda aquella energía indeseada que obtenemos en el receptor y que procede de otras fuentes distintas del transmisor. En esta definición también se incluirían, por tanto, como ruido todas las señales procedentes de otros usuarios, que comparten parte de nuestro espectro o que trabajan en regiones espectrales próximas. Este tipo de ruido, procedente de otros sistemas de comunicaciones, suele distinguirse de otras causas y se conoce con el nombre de **interferencias**.

Las interferencias pueden ser debidas a múltiples causas, en función del medio de transmisión y el tipo de sistema de comunicación. Así, por ejemplo, en sistemas de cable trenzado puede producirse cruce de comunicaciones (conocido como *diafonía*) entre las señales existentes entre dos o más pares diferentes. En

sistemas de transmisión sin hilos, la interferencia puede aparecer por sistemas que ocupan bandas de frecuencia que se solapan parcialmente con la utilizada por la nuestra.

Aparte de las interferencias, el ruido también puede producirse como resultado del movimiento aleatorio de los electrones en un conductor, lo que se conoce como ruido térmico. El ruido cósmico es debido a la radiación de los cuerpos celestes y tiene unas características muy parecidas al ruido térmico. Aparece en aplicaciones de comunicaciones con frecuencias superiores a los 15 MHz, sobre todo cuando se utilizan antenas muy directivas que apuntan al Sol u otras regiones del espacio. El ruido térmico y el ruido cósmico suelen modelarse como una señal aleatoria (proceso estocástico) con un espectro de frecuencia plano, es decir, con contenido en todas las frecuencias.

Otros tipos de ruido son el impulsional, que puede aparecer debido a la presencia de impulsos en las líneas de alta tensión, a la existencia de motores que producen radiaciones que afectan a nuestro sistema, a descargas eléctricas atmosféricas, etc.

### 3.2.2. La relación señal a ruido

Un parámetro importante en cualquier receptor es la relación señal a ruido (SNR, *signal noise ratio*), que mide la proporción entre la potencia correspondiente a la señal deseada y la potencia de ruido. Esta relación suele expresarse en decibelios:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N} \right) \quad (1)$$

donde  $P_S$  representa la potencia de la señal y  $P_N$  la potencia de ruido.

Análogamente, cuando el receptor trabaja en presencia de ruido y de interferencias, puede utilizarse la relación señal a ruido más interferencias (SNIR):

$$SNIR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N + P_I} \right) \quad (2)$$

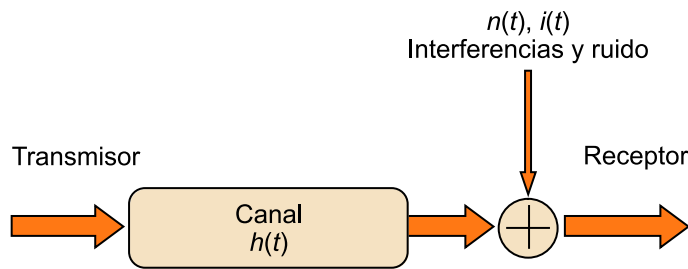
### 3.2.3. Distorsión

La **distorsión** es otra de las causas que puede introducir degradación en la forma de onda de la señal. La distorsión puede deberse a diferentes causas, aunque todas ellas tienen el factor común de que el canal no se comporta de un modo ideal.

En muchas aplicaciones podemos interpretar que el canal de comunicaciones se comporta como un filtro y, por lo tanto, tiene asociada una respuesta impulsional y una respuesta en frecuencia. En la Figura 7 se indica gráficamente

que el canal puede modelarse mediante un sistema lineal donde la señal de entrada se corresponde a la señal procedente del transmisor, y la señal de salida es la que obtenemos en la entrada del receptor. En la entrada del receptor pueden considerarse también los efectos de ruido e interferencias que hemos discutido en el subapartado 3.2.2. En el subapartado 3.2.4 formalizaremos la idea de modelar el canal mediante un filtro y caracterizaremos el canal ideal.

Figura 7. Modelo de un canal mediante un filtro lineal con respuesta impulsional  $h(t)$  más la adición de ruido e interferencias



### 3.2.4. Modelo de canal lineal

En resumen, los efectos de distorsión y de ruido e interferencias pueden en muchas aplicaciones modelarse mediante un sistema lineal. Según el diagrama de la figura 7, la señal que obtendremos en la salida del canal puede expresarse como:

$$y(t) = h(t) * x(t) + w(t) \quad (3)$$

donde  $h(t)$  representa la respuesta impulsional del sistema,  $x(t)$ , la señal en la salida del transmisor,  $y(t)$ , la señal en la entrada del receptor y  $w(t)$ , las interferencias y ruido. Podemos particularizar la ecuación anterior al caso en el que el sistema trabaja sin ruido ni interferencias, de modo que obtenemos la relación entre la señal del transmisor y del receptor teniendo en cuenta únicamente los efectos del filtrado lineal introducido por el canal. En este caso, la relación entre las dos señales vendrá dada por:

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (4)$$

Lo que nos indica que la forma de onda de la señal que obtenemos en la entrada del receptor depende de la señal transmitida y de la respuesta del canal. Así pues, si conocemos la respuesta impulsional del canal (o la respuesta en frecuencia), podremos intentar poner el sistema inverso en el receptor. Este sistema inverso suele denominarse filtro de ecualización y en la mayor parte de las aplicaciones sólo podemos determinarlo de forma aproximada. En el siguiente ejemplo definimos la respuesta impulsional de un canal ideal y comprobamos que este tipo de canales sólo introduce un factor de atenuación y un retardo.

#### Ejemplo. Canal ideal

Un canal ideal se define como aquel que no introduce ninguna distorsión sobre la forma de onda de la señal transmitida y que sólo está afectado por un factor de amplitud y un

retardo. El factor de amplitud se conoce como atenuación del canal. Es fácil comprobar que el canal ideal es un canal sin ruido ni interferencias y cuya respuesta impulsional puede expresarse mediante:

$$h(t) = \alpha \cdot \delta(t - \tau) \quad (5)$$

En efecto, la señal que obtendremos en la salida del sistema será:

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\nu) \cdot x(t - \nu) \cdot d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha \cdot \delta(\nu - \tau) \cdot x(t - \nu) \cdot d\nu = \alpha \cdot x(t - \tau) \quad (6)$$

Lo que demuestra que la señal  $y(t)$  es una réplica de la señal  $x(t)$  retardada un tiempo  $\tau$  y afectada por un factor de atenuación  $\alpha$ .

### 3.2.5. Efectos no lineales en el canal

La distorsión también puede ser originada por los efectos no lineales en los dispositivos electrónicos utilizados. En efecto, consideremos un canal de comunicaciones cuya relación entrada salida es no lineal. Por simplicidad supondremos que la relación entrada salida se puede expresar como una combinación de distintas potencias de la señal de entrada:

$$y(t) = a \cdot x(t) + b(x^2(t)) + c(x^3(t)) + \dots \quad (7)$$

En esta ecuación los coeficientes  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , etc. tienen en cuenta las no linealidades. Estos coeficientes suelen ser mucho más pequeños que el coeficiente  $a$ . Notad que en este modelo, si todos los coeficientes  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , etc. fueran iguales a cero, obtendríamos un canal ideal con retardo nulo y atenuación (o amplificación)  $a$ .

Para ilustrar que un sistema no lineal puede introducir nuevas componentes de señal, consideremos únicamente la componente cuadrática. Supongamos también, para simplificar máximo el tratamiento numérico del problema, que la señal en la entrada del canal es una senoide perfecta, con frecuencia  $f_0$ . Entonces, la componente que obtenemos en la salida debido al efecto cuadrático será:

$$\left(\sin(2\pi f_0 t)\right)^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(2\pi(2f_0)t) \quad (8)$$

lo que nos indica que aparece una señal de frecuencia doble como consecuencia del término no cuadrático del sistema no lineal.

En general, cuando una señal sinusoidal se introduce en la entrada de un sistema no lineal, aparecen en la salida del sistema una serie de componentes sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos de las frecuencias de entrada. Así, el término *cuadrático* es responsable de que aparezca una componente sinusoidal de frecuencia doble a la señal de entrada. El término *cúbico* será el responsable de que aparezca una componente con frecuencia triple, y así sucesivamente. Estas componentes sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos de

la frecuencia de la señal de entrada se conocen con el nombre de **armónicos**. En general tienen valores pequeños debido a que las constantes  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , etc. suelen ser también pequeñas.

La distorsión suele medirse como una relación entre la potencia debida a la aparición de los armónicos respecto a la frecuencia fundamental de la señal.

El factor se conoce como distorsión armónica total (*THD*)<sup>9</sup>:

$$TDH = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_N}{P_1} \quad (9)$$

donde  $P_1$  representa la potencia fundamental y  $P_k$ , la potencia de cada uno de los armónicos.

<sup>(9)</sup> *THD* es la sigla de la expresión inglesa *total harmonic distortion*.

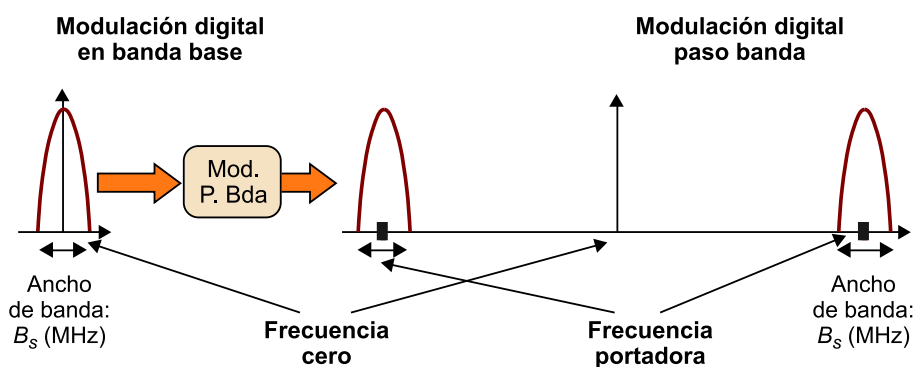


## 4. Modulador (en el transmisor)

Una vez se dispone de la señal de información obtenida de la fuente, ya se está en condiciones de transmitirla. No obstante, hemos visto que esta señal está centrada en el origen de frecuencias, por lo que su transmisión a distancia será poco eficiente en la mayor parte de medios de transmisión.

El modulador paso banda es el encargado de trasladar la señal en banda base a una ocupación espectral alrededor de una frecuencia determinada y en general mucho más alta que el ancho de banda que ocupa la señal en banda base. A nivel conceptual, esta operación es sencilla de conseguir. Basta con multiplicar la señal en banda base por una función trigonométrica de tipo coseno. La frecuencia de la función trigonométrica se denomina *frecuencia portadora* y la propia señal trigonométrica se denomina *portadora*.

Figura 8. Ocupación espectral de una modulación paso banda



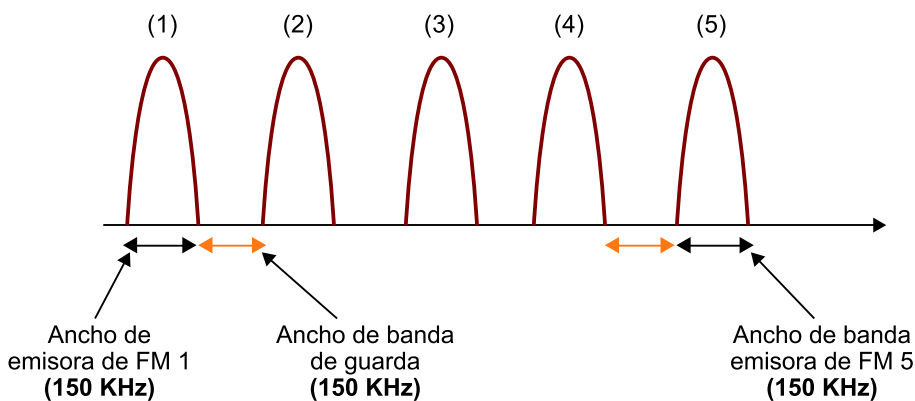
Los sistemas de comunicaciones prácticos, como la televisión o la radio, están estandarizados por normativas internacionales, de tal modo que tanto la ocupación espectral como la potencia de las señales transmitidas son recomendadas en el correspondiente estándar y reguladas en cada país, especialmente los sistemas de comunicaciones inalámbricos o radioeléctricos. El espectro es por tanto un bien escaso y cada aplicación opera en una determinada banda de frecuencias. Así, las transmisiones de radio por FM cubren la banda de frecuencias que va de 87,5 MHz a 108 MHz, conocida como banda VHF. Dentro de esta banda, está regulado que cada emisora ocupe un ancho de banda de 150 KHz y además que entre cada dos emisoras de frecuencias consecutivas se dejen 150 KHz libres de ancho de guarda. Por tanto, en los 20,5 MHz asignados al sistema de radiodifusión en FM, caben un total de  $20,5/0,3 = 68$  emisoras. En la práctica no siempre se respeta la asignación de frecuencias reguladas y, por ejemplo, en el caso de FM, aparecen emisoras locales que aprovechan los espacios de guarda entre emisoras vecinas, provocando posibles interferencias en las señales recibidas.

### Ved también

En el módulo "Multiplexación y sistemas de acceso múltiple" se estudiarán ésta y otras técnicas para multiplexar las señales.

En la figura 9 se muestra un ejemplo de asignación frecuencial a emisoras de radio FM. En este ejemplo queda claro que el espacio radioeléctrico está dividido en regiones claramente definidas, de manera que cada usuario (programa de radio FM) puede compartir y utilizar simultáneamente el medio (que en este caso es el aire). Esta estrategia para que varios usuarios compartan un medio se conoce con el nombre de multiplexación en frecuencia.

Figura 9. Ejemplo de asignación de anchos de banda y tiempos de guarda para cinco emisoras de FM



La señal resultante a la salida del modulador pasa por etapas de amplificación y de adaptación al medio antes de ser transmitida. En el caso de transmisiones radio, la adaptación al medio se realiza mediante una antena transmisora.

### Reflexión

Algunos sistemas de comunicaciones transmiten directamente la señal en banda base. Es el caso de comunicaciones por cable punto a punto. Tómese como ejemplo un periférico de un ordenador (ratón, teclado, etc.), la comunicación en un portero automático o la línea telefónica (de telefonía fija) entre vuestra casa y la centralita telefónica. En estas transmisiones el canal es utilizado únicamente por una señal que se transmite directamente en banda base y por tanto no es necesario su traslado a una frecuencia portadora.

El modulador paso banda traslada una señal de contenido frecuencial paso bajo a una banda de frecuencias alrededor de una frecuencia portadora.

El parámetro más significativo del modulador paso banda resulta la frecuencia portadora, ya que simboliza la ubicación espectral de la señal modulada y transmitida.

### Ved también

Los módulos "Comunicaciones analógicas: modulaciones AM y FM" y "Comunicaciones analógicas: señales paso banda" están dedicados al estudio de los moduladores analógicos paso banda, y en el módulo "Comunicaciones digitales paso banda" trata el estudio de las modulaciones digitales paso banda.

## 5. Desmodulador (en el receptor)

El receptor, como su nombre indica, es la parte del sistema situada físicamente en el punto de destino y su misión consiste en recuperar la señal mensaje a partir de la señal recibida. Para realizar esta función con las mejores garantías de calidad además de realizar las operaciones inversas a las ejecutadas en el transmisor, en el receptor se llevan a cabo funciones adicionales para combatir los efectos no deseados que el canal ha provocado sobre la señal transmitida.

A continuación se presentan cada una de estas tres funcionalidades del receptor por separado y se definen las estrategias habituales utilizadas para medir la calidad del sistema.

### 5.1. Procesado inverso

En un sistema de demodulación se realizan las funciones siguientes:

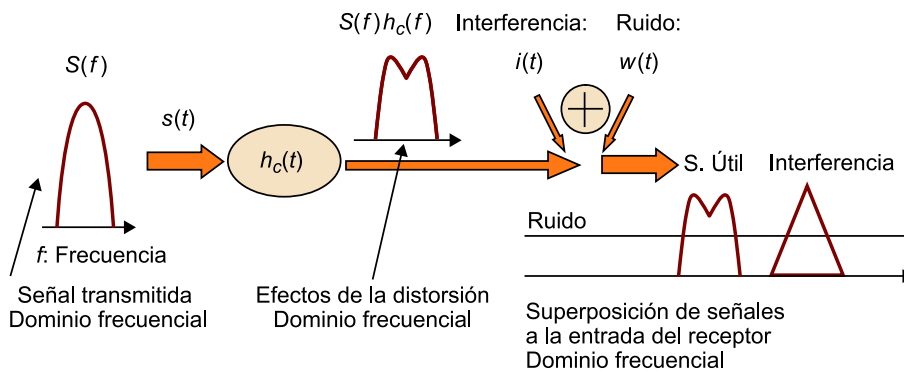
1) **Filtrado paso banda.** Este filtro se adapta a la modulación esperada y transmitida y también denominada señal útil. Está centrado a la frecuencia portadora de la transmisión y su ancho de banda debe ser suficiente para dar cabida a la señal modulada, si bien no debe exceder en la medida de lo posible dicho ancho de banda, con el objeto de evitar interferencias y ruido fuera de la banda de la señal útil. Si la modulación fuera directamente en banda base, este filtro es paso bajo con los mismos requisitos en cuanto al ancho de banda. Si bien este elemento no es propiamente de procesado inverso, ya que no se corresponde con ninguna de las funciones ejecutadas por el transmisor y su función es precisamente eliminar señales presentes en el canal de transmisión, y que no ocupan la banda de la señal útil, se comenta en este subapartado para seguir el orden de procesado de las diferentes funciones del receptor tal como operan en un sistema real.

2) **Demodulador paso banda.** Este bloque realiza la conversión desde alta frecuencia hasta banda base. La señal de entrada al transmisor ocupa la banda de frecuencias alrededor de la frecuencia portadora y la señal de salida se halla centrada alrededor de la frecuencia cero. Al realizar esta función, en recepción se requiere disponer de una réplica de la señal portadora utilizada en transmisión lo más precisa posible. Hemos comentado en el apartado 4 que en la modulación paso banda se utiliza una señal portadora de tipo “coseno”. En el receptor interesa reproducir la señal “coseno” con la máxima fidelidad respecto a los parámetros de frecuencia y fase que la definen. Si la señal transmitida es directamente la señal en banda base, el desmodulador paso banda no se implementa.

## 5.2. Compensación de los efectos provocados por el canal

Tal y como hemos visto en el subapartado 3.2, los efectos que introduce el canal sobre la señal recibida pueden reducirse al ruido aditivo, las señales interferentes y la distorsión. En la Figura 10 se muestra el efecto que los tres fenómenos provocan sobre la señal en el dominio frecuencial. En ésta se muestra de forma explícita cómo el espectro de la señal transmitida puede verse afectado por la respuesta en frecuencia del canal, modificando los valores relativos de las diferentes frecuencias. También se muestra la aparición de otras señales, cuyo contenido frecuencial está próximo al de la señal transmitida (interferencia) o se superponen (ruido). La gráfica también muestra que la interferencia tiene un ancho de banda parecido al de nuestra señal, mientras que la componente de ruido tiene un ancho de banda mucho mayor.

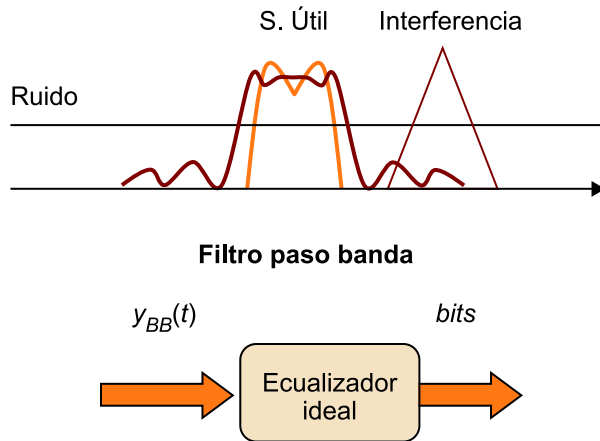
Figura 10. Efectos producidos por el canal en el dominio frecuencial



El filtro paso banda incluido como primer elemento en el sistema receptor elimina las posibles interferencias sumadas a la señal útil en recepción, así como el ruido de canal que se produce a la entrada del receptor y que ocupa las componentes frecuenciales no ocupadas por la señal útil. La parte de ruido que ocupa la banda de frecuencias de la señal útil no se puede eliminar mediante filtrado y queda superpuesta a la señal y se halla presente en el resto de las etapas del receptor.

El efecto provocado por la distorsión del canal cambia la forma de la señal. Cuando el canal admite el modelo de sistema lineal, invariante en tiempo y se puede caracterizar mediante su respuesta impulsional, el efecto en teoría se puede eliminar, restaurando la forma de la señal mediante otro sistema lineal e invariante denominado ecualizador. Es decir, la solución teórica para eliminar la distorsión lineal que produce el canal sobre la señal existe, sin embargo, su implementación práctica es en sí muy complicada si no imposible, y siempre se acaba implantando un sistema cuya función de transferencia es una aproximación de la ideal.

Figura 11. Efectos de filtrado paso banda y de ecualización



En un esquema receptor en el que sea necesario ecualizar la señal útil, el subsistema ecualizador se implementa en banda base y normalmente como una función añadida al demodulador.

### 5.3. Funciones de sincronismo

Las funciones de sincronismo son necesarias en todos los receptores de comunicaciones para permitir demodular la señal de forma correcta.

En la demodulación paso banda se requiere una réplica de la señal portadora en recepción, con los valores exactos que toman los parámetros de frecuencia y fase de la función de tipo coseno. Para obtener esta señal, se realiza la correspondiente función de extracción de sincronismo de portadora.

### 5.4. Medidas de calidad

El objetivo final de todo sistema de comunicaciones consiste en reproducir en el destino una réplica lo más fiel posible de la señal mensaje. Para medir la calidad de dicha réplica, se utilizan criterios consistentes en minimizar o maximizar determinadas funciones objetivos.

Para una señal de naturaleza analógica detectada en recepción, el criterio de medida de calidad consiste en medir el cociente de potencias entre la señal útil detectada y la señal de ruido (SNR). En la operación de filtrado paso banda, se muestra en la figura 11 cómo la parte de señal de ruido que ocupa la misma banda que la señal útil no se cancela mediante la función de transferencia del filtro y queda permanentemente sumada a la señal útil en recepción. Si la señal útil no se halla distorsionada, es decir, en caso de que haya sufrido distorsión, se ha ecualizado de forma perfecta y tiene sentido definir el cociente de potencias SNR.

Al comparar diferentes sistemas de modulación analógica entre sí, se suele calcular para cada uno de ellos el cociente de potencias en detección entre la señal útil (numerador) y la señal de ruido (denominador) en igualdad de

#### Observación

Por no extender excesivamente el módulo, no se incluyen como parte de la teoría las técnicas de sincronización de señales, aunque sí se han incluido algunos ejemplos y algunos ejercicios propuestos que estudian los efectos que tienen sobre las señales las técnicas de recepción con errores de sincronismo, ya sea de portadora o de símbolo.

Podéis consultar, si os interesan, las referencias propuestas para ampliar los conocimientos sobre este tema.

condiciones en cuanto a niveles de ruido y de potencia de la señal transmitida. El sistema que produce el mayor cociente de potencias es lógicamente el de mayor calidad.

Cuando la modulación es digital, la medida de calidad más utilizada es la probabilidad de error de la secuencia de bits. Esta medida se realiza tanto a la salida del demodulador digital, como a la salida del decodificador de canal.

Los efectos que sufre la señal al ser transmitida por el canal de comunicaciones son de naturaleza aleatoria: el ruido, las interferencias la distorsión, etc. Todos ellos repercuten en que la señal a la entrada del demodulador digital en el receptor sea más o menos diferente que la señal a la salida del modulador digital en el transmisor. Debido a estas diferencias, cada uno de los bits transmitidos se detectará a la salida del demodulador digital con una determinada probabilidad  $P$  de error. Es decir:

- Si el bit transmitido es un 1, el correspondiente bit detectado en el receptor es igual a 0 con probabilidad  $P$  y es igual a 1 con probabilidad  $1 - P$ .
- Si el bit transmitido es un 0, el correspondiente bit detectado en el receptor es igual a 1 con probabilidad  $P$  y es igual a 0 con probabilidad  $1 - P$ .

Lo que significa que si, por ejemplo, la probabilidad de error es  $P = 0,01$ , en promedio de cada 100 bits transmitidos se detectarán 99 bits correctamente y un bit erróneamente.

Al comparar diferentes sistemas de modulación digital entre sí, se suele calcular para cada uno de ellos la probabilidad de error en igualdad de condiciones en cuanto a niveles de ruido, velocidad de transmisión y de potencia de la señal transmitida. El sistema que produce la menor probabilidad de error es lógicamente el de mayor calidad.

La probabilidad de error es la función objetivo a minimizar para transmitir una secuencia de bits con la mejor calidad posible y fijadas las condiciones de velocidad de transmisión, potencia transmitida y efectos del canal de comunicaciones.

El cociente entre la potencia de la señal útil y la potencia de la señal de ruido es la función objetivo a maximizar para transmitir una señal continua con la mejor calidad posible y fijadas las condiciones de potencia transmitida y efectos del canal de comunicaciones.

## Anexo: Un poco de historia

Hoy en día, los sistemas de comunicación forman parte de nuestra vida diaria, y los utilizamos para realizar desde las actividades más cotidianas hasta las más sofisticadas. Desde que nos levantamos hasta que nos acostamos, hablamos por teléfono, ya sea fijo o móvil, escuchamos radio o vemos televisión, chateamos, compramos por Internet, intercambiamos e-mails, utilizamos un PC con conexión inalámbrica a un punto de acceso, etc. Cuesta imaginar cómo sería la vida diaria sin poder utilizar ninguno de estos sistemas.

### Invento del telégrafo y del teléfono

El sistema de comunicaciones electrónico más pionero que se desarrolló hacia 1830 fue la telegrafía. De hecho es el primer sistema de comunicaciones digitales transmitido a través de un par de cables. Se considera un sistema digital porque los únicos símbolos que se transmitían mediante el código Morse son el punto y el guión, y con ellos se representan todas las letras del alfabeto.

En 1870, Graham Bell hizo lo propio con un sistema de comunicaciones analógico al inventar el transductor acústico y de este modo convertir la voz directamente en una señal eléctrica. A partir de este hito, rápidamente se desarrolló la telefonía analógica convencional.

1830	Telegrafía alámbrica	Digital
1870	Telefonía alámbrica	Analógico

### Inicio de las comunicaciones radio

Las primeras comunicaciones radio empezaron con el cambio de siglo gracias a Marconi, quien patentó el primer sistema de telegrafía inalámbrica. Rápidamente, siguieron demostraciones de telefonía inalámbrica, es decir, vía radio. En 1918, Amstrong inventó el receptor de radio superheterodino, que es un componente tanto del sistema radio como de televisión modernos. En el módulo “Modulaciones paso banda” de esta asignatura se le dedica un apartado.

1901	Telegrafía radio	Digital
1905	Telefonía radio	Analógica
1907	Sistema radio <i>broadcasting</i>	Analógica (AM)
1918	Receptor superheterodino	Analógico Soporta sistemas digitales
1929	Sistema TV <i>broadcasting</i>	Analógica

1933	Sistema Radio <i>broadcasting</i>	Análogica (FM)
------	-----------------------------------	----------------

### Publicaciones pioneras en comunicaciones digitales

Aunque con el alfabeto Morse se desarrolla el primer sistema de comunicaciones digitales eléctrico (telegrafía), el soporte o base teórica de las comunicaciones modernas se inicia más tarde y de hecho son muchas las publicaciones que han supuesto demostraciones teóricas sobre los posibles alcances de los sistemas en cuanto a capacidad, calidad y funcionamiento.

1924	Nyquist formula el teorema del muestreo
1928	Harley establece velocidad de transmisión en función de determinados parámetros
1930	Reeves propone PCM
1942	Wiener propone la estimación óptima de señal en medio ruidoso
1948	Shanon establece los fundamentos de teoría de la información y los límites fundamentales en sistemas de comunicaciones digitales
1950	Hamming propone códigos detectores y correctores de errores

En 1930, Reeves propuso la primera modulación digital propiamente dicha: PCM o modulación de pulsos codificados, y que es aún la base de los sistemas de comunicaciones digitales vigentes. En el módulo “Modulaciones digitales paso banda” de este material se estudian como las modulaciones de pulsos por amplitud (PAM).

Actualmente, la mayor parte de los sistemas de comunicaciones existentes se basan en modulaciones digitales. Los dos grandes sistemas en los que coexisten las versiones analógicas con las digitales son la radiodifusión y la televisión, y de hecho, especialmente en la radio, aún con mayor utilización que las emisoras analógicas.

1994	Televisión digital por satélite (DVB-S)	Digital
1994	Televisión digital por cable (DVB-C)	Digital
1997	Televisión digital terrestre (DVB-T)	Digital
2003	Radio digital (DRM) Futuro sustituto de AM	Digital
2005	Radio digital (DAB) Futuro sustituto de FM	Digital

### Evolución de la tecnología

La Segunda Guerra Mundial supuso un empuje rápido para el desarrollo de muchas áreas, tanto de la ingeniería en general como de la tecnología en particular. Desafortunadamente, en ocasiones son las guerras las que provocan este



tipo de avances. La electrónica y las comunicaciones se beneficiaron grandemente con tal evento. Se establecieron las técnicas de radar como una nueva disciplina.

En 1945, Arthur G. Clarke escribió su famoso artículo en el que propone el establecimiento de satélites de comunicación geoestacionarios, y en 1963 se lanzó el primero de estos satélites con éxito. En 1966, Kao y Hockman propusieron un sistema de comunicaciones por fibra óptica y coincidió en tiempo con el establecimiento de los primeros sistemas de telefonía basados en modulaciones digitales.

La década de los setenta supuso el desarrollo de sistemas de comunicaciones con mayor volumen de tráfico de todo tipo. Se redujeron las pérdidas o atenuaciones de transmisión por fibra óptica y se aumentó enormemente la capacidad de transmisión de los satélites.

En la década de los ochenta se digitalizaron completamente las redes telefónicas de servicios integrados y además se empezaron a combinar con redes celulares o inalámbricas; si bien hacia 1978 se desarrolló el sistema de telefonía celular analógico, también llamado de primera generación por presentar mayores radios de cobertura que los sistemas celulares digitales. La telefonía celular de tipo GSM es completamente digital, y es la denominada de segunda generación y se instaura en Europa en 1991. Con la inclusión de servicios UMTS, se inicia la telefonía celular de tercera generación y hacia el año 2000, se desarrolla en Europa.

1978	Sistema de telefonía celular de 1.ª generación	Analógica
1991	Sistema de telefonía celular de 2.ª generación (GSM)	Digital
2000	Sistema de telefonía celular de 3.ª generación (UMTS)	Digital
2006	Sistema de telefonía celular de 4.ª generación (en vías de estandarización).	Digital

En 1970 aparecía el primer sistema internet (ARPANET) con el propósito de conectar mundialmente grandes ordenadores, y no es hasta 1995 cuando se crea la World Wide Web, basada en la red Internet y que aparece con el objetivo de compartir y difundir información a nivel mundial.

En la última década, la proliferación de nuevos sistemas de comunicación ha continuado su ritmo de aceleración, por lo que es prácticamente imposible mencionar todos los sistemas coexistentes.

## **Bibliografía**

### **Bibliografía básica**

**Proakis, J. G.; Salehi, M.** (2002). *Communication Systems Engineering* (2.<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.

### **Bibliografía complementaria**

**Carlson, A. B.** (2001). *Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication* (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw Hill.