
Fundamentos de comunicaciones

PID_00247327

Jesús Alonso-Zárate

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 4 horas



Universitat
Oberta
de Catalunya

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

Introducción	5
Objetivos	6
1. Introducción a los sistemas de comunicación	7
2. Comunicaciones analógicas y digitales	9
2.1. Comunicaciones analógicas	9
2.2. Comunicaciones digitales	10
2.3. Ventajas de las comunicaciones digitales	10
3. Elementos de un sistema de comunicación digital	12
3.1. Fuente de información y mensaje	12
3.2. Transmisor	13
3.3. El canal de comunicaciones	14
3.4. Receptor	16
4. El canal de comunicaciones	17
4.1. Introducción	17
4.2. Medios de transmisión guiados (por cable)	18
4.2.1. Par trenzado	18
4.2.2. Cable coaxial	19
4.2.3. Fibra óptica	19
4.3. Medios de transmisión no guiados (<i>wireless</i>)	20
4.3.1. Usos de la comunicación sin cables	20
4.3.2. Principios básicos de la propagación radio	21
4.3.3. Las bandas de frecuencia: el espectro radioeléctrico	21
4.3.4. Propagación según la frecuencia	22
4.3.5. Las bandas de frecuencia con licencia	23
4.3.6. Las bandas de frecuencia libres de licencia	24
4.3.7. Caso particular: las comunicaciones por satélite	24
4.4. Degradación de la señal	26
4.4.1. Ruido	26
4.4.2. Interferencia	27
4.4.3. Distorsión	28
4.4.4. Modelo de canal lineal	29

4.4.5. Modelo de canal no lineal.....	29
5. Modulación en transmisión	31
6. Demodulación en recepción	35
7. Compensación de los efectos del canal	36
8. Sincronismo para la recepción de señales	40
9. Medidas de calidad de un sistema de comunicación	41
9.1. Calidad en señales analógicas: la SNR y la SNIR.....	41
9.2. Calidad en señales digitales: la probabilidad de error	42
9.3. La sensibilidad en recepción: el <i>link budget</i>	42
Resumen	44

Introducción

Este material presenta y describe los fundamentos básicos de un sistema de comunicaciones. No pretende ofrecer una descripción completa y detallada de los sistemas de comunicaciones y sus fundamentos teóricos y matemáticos, sino establecer las bases mínimas necesarias para entender la importancia de las comunicaciones en los sistemas ciberfísicos y la industria 4.0, y adquirir el conocimiento de la terminología y conceptos fundamentales que todo experto en industria 4.0 debe poseer.

Además, este material presenta una serie de términos y conceptos que se irán usando a lo largo de los próximos materiales, dedicados a los sistemas de comunicación.

Objetivos

Los objetivos de este material son:

- 1) Adquirir un conocimiento básico de los sistemas de comunicación: elementos básicos y funciones principales.
- 2) Conocer la terminología básica asociada las telecomunicaciones.
- 3) Conocer las posibilidades y limitaciones de los sistemas de comunicación digitales de aplicación directa en los sistemas ciberfísicos.
- 4) Sentar las bases conceptuales para poder comprender las tecnologías existentes, explicadas en materiales posteriores, y poder crear un criterio para seleccionar qué tecnologías pueden ser las más adecuadas para cada aplicación concreta en el contexto de los sistemas ciberfísicos y la industria 4.0.

1. Introducción a los sistemas de comunicación

Un sistema de comunicación se puede definir como el conjunto de dispositivos físicos, técnicos y procedimientos necesarios que permiten establecer comunicación entre un transmisor (el que habla) y uno o varios receptores (que escuchan).

El **diseño de un sistema de comunicación** es el proceso a través del cual:

- 1) Se eligen los elementos necesarios para construir el sistema de comunicación.
- 2) Se configuran estos elementos para encontrar una solución a un problema de comunicaciones específico.

El objetivo último del diseño es poder implementar un sistema de comunicaciones que permita intercambiar información de manera fiable entre un transmisor y un receptor.

En función de la naturaleza **analógica** o **digital** de la información y de la manera en que esta información se transmitirá, podemos hablar de:

- 1) Comunicaciones analógicas.
- 2) Comunicaciones digitales.

En este bloque nos vamos a centrar, fundamentalmente, en las **comunicaciones digitales**.

Cuando decimos que una información es **digital** queremos decir, en esencia, que sea cual sea la naturaleza del mensaje (una imagen, una canción, la temperatura, humedad o presión de una estación meteorológica, una conversación telefónica, una fotocopia, por ejemplo), este se puede representar mediante una secuencia de bits.

Una *secuencia de bits* es un conjunto de ceros y unos (0100101101) ordenados de acuerdo con un criterio que conocen tanto el transmisor como el receptor, y que los dos saben interpretar correctamente.

El inicio de los sistemas de comunicación data de finales del siglo XIX, con la telegrafía, que es por sí mismo 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**.

Posteriormente, 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 energía. 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.

2. Comunicaciones analógicas y digitales

Como hemos visto en la introducción, los sistemas de comunicación pueden ser, por lo tanto:

- 1) Analógicos.
- 2) Digitales.

En este material, nos centraremos en los **sistemas de comunicación digitales**, dado su uso mayoritario en los sistemas de comunicación susceptibles de ser utilizados para la industria 4.0. Sin embargo, a continuación se describen brevemente los fundamentos de los dos tipos de comunicación.

2.1. Comunicaciones analógicas

La **transmisión analógica** de datos consiste en el envío de información en **forma de ondas**, a través de un medio de transmisión físico.

Los datos se transmiten a través de una onda portadora; una onda simple cuyo único objetivo es transportar datos modificando una de sus características:

- 1) **Amplitud.**
- 2) **Frecuencia.**
- 3) **Fase.**

Por este motivo, la transmisión analógica es generalmente denominada *transmisión de modulación de la onda portadora*. Se definen tres tipos de transmisión analógica, según cuál sea el parámetro de la onda portadora que varía:

- 1) Transmisión por modulación de la **amplitud** de la onda portadora.
- 2) Transmisión a través de la modulación de **frecuencia** de la onda portadora.
- 3) Transmisión por modulación de la **fase** de la onda portadora.

En función de cómo sea el origen de datos que hay que transmitir, se puede distinguir entre dos tipos de transmisión analógica:

1) **Transmisión analógica de datos analógicos:** este tipo de transmisión se refiere a un esquema en el que los datos que serán transmitidos ya están en formato analógico. Por eso, para transmitir esta señal, el DCTE (equipo de terminación de circuito de datos) debe combinar continuamente la señal que será transmitida y la onda portadora, de manera que la onda que transmitirá será una combinación de la onda portadora y la señal transmitida.

2) **Transmisión analógica de datos digitales:** cuando aparecieron los datos digitales, los sistemas de transmisión todavía eran analógicos. Por eso fue necesario encontrar la forma de transmitir datos digitales en forma analógica. La solución a este problema fue el **módem:** modulador/demodulador. Las funciones de un módem son:

- a) en el momento de la transmisión debe **modular**, es decir, convertir los datos digitales (una secuencia de 0 y 1) en señales analógicas (variación continua de un fenómeno físico), y
- b) en recepción debe **demodular**, es decir, convertir la señal analógica en datos digitales.

2.2. Comunicaciones digitales

La **transmisión digital** consiste en el envío de información a través de medios de comunicaciones físicos **en forma de señales digitales**.

Por lo tanto, las señales analógicas deben ser digitalizadas antes de ser transmitidas. Este proceso de digitalización se traduce en enviar 0 y 1 de manera alterna. La manera específica y el orden temporal en los que se envían estos 0 y 1 definen el mensaje que se quiere transmitir. Estos 0 y 1, físicamente, se pueden hacer usando dos niveles distintos de tensión, la presencia/ausencia de una corriente eléctrica, la presencia/ausencia de luz, etc.

2.3. Ventajas de las comunicaciones digitales

Algunas de las ventajas de las comunicaciones digitales respecto a las analógicas son:

- **Capacidad de multiplexación:** codificar las señales mediante una secuencia de bits repercute en el hecho de que señales de naturaleza muy diferente tienen una representación como una secuencia de bits. Es posible entrelazar los bits que provienen de muchas señales diferentes como un único sistema, mediante el cual se pueden transmitir simultáneamente bits que provienen de diferentes tipos de información. Esta propiedad se denomina multiplexación temporal.
- **Protección de los contenidos:** la información en formato digital se puede cifrar (codificar) de manera muy eficiente, para dificultar o impedir el acceso a la infor-

mación a aquellos usuarios que no estén autorizados. Los contenidos se pueden proteger para preservar la confidencialidad, autenticar la autoría o proporcionar servicios de pago mediante un acceso condicional.

- **Procesamiento digital de la información:** al tratarse de información digital, puede ser transformada directamente mediante procesadores digitales avanzados, que pueden ejecutar un elevado número de operaciones por segundo para adaptar las señales a las características del canal o estimar las señales que han sido enviadas. Además, estos algoritmos son muy flexibles, en el sentido de que se pueden modificar con facilidad, únicamente cambiando el software del procesador.
- **Capacidad de regeneración:** las modulaciones digitales son más robustas ante los efectos no deseados que sufre la señal al ser transmitida por el canal. En efecto, al tratarse de mensajes digitales, solo se admitirá un número finito de posibles formas de onda, por lo que el receptor puede intentar calcular la forma de onda original que se ha transmitido, aunque la señal recibida esté degradada. Por ejemplo, en el caso binario más simple solo se transmiten dos posibles formas de onda, las que se corresponden con cada uno de los niveles lógicos.

¿Existe entonces alguna desventaja con las comunicaciones digitales?

Sí. En igualdad de condiciones, cuando una señal continua se transmite mediante una modulación digital, siempre ocupa un ancho de banda mayor que la misma señal transmitida mediante una modulación analógica. Además, las comunicaciones digitales requieren una sincronización más compleja, como iremos viendo más adelante.

Si tomamos como ejemplo una señal de audio, la versión digital suele requerir para su transmisión un ancho de banda diez veces mayor que el original analógico (el número exacto de veces depende del sistema de modulación). En las señales de vídeo, el aumento del ancho de banda es todavía más espectacular, y alcanza factores de ensanchamiento de 100 respecto a la señal original analógica. Sin embargo, la capacidad de procesar digitalmente la información y la velocidad de los procesadores modernos permiten reducir el número de bits que se tienen que transmitir, de manera que se compense este problema. De hecho, en los sistemas de comunicación actuales, en los que se hace compresión de los bits originales, los canales digitales de audio y vídeo ocupan menos que su contrapartida analógica.

3. Elementos de un sistema de comunicación digital

El esquema básico general de un sistema de comunicación digital está formado por los siguientes elementos:

- Una **fente de información** que genera **mensajes**.
- Un **transmisor**.
- Un **canal**.
- Un **receptor**.

Existen múltiples y diferentes sistemas de comunicaciones. En ningún caso se considera como objetivo de este material hacer 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 hace cada uno de ellos.

Desengranamos cada uno de estos elementos en las siguientes secciones.

3.1. Fuente de información y mensaje

Desde un punto de vista muy general, podemos definir que un **sistema de comunicaciones** es el conjunto de elementos y procedimientos que permiten enviar la información generada por una fuente 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 originalmente generado por la fuente.

Todo mensaje se puede representar mediante una señal que se puede describir 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 se produce. Por lo tanto, es posible modelarlo como un proceso estocástico desde el punto de vista de un observador externo.

Las fuentes de información se dividen entre las que generan mensajes:

- 1) **Mensajes analógicos**, que consisten en una cantidad física que varía con el tiempo de forma **continua**. Los mensajes provenientes de fuentes de información analógicas se pueden digitalizar (muestrear y cuantificar) para poder transmitirse a través de sistemas de comunicación digital.
- 2) **Mensajes digitales**, que consisten en una secuencia ordenada de símbolos. Cada símbolo se selecciona de entre un **conjunto finito de elementos**, de un «abecedario».

3.2. Transmisor

El **transmisor** es el elemento que procesa el mensaje generado por la fuente de información y genera una **señal eléctrica** adecuada para ser transmitida por el canal o medio de transmisión y que pueda ser recibida con fiabilidad.

Para ello, primero se utiliza un **transductor** que convierte la señal generada por la fuente en una señal eléctrica. Por ejemplo, si el mensaje fuera de audio, este dispositivo transductor sería un micrófono; si el mensaje fuera de vídeo, el dispositivo transductor sería una cámara de vídeo.

Después del transductor, el transmisor está formado por diferentes subsistemas, entre los cuales se destacan, en este orden de ejecución, las etapas de:

- 1) **Codificación de fuente**. Su función es obtener una secuencia de bits que represente de manera eficiente la información que queremos transmitir. Además, puede extraer la redundancia existente en la fuente original (inherente a los datos y que no aporta información relevante), y reducir tanto como se pueda el número de bits necesarios que se tienen que transmitir. Hay sistemas de compresión sin pérdidas, en los que la información original se recupera de forma exacta, y sistemas con pérdidas en los que solo se puede recuperar la señal original de manera aproximada, aunque suficiente para ser correctamente interpretada. Un ejemplo de compresión con pérdidas no perceptibles para el ser humano es la codificación MP3 para el audio.
- 2) **Codificación de canal**. Su función es la de transformar los bits, con el objetivo de proteger la información ante eventuales degradaciones de la señal que pudieran producir la pérdida de algunos bits en el receptor debido a los efectos introducidos por el canal de comunicación. Evidentemente, la estrategia para proteger la información exige la introducción de cierta redundancia en los datos, de modo que el volumen de bits a la salida es siempre mayor que el número de bits a la entrada. La introducción de la redundancia adicional se puede utilizar con dos estrategias diferentes: la detección de errores y la corrección de errores.

Ejemplos

Ejemplos de **mensajes analógicos** son: la presión acústica de una señal de audio, la luminosidad de un punto de una imagen de televisión, la temperatura, la humedad, etc.
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, 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.

3) **Modulación digital en banda base.** Su misión es mapear la secuencia de bits resultante del codificador de canal y convertirla en una señal continua en el tiempo, que se manifiesta como una señal eléctrica, o diferencia de tensión entre dos puntos, y que va variando en el tiempo. Un convertidor digital/analógico (D/A) convierte los niveles lógicos (bits) de una señal digital en niveles de tensión analógicos. Una vez ejecutada la modulación digital, disponemos de una señal cuya forma de onda se ha **condicionado** para que el receptor pueda identificar de manera fiable los bits que forman el mensaje.

4) **Modulación paso banda.** Su función es trasladar la señal desde la **banda base** a una determinada **frecuencia portadora** mediante el modulador banda. Conceptualmente, este proceso de modulación **paso banda** es el mismo tanto si la señal que se va a modular es analógica como digital. La frecuencia portadora constituye uno de los parámetros más significativos del modulador paso banda, ya que simboliza la ubicación espectral de la señal modulada transmitida.

En el caso de mensajes digitales, o digitalizados, el proceso de modulación convierte la información binaria en una señal continua en el tiempo. La señal obtenida a la salida de esta transformación se manifiesta de forma física mediante una diferencia de tensión entre dos puntos, lo cual permite su transmisión a través de un canal de comunicación.

Al transmitir la secuencia de bits en cualquier sistema de comunicaciones, dos de las características que caracterizan el sistema son:

- 1) La respuesta en el dominio del **tiempo**: la velocidad a la que se envían estos bits, que se mide en bits (o kilobits, megabits o gigabits) transmitidos por segundo (bps, kbps, Mbps o Gbps).
- 2) La respuesta en el dominio de la **frecuencia**: la ocupación espectral. Por ocupación espectral se entiende la frecuencia central a la que se transmite la señal y el ancho de banda que se ocupa alrededor de esta frecuencia central. Los dos parámetros se miden en hercios (o múltiplos, como kHz, MHz, GHz). El ancho de banda se encuentra directamente relacionado con la velocidad de transmisión de los bits.

El análisis de una señal en el dominio temporal y frecuencial es posible gracias a la transformada de Fourier, en la que no vamos a entrar en este material. Sin embargo, es importante conocer el término y su existencia, ya que todos los sistemas de comunicación se basan en esta dualidad tiempo-frecuencia de las señales basadas en ondas.

Transformada de Fourier

Las señales se pueden caracterizar por el dominio del tiempo y de la frecuencia. La frecuencia no cambia con el tiempo y, por lo tanto, una señal se puede caracterizar por su variación en tiempo y su respuesta en frecuencia. El análisis en tiempo y frecuencia de las señales es posible gracias a una herramienta matemática llamada *transformada de Fourier*. Para poner un ejemplo práctico, el oído humano percibe distintas frecuencias a medida que pasa el tiempo; sin embargo, la transformada de Fourier contiene todas las frecuencias del tiempo durante el cual existió la señal. Es decir, en la transformada de Fourier se obtiene un solo espectro de frecuencias para toda la variación temporal de una señal. Este concepto es de gran aplicación para la ingeniería de telecomunicaciones y el diseño de sistemas de comunicación digital.

3.3. El canal de comunicaciones

El canal es un elemento fundamental en el diseño de un sistema de comunicación.

El **canal** de transmisión es el **medio** físico que cubre la distancia entre el transmisor y el receptor. Puede estar formado por un cable, una fibra óptica o el aire (usando el espacio **radioeléctrico**).

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, mayor es la atenuación que sufre la señal.

Además, aparecen otros efectos no deseados como el **ruido**, la **distorsión**, la **interferencia**, o la **propagación multicamino** en entornos de radio, que se detallarán más adelante, en el material «Radiocomunicaciones», específico de comunicaciones por radio.

La elección del canal de comunicaciones, ya sea el uso de un cable, una fibra óptica, o el uso de ondas de radio a través del medio aéreo para la transmisión de datos, afecta directamente al diseño de los diferentes bloques que componen el sistema de comunicaciones.

Por ejemplo, si la comunicación se lleva a cabo mediante **cable**, los efectos de las posibles interferencias y ruidos sobre la señal suelen ser menores que cuando la transmisión se hace a través de redes de **radioenlaces** terrenas usando el medio aéreo. Esto se debe a que el medio aéreo es, por definición, un canal de difusión, ya que es un medio compartido por todos los posibles transmisores y receptores de todos los sistemas de comunicación por radio.

De modo parecido, si se lleva a cabo una comunicación vía **satélite** geostacionario (GEO), la señal transmitida desde la estación terrestre debe recorrer un camino de unos 36.000 km, sin ningún tipo de amplificación, hasta llegar al satélite donde se reenvía a la Tierra. Esta transmisión a larga distancia requerirá de un diseño específico de los elementos de un sistema de comunicación.

Por lo tanto, el diseño de un sistema de comunicaciones debe tener en cuenta las condiciones en las que se hace esta comunicación y el canal que se va a utilizar. La codificación de la fuente y la codificación del transmisor deben tener en cuenta los efectos adversos que el canal introducirá en la señal, afectando, por lo tanto, a la manera en que esta señal será recibida.

3.4. Receptor

El **receptor**, como su nombre indica, es la parte del sistema de comunicación situada físicamente en el punto de destino de los mensajes que se transmiten. Su misión consiste en recuperar la señal mensaje a partir de la señal recibida, e intentar interpretarla de la manera más fiel posible a cómo se transmitió en el origen.

El receptor debe:

- 1) Intentar minimizar y compensar, en la medida de lo posible, los efectos producidos por el canal en la señal transmitida.
- 2) Adecuar la señal recibida haciendo las **operaciones inversas** al transmisor, es decir, demodular y decodificar, para obtener una versión lo más fiel posible al mensaje que originalmente se quería transmitir al **destinatario**.

Del mismo modo que en el transmisor contamos con un transductor para convertir el mensaje de la fuente a una señal eléctrica que se pueda manipular y transmitir, entre el receptor y el destinatario, otro **transductor** convierte la señal eléctrica recibida en la forma adecuada para que pueda ser interpretada por el destinatario, que puede ser un ser humano u otra máquina. Esto da lugar a los conceptos de comunicaciones *human-to-human* (**H2H**), máquina a máquina (**M2M**) o *machine-type communications* (**MTC**), en el que al menos uno de los dos extremos es una máquina.

En el caso de la industria 4.0 en particular, se espera que muchas comunicaciones se lleven a cabo automáticamente entre máquinas, sin participación directa de seres humanos. Estas son las denominadas comunicaciones M2M y MTC, como hemos introducido anteriormente.

Comunicaciones automáticas entre máquinas

Por ejemplo, si el mensaje recibido es de audio, el dispositivo transductor en el receptor sería un altavoz; y si el mensaje fuera de vídeo, el dispositivo transductor en el receptor sería una pantalla o monitor a través del que visualizar las imágenes.

4. El canal de comunicaciones

4.1. Introducción

Como se ha introducido en el apartado anterior, para establecer la comunicación entre un emisor y un receptor, es necesaria la existencia de un canal a través del cual se hace el intercambio de información.

El **canal** es, por lo tanto, el medio físico que permite el envío de señales entre los usuarios de un sistema de comunicación. 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, que inducen interferencia.

Algunos medios de transmisión están 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 suele, en principio, estar más protegido frente al ruido y las interferencias que un sistema de transmisión vía radio. Por este motivo, el medio de transmisión condiciona el diseño de todos los elementos de un sistema de comunicaciones. Tanto el transmisor como el receptor deberían adecuar las características de las señales a las del sistema. Por ejemplo, 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.

A grandes rasgos, los **tipos de canal de comunicación** se pueden clasificar como:

- 1) **Guiados**, por ejemplo usando un cable de cobre o fibra óptica (*wired*).
- 2) **No guiados**, usando el aire como medio físico de propagación. Esto da lugar a las comunicaciones por radio (*wireless*).

En general, los medios guiados ofrecen una mayor protección de la señal y, por lo tanto, permiten comunicaciones a mayores distancias y con mayor fiabilidad. Sus principales inconvenientes, sin embargo, son la necesidad de instalar las infraestructuras necesarias para cubrir a los diferentes usuarios, la imposibilidad de permitir movilidad entre transmisor y receptor, y la falta de flexibilidad para añadir o quitar nuevas fuentes y destinos a las comunicaciones.

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.

A modo de ejemplo, durante muchos años, la mayor parte de conexiones entre el abonado al servicio telefónico fijo y la central telefónica se han llevado a cabo mediante el uso de un par trenzado de hilos de cobre. El par trenzado se ha utilizado históricamente, dado que es económico y proporcionaba una calidad suficiente para el establecimiento de las comunicaciones de voz. Sin embargo, con el advenimiento de la revolución digital y la democratización del acceso a internet (incluyendo el internet móvil) para multitud de aplicaciones que generan el intercambio masivo e interactivo datos, se ha hecho necesario recurrir a sofisticadas soluciones tecnológicas. Este es el caso del uso de la fibra óptica que, a través de una sofisticación del sistema de modulación y demodulación de las señales, consigue velocidades de transmisión que hace algunos años, con los módems convencionales, eran totalmente impensables. Hoy día, la gran mayoría de los proveedores de internet ofrecen enlaces con fibra óptica cubriendo la última milla, y llegando hasta cada uno de los domicilios de los abonados (*fiber to the home*, **FTTH**).

4.2. Medios de transmisión guiados (por cable)

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

4.2.1. 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 hace 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 llevar a cabo el trenzado de los cables, se disminuyen estos dos efectos y es 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. Típicamente, se pueden transmitir 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 se han hecho populares los de la categoría 6 (250 MHz de ancho de banda) y la categoría 7 (600 MHz de ancho de banda). Esencialmente, la diferencia entre las diferentes categorías es el grosor del cable y el paso del trenzado (distancia entre cada uno de los cruces del cable).

4.2.2. 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, la cual 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. Hoy día, la tendencia es la de sustituirlos por cables de fibra óptica en la mayoría de las aplicaciones. Los coaxiales actuales tienen un ancho de banda aproximado de 1 GHz.

4.2.3. Fibra óptica

La **fibra óptica** es el medio cableado más utilizado hoy día, debido a que:

- 1) Es el medio que ofrece una mayor capacidad de transferencia de datos.
- 2) Tiene una muy elevada protección frente a ruidos e interferencias.
- 3) Tiene un peso y tamaño reducidos.

El cable de **fibra óptica** está formado por varios hilos de fibra; cada uno de ellos puede transportar varias comunicaciones de forma simultánea. La fibra óptica se fabrica a partir de **vidrio**, y este vidrio es el medio a través del cual se propaga la luz que transporta la información. Para transmitir una secuencia de bits a través de una fibra óptica, se introducen pulsos de luz en uno de sus extremos y se detectan en el otro. La presencia de luz representa 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.

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 solo 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 en torno a 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 hacerse 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 hacerse 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, y cubrir 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:

- Inmunidad frente a las interferencias producidas por otros sistemas.
- Capacidad de cubrir mayores distancias sin amplificación.
- Menor peso y volumen.

Un cable con mil pares trenzados de 1 km de longitud tiene un peso aproximado de 8.000 kg; 2 fibras ópticas que puedan soportar el mismo número de canales pesan solo unos 100 kg. Este es el motivo por el que todas las nuevas infraestructuras de redes de cable tienden a hacerse 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 interceptar las comunicaciones que con los cables de cobre.

4.3. Medios de transmisión no guiados (*wireless*)

4.3.1. Usos de la comunicación sin cables

Las comunicaciones sin cables 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 *wireless*.

Las comunicaciones *wireless* también pueden ser competitivas en aplicaciones en las que los terminales están fijos, especialmente en aquellos casos en los que el coste de dar servicios de cobertura al usuario mediante infraestructuras de cable es especialmente elevado.

Las comunicaciones sin cables ofrecen mucha más flexibilidad a la hora de añadir o eliminar nuevas fuentes y destinos de datos. **Por lo tanto, dado el gran número de dispositivos que se espera conectar en la industria 4.0, parece que el papel de las comunicaciones sin cables va a ser fundamental.**

4.3.2. Principios básicos de la propagación radio

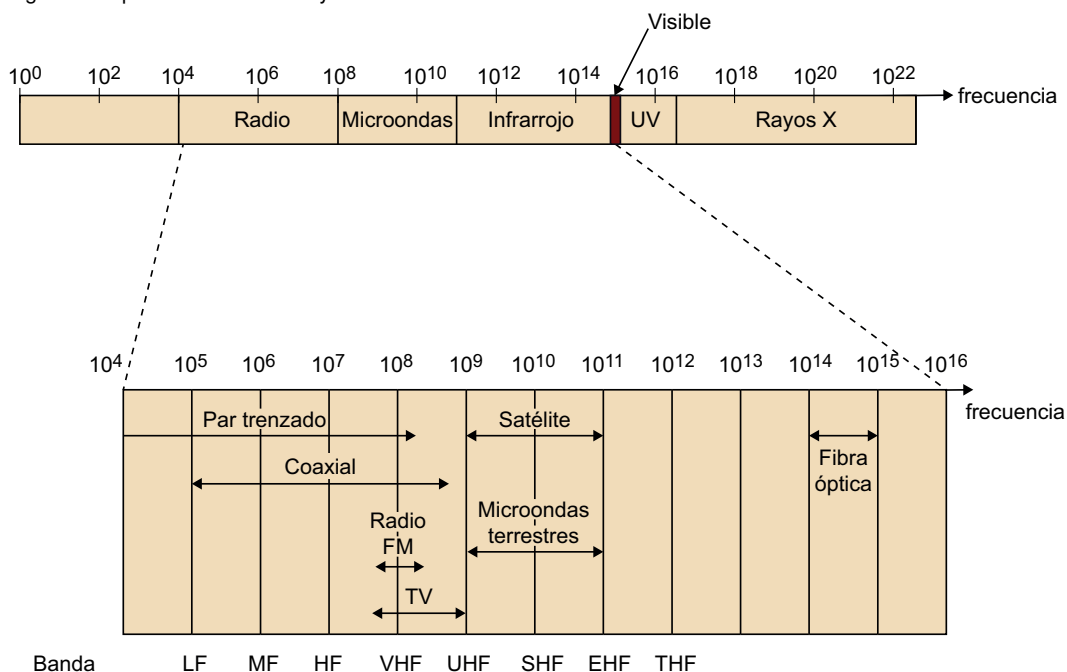
Los sistemas de transmisión sin hilos se basan en el principio de que al producir un movimiento sobre los electrones, se crean **ondas electromagnéticas** que pueden propagarse a través del espacio. Este fenómeno fue previsto por el físico inglés J. C. Maxwell en 1865, y confirmado experimentalmente por H. Hertz en 1887. Cuando una **antena** con el tamaño y diseño apropiados 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 la longitud de onda usada como portadora en el sistema de comunicaciones.

4.3.3. Las bandas de frecuencia: el espectro radioeléctrico

En la figura 1 se representa una división del espectro radioeléctrico, que incluye una distribución de sus bandas de frecuencia y sus usos en los sistemas de comunicación.

Figura 1. Espectro radioeléctrico y bandas de frecuencia



Las bandas de frecuencia más bajas se denominan **LF** (*low frequency*), **MF** (*medium frequency*) y **HF** (*high frequency*). Históricamente, estas tres bandas fueron las primeras en utilizarse.

Posteriormente, cuando empezaron a utilizarse servicios de comunicaciones en bandas de mayor frecuencia, los nombres que se adoptaron fueron los siguientes:

- VHF, *very high frequency*.
- UHF, *ultra high frequency*.
- SHF, *super high frequency*.
- EHF, *extra high frequency*.
- THF, *tremendously high frequency*.

4.3.4. Propagación según la frecuencia

Las ondas son susceptibles de sufrir interferencias y ruidos, procedentes de otros sistemas de comunicaciones o de radiaciones electromagnéticas naturales, en todas las bandas de frecuencias.

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 de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia con el transmisor**.

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 hasta 1.000 km.

Al **aumentar la frecuencia**, las ondas electromagnéticas tienden a propagarse en línea recta (como la luz), y son bloqueadas por los obstáculos y absorbidas por fenómenos atmosféricos como la lluvia o la niebla.

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, y que puede llegar a cubrir toda la superficie de la misma. Estas son las bandas utilizadas por los radioaficionados y algunos sistemas militares.

4.3.5. Las bandas de frecuencia con licencia

Debido a la capacidad de las ondas de radio de viajar largas distancias, pueden producirse interferencias entre los propios usuarios de los sistemas de comunicaciones, así como interferencias entre diferentes sistemas que operan en bandas de frecuencia cercanas.

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, y restringir y regular 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.

En un ámbito internacional, el organismo ITU-R (International Telecommunications Union – Radio) trata de coordinar estas asignaciones nacionales en los diferentes países, 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**. Se pueden destacar tres maneras principales de asignar el espectro radioeléctrico para su uso en sistemas de comunicación:

- 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 hace 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 la 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 compañía 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.

4.3.6. Las bandas de frecuencia libres de licencia

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. **Estas son las bandas ISM (*industrial, scientific, and medical*)**.

En estos casos, las regulaciones suelen estar en las potencias de transmisión y recepción de los equipos terminales, así como los tiempos máximos de uso continuado (*duty cycling*) que intentan garantizar que los sistemas no se interfieran entre ellos.

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 Wi-Fi, en los mandos a distancia de los equipos de TV, o en las emergentes redes LPWA como Sigfox o LoRa, que hacen uso de estas bandas de uso sin licencia. Veremos estas tecnologías con más detalle en el material «Sistemas de comunicaciones en la banda ISM» dedicado a las tecnologías que usan las bandas ISM.

4.3.7. Caso particular: las comunicaciones por satélite

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 geostacionarios, 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, a causa del 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 comunicacio-

nes y centros de investigación espacial, y se ha creado 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. Brevemente, 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 directivas que apuntan al satélite y dirigen toda la energía al mismo. El satélite recibe la señal y la amplifica. La señal recibida se traslada a otra banda de frecuencia (*transpondedor*), 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 amplia, de manera que con pocos satélites es posible cubrir la superficie de interés.

El periodo orbital del satélite depende de su distancia a la Tierra: cuanto más cerca, más rápida es la velocidad de orbitación. En la práctica, se utilizan tres tipos de órbitas:

- 1) **Órbitas GEO-estacionarias (GEO)**, situadas a 35.800 km y con un periodo orbital igual al de 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 cuales destacan los servicios de televisión y los de telefonía.
- 2) **Órbitas MEO (*medium earth orbit*)**, situadas entre los 5.000 y los 15.000 km. El periodo orbital es de unas seis horas, y son necesarios unos diez satélites para cubrir la Tierra completamente. Este tipo de satélites no se suelen utilizar para aplicaciones de comunicaciones. Su aplicación actual más importante es el servicio de posicionamiento global por satélite (GPS, *global positioning system*).
- 3) **Órbitas LEO (*low earth orbit*)**, situadas a una distancia aproximada (depende del servicio) de unos 1.000 km. 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, lo que reduciría de forma considerable su periodo de vida útil.

Dada la cobertura global que ofrecen, el uso de sistemas de comunicación por satélite tiene grandes aplicaciones comerciales, entre las cuales destacan los sistemas de seguimiento de barcos o aviones, y sus cargas, que de otro modo sería imposible mantener conectados durante los largos trayectos cruzando grandes desiertos o los océanos. **El uso de los enlaces por satélite, en el contexto de la industria 4.0, tiene gran aplicación en el campo de la logística inteligente.**

4.4. Degradación de la señal

Independientemente del medio de transmisión utilizado, cableado o sin cables, la señal enviada por un transmisor 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:

- 1) Ruido.
- 2) Interferencia.
- 3) Distorsión.

Elaboramos estos tres conceptos en las siguientes secciones.

4.4.1. Ruido

En todo circuito electrónico existen fluctuaciones de la señal eléctrica, producidas por el movimiento no deseado de los electrones, que dan lugar al ruido. Estas fuentes de ruido pueden ser muy variadas. Podemos definir **ruido** como cualquier señal de naturaleza aleatoria que aparece superpuesta a la señal útil.

Por su origen, el ruido puede ser **externo**, si la fuente de ruido está fuera del propio circuito, o **interno**, si la fuente de ruido es inherente al circuito. En el caso de ruido externo, este se puede intentar reducir o evitar, mientras que en el caso de ruido interno, este resulta inevitable.

El **ruido externo** lo podemos clasificar como natural o artificial. Diremos que el ruido es de **origen natural** si proviene de fenómenos naturales, como el ruido cósmico o el ruido atmosférico. Este ruido es captado por las antenas receptoras y siempre lo caracterizaremos mediante la temperatura equivalente de ruido. Por otro lado, diremos que el ruido es **artificial** si está provocado por el hombre. Ejemplos de ruido artificial son el provocado por motores eléctricos o de combustión con gasolina, o el ruido provocado por las redes de distribución eléctrica (conmutadores eléctricos y líneas de alta tensión). En todos estos casos, los chispazos generan alteraciones del campo electromagnético que son captadas por el receptor. Este tipo de ruido es altamente problemático en entornos industriales con una elevada densidad de motores.

El **ruido interno** se debe a las fluctuaciones de tensión o corriente debidas a la naturaleza de la materia que forma los componentes electrónicos. Los dos tipos de ruido más característicos de origen interno son el ruido **térmico** y el ruido **impulsivo** o *shot*. Por otro lado, existen otros tipos de ruido, entre los cuales pueden citarse el ruido de avalancha, el ruido *flicker*, el ruido de partición o el ruido pulsado o *burst-noise*.

El **ruido térmico** es el más importante de los ruidos en los sistemas de comunicaciones. Aparece debido al movimiento aleatorio de los electrones en el interior de la materia, como consecuencia de la temperatura ambiente. Aparece en cualquier dispositivo que presente una cierta resistividad y esté a una temperatura diferente del cero absoluto, independientemente de que esté conectado (o no) y pase (o no) por el mismo una corriente.

Este ruido es espectralmente plano (constante en toda la banda de frecuencias), y por esta razón también se le suele denominar **ruido blanco**. Estadísticamente, su tensión tiene una distribución gaussiana de media cero y varianza igual a la potencia del ruido, por lo que también se conoce como **ruido gaussiano**. Cuando un canal solo presente este tipo de distorsión, diremos que es un canal con ruido aditivo, blanco y gaussiano, resumido por el acrónimo **AWGN** (del inglés *additive white gaussian noise*).

El **ruido impulsivo *shot*** aparece como consecuencia del paso de portadores (electrones) mediante una barrera potencial. Este ruido solo aparece en dispositivos semiconductores o válvulas de vacío, acompañando al valor medio de la corriente. Por lo tanto, a diferencia del ruido térmico, solo puede existir cuando haya paso de corriente a través del dispositivo. Este tipo de ruido se encuentra, por ejemplo, en las comunicaciones PLC (*power line communications*), que usan la línea de transmisión de electricidad para transmitir datos.

Solo cuando el ruido presente una cierta estructura (por ejemplo, una conformación espectral o, equivalentemente, una correlación temporal) podrá mitigarse en el receptor aplicando técnicas de procesado de la señal. Por el contrario, cuando el ruido no presente ninguna estructura, como es el caso del ruido AWGN, el receptor no podrá hacer nada más que eliminar el ruido fuera de banda mediante un filtro de banda ajustado al ancho de banda de la señal.

4.4.2. Interferencia

Según la definición de ruido que hemos dado anteriormente, un tipo de ruido particular se denomina **interferencia**. Se consideran interferencias todas las señales procedentes de otros usuarios que comparten parte del mismo espectro o que trabajan en regiones espectrales próximas, ya sea en el mismo sistema de comunicación, o en otro sistema de comunicación que trabaje en el mismo espectro radioeléctrico.

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. El diseño de nuevas técnicas de cancelación de interferencias constituye, hoy día, un amplio y muy activo campo de estudio en el ámbito de las comunicaciones por radio.

La existencia de ruido e interferencias conduce a la definición del concepto de **relación señal a ruido más interferencia**, típicamente abreviado como **SNIR**, y que se puede calcular como:

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

Donde:

- P_S representa la potencia recibida de señal útil.
- P_N representa la potencia recibida de ruido.
- P_I representa la potencia recibida de interferencia.

El valor de la SNIR es un parámetro fundamental que hay que tener en cuenta en el uso y diseño de los sistemas de comunicación, tanto por cable, como por radio. Dada la SNR a la que un receptor puede trabajar (llamada **sensibilidad**), los niveles de ruido e interferencia, la potencia de transmisión en el transmisor y las características del canal, se puede definir el **link budget**, que permite relacionar un sistema de comunicaciones con su rango de alcance para las comunicaciones.

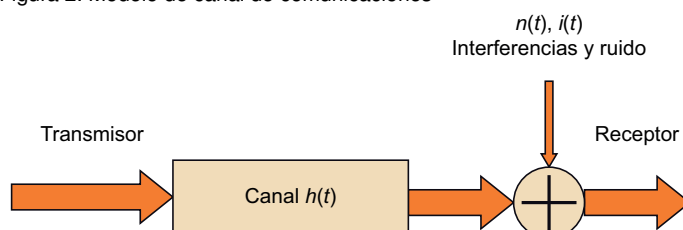
4.4.3. Distorsión

La **distorsión** es otra de las causas que pueden 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** en tiempo y una **respuesta en frecuencia**.

La figura 2 muestra un modelo de canal de comunicaciones. La señal $n(t)$ representa el ruido, que varía con el tiempo t , la señal $i(t)$ representa la interferencia, que también varía con el tiempo t , y el símbolo $h(t)$ representa la respuesta del canal en un instante de tiempo t .

Figura 2. Modelo de canal de comunicaciones



4.4.4. Modelo de canal lineal

Los efectos de distorsión y de ruido e interferencias pueden en muchas aplicaciones modelarse mediante un sistema lineal. Según el diagrama de la figura 2, la señal que obtendremos en la salida del canal puede expresarse como:

$$y(t) = x(t) * h(t) + w(t) = x(t) * h(t) + [n(t) + i(t)] \quad (2)$$

donde $x(t)$ es la señal de salida del transmisor, $y(t)$ es la señal de entrada al receptor, y el operador $*$ es la convolución de dos señales (no la multiplicación).

Por lo tanto, 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 (respuesta en tiempo/frecuencia), podremos intentar aplicar el sistema inverso en el receptor. En la mayor parte de las aplicaciones reales, solo podemos determinar la respuesta instantánea del canal de forma aproximada (estimando su respuesta y su variación en tiempo y frecuencia), lo que da lugar a lo que se conoce como **probabilidad de error** en la recepción de un mensaje transmitido.

4.4.5. Modelo de canal no lineal

La distorsión también puede ser originada por los efectos no lineales en los dispositivos electrónicos utilizados. A modo de ejemplo, 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, de este modo:

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

En esta ecuación, los coeficientes b y c tienen en cuenta las no linealidades. Estos coeficientes suelen ser mucho más pequeños que el coeficiente a . Si los coeficientes b y c fueran iguales a cero, obtendríamos un canal ideal con retardo nulo y tan solo 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 al 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:

$$\sin[(2\pi f_0 t)]^2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(2\pi(2f_0)t), \quad (4)$$

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 en 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 y c (y sucesivas) 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, *total harmonic distortion*):

$$THD = \frac{(P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_N)}{P_1} \quad (5)$$

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

Los filtros paso banda en recepción permiten combatir la presencia de armónicos indeseados en recepción.

5. Modulación en transmisión

Una vez se dispone de la señal de información obtenida de la fuente y debidamente codificada (codificación de fuente y de canal), el siguiente paso es su modulación para la transmisión física.

Como hemos visto antes, este proceso de modulación tiene dos etapas:

- 1) Modulación digital en banda base.
- 2) Modulación paso banda.

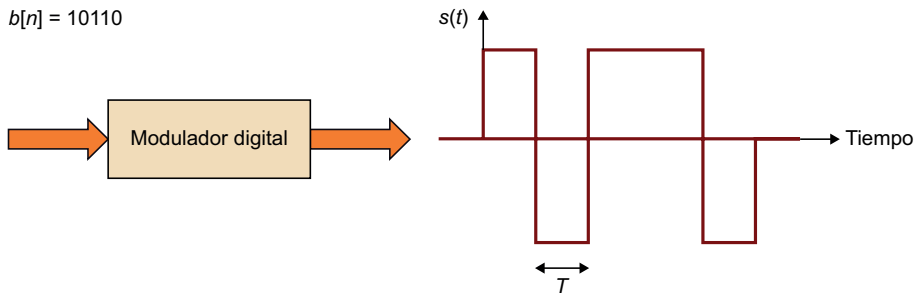
Primero, la modulación digital en banda base convierte la secuencia de bits que sale del codificador de canal en una señal eléctrica continua y variante en tiempo que puede modularse en amplitud, tiempo o frecuencia. Esta señal estará centrada en el origen de frecuencias (**en banda base**).

El **modulador digital** es, por lo tanto, la interfaz que lleva a cabo el mapeo de la información digital (de la secuencia de bits) a las formas de onda continuas o analógicas que se adaptan a las características del canal y pueden transmitirse.

Este proceso de modulación digital en banda base, en general, se lleva a cabo tomando conjuntos de b bits, y asociando a cada uno de estos conjuntos de bits, llamados **símbolos**, una señal de energía finita que se transmite en tiempo real. La señal modulada resultante ha de adoptar la forma más adecuada para poder ser transmitida por el canal. Es importante determinar el ancho de banda que ocupa y sus características espectrales para saber cómo puede verse afectada esta señal por el canal. Esta forma de señal viene determinada por lo que se llama **pulso conformador**. Cada símbolo se multiplica por el pulso conformador para obtener la señal analógica que podrá ser transmitida.

En el ejemplo representado en la figura 3, se muestra la transmisión de una secuencia de 5 bits (10110). La amplitud positiva de la señal modulada se corresponde con el bit 1, y la amplitud negativa de la señal modulada se corresponde con el bit 0. En frecuencia, el ancho de banda que ocupa esta señal se relaciona con la velocidad binaria de la secuencia de entrada y se clasifica como una modulación digital en banda base. Su contenido frecuencial está centrado alrededor de la frecuencia cero.

Figura 3. Modulador digital
 $b[n] = 10110$



La función base que soporta la información digital en la señal de salida de la figura 3 es un **pulso conformador** rectangular. En este ejemplo, el bit determina la amplitud de dicho pulso, y la forma temporal del pulso en particular es:

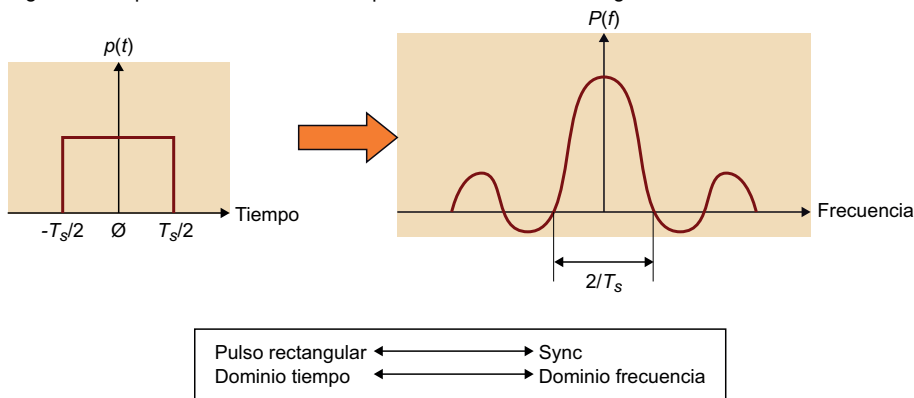
$$p(t) = \Pi\left(\frac{t}{T}\right). \tag{6}$$

En esta expresión, T es el margen de tiempo dedicado a la transmisión de cada bit. Así, si por ejemplo la secuencia de bits ha de transmitirse a una velocidad de 1 Mbps, se debe transmitir un millón de bits en cada segundo. De lo anterior, resulta que el tiempo que se dedica a la transmisión de cada bit es igual a 1 microsegundo (μs).

La respuesta frecuencial de una señal modulada digitalmente depende del pulso conformador, no de la modulación digital seleccionada.

La figura 4 muestra la respuesta frecuencial a un pulso conformador rectangular como el usado en la 3.

Figura 4. Respuesta frecuencial de un pulso conformador rectangular

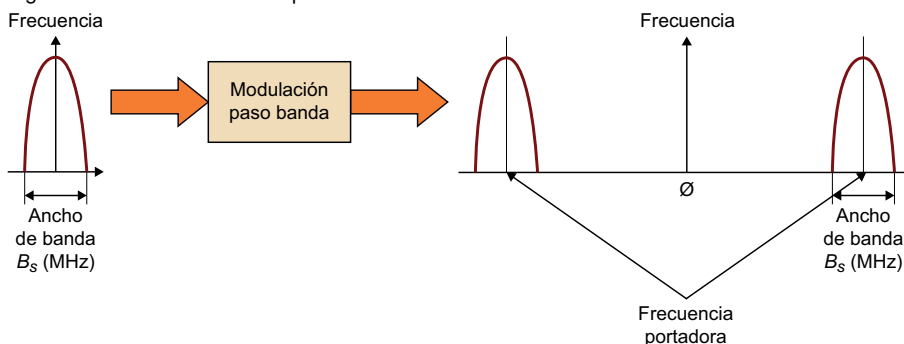


En general, las señales de comunicación se transmiten en una **frecuencia portadora** a través del uso de un **modulador paso banda**. A pesar de esto, algunos sistemas de comunicaciones transmiten directamente la señal en banda base. Este es el caso de comunicaciones por cable punto a punto. Tómese 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 lo tanto, no es necesario su traslado a una frecuencia portadora.

En el caso de que haya que trasladar la señal de banda base a otra frecuencia portadora, es el **modulador paso banda** 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.

En un ámbito 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 **señal portadora**. Se muestra un ejemplo gráfico en la figura 5.

Figura 5. Señal banda base a paso banda



Los sistemas de comunicaciones reales, como la televisión o la radio, están estandarizados por normativas internacionales. Esto permite que tanto la ocupación espectral como la potencia de las señales transmitidas sean recomendadas en el correspondiente estándar y reguladas en cada país, especialmente los sistemas de comunicaciones inalámbricos o radioeléctricos.

Dada esta ordenación, el espectro se convierte en un bien «escaso» (**por regulación, no por naturaleza**) y cada aplicación opera en una determinada banda de frecuencias.

Así, las transmisiones de radio por FM (frecuencia modulada) cubren la banda de frecuencias que va de 87,5MHz a 108MHz, 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, lo que provoca posibles interferencias en las señales recibidas.

6. Demodulación en recepción

El receptor, como su nombre indica, es la parte del sistema de comunicación situada físicamente en el punto de destino, y su misión consiste en recuperar, con el mínimo error posible, el mensaje transmitido en el transmisor a partir de la señal recibida.

Para llevar a cabo esta función con las mejores garantías de calidad, se hacen las siguientes tareas, en este orden:

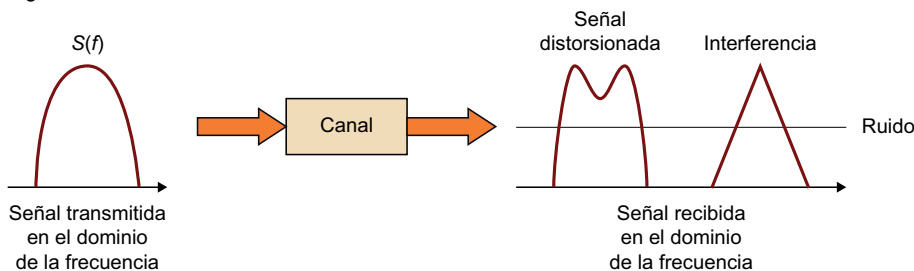
- **Filtrado paso banda para descartar señales fuera de la banda de interés.** Este filtro se encuentra centrado en la frecuencia portadora de la transmisión, y debe tener suficiente ancho de banda para dar cabida a la señal modulada, si bien no lo ha de exceder en tanto sea posible, con el fin de evitar interferencias y ruido fuera de la banda de la señal útil.
- **Las operaciones inversas a las ejecutadas en el transmisor.** Primero se demodula la señal para trasladarla de la banda portadora a banda base. Después, el demodulador digital procesa la forma de onda en la entrada de este y la reduce a una secuencia binaria. La entrada a un demodulador digital es una señal continua en el tiempo y materializada mediante una tensión eléctrica variante en el tiempo. La señal de salida es una secuencia de bits que se procesa a una determinada velocidad y se almacena en un dispositivo de tipo memoria. Implícitamente, se deduce de lo anterior que alguno de los componentes que integran el demodulador digital es un convertidor analógico/digital (A/D).
- **Decodificador de canal,** que deshace el procesado llevado a cabo por el codificador de canal en transmisión. Se elimina la redundancia introducida por el codificador de canal. La señal de entrada al decodificador de canal es una secuencia de bits que en los sistemas que operan en tiempo real se procesa a una determinada velocidad de bits por segundo. La señal de salida del decodificador de canal es también una secuencia de bits cuya velocidad binaria es inferior a la de la secuencia de entrada, debido a la eliminación de la redundancia.
- **Decodificador de fuente.** Es la etapa final del receptor. Si el mensaje transmitido es una señal analógica, como por ejemplo una señal de audio, la entrada a este es una secuencia binaria y la salida es continua en el tiempo. Incluso en el caso de que el decodificador de canal entregara en el decodificador de fuente una secuencia totalmente libre de errores, la reconstrucción de una señal analógica en la recepción no coincide exactamente con la señal mensaje del transmisor. Un codificador de fuente comprime la información y, aunque lo hace con criterios de provocar la mínima distorsión sobre la señal procesada, los efectos de la compresión son, en principio, irrecuperables en el receptor.

7. Compensación de los efectos del canal

Como se ha descrito anteriormente, los efectos que introduce el canal sobre la señal recibida pueden resumirse como **ruido aditivo**, **interferencias** y **distorsión**.

La figura 6 muestra el efecto que los tres fenómenos provocan sobre la señal en el dominio frecuencial. Se observa de forma explícita cómo el espectro de la señal transmitida puede verse afectado por la respuesta en frecuencia del canal, y modificar 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 6. Efectos del 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.

Existen también distintas técnicas avanzadas de **cancelación de interferencias** basadas en acceso no ortogonal (NOMA, *non-orthogonal multiple access*); técnicas basadas en la diversidad que ofrece el uso de múltiples antenas (MIMO, *multiple-input multiple-output*), técnicas basadas en *network coding*, o técnicas basadas en cancelación sucesiva de interferencias (SIC, *successive interference cancellation*). Estas son técnicas avanzadas que no se considerarán en este material pero que, progresivamente, se están integrando en los futuros estándares de comunicación.

El efecto provocado por la **distorsión** del canal cambia la forma de la señal. En este punto, cabe distinguir cuatro tipos de canal:

- 1) No selectivo en **frecuencia** y de variación lenta en el **tiempo**.
- 2) No selectivo en **frecuencia** y de variación rápida en el **tiempo**.
- 3) Selectivo en **frecuencia** y de variación lenta en el **tiempo**.
- 4) Selectivo en **frecuencia** y de variación rápida en el **tiempo**.

Es decir, según la **velocidad** a la que se den los cambios en la respuesta del canal, este se puede clasificar en dos grandes grupos.

- 1) Lentamente variante en el tiempo.
- 2) Rápidamente variante en el tiempo.

El umbral para determinar si un canal es rápido o lento puede determinarse a partir de la duración de los intercambios de información, y este umbral es un criterio definible según convenga.

En los canales **lentamente variantes en el tiempo**, canales con predominancia de ruido sobre otros efectos (llamados canales AWGN), se pueden aplicar técnicas como:

- 1) **Control de potencia**, mediante el cual se ajusta la potencia de transmisión a través de un diálogo y negociación entre transmisor y receptor.
- 2) **Modulación y codificación adaptativa** (AMC, del inglés *adaptive modulation and coding*), a través de la cual se ajusta la velocidad de transmisión y el nivel de protección que otorga la codificación. A mayor velocidad de transmisión, menor energía transmitida por cada bit y, por lo tanto, mayor probabilidad de error en recepción.

En los canales **rápidamente variantes en tiempo**, también llamados multiplicativos, no tenemos capacidad de actuar desde el transmisor sobre la señal, tal y como lo hacemos en el caso de que sea lentamente variante. Las opciones de control de potencia y AMC no se pueden aplicar, dado que este tipo de esquemas actúa con un cierto retardo (desde que se monitoriza el estado de la señal recibida, hasta que el transmisor actúa, pasa un tiempo). Cuando el canal varía rápidamente las condiciones que se encuentra el transmisor en el momento en el que actúa, y son diferentes de las que había en el momento en el que se va a monitorizar la señal, hablamos de que el estado del canal está «obsoleto».

En estos casos, se pueden aplicar otras técnicas tales como:

- 1) **Diversidad**: brevemente, podemos decir que las técnicas de diversidad se basan en transmitir la misma información repetida, contando con que el receptor recibirá de manera incorrelada (independiente) las diferentes «réplicas» de la información, que podrá combinar adecuadamente para recuperar la información transmitida. Existen varias estrategias de diversidad, pero todas ellas parten del mismo principio: enviar las diferentes réplicas de la señal de información de manera estratégica para que vean

canales incorrelados. El uso de múltiples antenas (MIMO) es una de las técnicas que se están popularizando en los sistemas de comunicación disponibles, como es el caso de las redes Wi-Fi más actuales.

2) **Entrelazado:** una segunda opción para luchar contra las variaciones rápidas de canal es combinar un esquema de codificación de canal con un entrelazador que desordena los bits antes de transmitirlos. La idea se basa en el hecho de que un código corrector de error es capaz de corregir un número de símbolos erróneos consecutivos determinado: si son pocos, los podrá corregir, mientras que si son muchos, será incapaz de hacerlo. Así, si por el hecho de que la señal haya experimentado durante un tiempo determinado un desvanecimiento profundo (una fuerte atenuación) se recibe una ráfaga de errores superior a la que el código puede corregir, la corrección no se podrá llevar a cabo. Ante este problema, una posible estrategia para mejorar las prestaciones del código, y por lo tanto de la comunicación, consiste en *desordenar* los bits antes de enviarlos por el canal y *reordenarlos* en el receptor utilizando entrelazadores. Dado que el canal está de por medio, una ráfaga de bits erróneos provocada por un desvanecimiento profundo se verá como una serie de errores individuales y dispersos después de la reordenación hecha en el receptor. Como ya hemos comentado, un código corrector de error lo tiene más fácil para corregir errores aislados que para corregir ráfagas de errores.

Cuando un canal es lentamente variante en tiempo, pero selectivo en frecuencia, cobra sentido aplicar técnicas como:

1) **Ecuación:** la ecuación es la solución tradicionalmente utilizada para luchar contra la dispersión temporal del canal cuando esta es relevante. En el caso de comunicaciones digitales, el ecualizador busca compensar la interferencia intersimbólica (ISI) introducida por el canal, mientras que en caso de comunicaciones analógicas, el ecualizador busca compensar la distorsión en frecuencia. El diseño del ecualizador requiere tener un conocimiento de la respuesta impulsional del canal. Por lo tanto, en canales variantes en tiempo será necesario que el diseño del ecualizador se vaya adaptando/corrigiendo, con el objeto de ecualizar correctamente los datos. En este punto, encontramos la limitación que impondrán los canales muy rápidamente variantes en tiempo. En el momento en que el diseño del ecualizador no sea factible, justificado por la rápida variación del canal, encontraremos un límite que separará (para este problema) los canales variantes en tiempo de los canales muy rápidamente variantes en tiempo.

2) **OFDM:** diseñar e implementar un ecualizador, si bien es una tarea muy conocida, hace más compleja la implementación tecnológica del receptor. En este sentido, una señal OFDM (correspondiente a un esquema de modulación multiportadora) correctamente diseñada puede conseguir que el efecto dispersivo en tiempo del canal (que provoca ISI) se convierta en un efecto multiplicativo (canal multiplicativo sin ISI).

Cuando el canal presenta distorsión frecuencial y es muy rápidamente variante en tiempo, hasta el límite de que no podemos compensarlo con alguna de las soluciones ya propuestas, quedan pocas alternativas, entre las cuales se pueden comentar:

- 1) **Reducir la velocidad de transmisión** para reducir la distorsión del canal y aumentar la cantidad de energía que transporta cada bit, lo que ofrece más margen para tolerar ruido, interferencia y distorsión.
- 2) **Transmitir paquetes más cortos** para poder forzar que el canal sea invariante dentro de un paquete o trama de datos (cuanto más tiempo dure la transmisión de un paquete, más expuesto estará a los efectos del canal).
- 3) **Usar esquemas de codificación más complejos, con mayor protección frente a errores.**

Aunque en algunos casos estas soluciones son viables, en otros pueden no serlo debido a los requisitos de comunicación (por ejemplo, no poder disminuir la velocidad por debajo de un umbral determinado), a la pérdida de eficiencia de la comunicación (por ejemplo, suponiendo que hay una cantidad de energía dada para lograr una transmisión), o al exceso de complejidad. Este último punto es particularmente importante en sistemas de comunicaciones entre máquinas en los que la complejidad debe ser muy baja para poder mantener el coste de los dispositivos también muy bajo.

Cuando estas técnicas no son viables, otra opción es recurrir a comunicaciones que puedan efectuarse sin que ni transmisor ni receptor tengan conocimiento del canal, de manera que los cambios de estos no afectan a los esquemas de comunicación. En esta línea encontramos soluciones como comunicaciones *ultrawideband* (UWB), ciertos esquemas de diversidad temporal o comunicaciones no coherentes. Estos sistemas, sin embargo, tienen limitaciones que pueden limitar su aplicabilidad en el contexto de la industria 4.0, en su visión más general.

8. Sincronismo para la recepción de señales

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

Primero, es necesario disponer de un **sincronismo de portadora**, que consiste en disponer en la recepción de una réplica de la señal portadora con los valores exactos la frecuencia y fase de la portadora, para poder trasladar de nuevo la señal a banda base.

En comunicaciones digitales, además, el subsistema de demodulador requiere conocer con exactitud la señal de referencia que marca la velocidad de símbolo y sus transiciones. Se suele denominar señal de reloj y, en definitiva, a partir de sus transiciones se sincroniza la operación de muestreo implícita al convertidor A/D del demodulador digital. Para obtener esta señal, se hace la correspondiente función de extracción de sincronismo de símbolo.

Hay otras operaciones de sincronismo que se efectúan directamente sobre las secuencias de bits y que dependen, a su vez, de operaciones de empaquetado y de etiquetado que se ejecutan sobre la misma secuencia.

9. Medidas de calidad de un sistema de comunicación

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

Los criterios de medida de calidad de un enlace son diferentes si se trata de una señal analógica o digital. Se describen las diferencias a continuación.

9.1. Calidad en señales analógicas: la SNR y la SNIR

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, 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, tiene sentido definir el cociente de potencias SNR.

Si además del ruido se tiene en cuenta la interferencia de otros sistemas o de otros usuarios del mismo sistema, se habla de la SNIR (relación señal a ruido más interferencias).

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 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.**

Por lo tanto, el cociente entre la potencia de la señal útil y la potencia de la señal de ruido es la función objetivo que hay que maximizar para transmitir una señal continua con la mejor calidad posible, y fijadas las condiciones de potencia transmitida y efectos del canal de comunicaciones.

9.2. Calidad en señales digitales: la probabilidad de error

Cuando la modulación es digital, la medida de calidad más utilizada es la **probabilidad de error de la secuencia de bits**. Esta medida se lleva a cabo 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 1 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.**

Por lo tanto, la probabilidad de error es la función objetivo que hay que 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.

9.3. La sensibilidad en recepción: el *link budget*

Dado un sistema de comunicación, todo receptor puede detectar y decodificar señales recibidas a partir de un umbral de SNIR. Este umbral se conoce como «sensibilidad» del receptor.

Esta sensibilidad dependerá de muchos parámetros del sistema de comunicación, tales como la codificación y la modulación usadas, entre otros, así como de la propia implementación hardware del receptor.

Dada esta sensibilidad y la potencia de transmisión, se puede definir el *link budget*; de una manera informal, podríamos decir que el *link budget* es el «presupuesto» de pérdidas que podemos tolerar en el canal para combatir sus efectos adversos.

Por lo tanto, un *link budget* elevado nos permitirá tener muchas pérdidas de propagación entre transmisor y receptor, mientras que un *link budget* reducido nos dará margen para asumir pocas pérdidas.

Este concepto de *link budget* suele utilizarse, por ejemplo, para comparar sistemas de comunicación en términos de fiabilidad y de alcance. A igualdad de condiciones, un sistema de comunicaciones con mayor *link budget* será «mejor». En cualquier caso, el concepto de «mejor» o «peor» no debe banalizarse, ya que cada aplicación en particular necesita valorar sus requerimientos, así como las alternativas más adecuadas.

Resumen

En este material, hemos revisado los conceptos fundamentales de un sistema de comunicación.

Tras una posible definición de lo que es un sistema de comunicación, hemos descrito los motivos por los cuales los sistemas digitales son los predominantes que hay que tener en cuenta en las soluciones de la industria 4.0.

Hemos revisado los elementos fundamentales de todo sistema de comunicación: transmisor, canal, receptor.

Hemos sentado las bases para entender que el canal juega un papel fundamental sobre el que no tenemos control, y tiene una afectación directa en el diseño de los sistemas de comunicaciones. Estos sistemas deben estar diseñados para compensar los efectos adversos del canal, que complican las comunicaciones a distancia.

Se ha introducido el concepto de modulación y demodulación, las técnicas fundamentales para compensar los efectos del canal, y la necesidad de sincronismo para establecer comunicaciones.

Finalmente, hemos introducido las medidas de calidad de un sistema de comunicación, lo que nos permitirá entender de qué manera un sistema es más o menos adecuado para una aplicación en particular.

En resumen, tras este material, el lector debería tener las bases para poder comprender de qué manera funciona un sistema de comunicación punto a punto; es decir, entre un transmisor y un receptor.