

Tema 2

Transmisión de señales en comunicación de datos

2.	TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN COMUNICACIÓN DE DATOS	3
2.1.	INTRODUCCIÓN	3
2.2.	ANALÓGICO Y DIGITAL	5
2.3.	SEÑALES PERIÓDICAS Y NO-PERIÓDICAS	7
2.4.	SEÑALES ANALÓGICAS	8
2.4.1.	<i>Señales analógicas simples</i>	8
2.4.1.1.	Amplitud.....	8
2.4.1.2.	Periodo/frecuencia.....	9
2.4.1.3.	Fase.....	10
2.4.2.	<i>Señales analógicas compuestas</i>	13
2.4.3.	<i>Espectro de frecuencias y ancho de banda</i>	14
2.5.	SEÑALES DIGITALES	15
2.6.	TRANSMISIÓN DE SEÑALES: ANALÓGICA Y DIGITAL.....	19
2.6.1.	<i>transmisión</i>	20
2.6.2.	<i>Señalización</i>	21
2.7.	MEDIOS DE TRANSMISIÓN	22
2.7.1.	<i>Medios de transmisión guiados</i>	24
2.7.1.1.	Par trenzado	25
2.7.1.2.	Cable coaxial	26
2.7.1.3.	Fibra óptica.....	28
2.7.2.	<i>Medios no guiados</i>	31
2.7.2.1.	Microondas terrestres	31
2.7.2.2.	Microondas por satélite.....	32
2.7.2.3.	Ondas de radio	32
2.7.2.4.	Ondas infrarrojas	33
2.7.2.5.	Ondas de luz.....	33
2.8.	PERTURBACIONES EN LA TRANSMISIÓN	34
2.8.1.	<i>Atenuación</i>	34
2.8.2.	<i>Distorsión por retardo</i>	35
2.8.3.	<i>Ruido</i>	36
2.8.3.1.	Ruido térmico.....	36
2.8.3.2.	Ruido de intermodulación	36
2.8.3.3.	Diáfonía (Crosstalk)	36
2.8.3.4.	Ruido impulsivo	36
2.9.	APROVECHAMIENTO DE UN MEDIO DE TRANSMISIÓN	37
2.9.1.	<i>velocidad de modulación (V_m)</i>	37
2.9.2.	<i>Velocidad de transmisión (V_t)</i>	39
2.9.3.	<i>Tasa de error (BER)</i>	41
2.9.4.	<i>Capacidad del canal</i>	42
2.9.4.1.	Canal libre de ruido.....	42
2.9.4.2.	Canal con ruido.....	43
2.9.5.	<i>transmisión multinivel</i>	45
2.9.5.1.	Dibits.....	45
2.9.5.2.	Tribits y Cuatribits	48

2. TRANSMISIÓN DE SEÑALES EN COMUNICACIÓN DE DATOS

2.1. Introducción

El Modelo de Referencia OSI (*Figura 2-1*) establece que el nivel físico se ocupa de la transmisión de señales electromagnéticas a través del medio de transmisión utilizado.

A nivel de aplicación, las redes de comunicaciones en general, y las redes de computadores, en particular, se utilizan para la comunicación de información de alto nivel, por ejemplo, envío de ficheros de datos, vídeo, audio, datos numéricos registrados en una estación de medición meteorológica, señales de control en un entorno robotizado, etc. Toda esta información (datos) de alto nivel es comprensible para el usuario final, ya sea humano o máquina, pero no es apropiada para ser enviada a través de un medio de transmisión eléctrico/electrónico, para ello necesita de ciertos ajustes, necesita de un proceso de codificación/decodificación.

Modelo de Referencia OSI

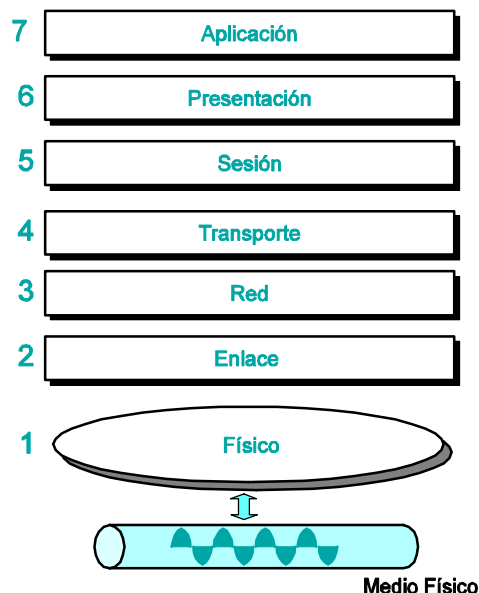


Figura 2-1. Modelo de Referencia OSI

El proceso de codificación consiste en convertir esta información de alto nivel en una serie de símbolos legibles por el computador. Por la propia naturaleza electrónica de los sistemas telemáticos y redes de computadores, son utilizados como elementos de codificación los símbolos '0' y '1', conocidos como 'códigos binarios' o 'bits'.

Por tanto, el proceso de codificación consiste en convertir la información, esto es, ficheros de datos, vídeo, audio, etc., en cadenas de bits, legibles por el computador. Por otro lado, el receptor debe tener la capacidad de, a partir de las cadenas de bits recibidas, reconstruir la información original, enviada por el emisor.

Pero todavía, esta información que se quiere enviar a través de un medio de transmisión, que ha sido convertido a cadenas de bits, no es capaz de viajar a través de un medio físico de transmisión de datos. La función de los medios de transmisión es la de transportar energía a través del camino físico. Por tanto, es necesario convertir las cadenas binarias de '0' y '1' a alguna forma de energía, y ello se consigue mediante señales electromagnéticas, que éstas ya tienen capacidad para viajar a lo largo de los medios de transmisión, ser reproducidos o amplificados según necesidad, y detectados por algún dispositivo receptor. (Figura 2-2).

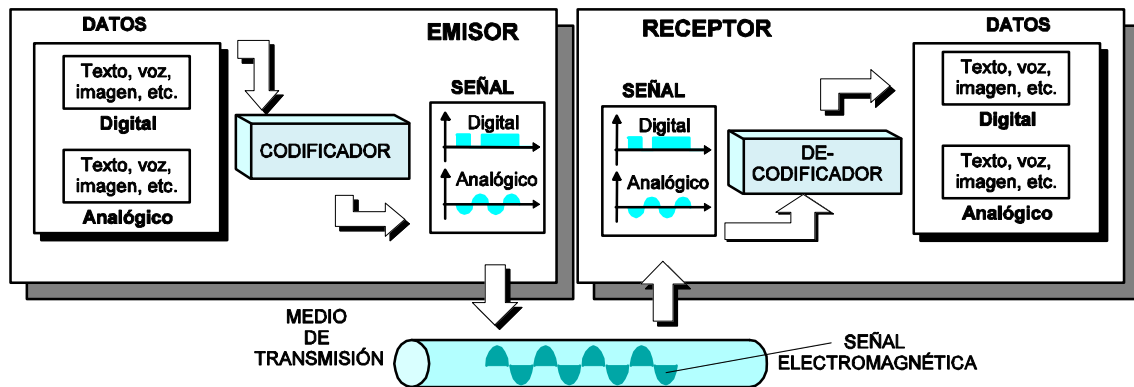


Figura 2-2. Codificación Analógico/Digital.

2.2. Analógico y digital

La característica de analógico y digital es susceptible de aplicar tanto al concepto de dato (información) como al de señal:

Definiremos **dato** como una entidad que transporta información. Los conceptos de datos analógicos o digitales son bastante sencillos: Los datos analógicos pueden tomar valores en cierto intervalo continuo (por ejemplo, temperatura, presión, etc.). El dato analógico puede tomar cualquier valor de los infinitos valores comprendidos entre dos puntos. Los datos digitales toman valores discretos (por ejemplo, textos, números enteros, binarios, etc.). En un sistema de comunicaciones, los datos se propagan de un punto a otro a través del medio de transmisión mediante señales electromagnéticas:

Una **señal analógica** consiste en una onda **continua** que varía suavemente en el tiempo. Cuando la onda pasa de un valor a otro, ésta pasa por todos y cada uno de los infinitos puntos comprendidos entre los dos extremos. La forma más conocida de señal sinusoidal es la representada por la “*onda sinusoidal*” (*Figura 2-3 (a)*). El eje vertical representa el valor de la señal en cada punto. La propia forma de onda de la señal transmitida es la que contienen la información que se transmite. Ejemplos: audio, vídeo, etc.

Una **señal digital**, por el contrario, es **discreta**, sólo pasa por un número limitado de valores en su cambio de un estado a otro. La transición entre dos valores es instantáneo, no pasando por ningún valor intermedio. Normalmente, los valores son simples, como ‘1’ y ‘0’. La “*onda cuadrada*” es la forma más común de señal digital. La *Figura 2-3 (b)* ilustra la representación gráfica de una señal digital, formada por líneas horizontales y verticales, éstas últimas representan la transición instantánea entre los diferentes valores discretos que toma la señal, y que son representados por las líneas horizontales. Los pulsos codificados de la señal transmitida son los que contienen la información.

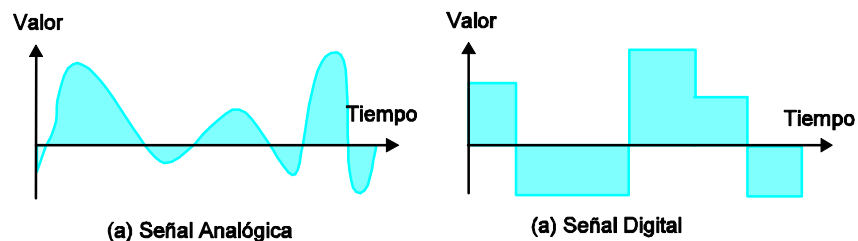


Figura 2-3. Ejemplo de señal analógica y señal digital.

Vamos a profundizar un poco en los conceptos analógico/digital, mediante la utilización de un ejemplo: Medición del potencial eléctrico (voltaje) de un determinado circuito. Es de sobra conocida la naturaleza analógica del potencial eléctrico, que puede tomar cualquier valor continuo, dentro de un cierto rango de valores, por ejemplo: 15 V, 34.5 V, 220 V. Por el contrario, la medida del voltaje puede ser tanto digital como analógica.

Si se utiliza un dispositivo analógico (*Figura 2-4 (a)*), para la medición del voltaje, este dispositivo proporcionará un valor analógico y continuo, es decir, se pueden hacer tantas divisiones y lecturas del dispositivo, dependiendo de la precisión que el dispositivo permita y grado de exactitud que deseemos. Por el contrario, si se utiliza un dispositivo de medición digital (*Figura 2-4 (b)*), éste proporcionará un valor de medida discreto, expresando en el rango del dispositivo, sin posibilidad de aproximar la medición a algún valor intermedio.

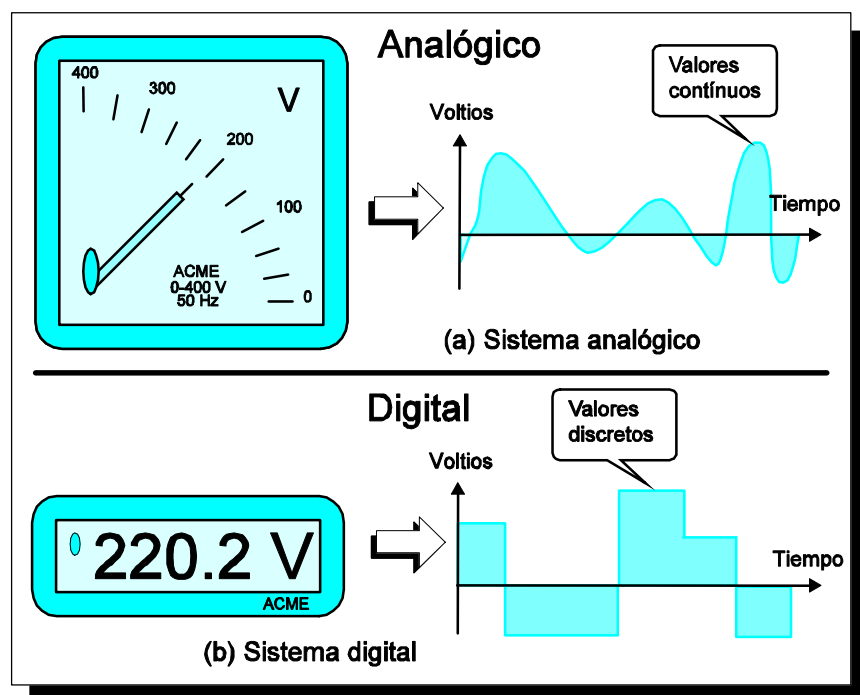


Figura 2-4. Ejemplo de dispositivo analógico y digital.

2.3. Señales periódicas y no-periódicas

Se define el **periodo (T)**, como la cantidad de tiempo necesario para completar un ciclo completo. Se mide en segundos.

$$[T] = [\text{Seg}]$$

Una primera clasificación de las señales, tanto analógicas como digitales, puede ser en relación a su periodo:

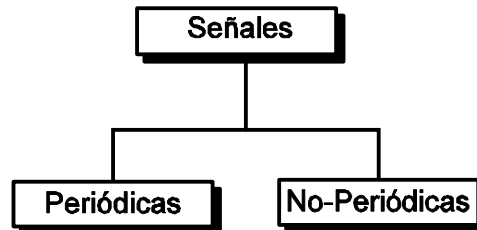


Figura 2-5.

- **Señal periódica:** completa un determinado patrón de valores (ciclo) en un determinado tiempo (periodo), y repite dicho patrón en los siguientes periodos (Figura 2-6).
- **Señal no-periódica:** cambia de valor a lo largo del tiempo, sin mostrar ningún patrón ni repetición de ciclo a lo largo del tiempo (Figura 2-7).

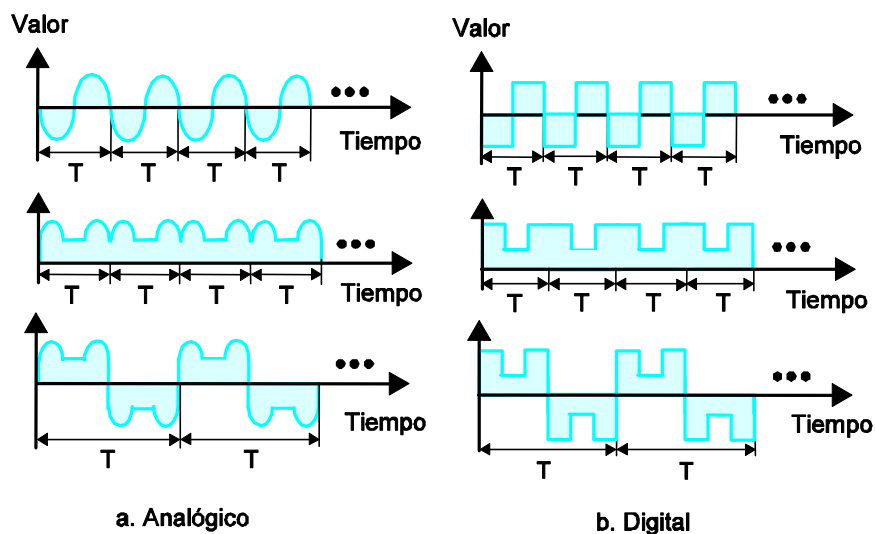


Figura 2-6. Señales periódicas.

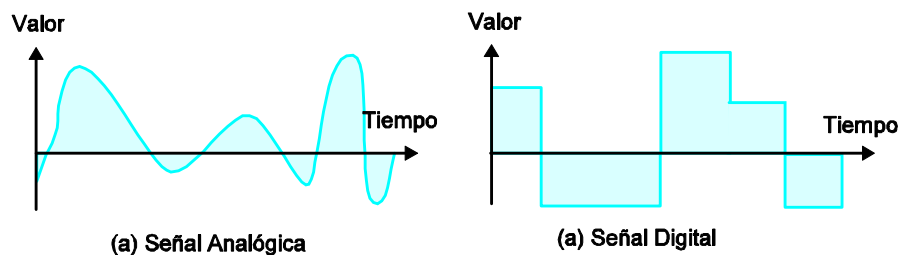


Figura 2-7. Señales no periódicas.

2.4. Señales analógicas

Las señales analógicas se pueden clasificar en: simples y compuestas.

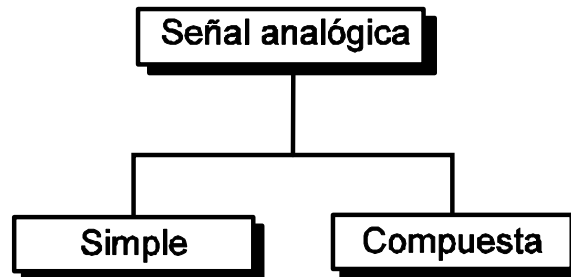


Figura 2-8. Clasificación de señales analógicas.

2.4.1. Señales analógicas simples

La **señal analógica simple**, también denominada “onda seno” u “onda sinusoidal”, es la forma más simple de onda analógica periódica, y no puede ser descompuesta en señales más simples. Está formada por arcos senos centrados en el eje horizontal (Figura 2-9).

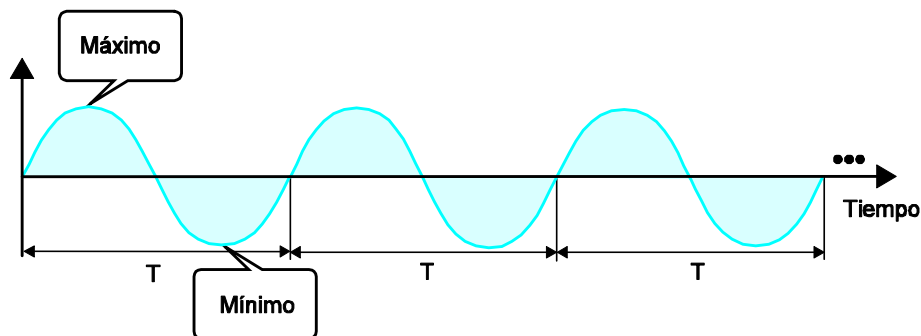


Figura 2-9. Señal analógica simple.

Una señal analógica se describe perfectamente mediante sus tres características:

- Amplitud (A)
- Periodo (T) / frecuencia (f)
- Fase (P)

2.4.1.1. Amplitud

La **amplitud (A)** de una señal es el valor de dicha señal en un instante determinado. Gráficamente viene representado por la distancia en el eje vertical. Las señales electromagnéticas utilizadas en transmisión de datos se miden en diferentes unidades, dependiendo del tipo de señal, según se indica en la tabla siguiente:

Tipo de señal	Unidad
Voltaje	Voltio (V)
Corriente	Amperio (A)
Potencia	Watio (W)

2.4.1.2. Periodo/frecuencia

El **periodo (T)** de una señal electromagnética hace referencia al tiempo, en segundos, que tarda la señal en completar un ciclo.

La **frecuencia (f)** hace referencia al número de ciclos completados por unidad de tiempo, es decir, número de ciclos completados por segundo. Por tanto, es fácil deducir la relación inversa entre ambas magnitudes:

$$f = \frac{1}{T} \quad T = \frac{1}{f}$$

Y cuyas unidades son:

$$[f] = [\text{Hertz}] = [\text{Hz}]$$

$$[T] = [\text{Segundo}] = [\text{seg}]$$

Así como las diferentes unidades y sus equivalencias, relacionados en la siguiente tabla:

Frecuencia (f)		Periodo (T)	
Unidad	Equivalencia	Unidad	Equivalencia
<i>hertz (Hz)</i>	<i>1 Hz</i>	<i>segundo (s)</i>	<i>1 s</i>
<i>kilohertz (KHz)</i>	<i>10³ Hz</i>	<i>milisegundo (ms)</i>	<i>10⁻³ s</i>
<i>megahertz (MHz)</i>	<i>10⁶ Hz</i>	<i>microsegundo (?s)</i>	<i>10⁻⁶ s</i>
<i>gigahertz (GHz)</i>	<i>10⁹ Hz</i>	<i>nanosegundo (?s)</i>	<i>10⁻⁹ s</i>
<i>terahertz (THz)</i>	<i>10¹² Hz</i>	<i>picosegundo (?s)</i>	<i>10⁻¹² s</i>

Como se ha descrito anteriormente, la frecuencia indica el número de ciclos completados por unidad de tiempo. No obstante, otro aspecto de la frecuencia, más utilizado en transmisión de datos, es el que da idea de la **tasa de cambios** con respecto al tiempo.

Por ejemplo, una señal con frecuencia de *120 Hz*, es el doble en frecuencia (y ciclos completados) que una señal con frecuencia *60 Hz*. Así, también es frecuente el concepto de **frecuencia alta** cuando se producen muchas oscilaciones por unidad de tiempo, y **frecuencia baja** cuando, por el contrario, se producen pocas oscilaciones por unidad de tiempo. De la misma forma, cuando una señal no oscila a lo largo del tiempo, en este caso estamos ante una señal de **frecuencia cero**; por el contrario, cuando una señal oscila muy rápidamente, de forma instantánea, entonces estamos ante una señal de periodo cero, y por tanto, **frecuencia infinita**.

2.4.1.3. Fase

La **fase (P)** ("Phase") describe la posición de la onda respecto al punto de origen, es decir, respecto al punto de *tiempo* = 0. Las unidades utilizadas son en **grados** o **radianes**. De forma que existe una relación de la fase de una señal y su desplazamiento respecto al punto origen (Figura 2-11).

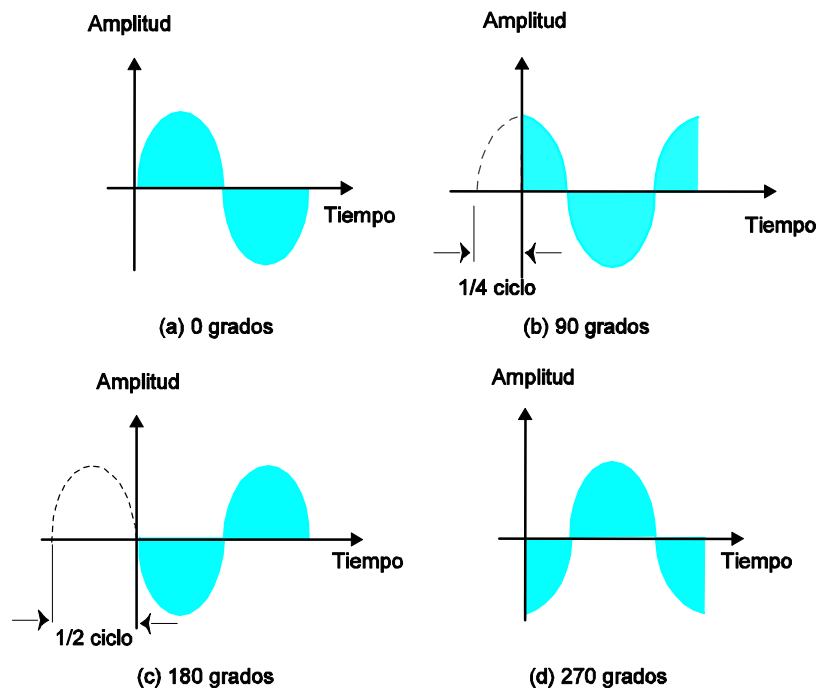


Figura 2-11. Relación entre las fases de una señal.

Volviendo a las magnitudes de amplitud, frecuencia y fase, en transmisión de datos, dónde realmente se hace un uso exhaustivo de estas magnitudes es utilizando la característica del cambio de alguna de estas magnitudes, o cambio en varias de las magnitudes. Así, aparecen los términos de **cambio de amplitud** (Figura 2-12), **cambio de frecuencia** (Figura 2-13) o **cambio de fase** (Figura 2-14). Estas técnicas son generadas y detectadas por los equipos utilizados en transmisión de datos, y básicamente, los equipos de transmisión de datos actuales utilizan alguna o varias de estas técnicas descritas.

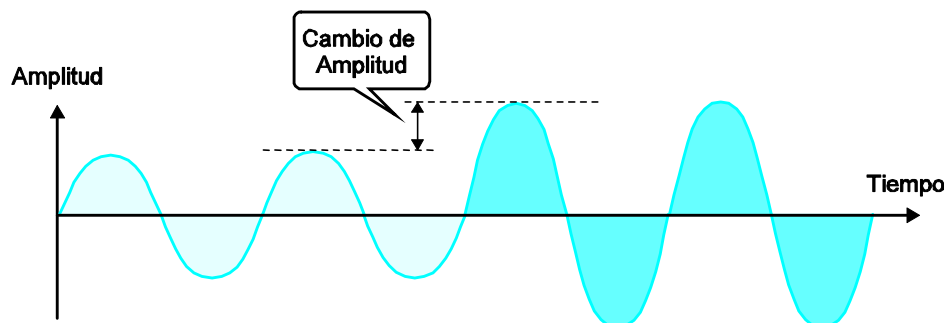


Figura 2-12. Cambio de amplitud.

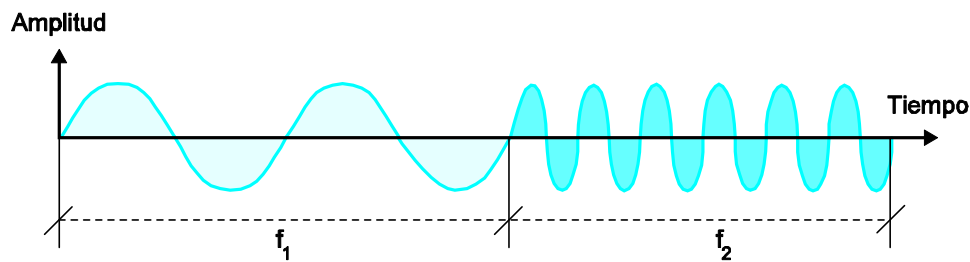


Figura 2-13. Cambio de frecuencia.

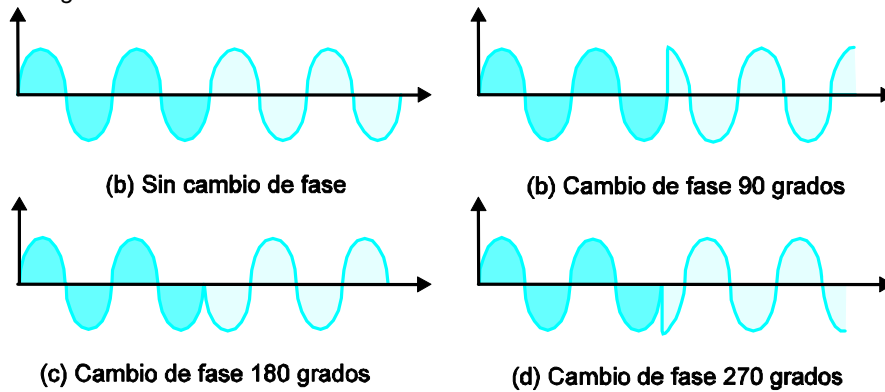


Figura 2-14. Cambio de fase.

Hasta ahora hemos venido utilizando la representación gráfica de señales denominada **dominio del tiempo** (Figura 2-15 (a)), donde mediante un par de ejes perpendiculares se representa la amplitud de la señal frente al tiempo.

Como sabemos, las tres propiedades que definen perfectamente una señal son amplitud, frecuencia y fase, por tanto, con el esquema basado en el dominio del tiempo no ofrece una representación completa de la señal, y por ello se utiliza el esquema denominado **dominio de la frecuencia** (Figura 2-15 (b)), donde se obtiene una representación conjunta de las tres magnitudes y su relación entre ellas, representando la señal como una serie de componentes de frecuencia. Se utilizan dos representaciones basadas en el dominio de la frecuencia:

- **Máxima amplitud frente a frecuencia.**
- **Fase frente a frecuencia**

No obstante, el primer tipo, el que representa en un par de ejes de coordenadas la máxima amplitud frente a la frecuencia es el más utilizado, especialmente cuando es necesario descomponer una señal cualquiera en sus distintas componentes de frecuencia, muy utilizado en transmisión de datos.

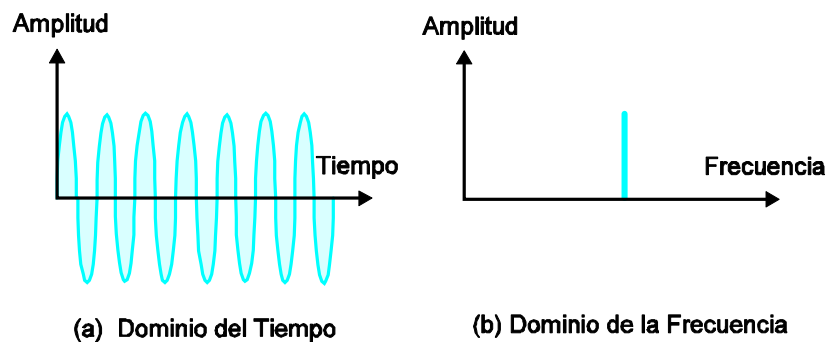


Figura 2-15. Representaciones en el dominio de la frecuencia.

La *Figura 2-16* ilustra varias representaciones gráficas de una misma señal, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. Podemos observar la relación entre ambas representaciones gráficas, así, se aprecia que una señal con un periodo largo (*Figura 2-16 (a)*) corresponde a una señal de baja-frecuencia, y viceversa. La *Figura 2-19 (b)* ilustra una determinada señal, con 8 ciclos por segundo, lo que corresponde a una valor de frecuencia $f=8$, representado en el dominio de la frecuencia. Finalmente, la *Figura 2-16 (c)* muestra una señal de alta frecuencia y, por tanto, con valor de periodo T bajo, mostrado en el dominio del tiempo.

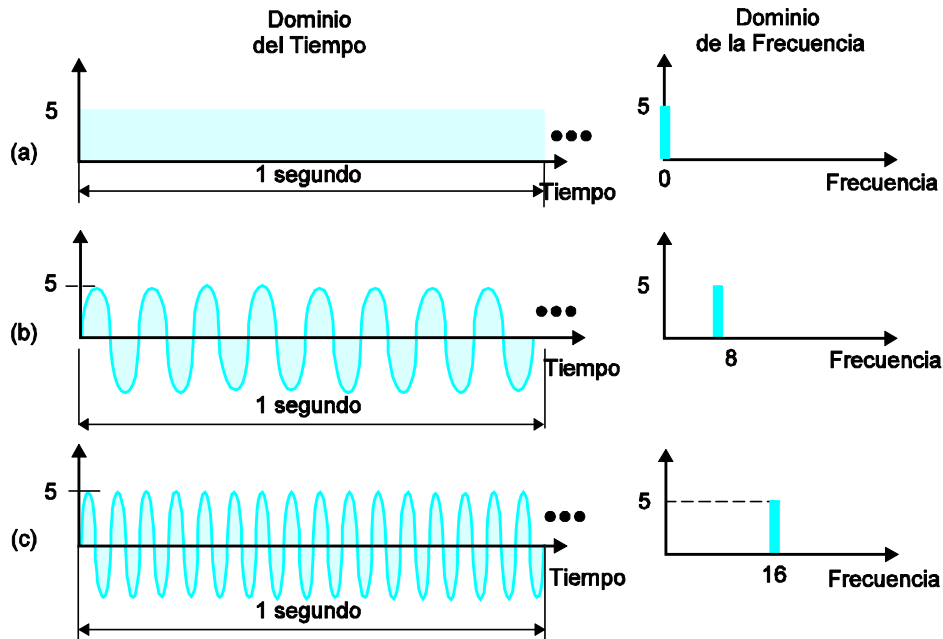


Figura 2-16. Representaciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

2.4.2. Señales analógicas compuestas

La señal periódica más simple es la denominada onda seno u onda sinusoidal, pero, evidentemente, no todas las señales periódicas se presentan de esta forma, sino que pueden tener diferentes comportamientos y características. Con la transformada de Fourier, cualquier señal puede ser descompuesta en sus diferentes componentes de la forma señal sinusoidal y de diferentes frecuencias, es decir, a partir de una señal periódica compuesta cualquiera, se pueden obtener las diferentes señales sinusoidales simples, perfectamente caracterizadas por su amplitud, frecuencia y fase.

La *Figura 2-17 (a)* muestra una señal periódica compuesta, representada en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, y podemos apreciar la descomposición de dicha señal compuesta en sus diferentes componentes de frecuencias. La *Figura 2-17 (b)* ilustra una de las señales sinusoidales simples obtenida, con valores de $f_1 = 6$ y $A_1 = 7$, y la *Figura 2-17 (c)* representa otra señal sinusoidal simple obtenida, con valores de $f_2 = 0$ y $A_2 = 10$.

Gráficamente se puede apreciar que a partir de las señales simples se puede reconstruir la señal compuesta original, donde se aprecia un desplazamiento de la onda sinusoidal sobre el eje vertical, debido a su **componente continua** (DC, "Direct Current"). Se dice que una señal tiene una componente continua, si contiene alguna componente de frecuencia de valor cero y, por tanto, la amplitud media es mayor que cero.

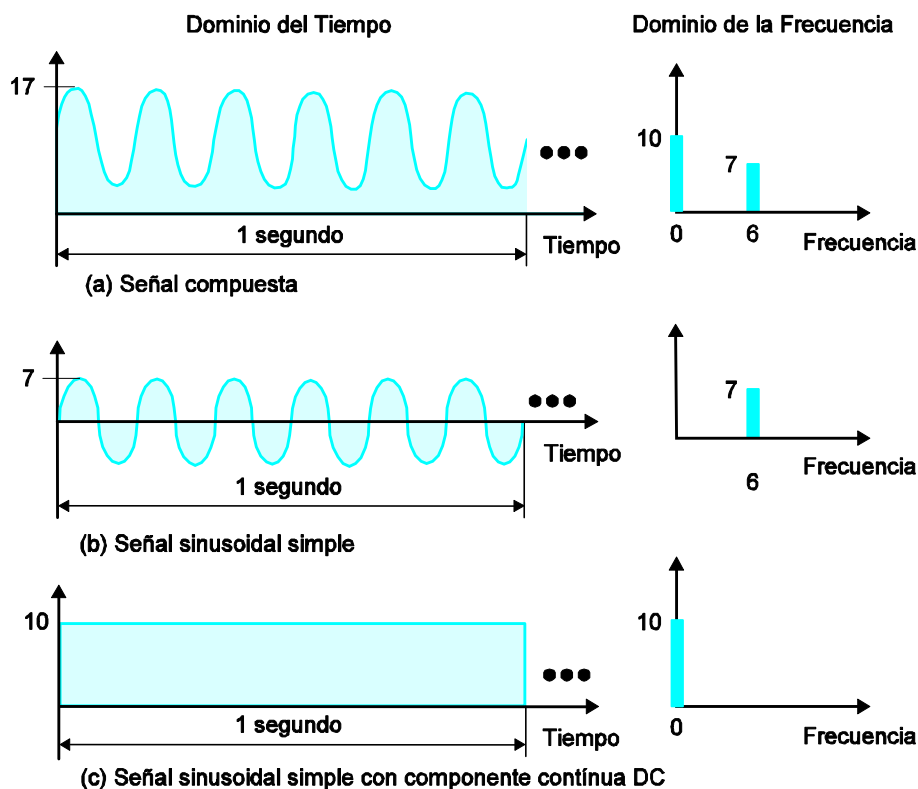


Figura 2-17. Una señal con Componente continua DC.

La *Figura 2-18* muestra una señal periódica compuesta y su descomposición en las diferentes componentes de frecuencias.

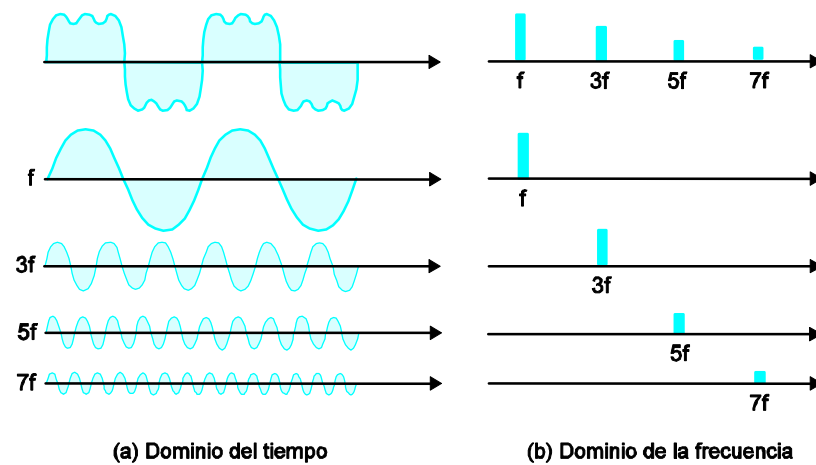


Figura 2-18. Onda compuesta.

2.4.3. Espectro de frecuencias y ancho de banda

El término **espectro de frecuencias** de una señal hace referencia al conjunto de todas las componentes de frecuencias que contiene. Se utiliza el dominio de frecuencias para su representación.

El **ancho de banda (B)** de una señal se refiere a la anchura de su espectro de frecuencias, es decir, el rango de componentes de frecuencias de una señal. El ancho de banda corresponde a la diferencia entre las frecuencia más alta y la frecuencia más baja (*Figura 2-19*)

$$B = [\text{Hertzio}] = [\text{Hz}]$$

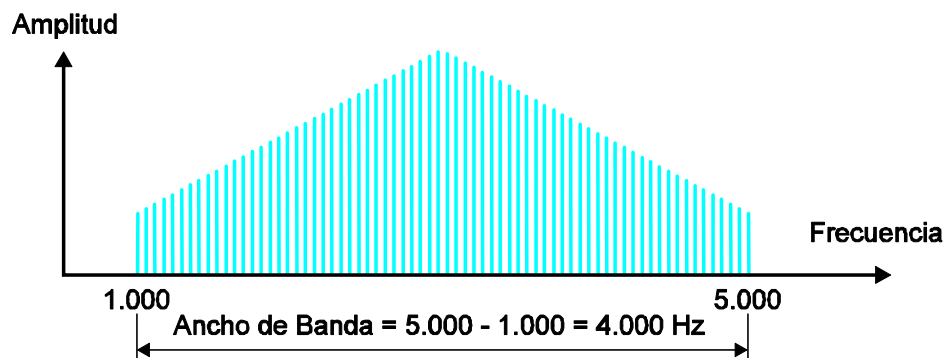


Figura 2-19. ancho de banda.

2.5. Señales digitales

Ya hemos indicado que la información (datos) puede tener una naturaleza tanto digital como analógica y que, por tanto, las señales también son susceptibles de esta clasificación. La *Figura 2-20* muestra una cadena de bits (información digital) que se representa mediante una señal digital, denominada también, “onda cuadrada” o “tren de pulsos”.

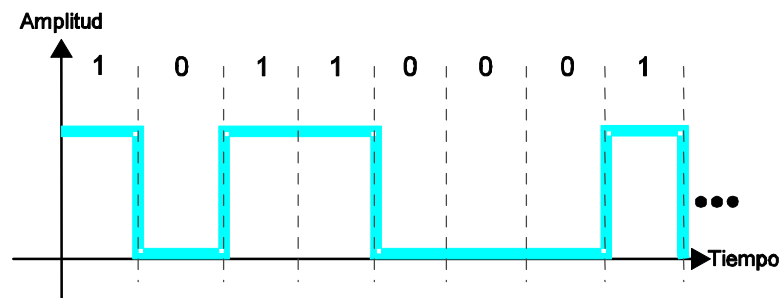
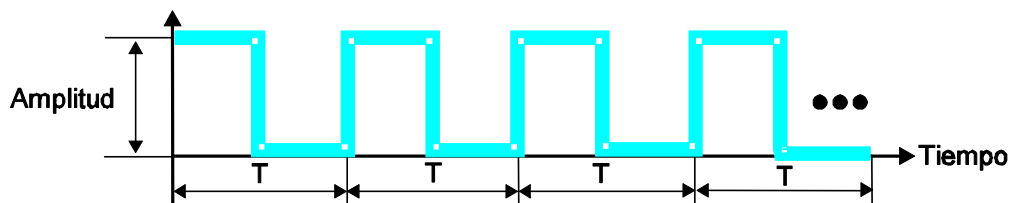
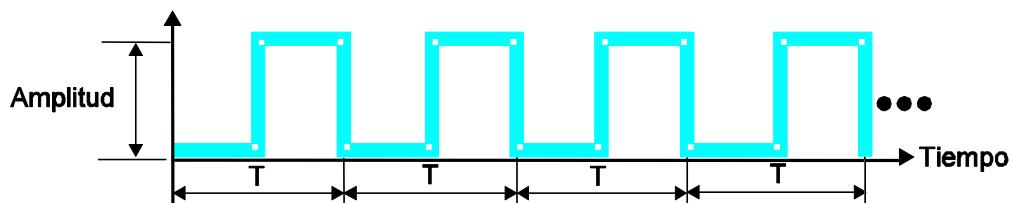


Figura 2-20. Una señal digital.

Al igual que las señales periódicas analógicas, las señales digitales también se definen perfectamente mediante sus tres características (*Figura 2-21*): amplitud, frecuencia y fase.



(a) Sin desplazamiento de fase



(b) Desplazamiento de fase 180 grados

Figura 2-21. Amplitud, periodo y fase en una señal digital periódica.

No obstante, en transmisión de datos mediante señales digitales, los términos frecuencia y periodo ya no son apropiados, utilizándose en este caso los conceptos:

- **Intervalo de bit (seg):** tiempo necesario para representar un bit. Sería el equivalente a periodo.
- **Tasa de bit/velocidad de transferencia/velocidad de transmisión (bps):** número de intervalos de bit por segundo o cantidad de bits transmitidos por segundo. Equivalente a la frecuencia.

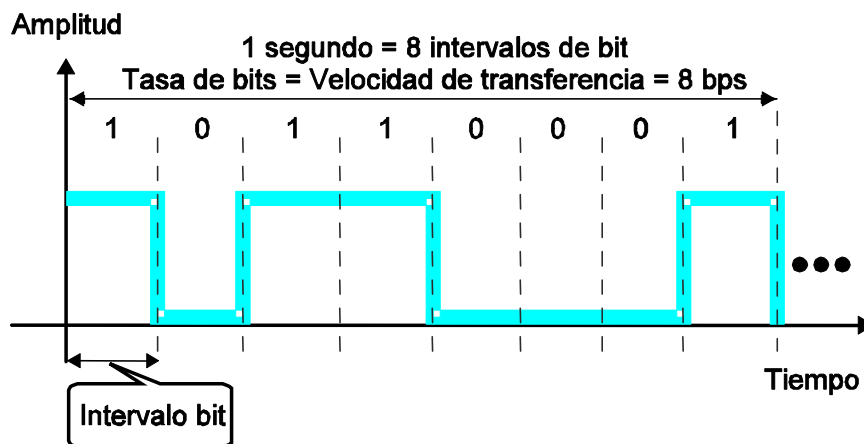


Figura 2-22. Intervalo de bit y velocidad de transferencia.

Como ya sabemos, la transformada de Fourier proporciona una herramienta para descomponer una señal digital en sus infinitas señales sinusoidales, cada una con sus valores de amplitud, frecuencia y fases. Estas infinitas señales sinusoidales se denominan **armónicos, componentes o espectro de frecuencias** de una señal.

La Figura 2-23 muestra la descomposición en los infinitos armónicos de una señal digital. Se puede apreciar como, progresivamente, el primer armónico consiste en una representación muy lejana de una señal digital (Figura 2-23 (a)). La Figura 2-23 (b), que muestra los armónicos primero, tercero y quinto, ya proporciona una idea más aproximada de la señal digital, pero con cierto grado de indefinición, y así continuaría el proceso hasta llegar a la obtención de los infinitos armónicos de una señal digital (Figura 2-23 (d)), que ya representa una señal digital perfectamente definida.

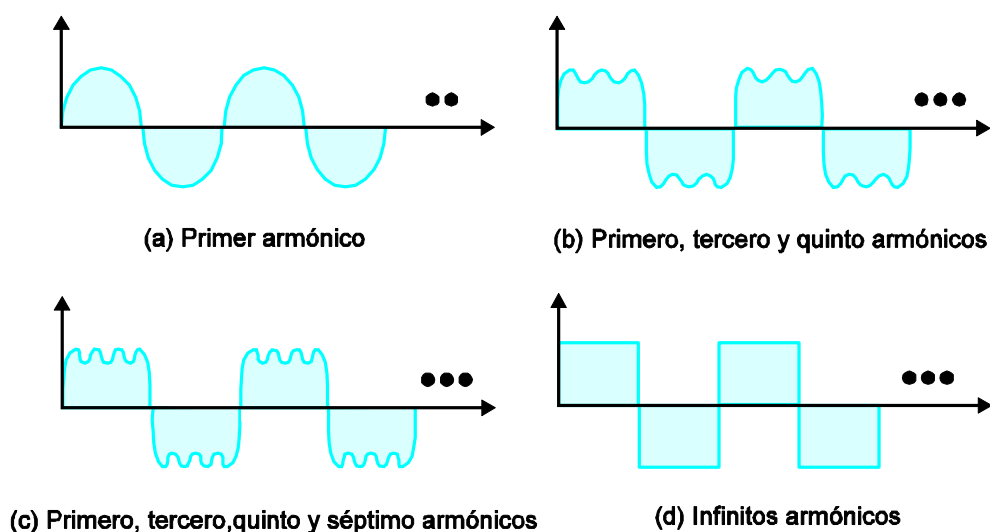


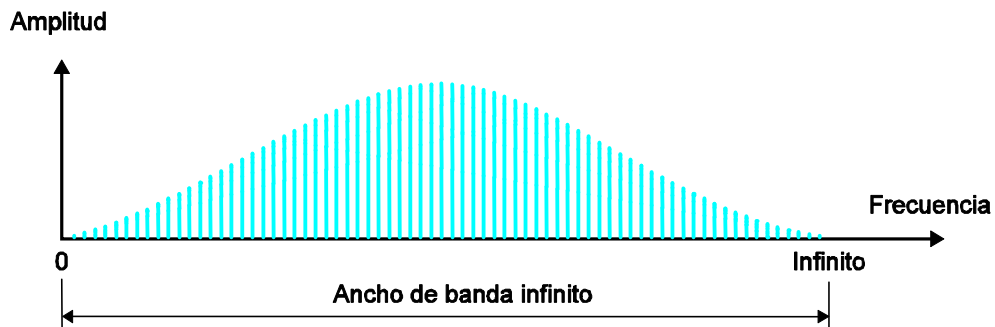
Figura 2-23. Descomposición en armónicos de una señal digital.

La transmisión de una señal digital a través de un medio de transmisión (como por ejemplo, cable coaxial o fibra óptica), consiste en la transmisión de todas y cada una de estas infinitas señales sinusoidales o componentes de frecuencias de la señal original, dicha señal (formada por el conjunto de componentes de frecuencias) viajará a través del medio de transmisión. En el receptor, se debe reconstruir la señal original a partir de las infinitas componentes de frecuencias recibidas

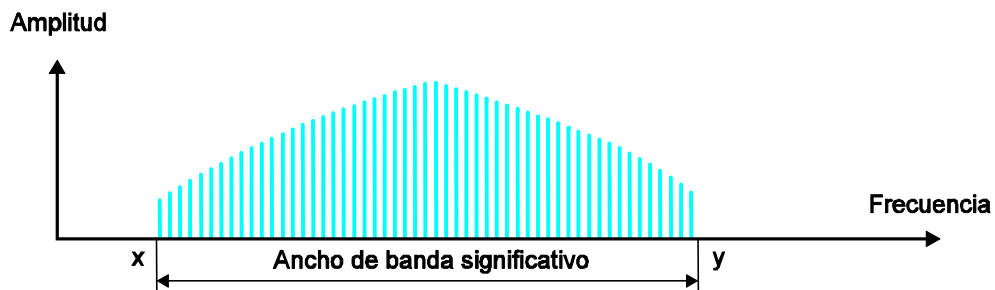
Como veremos más adelante, los medios de transmisión no son capaces de transportar las infinitas frecuencias de una señal, este fenómeno se conoce como **ancho de banda limitado**, lo que origina fenómenos de distorsión en la señal. Hay que destacar que dichos fenómenos de distorsión de la señal se pueden minimizar en la medida de lo posible, pero nunca eliminar por completo. Todos los medios de transmisión disponen de un ancho de banda limitado. Esta limitación en el ancho de banda o cantidad de frecuencias que puede transportar un determinado medio de transmisión, origina fenómenos de distorsión no deseados en la señal.

Para eliminar en la medida de lo posible los fenómenos de distorsión en la señal, y dado que podemos transmitir una señal digital solamente enviando un rango de componentes de frecuencias, los suficientes como para ser detectado en el receptor los diferentes estados de bit, se utiliza el concepto de **espectro significativo** y **ancho de banda significativo** (Figura 2-24), haciendo referencia a la cantidad de frecuencias necesarias para transmitir y ser detectados en el receptor los diferentes estados de bit, tanto '0' como '1'.

Debe de existir una correlación entre el espectro significativo de una señal y, por tanto, su ancho de banda significativo, y el ancho de banda del medio de transmisión, de forma que, a mayor ancho de banda de la señal, mayor debe ser el ancho de banda del medio, de forma que permite la transmisión de todas las frecuencias contenidas en el espectro de frecuencias significativo de la señal.



(a) Espectro de frecuencias real



(b) Espectro de frecuencias significativo

Figura 2-24. Espectro de frecuencias real y significativo.

Si el ancho de banda del medio de transmisión es menor que el ancho de banda de la señal, se producen fenómenos de **distorsión** en la señal (Figura 2-25).

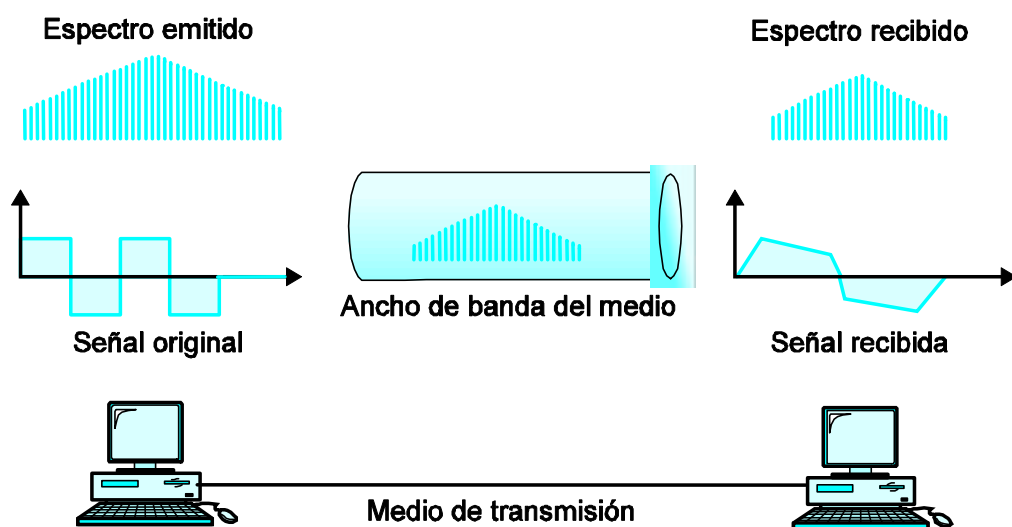


Figura 2-25. Corrupción de una señal digital debido a ancho de banda insuficiente del medio.

2.6. Transmisión de señales: analógica y digital

En la transmisión de señales se debe tener en cuenta la naturaleza de las propias señales, como se propagan físicamente, y qué procesamientos o ajustes se necesitan a lo largo del camino para asegurar que las señales sean recibidas correctamente. Toda transmisión entre un emisor y un receptor se realiza siempre a través de un medio de transmisión, que es el sistema (físico o no) por el que viaja la información transmitida (datos, voz, audio, etc.) entre dos o más puntos distantes entre sí. Por el medio de transmisión viajan ondas electromagnéticas, que son las que realmente contienen la información. En relación a la naturaleza del medio, se clasifican:

- **Medios Guiados:** aquellos en los que la señal electromagnética viaja confinada en algún medio físico de transmisión. Los medios de transmisión guiados más comunes son: par trenzado, cable coaxial y fibra óptica.
- **Medios No Guiados:** en este tipo de medio, las ondas electromagnéticas se transmiten sin ser encauzadas en ningún medio físico, por ejemplo, en aire, agua o vacío.

Con el término **enlace directo** se hace referencia al camino de transmisión entre dos dispositivos en el que la señal se propaga directamente del emisor al receptor sin ningún otro dispositivo intermedio que no sea un amplificador o repetidor. El término enlace directo se aplica tanto a medios guiados como no guiados.

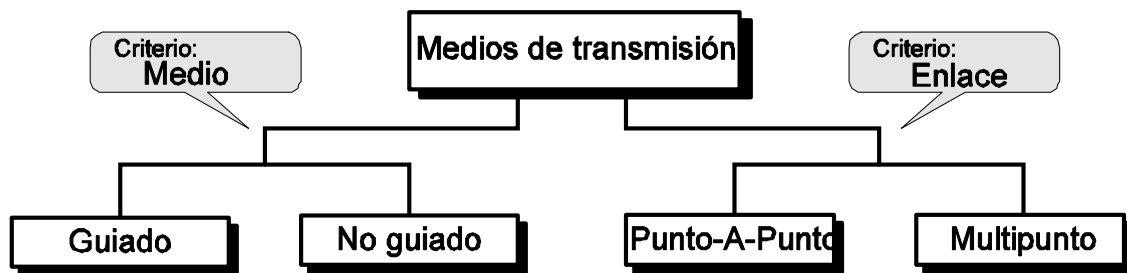


Figura 2-26. Esquema medios de transmisión.

Otra clasificación de los medios de transmisión, en cuanto al tipo de enlace al medio por los diferentes dispositivos:

- **Punto a punto:** se establece un enlace directo entre los dos únicos dispositivos que comparten el medio de transmisión (*Figura 2-27 (a)*).
- **Multipunto:** cuando el medio de transmisión es compartido por más de dos dispositivos (*Figura 2-27 (b)*).

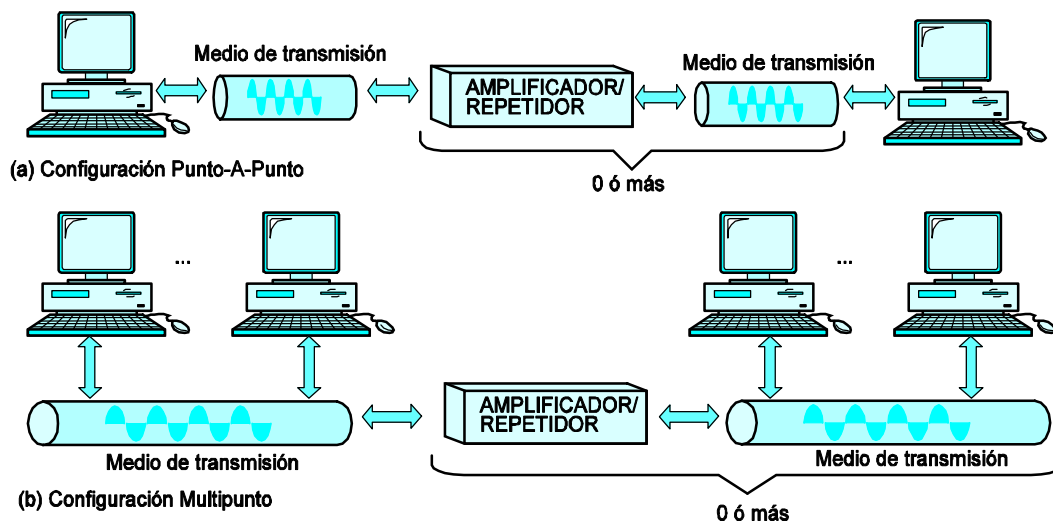


Figura 2-27. Configuración del medio de transmisión.

2.6.1.transmisión

Tanto señales analógicas como digitales se transmiten por medios de transmisión que sean adecuados a su espectro. Las señales electromagnéticas sufren una serie de alteraciones que conllevan un deterioro o distorsión de la señal, siendo necesario utilizar de equipos especiales que nos permitan alcanzar mayores distancias o en su defecto, minimizar de alguna forma estas alteraciones que afectan a las señales.

En el caso de transmisión analógica es necesario el uso de **amplificadores** para lograr distancias grandes, pues la señal se debilita con la distancia. La transmisión analógica puede transportar tanto datos analógicos, en cuyo caso los amplificadores introducen una distorsión que puede ser aceptada (por ejemplo, voz), como digitales, en cuyo caso estos errores son intolerables.

En transmisión digital, ésta sólo se puede realizar a cortas distancias, ya que la atenuación y otros elementos introducen errores en los datos. Para conseguir mayores distancias, teóricamente distancias infinitas, se hace uso de los llamados **repetidores**, cuya función es regenerar la señal a partir de otra señal atenuada, debilitada o alterada de alguna forma, pero que alcance un umbral mínimo que permita ser decodificada y vuelta de nuevo a codificar en cada salto, permitiendo con ello, en teoría, una longitud del enlace infinita.

A pesar de las grandes inversiones en transmisión analógica, se está derivando una transmisión digital generalizada, tanto a largas como cortas distancias, motivado por los siguientes hechos:

- **Abaratamiento de la tecnología:** debido a los grandes avances en escalas de integración LSI y VLSI, provocando una drástica reducción de la tecnología, mayor integración y, por tanto, reducción de costes.
- **Ruido no aditivo:** al utilizar repetidores (regeneración de la señal), en lugar de amplificadores, los errores son no acumulativos.
- **Aprovechamiento del medio:** se consiguen líneas de mayor ancho de banda con técnicas de multiplexión en el tiempo (técnicas digitales), de menor coste que las técnicas de multiplexión en frecuencias (técnicas analógicas).
- **Seguridad y privacidad:** la digitalización de los datos, tanto analógicos como digitales, permite el uso de técnicas de cifrado y encriptación.
- **Integración:** con el tratamiento digital de los datos, tanto digitales como analógicos, todas las señales se pueden tratar de forma similar, permitiendo con ello, la total integración de las diferentes señales en un mismo medio. Las actuales redes de banda ancha permiten la integración de audio, vídeo y datos sobre el mismo medio.

2.6.2. Señalización

Hasta ahora se han considerado señales analógicas para representar datos analógicos, y señales digitales para representar datos digitales. Normalmente, como ya hemos visto, los datos analógicos son función del tiempo y se representan mediante una señal electromagnética. Los datos digitales se pueden representar por señales digitales, con niveles de tensión diferente (tren de pulsos binarios) para cada uno de los dígitos binarios, utilizando para ello un codificador digital.

Señalización		
Tipo (Dato/Señal)	Descripción	Ejemplo
Analógico/Analógica	Los datos analógicos de entrada (voz), se transmiten mediante una onda electromagnética que varía continuamente (señal analógica).	Sistema telefónico
Digital/Analógico	Tren de pulsos binarios procedentes del computador (datos digitales), que se transmite a través de un medio de transmisión de calidad voz mediante una señal electromagnética continua (señal analógica), obtenida a partir de un proceso de modulación de la señal, utilizando para ello módem.	Transmisión de datos digitales a través del sistema telefónico, utilizando módem.
Analógico/Digital	Una señal analógica (voz), se convierte a una cadena de bits. En el receptor, dichos bits se usan para reconstruir los datos analógicos.	CODEC
Digital/Digital	La transmisión de datos digitales mediante señales digitales necesitan de transmisores digitales, de forma que se componga un tren de pulsos de tensión binarios a partir de los datos digitales, asignando un nivel de tensión diferente a cada dato-bit.	Transmisor digital

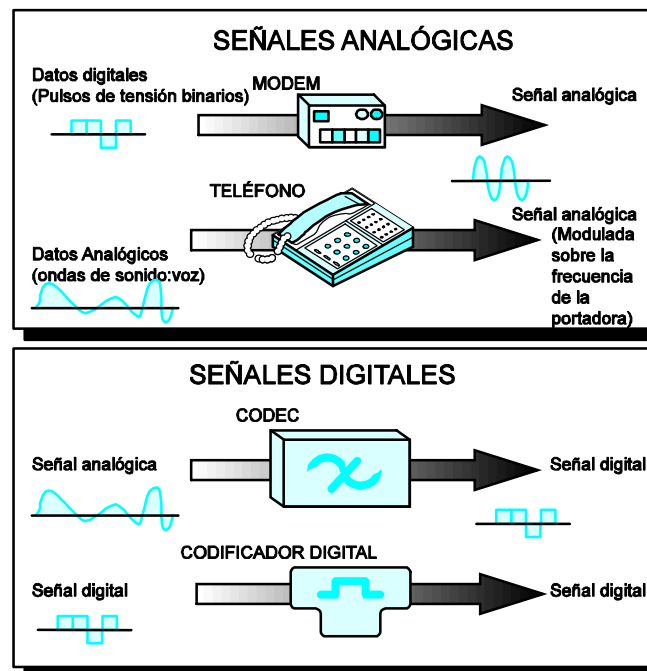


Figura 2-28. Tipos de Señalización.

2.7. Medios de transmisión

El concepto de medio de transmisión hace referencia al camino entre el transmisor y el receptor. Los medios de transmisión se clasifican en guiados (a través de un conductor) y no guiados (atmósfera o espacio), en ambos, la comunicación se realiza mediante ondas electromagnéticas.

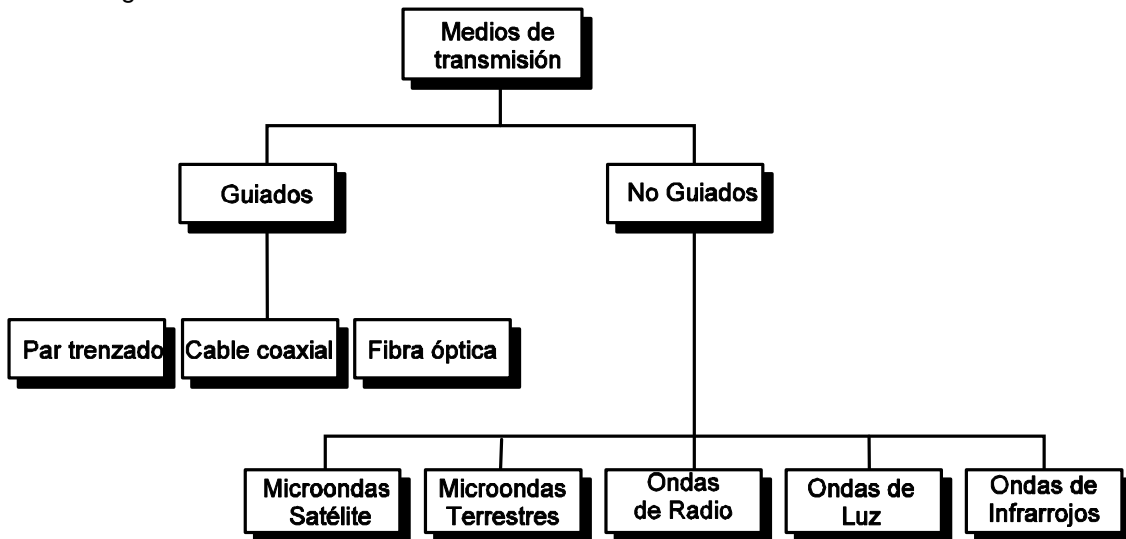


Figura 2-29. Esquema medios de transmisión.

Las características y calidad de la transmisión están determinadas tanto por el tipo de señal, como por las características del medio. En el diseño de sistemas de transmisión es deseable que tanto la distancia como la velocidad de transmisión sean lo más grandes posibles. Hay una serie de factores relacionados con el medio de transmisión y con la señal que determinan tanto la distancia como la velocidad de transmisión:

- **Ancho de banda:** en condiciones ideales, al aumentar el ancho de banda de la señal, la velocidad de transmisión puede incrementarse. En la práctica, como hemos visto, la velocidad de transmisión viene determinado por el ancho de banda del medio.
- **Dificultades en la transmisión:** atenuación, ruido, retardos, etc., y en general, fenómenos físicos no deseables y que producen un deterioro de la transmisión, y por tanto, una disminución de velocidad de transmisión.
- **Interferencias:** producidas por campos electromagnéticos cercanos a la banda. Especialmente importantes en medios no guiados.
- **Número de receptores:** los medios guiados se pueden utilizar como enlace punto a punto o como enlace compartido, en este caso, cada uno de los conectores puede atenuar y distorsionar la señal, disminuyendo la velocidad y distancia.

En la *Figura 2-30* se muestra el espectro electromagnético, así como la frecuencia a la que operan diferentes técnicas de transmisión sobre medios guiados y no guiados.

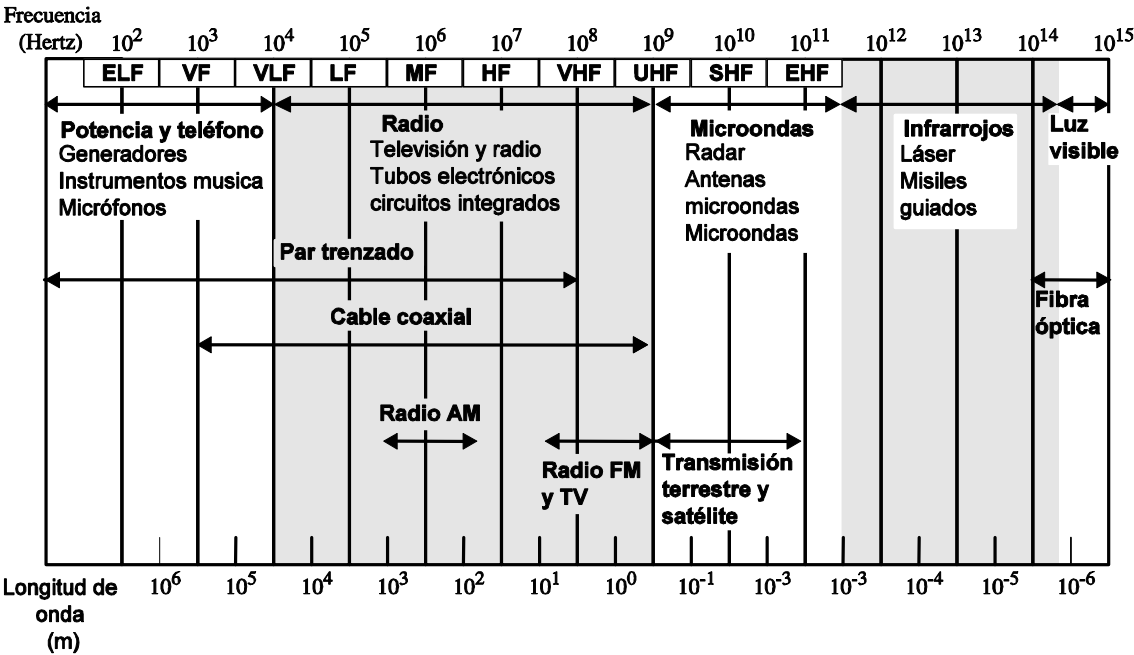


Figura 2-30. Espectro electromagnético para las comunicaciones.

2.7.1. Medios de transmisión guiados

Los medios de transmisión guiados son los que proporcionan un conducto cerrado desde un dispositivo a otro. En este tipo de medios, la capacidad de transmisión, en términos de velocidad de transmisión o ancho de banda, depende drásticamente de la distancia o de si el medio se utiliza para un enlace punto a punto o como medio compartido (por ejemplo, LAN). Los medios más utilizados para la transmisión de datos son: par trenzado, cable coaxial y fibra óptica

En la *Figura 2-32* se indican las prestaciones típicas de los medios guiados más comunes para aplicaciones punto a punto de larga distancia, y la *Figura 2-33* el comportamiento en frecuencia de los distintos medios guiados.

Medio de transmisión	Razón De datos total	ancho de banda	Separación Entre repetidores
par trenzado	4 Mbps	3 MHz	2 a 10 Km
cable coaxial	500 Mbps	350 MHz	1 a 10 Km
fibra óptica	2 Gbps	2 GHz	10 a 100 Km

Figura 2-32. Características de transmisión en medios guiados punto a punto.

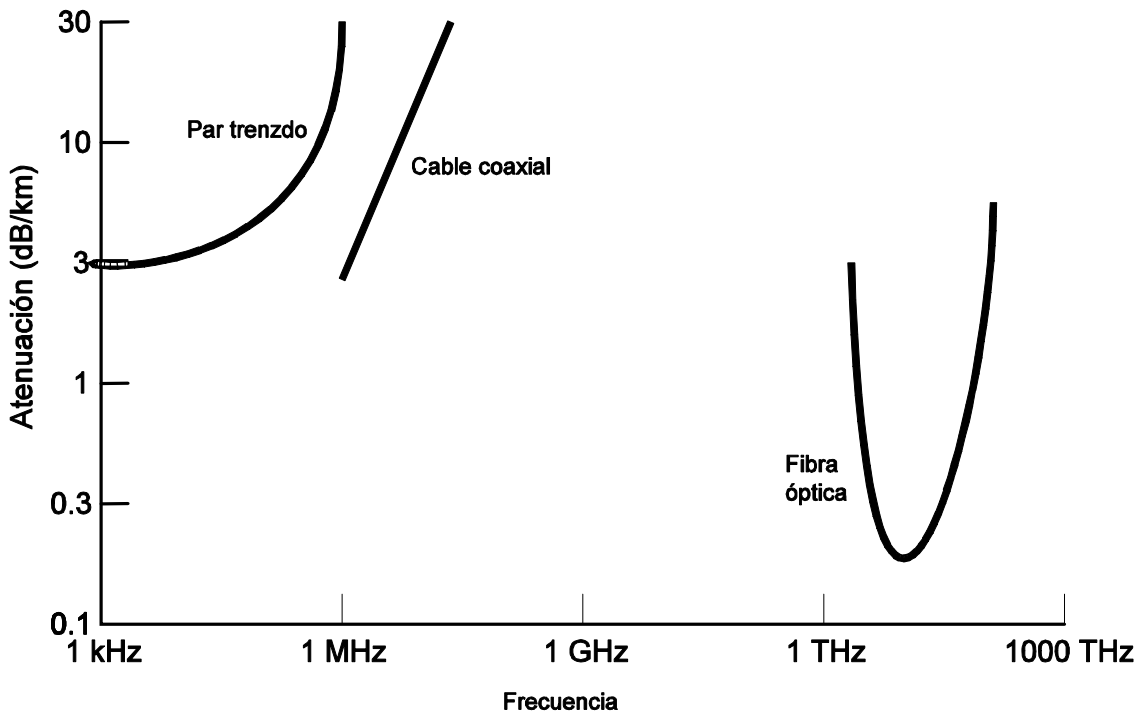


Figura 2-33. Atenuación en medios guiados.

2.7.1.1. Par trenzado

El cable de par trenzado sin apantallar UTP (“*Unshielded Twisted-Pair*”) es el soporte de transmisión más antiguo, más económico y por lo tanto, más utilizado para telecomunicaciones. Aunque su uso principal es en telefonía, su rango de frecuencias (100 Hz - 5 MHz) permite la transmisión tanto de voz como de datos.

Consiste en dos hilos de cobre aislados, en general de 1 mm. de espesor, enlazándose en forma helicoidal (*Figura 2-34*). La forma trenzada del cable se utiliza para reducir la interferencia eléctrica respecto a pares cercanos que se pudieran encontrar a su alrededor (diafonía) o dentro de la misma envoltura.

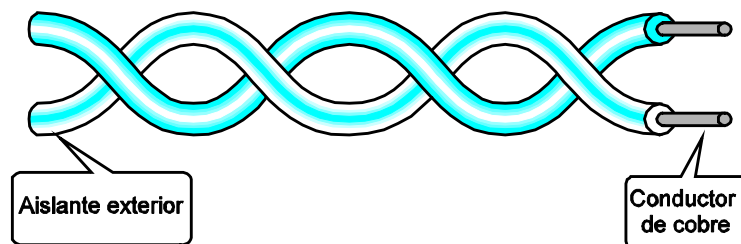


Figura 2-34. Par trenzado.

Los pares trenzados se pueden utilizar tanto para transmisión analógica (amplificadores cada 5/6 Km), como para transmisión digital (repetidores cada 2/3 Km), y el ancho de banda depende del calibre del hilo y de la distancia que recorre. Debido a su adecuado comportamiento y bajo costo, el par trenzado se utiliza ampliamente en LAN, incluyendo Token Ring y Ethernet. El mayor inconveniente es que son susceptibles a interferencias externas, como campos electromagnéticos y el ruido impulsivo. Para reducir el efecto de las perturbaciones externas se pueden tomar algunas medidas, tales como el apantallamiento con malla metálica del cable, para reducir las interferencias externas; el trenzado reduce las interferencias de baja frecuencia y el uso de distintos pasos de torsión entre pares adyacentes reduce la diafonía.

El tipo de par trenzado más extendido es del tipo sin apantallar, UTP, que como hemos dicho, es el más económico, utilizado en redes de área local y muy fácil de instalar y manipular. Típicamente se utilizan haces de pares encapsulados en una misma envoltura, con pasos de torsión diferentes para reducir interferencias (*Figura 2-35*).

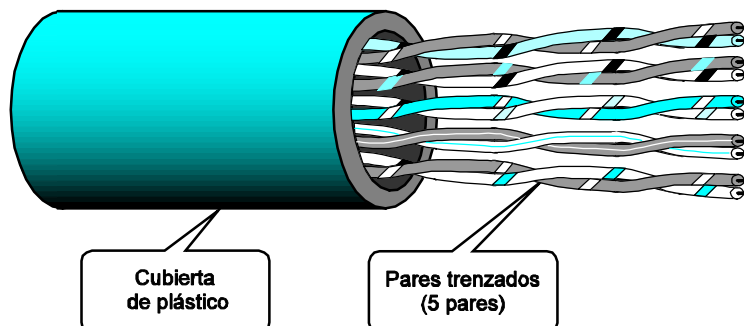


Figura 2-35. Cable con 5 pares trenzados sin apantallar.

La Asociación de Industrias de Electrónica (EIA: "*Electronic Industries Association*") ha desarrollado estándares para clasificar los cables de pares trenzados en función de su calidad. Las categorías las determina la calidad del cable, variando desde categoría 1 (menor calidad) hasta categoría 5 (mayor calidad):

- **Categoría 1:** cable básico utilizado en telefonía. Es aceptable para voz, pero inadecuado para cualquier tipo de transmisión de datos, por muy baja que sea la velocidad.
- **Categoría 2:** voz y transmisión digital hasta 4 Mbps.
- **Categoría 3:** la especificación dice que debe tener al menos 3 giros cada 30 cm. Se puede utilizar para transmisión de datos hasta 10 Mbps. Es actualmente el estándar en telefonía.
- **Categoría 4:** igual que el anterior además de otras condiciones que le permiten hasta 16 Mbps.
- **Categoría 5:** es el cable de par trenzado de mayor calidad. Permite transmisión de datos hasta 100 Mbps.

Existe una variante, el par trenzado apantallado (STP: "*Shielded Twisted Pair*"), proporciona mejores resultados a velocidades bajas, por el contrario, es más caro y difícil de manipular que el UTP.

2.7.1.2. Cable coaxial

Está formado por un hilo rígido de cobre en su parte central, que constituye el núcleo, rodeado por un material aislante, generalmente plástico, a su vez, el material aislante está rodeado por un conductor cilíndrico en forma de malla de tejido trenzado. El conductor externo, finalmente, se encuentra cubierto por una capa de plástico protector (*Figura 2-36*).

Debido al tipo de apantallamiento realizado, es decir, a la disposición concéntrica de los dos conductores, el cable coaxial es mucho menos susceptible a diafonías e interferencias que el par trenzado, además se puede utilizar para cubrir mayores distancias, tiene mayor ancho de banda y posibilidad de conectar un número de estaciones en una línea compartida. Sus principales limitaciones son la atenuación, el ruido térmico y el ruido de intermodulación, este último aparece sólo cuando se usan simultáneamente varios canales o bandas de frecuencias.

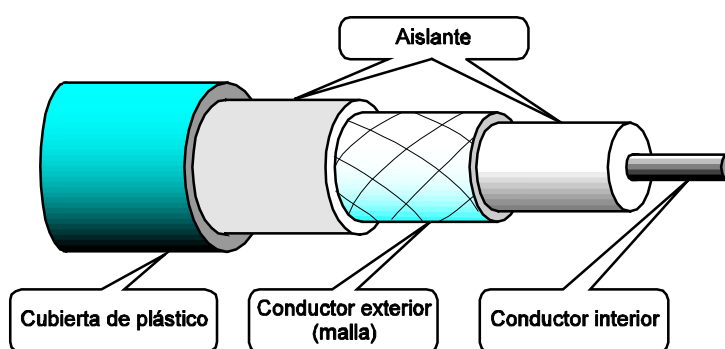


Figura 2-36. Cable coaxial.

Se distinguen dos tipos de cable coaxial:

- **Transmisión banda-base:** empleado para señal digital con cable de 50 Ω con el que, para distancias de hasta 1 Km, se pueden conseguir velocidades de hasta 10 Mbps.
- **Transmisión banda-ancho:** utilizado para transmisión analógica con cable de 75 Ω para aplicaciones que necesiten hasta 300 MHz, consiguiendo velocidades de transmisión de hasta 150 Mbps, por tratarse de señal analógica, que siempre es menos crítica que la digital.

El cable coaxial es de aplicación en una gran variedad de aplicaciones. Las más importantes son:

- TV por cable
- Telefonía a larga distancia
- Conexión de periféricos a corta distancia
- Redes de área local LAN

Normalmente, los sistemas de banda ancha se dividen en varios canales, por ejemplo, los canales de 6 MHz utilizados para TV por cable. Cada uno de los canales se pueden emplear para transmisión de señales analógicas (vídeo, voz, audio) o digitales. En el mismo cable se pueden mezclar las señales de TV y datos.

Hay muchos tipos de conectores estandarizados para su uso con el cable coaxial, aunque los principales son el BNC (Bayonet Network Connector) y la T.

2.7.1.3. Fibra óptica

Un cable de fibra óptica tiene forma cilíndrica y está formado por tres secciones concéntricas: **núcleo**, **revestimiento** y **cubierta**. El núcleo es la sección más interna, está constituido por una o varias hebras o fibras muy finas de cristal o plástico. Cada fibra está rodeada por su propio revestimiento, que no es sino otro cristal o plástico con propiedades ópticas distintas a las del núcleo. La capa más exterior que envuelve a uno o varios revestimientos es la cubierta. La cubierta está hecha de plástico y otros materiales dispuestos en capas para proporcionar protección contra la humedad, abrasión, aplastamientos y otros peligros (Figura 2-37).

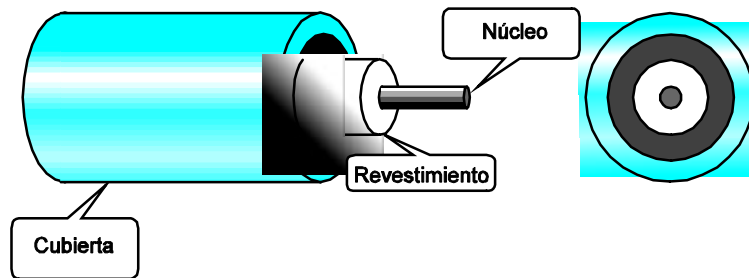


Figura 2-37. Fibra óptica.

En este medio de transmisión, la naturaleza de la señal deja de ser eléctrica para convertirse en pulsos de luz. Un pulso de luz puede utilizarse para indicar un bit de valor '1' y la ausencia de luz para indicar el '0'. La luz visible tiene una frecuencia alrededor de 108 MHz, por lo que estamos ante un ancho de banda de una potencia muy superior a los anteriormente vistos. Un sistema de transmisión basado en fibra óptica está formado por tres componentes:

- **Medio de transmisión:** fibra ultradelgada de vidrio o silicio fundido.
- **Fuente de luz:** normalmente se utiliza diodo LED (*"Light Emitting Diode"*) o diodo ILD (*"Injection Laser Diode"*), ambos con tecnología semiconductor.
- **Detector:** fotodiodo que genera un pulso eléctrico en el momento en el que recibe un rayo de luz.

Hay que tener en cuenta una serie de propiedades físicas de la luz para comprender el comportamiento de la luz dentro de la fibra. Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro, por ejemplo del silicio fundido al aire, sufre una refracción (se desvía) en la frontera de los dos medios. En la Figura 2-38 (a) se puede observar la incidencia del rayo de luz sobre dicha frontera, a un ángulo α_1 , emergiendo a un ángulo β_1 , donde la cantidad de refracción depende las propiedades de los medios, en particular, de sus índices de refracción. Para ángulos de incidencia que se encuentran por encima de un valor crítico, la luz se refracta de vuelta al silicio, nada de ella escapa al aire. De esta forma, el rayo de luz que incida por encima del mencionado ángulo crítico, queda atrapado en el interior de la fibra (Figura 2-38 (b)), y puede propagarse a lo largo e varios kilómetros sin tener, virtualmente, ninguna pérdida.

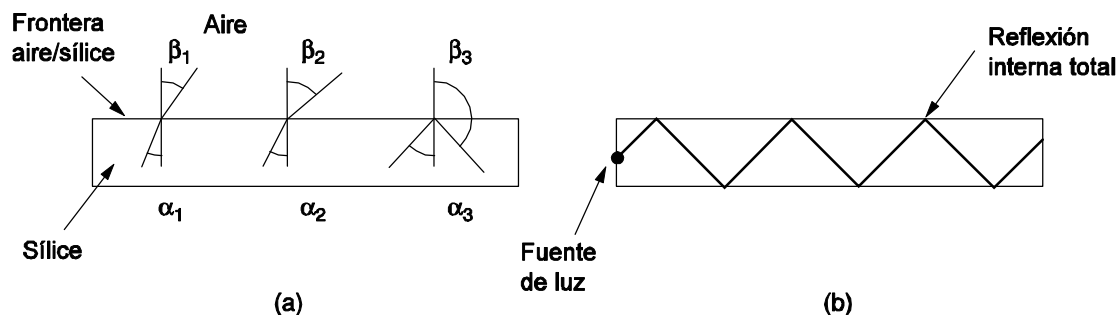


Figura 2-38. (a) Tres ejemplos de rayo de luz procedente del interior de una fibra de silicio que incide sobre la frontera aire/silicio con diferentes ángulos. (b) Luz atrapada por reflexión interna total.

En la *Figura 2-39* se ilustran varias fibras y sus modos, dependiendo de la cantidad de rayos que viajan por ella:

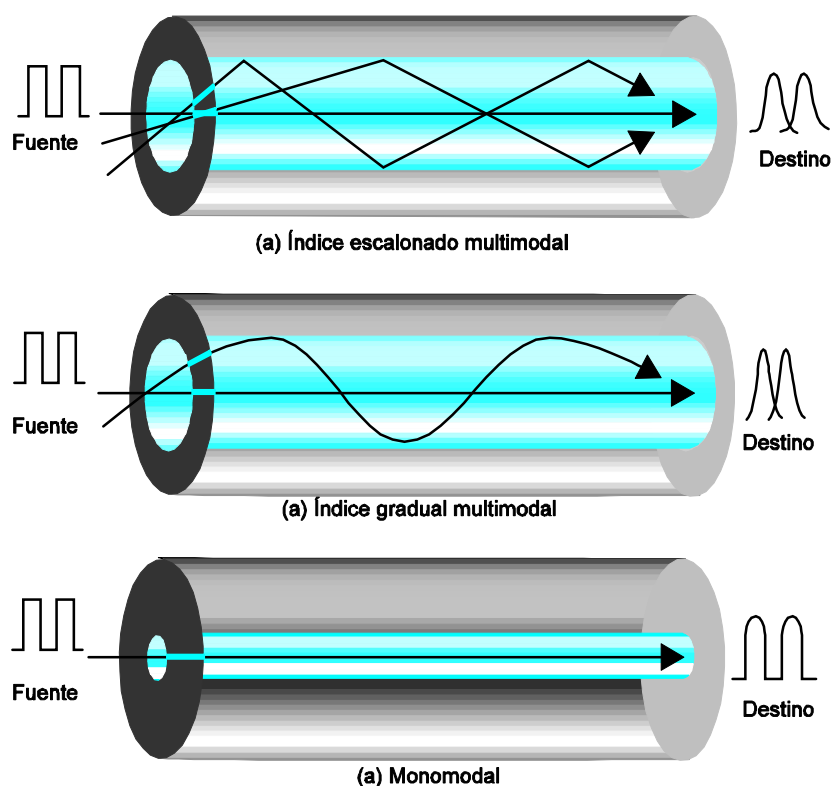


Figura 2-39. Diferentes modos en fibra óptica.

Las principales ventajas que presenta la fibra óptica, frente a los sistemas de par trenzado o cable coaxial, son las siguientes:

- **Aislamiento electromagnético:** por la propia naturaleza cuántica de la luz, le hace inmune a las interferencias de los campos electromagnéticos, no siendo, por tanto, afectados por interferencias, ruido impulsivo o diafonía. De la misma forma, la fibra óptica no produce campo electromagnético, por lo tanto, no interfiere en otros equipos.
- **Menor atenuación:** la distancia de transmisión para la fibra óptica es significativamente mayor que para cualquier otro medio guiado. Una señal puede recorrer kilómetros sin necesidad de ser regenerada.
- **Mayor ancho de banda:** la fibra óptica puede soportar anchos de banda mucho mayores que el par trenzado o el cable coaxial. Actualmente, las velocidades de transmisión y el ancho de banda utilizado en fibra óptica no están limitados por el medio, sino por la tecnología disponible en la generación y recepción de la señal.
- **Menor tamaño y peso:** la fibra de vidrio tiene un grosor mucho menor que cualquier otro medio guiado. Así, un cable de fibra óptica con cientos de fibras tan sólo tiene un par de centímetros de grosor.
- **Mayor privacidad:** Por su propia naturaleza, la fibra óptica es difícil de intervenir o, coloquialmente hablando, "pinchar".

No obstante, la aplicación de la fibra óptica presenta una serie de inconvenientes que hacen que no sea de total aplicación en todas las áreas:

- **Coste:** el cable de fibra óptica es muy caro. Cualquier impureza o imperfección en la fibra puede estropear la señal, por ello, su fabricación es extremadamente cuidadosa. También destacar que los generadores láser mantienen unos precios muy altos en la actualidad.
- **Instalación y mantenimiento:** cualquier grieta o rotura en el núcleo de la fibra causaría la alteración o pérdida de la señal. La unión de dos segmentos de fibra óptica debe ser muy precisa para que los núcleos estén perfectamente alineados.
- **Fragilidad:** la fibra de vidrio es mucho más frágil que el cobre, por lo que es menos adecuado para aplicaciones donde se necesite movilidad.

En cuanto a sus aplicaciones:

- Transmisión a larga distancia e intercontinentales
- Transmisión metropolitana
- Backbone.

Característica	LED	Semiconductor láser
Velocidad de datos	Baja	Alta
Modo	Multimodo	Multimodo o modo único
Distancia	Corta	Larga
Tiempo de vida	Vida larga	Vida corta
Sensibilidad a la temperatura	Baja	Considerable
Costo	Bajo	Elevado

Figura 2-40. Comparación de diodos semiconductores y LED como fuentes de luz.

2.7.2. Medios no guiados

También se denominan transmisiones inalámbricas. Los medios no guiados transportan las ondas electromagnéticas sin utilizar físicamente un conductor. Las señales se difunden por el aire, estando disponibles para cualquier receptor que tenga un dispositivo para recibirla, normalmente, tanto la emisión como la recepción se realizan a través de antenas. Básicamente, existen dos configuraciones para las transmisiones inalámbricas:

- **Direccional:** la antena transmisora emite la energía electromagnética concentrándola en un haz; por tanto en este caso las antenas de emisión y recepción deben estar perfectamente alineadas.
- **Omnidireccional:** el diagrama de radiación de la antena es disperso, emite en todas las direcciones.

En general, cuanto mayor es la frecuencia de la señal transmitida es más factible confinar la energía en un haz direccional.

2.7.2.1. Microondas terrestres

La transmisión por radio de microondas se ha utilizado mucho como una alternativa del cable coaxial, en aplicaciones para comunicaciones de larga distancia. Este sistema se utilizó mucho en transmisiones telefónicas y de vídeo, aunque actualmente está en declive respecto a la transmisión por fibra óptica.

Para la transmisión se utilizan antenas parabólicas, sobre un soporte rígido, situadas a una altura apreciable sobre el nivel del suelo, para conseguir mayores alcances o salvar obstáculos. La antena emite un haz estrecho, por lo que tanto la antena emisora como la receptora deben estar perfectamente alineadas. *Figura 2-41.*

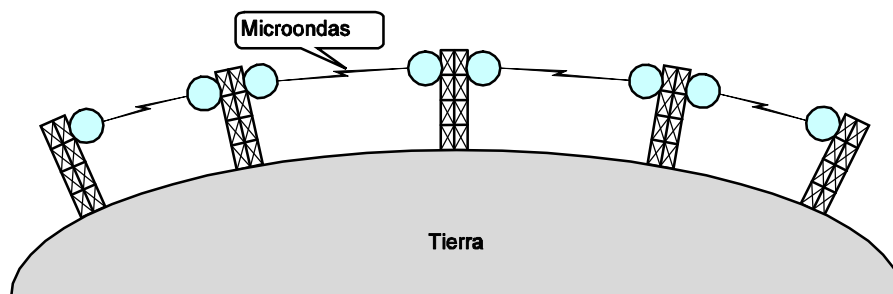


Figura 2-41. Microondas terrestres.

Las señales de microondas se propagan en una única dirección a la vez, lo que significa que se necesitan dos frecuencias distintas para una comunicación de doble sentido. Cada frecuencia necesita su emisor y receptor, que se agrupan en un único equipo denominado **transceiver** o **transpondedor**.

Los principales inconvenientes de las microondas es que no pueden atravesar edificios y que son susceptibles a las condiciones atmosféricas, por ello necesitan amplificadores cada cierta distancia.

La transmisión mediante microondas se lleva a cabo en una escala de frecuencias que va desde 2 hasta 40 GHz, que corresponde a longitudes de onda de 15 a 0.75 cm. Normalmente se utilizan como conexión punto a punto en telefonía y transmisión digital (LAN).

2.7.2.2. Microondas por satélite

Un satélite de comunicaciones es esencialmente una estación que retransmite microondas. Se usa como enlace entre dos o más receptores/transmisores terrestres, denominados estaciones base. El satélite recibe en una banda de frecuencia (canal ascendente), la amplifica o repite, y posteriormente la retransmite en otra banda de frecuencia (canal descendente).

Las aplicaciones más importantes de las microondas vía satélite son:

- Difusión de TV
- transmisión telefónica a larga distancia
- Interconexión de centrales telefónicas, redes privadas
- Usos militares.

La transmisión por microondas vía satélite opera en una banda de frecuencias entre 1 hasta 10 GHz.

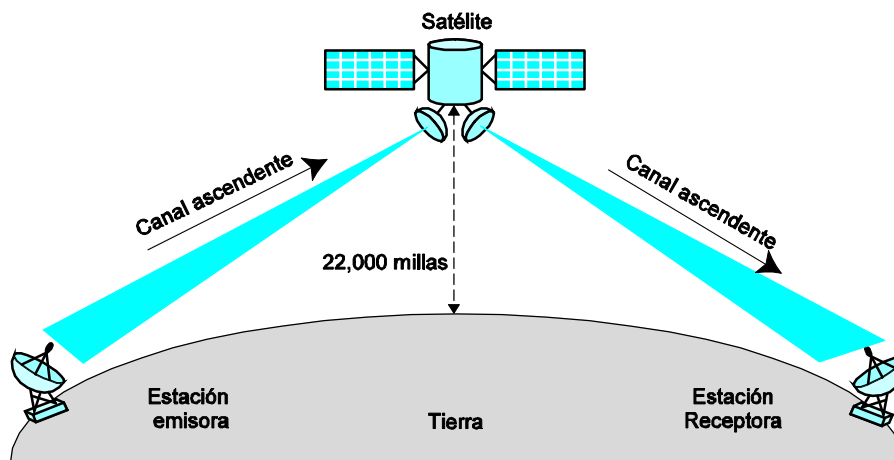


Figura 2-42. Microondas por satélite.

2.7.2.3. Ondas de radio

Básicamente se diferencian de las microondas en que las ondas de radio son omnidireccionales, por lo tanto, no necesitan ni antenas parabólicas y alineación con las demás estaciones. El rango de frecuencias comprendido entre 30 MHz y 1 GHz se utiliza principalmente para aplicaciones de locales.

2.7.2.4. Ondas infrarrojas

Se utilizan en comunicaciones de corto alcance, principalmente en LAN confinadas en edificios. Las ondas infrarrojas tienen la peculiaridad de no atravesar paredes ni obstáculos, lo cual puede suponer un inconveniente, pero también puede suponer una ventaja en redes locales dentro de un edificio, donde los ordenadores portátiles pueden estar en la LAN sin estar físicamente conectada a ella.

2.7.2.5. Ondas de luz

Se utilizan para conectar/enlazar las LAN de los edificios cercanos a través de sistemas de emisión/recepción láser situados en las azoteas (*Figura 2-43*).

La principal ventaja principal es su bajo coste. Inconvenientes: necesario un enfoque preciso emisor-receptor, sensible a la lluvia, niebla y corrientes de convección en fachadas de edificios.

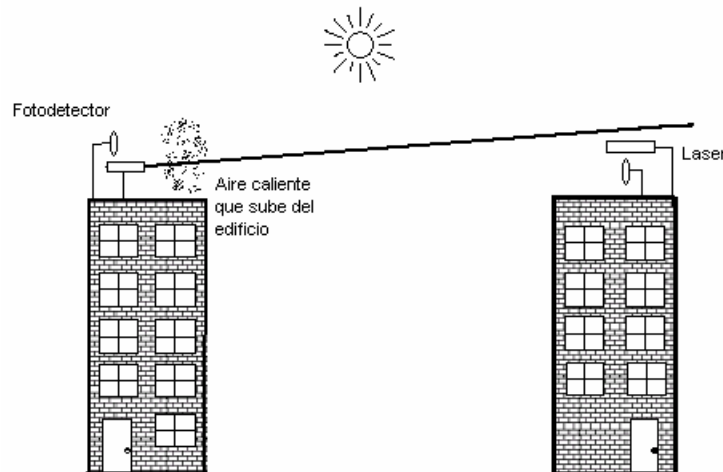


Figura 2-43. Las corrientes de convección pueden interferir los sistemas de comunicación por láser. Aquí se ilustra un sistema bidireccional con dos láseres.

2.8. Perturbaciones en la transmisión

Cualquier señal transportada por un medio de transmisión acusa una serie de efectos en la transmisión: atenuación, ancho de banda limitado, distorsión de retardo y ruido. Si los datos son digitales, estas perturbaciones pueden conducir a errores. Aunque todos estos factores se presentan juntos y producen un efecto combinado, consideraremos cada una de estas perturbaciones por separado.

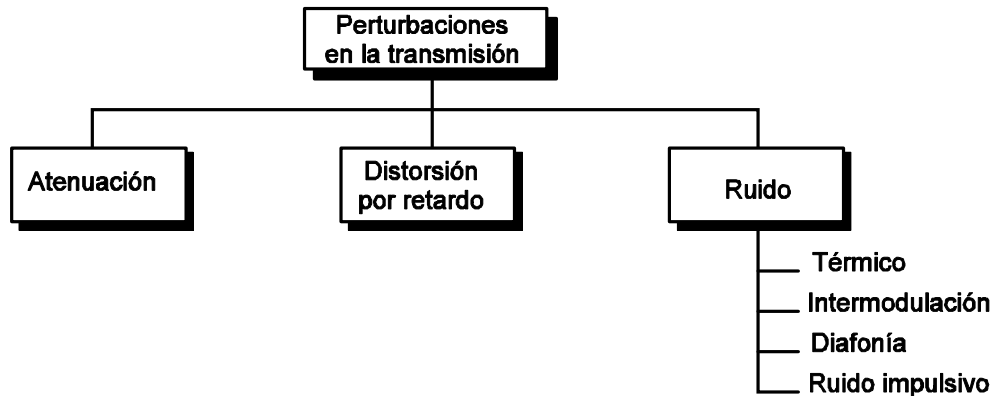


Figura 2-44. Esquema de perturbaciones en la transmisión.

2.8.1. Atenuación

Es la pérdida de energía conforme la señal se propaga hacia el destino. Es una relación logarítmica entre potencia final y potencia original de la señal, que se expresa como un valor en decibelios. En medios guiados, la señal decae en forma logarítmica con la distancia. La cantidad de energía depende de la frecuencia. En medios no guiados, la atenuación es una función más compleja que depende de la distancia y de las condiciones atmosféricas.

La atenuación es una función creciente de la frecuencia, a mayores valores de frecuencia, aumenta la atenuación de la señal. La línea continua muestra la atenuación sin ecualización y la línea discontinua muestra los efectos de la ecualización (Figura 2-45). La solución a esta perturbación es la incorporación de amplificadores o repetidores si se conocen las condiciones de atenuación, pero de ninguna forma se puede restaurar la señal a su forma original exacta.

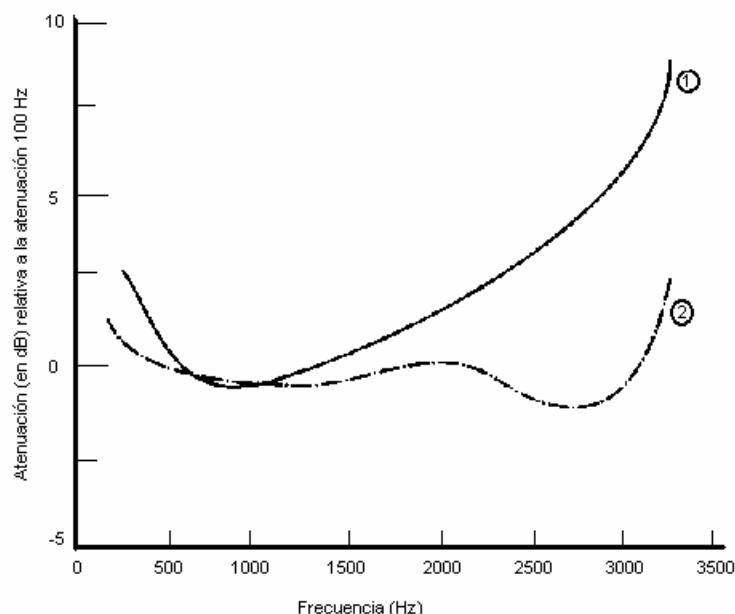


Figura 2-45. Distorsión de atenuación.

2.8.2. Distorsión por retardo

Es un fenómeno peculiar de los medios guiados. Esta distorsión está causada por el hecho de que la velocidad de propagación de la señal en el medio varía con la frecuencia. Para señales con ancho de banda limitado, la velocidad tiene a aumentar cerca de la frecuencia central, y a disminuir en los extremos de la banda. De esta manera, las distintas frecuencias que componen la señal llegarán al receptor en instantes distintos.

Este tipo de distorsión es crítica en señales digitales. Considérese que se transmite una secuencia de bits, usando señales digitales o analógicas. Debido a la distorsión por retardo, algunas de las señales que componen el valor en la posición de un bit, se mezclan con las señales de las posiciones de otros bits, causando el fenómeno conocido como **interferencia de símbolos**, el cual es una limitación importante a la velocidad de transmisión.

Para eliminar o disminuir esta distorsión se utilizan técnicas de ecualización, de manera que limitando el ancho de banda se consigue homogeneizar la velocidad de los componentes de la señal (*Figura 2-46*).

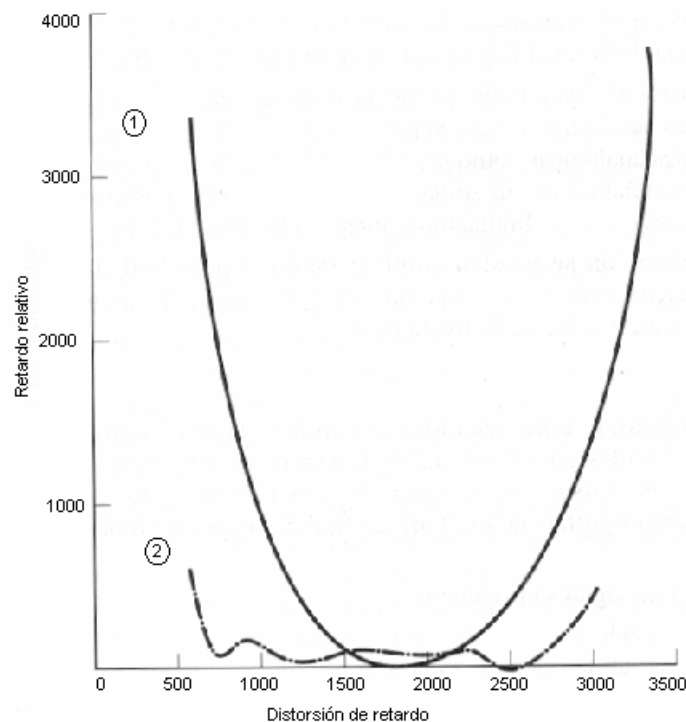


Figura 2-46. Distorsión de retardo.

2.8.3. Ruido

En cualquier transmisión de datos, la señal recibida está compuesta por la señal transmitida, modificada por las diferentes distorsiones introducidas por el sistema de transmisión, más un conjunto de señales no deseadas que se introducen en cualquier instante entre la transmisión y la recepción, a estas últimas se les denomina ruido, y son el mayor problema para obtener un buen rendimiento en un sistema de comunicaciones. Según su procedencia, se dividen en cuatro categorías:

2.8.3.1. Ruido térmico

Se produce por la agitación térmica de los electrones en el medio conductor, siendo función de la temperatura. Está presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión, no se puede eliminar, y por tanto, impone una restricción importante a los servicios de los sistemas de comunicación. El principal problema aparece cuando se amplifica la señal pues, inevitablemente, también se amplifica el ruido, llegando a ser totalmente irreconocible.

2.8.3.2. Ruido de intermodulación

Se produce cuando señales de distintas frecuencias comparten el mismo medio de transmisión, produciéndose la aparición de señales que son la suma o diferencia de las señales originales, o múltiplos de éstas.

2.8.3.3. Diafonía (Crosstalk)

Se produce por un acoplamiento inductivo no deseado de dos líneas que transportan señales. Los conductores o líneas de transmisión normalmente van juntos, esta proximidad hace, según la Ley de Faraday, se cree un campo magnético alrededor de un conductor por el que pasa una corriente. Como consecuencia, este campo magnético puede inducir una corriente en los conductores sometidos a él. En la práctica, el efecto que puede notar un usuario del teléfono es que se pueden oír otras conversaciones de fondo.

2.8.3.4. Ruido impulsivo

Es un ruido no continuo que consiste en pulsos irregulares o picos de corta duración y gran amplitud. Se generan por una gran diversidad de causas, como por ejemplo, por perturbaciones electromagnéticas exteriores producidas por tormentas atmosféricas, o fallos en los sistemas de comunicación. Este ruido es el menos importante en transmisión analógica, pero es la primera causa de error en comunicación digital, pudiendo llegar a borrar/cambiar bits. (*Figura 2-47*).

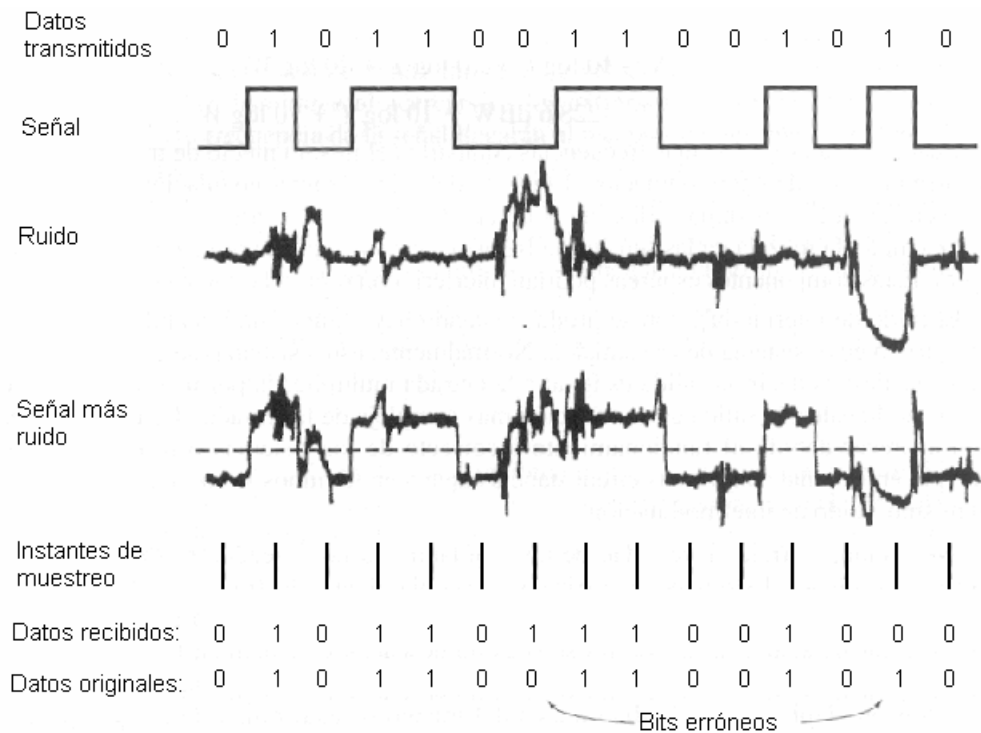


Figura 2-47. Efecto del ruido en una señal digital.

2.9. Aprovechamiento de un medio de transmisión

Cualquier medio de transmisión ofrece unos recursos concretos y limitados, condicionados a sus características físicas, ruidos y otros fenómenos físicos, así como la técnica de modulación utilizada en la transmisión. En el estudio del rendimiento de un determinado medio de transmisión, es necesario los siguientes conceptos:

- Velocidad de modulación
- Velocidad de transmisión
- Tasa de errores del Medio
- Modulación mono y multinivel

2.9.1. velocidad de modulación (V_m)

Se define la velocidad de modulación (V_m) de un determinado sistema como la inversa del tiempo que dura el elemento más corto de señal, que se utiliza para crear un pulso.

$$V_m = \frac{1}{T}$$

Donde:

T = Duración o ancho del pulso.

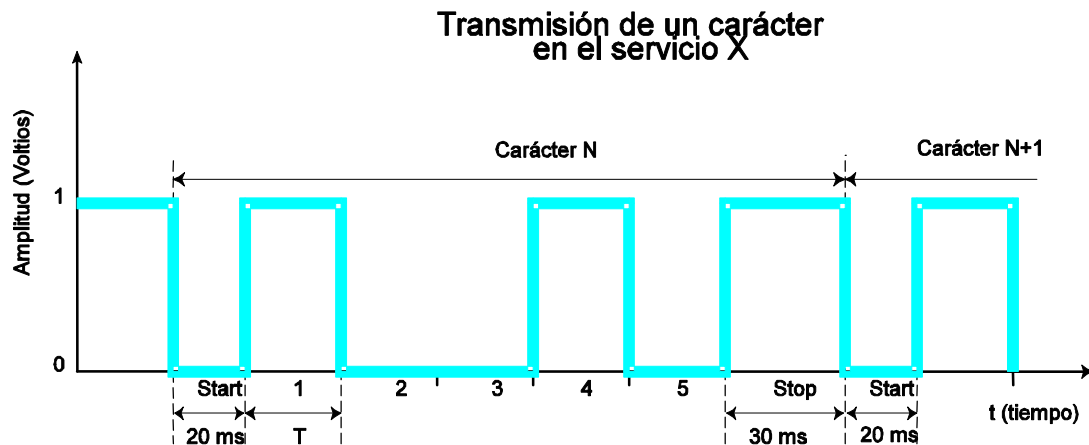
Cuyas unidades son:

$$[V_m] = \frac{1}{[seg]} = [Baudio]$$

Generalizando pulsos de igual duración, la velocidad de modulación medida en baudios es el número de pulsos por segundo, o dicho de otro modo, el máximo número de transiciones de la señal por segundo. A la velocidad de modulación se le conoce también por **velocidad de señalización**.

Ejemplo

Supongamos un cierto servicio de transmisión de datos. La figura representa la transmisión de un carácter en dicho servicio. Obtener la velocidad de modulación V_m .



Solución:

La figura muestra como se transmite un carácter (byte) en este servicio. Por tanto, la velocidad de modulación (V_m), corresponde a:

$$V_m = \frac{1}{20 \text{ ms}} = \frac{1}{0.02 \text{ seg}} = 50 \text{ baudios}$$

2.9.2. Velocidad de transmisión (V_t)

En un canal de datos, se denomina **velocidad de transmisión (V_t)** al número de dígitos binarios (bits) transmitidos por unidad de tiempo. Se mide en bits por segundo (*bps*).

Para un enlace de m canales y n niveles, la velocidad de transmisión será:

$$V_t = \sum_{i=1}^m \frac{1}{T_i} \log_2 n_i \quad (2.1)$$

Donde:

m = nº de canales que transmiten en paralelo.

T_i = menor duración de un pulso de señal, expresado en segundos, para el i -ésimo canal.

n_i = nº de estados de señal de la modulación del i -ésimo canal.

Particularizando, tenemos que un solo canal transmitiendo en modo serie, al ser $m=1$, la expresión queda:

$$V_t = \frac{1}{T} \log_2 n = [bps]$$

En el caso de modulación binaria, por tanto, $n=2$, la expresión se simplifica todavía más:

$$V_t = \frac{1}{T}$$

que como podemos observar, coincide con la velocidad de modulación.

En determinados esquemas de modulación, en cada estado de la señal se puede representar más de un *bit*. Normalmente, se representan 2, 3, 4, ... bits, siendo necesarios para ello: 4, 8, 16, ... estados de señal, que aplicados a la expresión (2.1), se obtiene:

$$\log_2 4 = 2 \quad \log_2 8 = 3 \quad \log_2 16 = 4$$

Luego la velocidad de transmisión para dichos estados será:

$$V_t = 2 \frac{1}{T} \quad V_t = 3 \frac{1}{T} \quad V_t = 4 \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Podemos establecer la relación entre ambas velocidades V_m y V_t . Recordando la expresión:

$$V_m = \frac{1}{T}$$

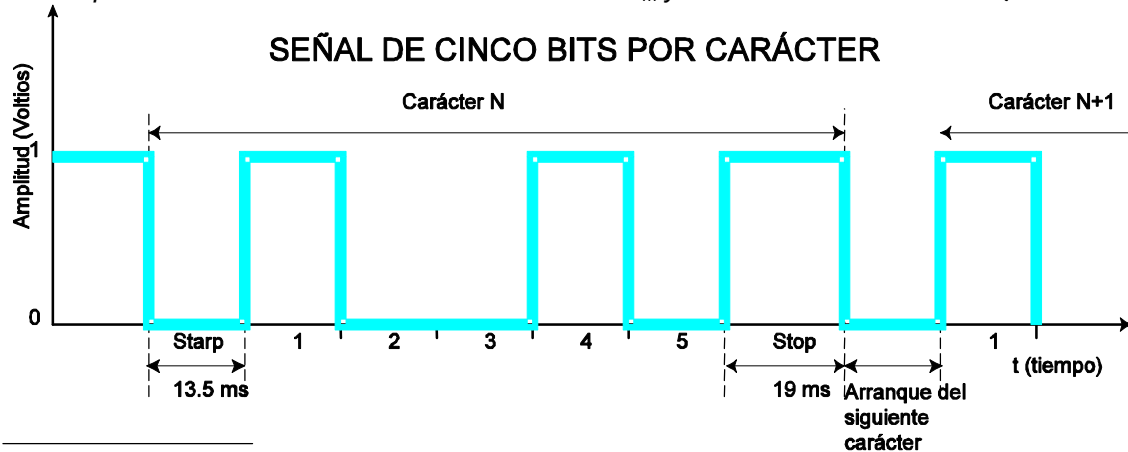
Entonces, reemplazando en (2.2) resultará:

$$V_t = 2|V_m| \quad V_t = 3|V_m| \quad V_t = 4|V_m|$$

A partir de estas expresiones se deduce que al aumentar el número de estados significativos de la señal es posible aumentar la velocidad de transmisión sin aumentar la velocidad de modulación.

Ejemplo

Estudiar una señal que utiliza un código de 5 bits por carácter, con un impulso de arranque y otro de parada. Obtener la velocidad de modulación V_m y velocidad de transmisión V_t .



Solución:

En la figura se detalla la señal considerada, donde puede observarse la duración de cada uno de los pulsos utilizados. Para formar cada carácter se utilizarán:

1 pulso de arranque (13.5 ms)

5 pulsos de datos (13.5 ms)

1 pulso de parada (19 ms)

Se observa que el tiempo total de transmisión de un carácter es de 100 ms.

La velocidad de transmisión, en términos de bps, será:

$$V_t = \frac{7 \text{ bits}}{100 \text{ ms}} = 70 \text{ bps}$$

Por otro lado, la velocidad de modulación será:

$$V_m = \frac{1}{13.5 \text{ ms}} = 74.07 \text{ baudios}$$

La velocidad de modulación depende sólo de la duración del pulso de información más corto, en este caso 13.5 ms.

Sin embargo, en este caso, el régimen de 70 bps. Es un dato no representativo, dado que no se tiene en cuenta la separación entre caracteres, que puede ser de duración variable. Se debería entonces utilizar la velocidad de transmisión de datos, que tiene en cuenta el número medio de bits, caracteres o bloques, etc. transferidos por unidad de tiempo.

2.9.3. Tasa de error (BER)

La **tasa de error** ("*Bit Error Rate*") está relacionada con la cantidad de bits transmitidos de manera errónea en una sesión de transmisión de datos. La transmisión se puede realizar mediante medios analógicos o digitales, pero la tasa de errores está referida siempre a la recepción en forma digital de los datos en el equipo receptor.

De esta forma, se define a la tasa de error (BER) de un equipo receptor de datos, a la relación entre los bits recibidos de manera errónea respecto a la cantidad total de bits transmitidos. A medida que un canal de transmisión tienen mayor confiabilidad, menor será su tasa de errores.

$$BER = \frac{\text{bits erróneos recibidos}}{\text{bits transmitidos}}$$

Ejemplo

Un computador recibe, desde un equipo transmisor remoto, un total de 20 Mb que corresponden a un archivo y a los datos de control que posibilitaron la transmisión. Si durante la transmisión se produjeron 20 bits con errores, ¿cuál es la tasa de errores, en BER, de esa transmisión?

Solución:

$$BER = \frac{20 \text{ bits}}{20000000 \text{ bits}} = 10^{-5}$$

En la Red Telefónica conmutada, la tasa que se ha calculado en este ejemplo suele denominarse tasa típica de la red. Esto significa que se puede prever que se producirá un bit con error cada 100.000 bits transmitidos.

2.9.4. Capacidad del canal

Hemos visto que hay una gran cantidad de imprevistos o fenómenos que distorsionan una señal, la cuestión es discernir cómo afectan estos imprevistos a la velocidad de datos por un canal. Se denomina **capacidad del canal (C)** a la velocidad a la que se pueden transmitir los datos en un canal o ruta de comunicación de datos. Hay algunos conceptos relacionados con la capacidad:

- **Velocidad de transmisión (V_t)**
- **Ancho de banda (H):** ancho de banda de la señal transmitida que está limitado por el transmisor y por la naturaleza del medio de transmisión. Se mide en ciclos/seg. o hertzios (Hz).
- **Ruido:** nivel medio de ruido a través del camino de transmisión.
- **Tasa de errores**
- **Velocidad de modulación (V_m)**

Los servicios de comunicación son por lo general caros, y normalmente cuando mayor es el ancho de banda requerido por el servicio, mayor es el costo. En la práctica, todos los medios de transmisión están limitados en ancho de banda. Las limitaciones vienen impuestas por las propias limitaciones físicas de los medios, o por limitaciones impuestas deliberadamente para evitar interferencias electromagnéticas por otras fuentes. Por lo tanto, el objetivo de todo sistema de comunicación es la máxima eficiencia en la velocidad de transmisión para un ancho de banda determinado, no superando la tasa de errores permitida. El mayor inconveniente para conseguir este propósito es la existencia de ruido.

2.9.4.1. Canal libre de ruido

En 1924, H. Nyquist dedujo la ecuación que expresa la tasa de datos máxima para un canal sin ruido de ancho de banda finito. Nyquist demostró que si la velocidad de transmisión de la señal es $2H$, entonces una señal con frecuencias no superiores a H es suficiente para conseguir la velocidad deseada. Dicho de otro modo, dado un ancho de banda H , la mayor velocidad de transmisión que se puede obtener es $2H$.

$$C = 2H \log_2 N \quad \text{bits / seg}$$

donde:

N = nº de niveles de tensión de la señal.

Para un ancho de banda dado, la velocidad de transmisión de datos se puede aumentar solamente considerando un mayor número de señales diferentes (transmisión multinivel), esto conlleva un aumento de la complejidad del receptor al tener que distinguir las diferentes señales, así como la aparición de ruido y otras limitaciones.

Ejemplo

Considérese un canal de voz que se utiliza mediante un módem para transmitir datos digitales. Sea un ancho de banda de 3100 Hz. Calcular la capacidad del canal en los siguientes casos, suponiendo un medio teórico, libre de ruidos : a) Señal con 2 niveles de tensión. b) Señal con 4 niveles de tensión.

Solución:

A partir de la expresión de Nyquist

$$C = 2H \log_2 N \quad \text{bits / seg}$$

Obtenemos los siguientes resultados:

- a) $N = 2$ $C = 2 \cdot 3100 \cdot \log_2 2 = 6.200 \text{ bps}$
b) $N = 4$ $C = 2 \cdot 3100 \cdot \log_2 4 = 12.400 \text{ bps}$

Conclusión, para un ancho de banda determinado, solamente variando el número de niveles de señal, se puede conseguir un aumento considerable de la Capacidad del Canal.

2.9.4.2. Canal con ruido

En la práctica, en los medios de transmisión existe una cierta cantidad de ruido térmico, que influye en la tasa de envío por dicho canal. La cantidad de ruido térmico se mide por la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido, y se llama **relación señal a ruido** (SNR, "Signal-to-noise ratio"), que suele expresarse en decibels (dB), y viene dada por la expresión:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$$

Cuyas unidades son:

$$[SNR] = [dB]$$

En 1948, el matemático Claude Shannon llevó más allá el trabajo de Nyquist y lo extendió al caso de un canal sujeto a ruido termodinámico. La principal conclusión de Shannon es que la tasa de datos máxima de un canal ruidoso de ancho de banda H y cuya relación señal a ruido es SNR , viene dada por:

$$C = H \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad \text{bits / seg}$$

Ejemplo

Considérese un canal de voz que se utiliza mediante un módem para transmitir datos digitales. Sea un ancho de banda de 3100 Hz y una razón de potencia señal a ruido característica de 30 dB. Calcular la capacidad del canal máxima teórica que puede obtenerse

Solución:

Sabemos que la relación señal a ruido viene dado por la expresión

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$$

Por tanto:

$$30 = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)$$

De ahí que:

$$\frac{S}{N} = 1000$$

Ahora bien,

$$C = H \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bits / seg}$$

Por consiguiente:

$$C = 3100 * \log_2 (1 + 1000) = 30894 \text{ bps}$$

La medida de la eficacia de una transmisión digital es la razón C/H , que expresa los bps/Hz obtenido. La Figura 2-49 muestra la eficacia teórica de una transmisión, y los resultados reales que se han obtenido en una línea convencional de calidad telefónica.

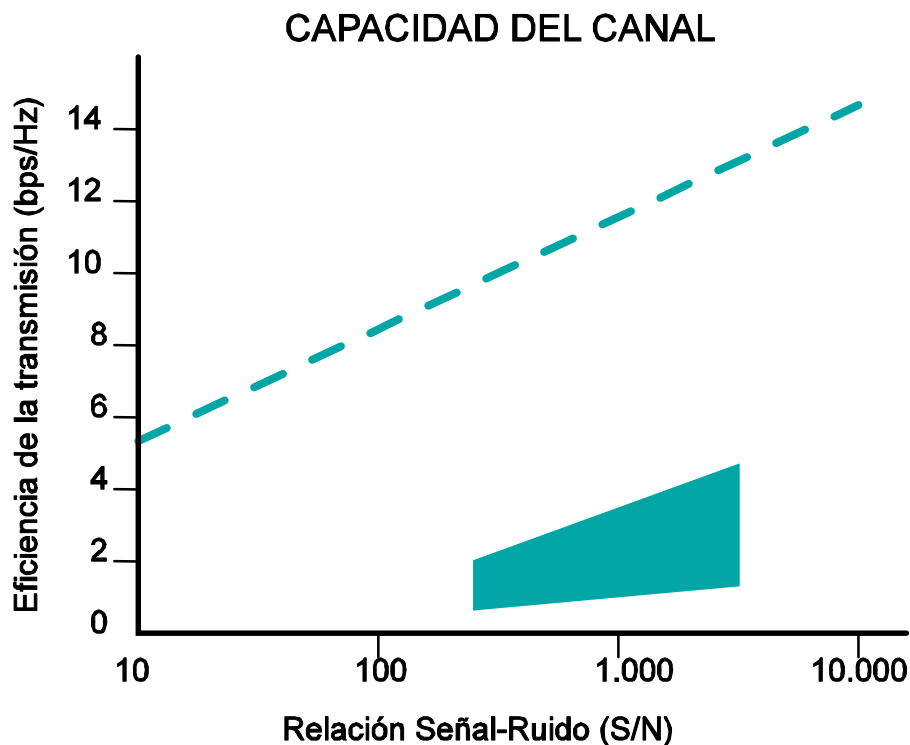


Figura 2-49. Eficacia real y teórica de una transmisión.

2.9.5.transmisión multinivel

Un aumento de la velocidad de modulación, sin un aumento paralelo del ancho de banda hace que la tasa de error vaya aumentando, y a veces, puede ser llegar a ser tan elevada que hace que la comunicación sea prácticamente imposible. Para evitar estas situaciones, se han desarrollado técnicas de transmisión que permiten mejorar sustancialmente la cantidad de información que se puede transmitir por un ancho de banda determinado, es la denominada **transmisión Multinivel**. Recordando la expresión de la velocidad de transmisión V_t :

$$V_t = \frac{1}{T} \log_2 N$$

Donde:

$N = n^\circ$ de estados (niveles) de una señal

Se denomina **transmisión multinivel** a aquella en la que el número de estados que puede tomar la señal es mayor que 2. En el caso en que el número de niveles es 2, se denomina **transmisión binaria**. Recordando las expresiones:

$$V_t = 2|V_m| \quad V_t = 3|V_m| \quad V_t = 4|V_m|$$

Cuando el $\log_2 N$ es mayor que 1, la velocidad de transmisión aumenta sin que aumente la velocidad de modulación, y por tanto, se pueden transmitir una mayor cantidad de bits por baudio, aumentando así la eficiencia del canal de comunicaciones. Finalmente se obtiene una relación de bits transmitidos por baudio superior a uno (*Figura 2-50*):

TRANSMISIÓN MULTINIVEL

Transmisión Multinivel	Nº de Niveles (N)	Nº de bits por estado (n)
Dibit	4	2
Tribit	8	3
Cuadribit	16	4

Figura 2-50. transmisión multinivel

2.9.5.1. Dibits

La velocidad de modulación es el n° de cambios de estado de la señal por unidad de tiempo, más concretamente, el n° de cambios de estado por segundo. Con los mecanismos de transmisión básicas, cada cambio de estado representa un bit, y por tanto, como ya se ha visto anteriormente, tenemos que:

A continuación estudiaremos como con el esquema de transmisión de **dibits** es posible el

$$V_m = V_t$$

envío de dos bits con un solo cambio de estado de la señal.

Básicamente, la idea consiste en realizar pares de bits, de forma que complete todas las combinaciones posibles y con estos pares se pueda representar cualquier combinación de bits. A continuación, a cada grupo de dos bits asignarle un nivel de señal distinto. De esta forma tenemos, en el caso de dibits, cuatro combinaciones posibles, que corresponden a cuatro niveles o estados de tensión diferentes (*Figura 2-51*). Como se puede comprobar, cualquier combinación de bits se puede expresar como grupos de dos bits, y por tanto, ser asignado a un nivel (*Figura 2-52*).

Pares de bits	Nivel de tensión
00	V_0
01	V_1
10	V_2
11	V_3

Figura 2-51. Pares de bits.

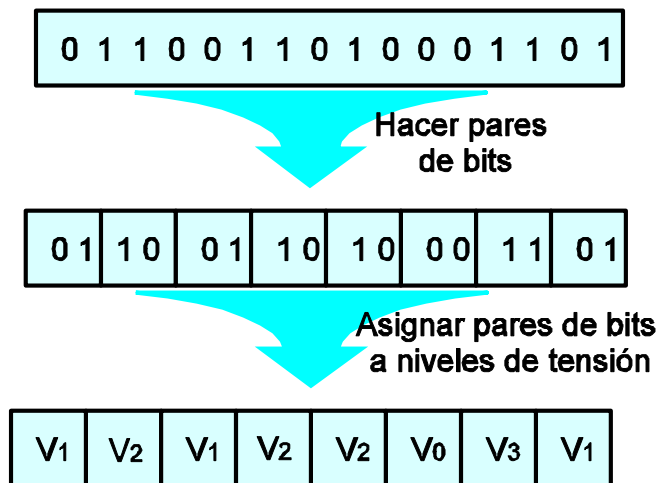


Figura 2-52. Agrupación de bits y asignación de niveles de tensión.

Gráficamente, la Figura 2-53 representa la cadena de bits en formato Unipolar:

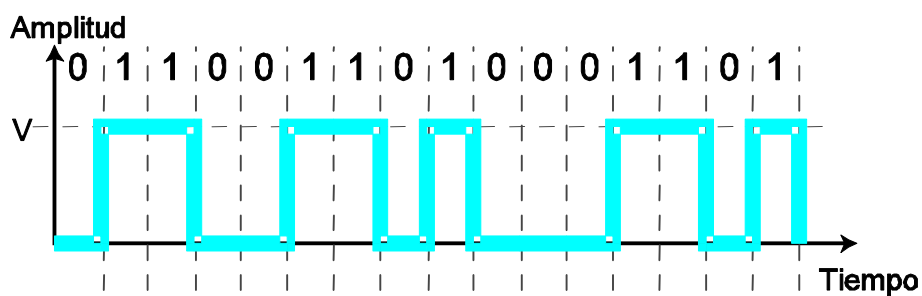


Figura 2-53. Representación unipolar de una señal digital.

Que correspondería a una representación mediante dibits (*Figura 2-54*):

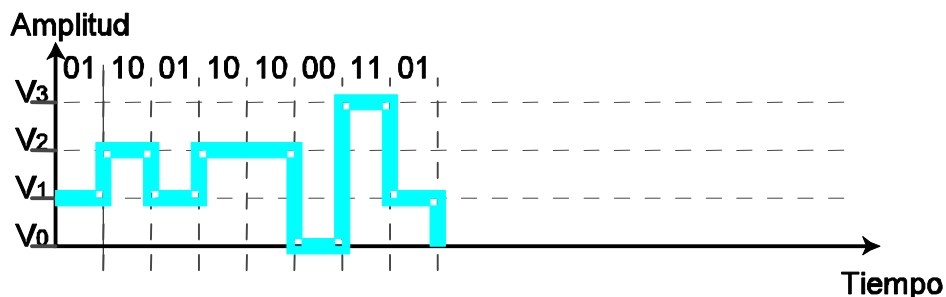


Figura 2-54. Representación de una señal digital con dibits.

Por tanto, podemos observar que sin variar la velocidad de modulación se consigue el doble de transferencia de información, se obtiene un aumento en la velocidad de transferencia del orden: Deducida de la expresión:

$$V_t = 2V_m$$

Donde:

$$N = 2^n$$

$N = n^0$ de estados de la señal

$n = n^0$ de bits por pulso transmitidos

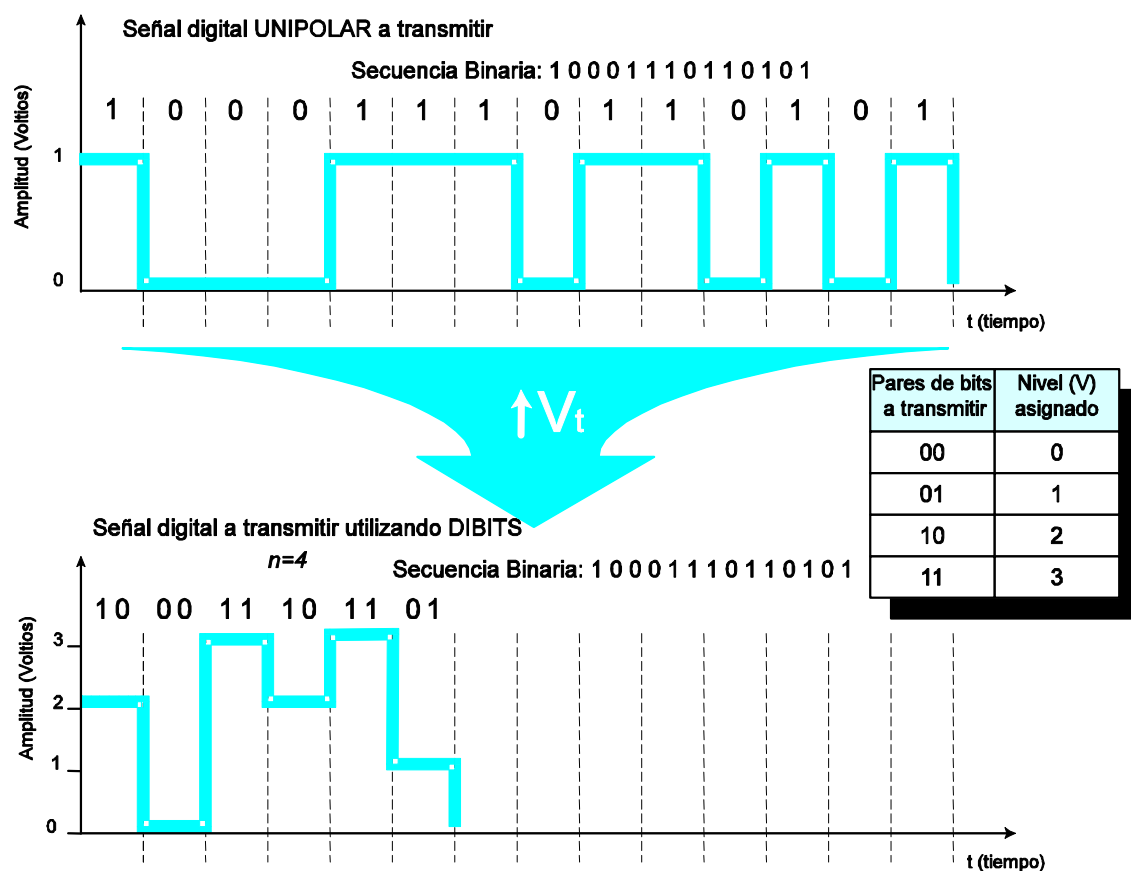


Figura 2-55. Ejemplo de codificación con *dibits*.

2.9.5.2. Tribits y Cuatribits

Aumentando el número de bits por pulso transmitidos, se consiguen los esquemas de transmisión multinivel de orden superior:

Para $n = 3$, se necesitan 8 niveles de tensión y se obtienen **Tribits**.

Para $n = 4$, se necesitan 16 niveles de tensión, y se obtienen **Cuatribits**.

Como aplicación de estas técnicas, los modems que transmiten a velocidades superiores a *2400 bps*, utilizan técnicas de transmisión multinivel (dibits, tribits o cuatribits), de forma que manteniendo la velocidad de modulación en *2400 baudios*, se consiguen velocidades de transmisión superiores.