

Introducción.

Todos los tipos de información se pueden representar mediante señales electromagnéticas. Para transportar la información, dependiendo del medio de transmisión y del entorno donde se realicen las comunicaciones, se podrán utilizar señales analógicas o digitales.

Cualquier señal electromagnética, analógica o digital, está formada por una serie de frecuencias constituyentes. Un parámetro clave en la caracterización de la señal es el ancho de banda, definido como el rango de frecuencias contenidas en la señal. (cuanto mayor es el ancho de banda de la señal, mayor es su capacidad para transportar información).

Uno de los principales problemas reside en paliar las dificultades, o defectos, de las líneas de transmisión. Las más importantes son: **la atenuación, la distorsión de atenuación, la distorsión de retardo**, así como los distintos tipos de **ruido**. El ruido puede ser, de tipo térmico, ruido de intermodulación, diafonía o impulsivo, etc. En señales analógicas, las dificultades en la transmisión pueden afectar la inteligibilidad de la información recibida. Cuando se utilizan señales digitales, los defectos pueden introducir bits erróneos en la recepción.

En un sistema de comunicaciones se debe tener presente 4 factores determinantes: **el ancho de banda** de la señal, **la velocidad de transmisión** de la información digital, **la cantidad de ruido** y la proporción o **tasa de errores tolerable**.

El éxito en la transmisión de datos depende fundamentalmente de 2 factores: la calidad de la señal que se transmite y las características del medio de transmisión.

Los datos analógicos como los digitales se pueden transmitir usando señales analógicas o digitales.

Los defectos en la transmisión pueden ser causantes de errores en los datos. Dichos errores son : **la atenuación, la distorsión de retardo y los diversos tipos de ruido**.

Terminología utilizada en transmisión de datos.

La transmisión de datos entre un emisor y un receptor siempre se realiza a través de un medio de transmisión. Los medios de transmisión se pueden clasificar como guiados y no guiados. En ambos casos, la comunicación se realiza usando ondas electromagnéticas. En los **medios guiados**, por ejemplo en pares trenzados, en cables coaxiales y fibras ópticas, las ondas se transmiten a lo largo de un camino físico. Los medios **no guiados**, denominados inalámbricos, proporcionan un medio para transmitir las ondas electromagnéticas a través del aire, el mar o el vacío.

El término **enlace directo** se usa para designar un camino de transmisión entre 2 dispositivos en el que la señal se propague directamente del emisor al receptor sin ningún otro dispositivo intermedio que no sea un amplificador o repetidor. Este término se puede aplicar tanto a medios guiados como no guiados.

Un medio de transmisión guiado es **punto a punto** si proporciona un enlace directo entre 2 dispositivos que comparten el medio, no existiendo ningún otro dispositivo conectado. En una configuración guiada **multipunto**, el mismo medio es compartido por más de 2 dispositivos.

Un medio de transmisión puede ser *simplex, half-duplex o duplex*. En la transmisión simplex, las señales se transmiten sólo en una única dirección (emisora y receptor.). En half-duplex, ambas estaciones pueden transmitir, pero no simultáneamente. En full-duplex,

ambas estaciones pueden transmitir y recibir, pero ahora simultáneamente, en este caso, el medio transporta señales en ambos sentidos al mismo tiempo.

Frecuencia, espectro y ancho de banda.

La señal que es función del tiempo, se puede expresar alternativamente en función de la frecuencia, la señal puede considerarse estar constituida por componentes a diferentes frecuencias.

Conceptos en el dominio temporal

Una señal analógica es aquella en la que la intensidad de la señal varía suavemente en el tiempo.

Una señal digital es aquella en la que la intensidad se mantiene constante durante un determinado intervalo de tiempo, tras el cual la señal cambia a otro valor constante.

Las señales periódicas son el tipo de señales más sencillas que se puede considerar; se caracterizan por contener un patrón que se repite a lo largo del tiempo. Ej: onda seno y onda cuadrada.

La onda seno se representa mediante 3 parámetros: amplitud, frecuencia y fase.

La amplitud se mide en voltios, la frecuencia es la razón a la que la señal se repite, se mide en Hz. El período, se define como la cantidad de tiempo transcurrido entre 2 repeticiones consecutivas de la señal ($1/\text{frecuencia}$). La fase es una medida de la posición relativa de la señal dentro de un período.

Dada una señal, se define la longitud de onda, λ , como la distancia que ocupa un ciclo o, en otras palabras, se define como la distancia entre 2 puntos de igual fase en 2 ciclos consecutivos. La longitud de onda se puede obtener: $\lambda = v.T$ (donde v es la velocidad de la señal).

Conceptos en el dominio de la frecuencia

Las señales electromagnéticas pueden estar compuestas de muchas frecuencias.

Si tenemos una señal con frecuencias f y $3f$, podemos hacer 2 comentarios:

-La frecuencia de la 2da componente es un múltiplo entero de la frecuencia de primera componente. Cuando todas las componentes de una señal tienen frecuencias múltiplo de una dada, esta última se denomina **frecuencia fundamental**.

-El período de la señal total de componentes es el período correspondiente a la frecuencia fundamental.

Se define **espectro** de la señal como un conjunto de frecuencias que la constituyen.

Se define **ancho de banda** de una señal como la anchura del espectro. Muchas señales tienen un ancho de banda infinito. No obstante, la mayor parte de la energía de la señal se concentra en una banda de frecuencias relativamente estrecha. Esta banda se denomina **ancho de banda efectivo**, o simplemente **ancho de banda**.

Si una señal contiene una componente de frecuencia cero, esa componente se denomina **componente continua**. Sin componente continua, la señal tiene una amplitud media cero, vista en el dominio del tiempo. Si tiene componente continua, tendrá un término de frecuencia $f=0$ y por lo tanto, una amplitud promedio distinta de cero.

Relación entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda

Aunque una forma de onda dada contenga frecuencias en un rango extenso, por cuestiones prácticas, cualquier sistema de transmisión (transmisor+medio+receptor) sólo podrá transmitir una banda limitada de frecuencias. Esto hace que la velocidad de transmisión máxima en el medio esté limitada.

Un ancho de banda dado puede proporcionar varias velocidades de transmisión, dependiendo de la habilidad que exhiba el receptor para distinguir diferencias entre los 1 y 0 en presencia de ruido y de otros defectos.

En general, cualquier onda digital tendrá un ancho de banda infinito. Si se intenta transmitir esta forma de onda como una señal por cualquier medio, el sistema de transmisión (**medio**) limitará el ancho de banda que se puede transmitir. Luego, por un lado, por cuestiones prácticas y económicas la información digital se aproxima por una señal de ancho de banda limitado. Por otro lado, limitar el ancho de banda introduce distorsiones, las cuales hacen que la interpretación de la señal recibida sea más difícil. Cuanto mayor es la limitación en el ancho de banda, mayor es la distorsión y mayor es la posibilidad de que se cometan errores en el receptor.

Hay una relación directa entre la velocidad de transmisión y el ancho de banda: cuanto mayor es la velocidad de transmisión de la señal, mayor es el ancho de banda efectivo necesario. Visto de otra manera, cuanto mayor es el ancho de banda de un sistema de transmisión, mayor es la velocidad con la que se puede transmitir datos en el sistema.

Transmisión de datos analógicos y digitales

Los términos analógico y digital se aplican con frecuencia en el marco de las comunicaciones en al menos 3 contextos diferentes: datos, señalización y transmisión.

Se define **dato** como cualquier entidad capaz de transportar información. Las **señales** son representaciones eléctricas o electromagnéticas de los datos. La **señalización** es el hecho de la propagación física de las señales a través de un medio adecuado. Por último, se define **transmisión** como la comunicación de datos mediante la propagación y el procesamiento de señales.

Datos analógicos y digitales

La señal de audio es el más familiar ejemplo de dato analógico.

Las cadenas de caracteres son ejemplos de datos digitales.

Señales analógicas y digitales

Una señal analógica es una onda electromagnética que varía continuamente y que, según sea su espectro, puede propagarse a través de una serie de medios, guiados o no guiados.

Una señal digital es una secuencia de pulsos de tensión que se puede transmitir a través de un medio conductor.

La principal ventaja de la señalización digital es que en términos generales, es más económica que la analógica, a la vez de ser menos susceptible a las interferencias de ruido.

La principal desventaja es que las señales digitales sufren más con la atenuación que las señales analógicas.

Lo interesante en las señales digitales es que el ancho de banda depende de la forma de la onda exacta y de la secuencia de ceros y unos. Al aumentar el ancho de banda de la señal, la aproximación a la cadena de pulsos digitales es mejor.

Datos y señales.

Generalmente los datos analógicos son función del tiempo y ocupan un espectro en frecuencias limitado; estos datos se pueden representar mediante un señal electromagnética que ocupe el mismo espectro. Los datos digitales se pueden representar mediante señales digitales con un nivel de tensión diferente para cada uno de los dígitos binarios.

Los datos digitales se pueden también representar mediante señales analógicas usando un MÓDEM. El módem convierte la serie de pulsos binarios de tensión en una señal analógica, codificando los datos digitales haciendo variar alguno de los parámetros característicos de una señal denominada *portadora*. Los módems más convencionales representan los datos binarios en el espectro de la voz y, por lo tanto, hacen posible que los datos se propaguen a través de líneas telefónicas convencionales.

Los datos analógicos se pueden representar mediante señales digitales. El dispositivo que realiza esta función para la voz se denomina *codec*. El codec toma la señal analógica, que representa directamente a la voz, y la aproxima mediante una cadena de bits. En el receptor, dichos bits se usan para reconstruir los datos analógicos.

Transmisión analógica y digital

La **transmisión analógica** es una forma de transmitir señales analógicas con independencia de su contenido; las señales pueden representar datos analógicos o digitales. En cualquier caso, la señal analógica se irá debilitando (**atenuándose**) con la distancia. Para conseguir distancias más largas, el sistema de transmisión analógico incluye amplificadores que inyectan energía en la señal. (Para distancias más largas, amplificadores en cascada). En el caso de los datos analógicos, como la voz, se puede tolerar una pequeña distorsión, ya que en ese caso siguen inteligibles. Sin embargo, para los datos digitales los amplificadores en cascada introducen errores.

La **transmisión digital**, por el contrario, es dependiente del contenido de la señal. Una señal digital sólo puede transmitir a una distancia limitada, ya que la atenuación, el ruido y otros aspectos negativos pueden afectar la integridad de los datos transmitidos. Para conseguir distancias mayores se usan repetidores. Un repetidor recibe la señal digital, regenera el patrón, y los retransmite. De esta manera se evita la atenuación.

Para señales analógicas se puede usar la misma técnica anterior si la señal transmitida transporta datos digitales. En este caso el sistema de transmisión tendrá repetidores convenientemente espaciados en lugar de amplificadores. Dichos repetidores recuperan los datos digitales a partir de la señal analógica y generan una señal analógica limpia. De esta manera el *ruido no es acumulativo*.

Un problema a resolver es la elección del método de transmisión.

Las comunicaciones a larga distancia, como los servicios de comunicación a distancias cortas se han reconvertido a digital y, lo que es más, la señalización digital se está introduciendo en todos los sistemas donde sea factible. Las razones más importantes son:

-**Tecnología digital**: la disminución continua en el tamaño y el coste de la circuitería digital.

-**Integridad de los datos**: al usar repetidores, el ruido y otros efectos negativos no son acumulativos. Por tanto, usando tecnología digital es posible transmitir datos conservando su integridad a distancias mayores utilizando incluso líneas de calidad inferior.

-Utilización de la capacidad: Para usar eficazmente el ancho de banda se necesita un alto grado de multiplexación. La multiplexación se puede realizar más fácilmente y con menor coste usando técnicas digitales (división en el tiempo) que con técnicas analógicas (división en frecuencia).

-Seguridad y privacidad: las técnicas de cifrado se pueden aplicar fácilmente a los datos digitales o analógicos que se hayan digitalizado previamente.

-Integración: en el tratamiento digital de datos analógicos y digitales todas las señales tienen igual forma y pueden ser procesadas de una forma similar. Este hecho posibilita economías de gran escala mediante la integración de voz, video y datos.

Dificultades en la transmisión

Las dificultades más significativas son:

- La atenuación y la distorsión de atenuación.
- La distorsión de retardo.
- El Ruido.

Atenuación. En cualquier medio de transmisión la energía de la señal decae con la distancia. Se pueden establecer 3 consideraciones respecto a la atenuación. *Primero*, la señal recibida debe tener suficiente energía para que el receptor pueda detectar la señal adecuadamente. *Segundo*, para ser recibida sin error, la señal debe conservar un nivel suficientemente mayor que el ruido. *Tercero*, la atenuación es habitualmente una función creciente de la frecuencia.

Los 2 primeros problemas se resuelven controlando la energía de la señal, para ello se usan amplificadores o repetidores.

El 3er problema es especialmente relevante para el caso de las señales analógicas. Debido a que la atenuación varía en función de la frecuencia, la señal recibida está distorsionada, reduciendo así su inteligibilidad.

Distorsión de retardo. Es un fenómeno debido a que la velocidad de propagación de una señal a través de un medio guiado varía con la frecuencia. Las distintas componentes en frecuencia de la señal llegarán al receptor en instantes diferentes de tiempo, dando lugar a desplazamientos de fase entre las diferentes frecuencias. La distorsión de retardo es particularmente crítica en la transmisión de datos digitales. Este es un factor de gran importancia que limita la velocidad de transmisión máxima en un canal de transmisión.

Ruido. Para cualquier dato transmitido, la señal recibida consistirá en la señal transmitida modificada por las distorsiones introducidas en la transmisión, además de señales no deseadas que se insertarán en algún punto entre el emisor y el receptor. A estas últimas señales no deseadas se les denomina ruido. El ruido es el factor de mayor importancia de entre los que limitan las prestaciones de un sistema de comunicación. Este se puede clasificar en 4 categorías: *ruido térmico*, *ruido de intermodulación*, *diafonía* y *ruido impulsivo*. *El ruido térmico* se debe a la agitación térmica de los electrones, es función de la temperatura. Está uniformemente distribuido en el espectro de frecuencias usado en los sistemas de comunicación, no se puede eliminar y, por lo tanto, impone un límite superior en las prestaciones en los sistemas de comunicación.

Cuando señales de distintas frecuencias comparten el mismo medio de transmisión puede producirse *ruido de intermodulación*. El efecto de esto es la aparición de señales a frecuencias que sean suma o diferencias de las dos frecuencias originales o múltiplos de

éstas. Se produce cuando hay alguna no linealidad en el transmisor , en el receptor o en el sistema de transmisión.

La *diafonía* la ha podido experimentar todo aquel que al usar un teléfono haya oído otra conversación. Se trata de un acoplamiento no deseado entre las líneas que transportan las señales. Esto puede ocurrir por el acoplamiento eléctrico entre cables de pares cercanos o, en raras ocasiones, en coaxiales que transportan varias señales.

Estos ruidos descritos son de magnitud constante y razonablemente predecibles. Así pues es posible idear un sistema de transmisión que les haga frente. Por el contrario, el *ruido impulsivo* es no continuo y está constituido por pulsos o picos irregulares de corta duración y de amplitud relativamente grande.

Generalmente , el ruido impulsivo no tiene mucha trascendencia para los datos analógicos. Sin embargo, el ruido impulsivo es una de las fuentes principales de error en la comunicación digital de datos. El ruido puede convertir un 1 en 0, o un 0 en un 1.

Capacidad de canal

Se denomina **capacidad de canal** a la velocidad máxima a la que se pueden transmitir los datos en un canal, o ruta de comunicación de datos, bajo unas condiciones dadas.

Hay 4 conceptos en juego relacionados entre sí: **velocidad de transmisión de los datos-ancho de banda- ruido-Tasa de errores.**

La *velocidad de transmisión* es la velocidad a la que se pueden transmitir los datos, en bits por segundo (bps).

El *ancho de banda* es el ancho de banda de la señal transmitida; se mide en ciclos por segundo o Hz.

El ruido: nivel medio de ruido a través del camino de transmisión.

La tasa de errores: se considera que hubo un error cuando se recibe un 1 habiendo transmitido un 0.

Las limitaciones en la transmisión se deben a las propiedades físicas de los medios de transmisión o por limitaciones que se imponen en el transmisor para prevenir interferencias con otras fuentes.

En el caso de los datos digitales, dado un ancho de banda sería deseable conseguir la mayor velocidad de datos posible no superando la tasa de errores permitida, el mayor inconveniente para conseguir este objetivo es la existencia de ruido.

Ancho de banda de NYQUIST

Para un ancho de banda dado, la velocidad de transmisión de datos se puede incrementar considerando un número mayor de señales diferentes (multiniveles). Sin embargo, esto supone una dificultad mayor en el receptor: en lugar de tener que distinguir una de entre 2 señales, deberá distinguir una de entre M señales. La formulación de nyquist para el caso de señales multinivel es

$C = 2B \cdot \log_2 M$, donde C es la capacidad del canal B es un ancho de banda dado y M son los niveles de tensión.

Esta fórmula implica que al duplicar el ancho de banda se duplica la velocidad de transmisión, si todo lo demás se mantiene inalterado.

Fórmula para la capacidad de Shannon

Ahora vamos a establecer una relación entre la velocidad de transmisión, el ruido y la tasa de errores. La presencia de ruido puede corromper uno o más bits. Si se aumenta la velocidad de transmisión, el bit se hace más “corto”, de tal manera que dado un patrón de ruido, éste afectará a un mayor número de bits. Así pues, dado un nivel de ruido, cuanto mayor es la velocidad de transmisión, mayor es la tasa de errores.

Dado un nivel de ruido, es de esperar que incrementando la energía de la señal se mejoraría la recepción de datos en presencia de ruido. Un parámetro fundamental en el desarrollo de este razonamiento es la relación señal-ruido SNR, que se define como el cociente de la potencia de la señal entre la potencia del ruido presente en un punto determinado en el medio de transmisión. Por cuestiones de comodidad se expresa en decibelios $SNR = 10 \cdot \log_{10}(P_s/P_r)$. Una **SNR alta** significará una **señal de alta calidad**, y por lo tanto, la necesidad de un número reducido de repetidores.

La relación señal-ruido es importante en la transmisión de datos digitales, ya que ésta determina la máxima velocidad de transmisión que se puede conseguir. Una conclusión de Shannon es que la capacidad máxima del canal, en bits por segundos, verifica la ecuación:

$C = B \cdot \log_2(1 + SNR)$, se denomina *capacidad libre de errores*, donde C es la capacidad del canal en bits por segundo y B es el ancho de banda del canal en Hz. **La fórmula de Shannon representa el máximo límite teórico que se puede conseguir.** Sin embargo, en la práctica, se consiguen velocidades mucho menores, ya que se supone sólo ruido blanco, no se tiene en cuenta el ruido impulsivo, la distorsión de atenuación o la distorsión de retardo.