

3. Capítulo 3: Conceptos de Señales

En el Capítulo 1 se vio que para que los datos puedan ser transmitidos de un dispositivo a otro remoto, se necesita que un transmisor genere una señal electromagnética con capacidad de atravesar el medio de transmisión y llegar hasta el receptor en el otro extremo. En este contexto, se puede decir que el éxito en la transferencia de los datos depende fundamentalmente de dos factores que son:

- La calidad de la señal que se transmite.
- Las características del medio de transmisión.

En este capítulo y en el siguiente se estudiarán estos dos factores y su incidencia en la calidad de la transmisión. No obstante, antes es necesario definir conceptos básicos relativos a las señales, lo que representa el propósito de este capítulo.

La transmisión de datos ocurre entre el transmisor y el receptor a través de algún medio de transmisión. Los medios de transmisión pueden clasificarse como guiados o no guiados. En ambos casos, la comunicación es en forma de ondas electromagnéticas. Con medios guiados las ondas son guiadas a lo largo de un camino físico; ejemplos de medios guiados son el cable de par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica. Los medios no guiados, también llamados inalámbricos, proporcionan un medio para transmitir ondas electromagnéticas, pero no las guía; en estos casos se propagan a través del aire, el vacío y el agua de mar.

El término enlace directo se utiliza para referirse a la ruta de transmisión entre dos dispositivos en los que las señales se propagan directamente del transmisor al receptor sin dispositivos intermedios, que no sean amplificadores o repetidores utilizados para aumentar la fuerza de la señal. Se debe tener en cuenta que este término puede aplicarse tanto a medios guiados como no guiados.

Un medio de transmisión guiado es punto a punto si proporciona un enlace directo entre dos dispositivos y esos son los únicos dos dispositivos que comparten el medio. En una configuración guiada multipunto, más de dos dispositivos comparten el mismo medio.

Una transmisión puede ser simplex, half duplex o full duplex. En transmisión simplex, las señales se transmiten en una sola dirección; una estación es el transmisor y la otra es el receptor. En la operación semidúplex o half duplex, ambas estaciones pueden transmitir, pero solo uno a la vez. En operación full-duplex, ambas estaciones pueden transmitir simultáneamente. En el último caso, el medio transporta señales en ambas direcciones al mismo tiempo.

3.1. Tiempo, Frecuencia y Ancho de Banda

Los datos que intercambian los dispositivos son transportados a través de la distancia por señales que son ondas electromagnéticas. Si bien el estudio de estas ondas es materia de la ingeniería electrónica, en esta sección se tratarán sólo aquellos aspectos básicos de esta disciplina que son necesarios para entender los conceptos de transmisión de señales a través de un medio de transmisión.

En el Capítulo 1 se dijo que la señal $s(t)$ generada por un transmisor es variable en el tiempo; es decir, el valor que la misma tiene en cada momento es una función del tiempo. Por otro lado, una señal en un instante de tiempo dado, se puede considerar como el resultado de la suma de varias ondas con diferentes frecuencias y, por lo tanto, puede ser expresada en función de la frecuencia. En definitiva, el estudio de las señales se puede realizar desde dos puntos de vista:

- Su variación en el tiempo.
- Sus componentes de frecuencia.

Ambos enfoques permiten visualizar aspectos diferentes de las señales que ayudan al conocimiento de las mismas, por tal motivo se tratan a continuación.

3.1.1. Análisis en el Dominio del Tiempo

Vista como una función del tiempo, una señal puede ser continua o discreta:

- Señal continua. Definida en forma práctica, es la señal que varía suavemente a través del tiempo; es decir, no tiene quiebres o discontinuidades como muestra la Figura 3.1.1.1 (a). Expresado matemáticamente, es lo siguiente: una señal $s(t)$ es continua si:

$$\lim_{t \rightarrow a} s(t) = s(a), \text{ para todo } a$$

- Señal discreta. Es aquella cuya intensidad mantiene un nivel constante durante un tiempo dado y luego cambia bruscamente a otro nivel constante. En la Figura 3.1.1.1(b) se muestra una señal discreta.

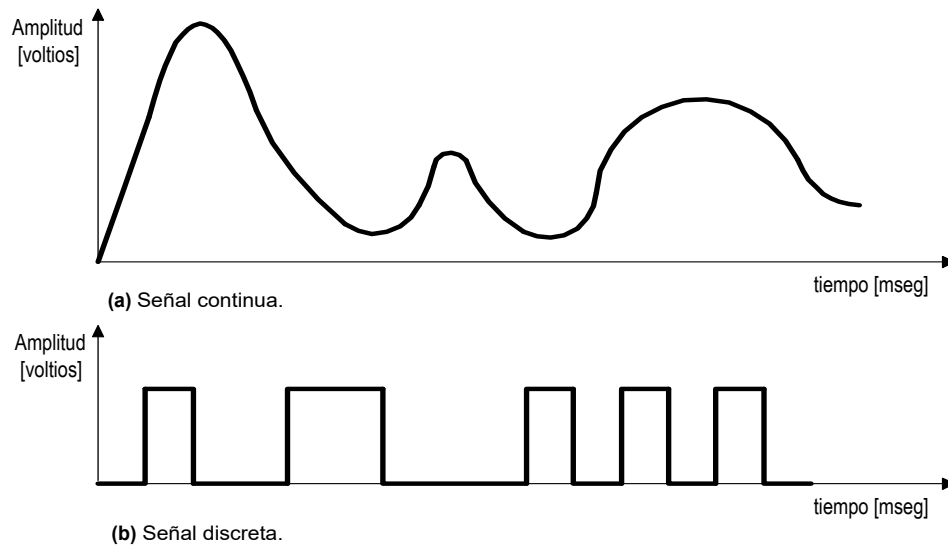


Figura 3.1.1.1: Señal continua y discreta

Ejemplos de señales continuas son la voz humana y, en general, todas las manifestaciones físicas de la naturaleza como temperatura, humedad, sonidos. Una señal discreta es, por ejemplo, una sucesión de pulsos cuadrados eléctricos que representan físicamente los bits; es decir, los 1's y 0's de la lógica binaria.

Una señal continua o discreta puede ser, además, periódica o aperiódica:

- Señal periódica. Es aquella en que un mismo patrón de señal se repite sucesivamente en el tiempo. En la Figura 3.1.1.2 se presentan dos ejemplos de señal periódica; en (a) se muestra como señal continua una onda seno, y en b) la señal discreta es una onda cuadrada. Desde el punto de vista matemático una señal $s(t)$ se define como periódica sí y solo sí:

$$s(t + T) = s(t), \text{ para } -\infty < t < \infty;$$

en donde T es el período de la señal y es el menor valor que satisface dicha condición.

- Señal aperiódica. Es toda señal en la que no se cumple la condición de señal periódica para ningún T finito.

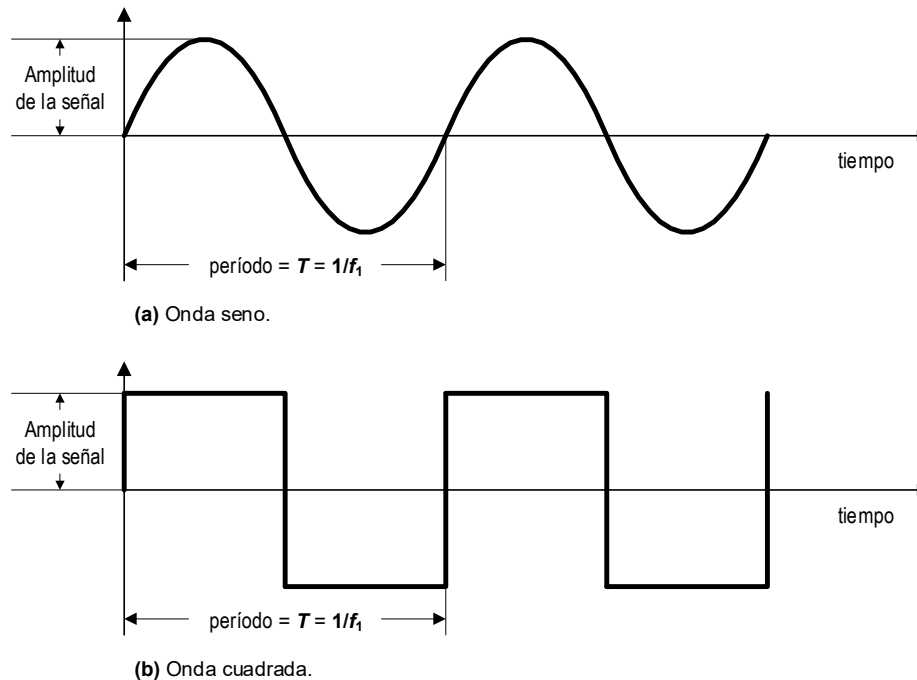


Figura 3.1.1.2: Señales periódicas y aperiódicas

Definiciones

- Señal. Desde un punto de vista general, señal es la variación de una entidad física en función del tiempo que transporta información. Conforme a la temática que aborda este texto, se considerarán específicamente las señales electromagnéticas que se envían por los enlaces de comunicación para transmitir datos a través de la distancia.
- Onda. Es la representación gráfica de la relación entre dos variables. Así, una señal puede representarse mediante una onda en un sistema de ejes coordenados: en el eje vertical se representa la amplitud de la señal que varía en cada instante de tiempo; en el eje horizontal se registra el transcurso del tiempo.
- Función. Es la expresión matemática de una onda.

Onda Seno

La onda seno es una onda fundamental continua y periódica que puede representarse mediante tres parámetros que son: amplitud (A) -, frecuencia (f) - y fase (ϕ).

- Amplitud. Es el máximo valor de la señal en el tiempo. Normalmente es una tensión eléctrica que se expresa en voltios. Puede ser también una corriente eléctrica expresada en amperes o una potencia expresada en vatios.
- Frecuencia. Es la velocidad en que se repite un ciclo de señal en una unidad de tiempo y se expresa en ciclos por segundo o Hertz. Otro parámetro usado es el

período (T), que es el tiempo que transcurre en un ciclo de señal. Por lo tanto, la relación que existe entre T y f es $T = 1/f$.

- Fase. Es una medida de la posición relativa de la señal con respecto a una referencia temporal, como puede ser el eje de las ordenadas en un sistema de ejes coordenados.

A continuación, se analiza cómo influyen estos tres parámetros en la forma y posición de la onda. La onda seno está representada por la función $s = A \sin(\alpha + \phi)$, donde A es la amplitud y $(\alpha + \phi)$ es el argumento de la función.

En dicho argumento α es la variable independiente y ϕ es una constante; ambos tienen dimensión de radianes o grados. Para que la función seno exprese una onda variable en el tiempo, es necesario que contenga en el argumento la variable tiempo t en forma explícita, para lo cual se necesita hacer un cambio de variables. En este sentido téngase presente que, cuando α varía entre 0 y 2π radianes en la función $\sin(\alpha)$, t lo hace entre 0 y T segundos en una onda seno que varía en función del tiempo. Haciendo la relación $\alpha/t = 2\pi/T = 2\pi f$ y despejando α se tiene que $\alpha = 2\pi ft$. Reemplazando este valor de α en la función original, se llega a:

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

En esta expresión la variable independiente es t y también están presentes los parámetros A , f y ϕ que son constantes. En la Figura 3.1.1.3 se muestra cómo se modifica la onda seno cuando varía uno de los parámetros manteniendo constantes los otros dos.

En la parte (a) de la Figura 3.1.1.3 la frecuencia es $f = 1\text{ Hz}$ (ciclos/seg), por lo tanto, el período es $T = 1$ seg. En la parte (b) la frecuencia y la fase son las mismas pero la amplitud es la mitad de la original. En la parte (c) se tiene $f = 2\text{ Hz}$, que equivale a $T = 0.5$ seg. Finalmente, en la parte (d) se muestra el efecto de correr la fase en $\pi/4$ radianes ó 45° .

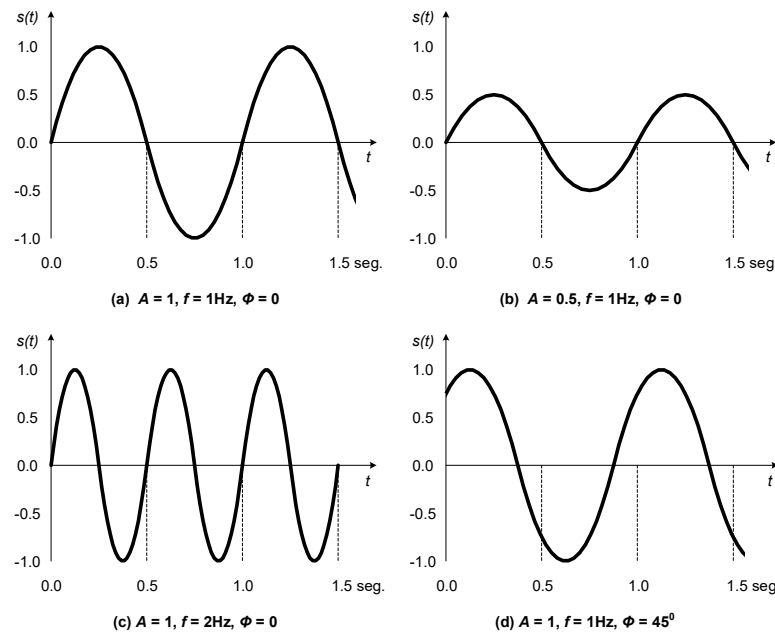


Figura 3.1.1.3: Representaciones de la función $s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$ cuando varían los parámetros A , f y ϕ .

Interpretación de la onda seno en tiempo y en espacio

Los gráficos de la Figura 3.1.1.3 muestran la variación de una onda seno en función del tiempo. Una forma de visualizar esta variación es pararse en un punto dado del medio de transmisión y detectar con algún instrumento los valores que toma la señal a medida que transcurre el tiempo. Si se realiza un gráfico de estos valores para distintos intervalos de tiempo se obtiene un gráfico similar al de la Figura 3.1.1.3.

De forma similar se puede visualizar la variación de la señal a lo largo del medio de transmisión en un instante dado. En este caso es como sacarle una fotografía a la señal (tiempo detenido). Si se hace un gráfico utilizando un par de ejes coordenados de amplitud vs. distancia, se obtiene una onda seno que muestra el valor de la señal en cada punto del medio de transmisión en un instante dado. Por ejemplo, en el caso de una transmisión senoidal como onda electromagnética de radio que se genera desde una antena o el sonido que parte de un parlante, en un instante de tiempo dado, la intensidad de la señal variará en forma senoidal como función de la distancia desde la fuente.

Existen dos relaciones simples entre dos ondas seno, una en función del tiempo y otra en función del espacio. Se define la longitud de onda (λ) de una señal como la distancia ocupada por un ciclo, o, dicho de otro modo, como la distancia entre dos puntos de dos ciclos consecutivos en idéntico estado de excitación electromagnética. Supóngase que la señal viaja a una velocidad “ v ”. La longitud de onda λ está relacionada con el período T de la siguiente forma:

$$\lambda = vT ; \text{ otra expresión equivalente es } \lambda f = v$$

Tiene particular relevancia en esta discusión cuando $v = c$, donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre, cuyo valor es $c = 3 \times 10^8$ m/seg. Esta es la velocidad de propagación de una señal electromagnética en el aire.

Para el caso de tener que calcular la velocidad de propagación de una señal electromagnética en un medio guiado, se debe tener en cuenta el factor de velocidad de la línea.

El factor de velocidad de una línea de transmisión es la relación entre la velocidad de propagación de una señal en un cable y la velocidad de propagación de la luz en el espacio libre. La velocidad a la que viaja una onda electromagnética en una línea de transmisión, depende de la constante dieléctrica del material aislante que separa los dos conductores.

La constante dieléctrica es simplemente la permeabilidad relativa del material. La constante dieléctrica relativa del aire es 1.0006. Sin embargo, la constante dieléctrica de los materiales comúnmente utilizados en las líneas de transmisión varía de 1.2 a 2.8, dando factores de velocidad desde 0.6 a 0.9. La figura 3.1.1.4 muestra los distintos factores de velocidad para cada tipo de cable. Por ejemplo, en un cable trenzado Cat.6A, la velocidad de propagación de la señal será 195.000 m/s (metros sobre segundo)

VF (%)	Cable	capa física Ethernet
74-79	Cat-7 de par trenzado	
77	RG-8 / U	Mínimo para 10BASE5
67	Fibra óptica	Mínimo para 10BASE-FL , 100BASE-FX , ...
sesenta y cinco	RG-58A / U	Mínimo para 10BASE2
sesenta y cinco	Cat-6A de par trenzado	10GBASET
64	Cat-5e de par trenzado	100BASE-TX , 1000BASE-T
58.5	Cat-3 de par trenzado	Mínimo para 10BASE-T

Figura 3.1.1.4: Factor de velocidad de distintos tipos de cables

3.1.2. Análisis en el Dominio de la Frecuencia

El tratamiento formal de las señales en el dominio de la frecuencia es realizado por el Análisis de Fourier cuyo estudio escapa del alcance de este texto. Se intentará, en cambio, dar un concepto intuitivo de la relación entre la forma de una señal y las frecuencias que la constituyen mediante un método inductivo. Esto es, partiendo del resultado obtenido por Fourier se sigue luego con ejemplos relacionados.

Mediante el Análisis de Fourier se puede demostrar que cualquier señal está formada por componentes de distinta frecuencia, donde cada componente es una onda seno. Dicho de otra manera: una señal de cualquier forma puede descomponerse en simples ondas seno. Este resultado es de suma importancia, por cuanto el efecto que produce el medio de transmisión en una señal que lo atraviesa se puede expresar más claramente en términos de frecuencia, que en el dominio del tiempo.

La Onda Cuadrada

Como se mencionó anteriormente, normalmente una señal electromagnética está compuesta por muchas frecuencias. El caso más típico es el de la señal digital cuya forma se aproxima a la de una onda cuadrada. En esta sección se examinará la relación que existe entre una onda cuadrada periódica y sus componentes de frecuencia. En ese sentido, considérese la siguiente función:

$$s_1(t) = \text{sen}[2\pi ft] + (1/3) \text{sen}[2\pi(3f)t]$$

La expresión anterior representa una onda que tiene como componentes dos ondas seno de frecuencias f y $3f$ y amplitudes 1 y $1/3$, respectivamente. En la parte (a) de la Figura 3.1.2.1 se muestra la primera componente, en (b) la segunda, y en (c) se muestra la onda que resulta de sumar ambas componentes.

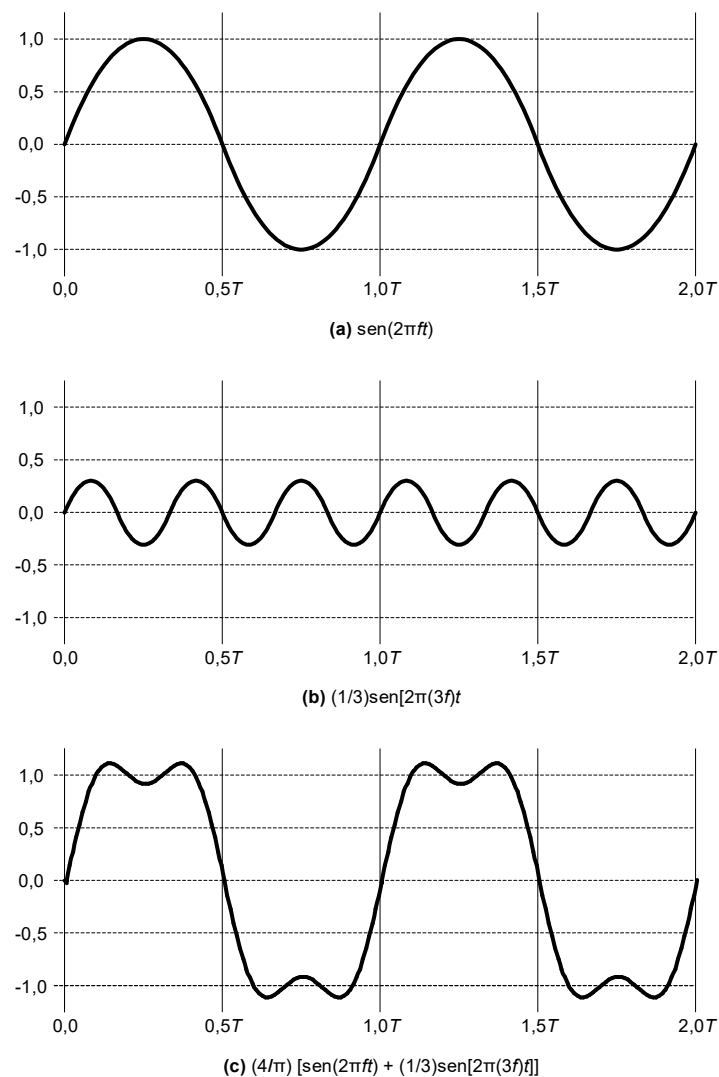


Figura 3.1.2.1: Suma de dos ondas seno. (a) onda fundamental (b) componente de frecuencia $3f$. (c) onda resultante de la suma de (a) y (b).

Considérese ahora las funciones $s_2(t)$ y $s_3(t)$ definidas como sigue:

$$s_2(t) = \text{sen } [2\pi ft] + (1/3) \text{sen } [2\pi(3f)t] + (1/5) \text{sen } [2\pi(5f)t]$$

$$s_3(t) = \text{sen } [2\pi ft] + (1/3) \text{sen } [2\pi(3f)t] + (1/5) \text{sen } [2\pi(5f)t] + (1/7) \text{sen } [2\pi(7f)t]$$

$s_2(t)$ representa una onda que se obtiene de sumar tres ondas seno de frecuencias f , $3f$ y $5f$, y cuyas amplitudes son 1, $1/3$ y $1/5$, respectivamente. Mientras que $s_3(t)$ es la onda representada por $s_2(t)$ a la que se ha agregado una cuarta onda seno de frecuencia $7f$ y amplitud $1/7$. Las ondas que representan las funciones $s_2(t)$ y $s_3(t)$ se muestran en (a) y (b) de la Figura 3.1.2.2. A partir de las expresiones presentadas se pueden realizar algunas consideraciones interesantes:

- Las frecuencias de las ondas componentes en $s_1(t)$, $s_2(t)$ y $s_3(t)$ son múltiplos enteros de la primera frecuencia. Cuando todas las frecuencias de las componentes de una señal son múltiplos de una frecuencia, esta última se denomina frecuencia fundamental. En este caso la frecuencia fundamental es f .
- En las Figuras 3.1.2.1 y 3.1.2.2 puede observarse que el período de las señales resultantes $s_1(t)$, $s_2(t)$ y $s_3(t)$, es igual al período de la frecuencia fundamental. Es decir, el período de la componente $\text{sen } [2\pi ft]$ es $T = 1/f$, y el período de $s_1(t)$, $s_2(t)$ y $s_3(t)$ es también T .
- Observando las ondas de las Figuras 3.1.2.1(c) y 3.1.2.2 se puede concluir que, a medida que se agregan más términos de la forma $(1/k) \text{sen } [2\pi(kf)t]$, con k impar, a la función $s(t) = \text{sen } [2\pi ft]$, la onda resultante se acerca cada vez más a la forma de la onda cuadrada de la Figura 3.1.2.2 (c).

Siguiendo un razonamiento inductivo a partir de la formación de las funciones $s_1(t)$, $s_2(t)$ y $s_3(t)$, se puede decir que la función $s(t)$, definida a continuación, representa una onda cuadrada de amplitud A y período $T = 1/f$:

$$s(t) = A (4/\pi) \sum_{k=1, k \text{ impar}}^{\infty} (1/k) \text{sen } (2\pi k f t)$$

Es decir, una onda cuadrada pura tiene infinitas componentes cuyas amplitudes y frecuencias se obtienen de acuerdo a lo indicado por la expresión anterior.

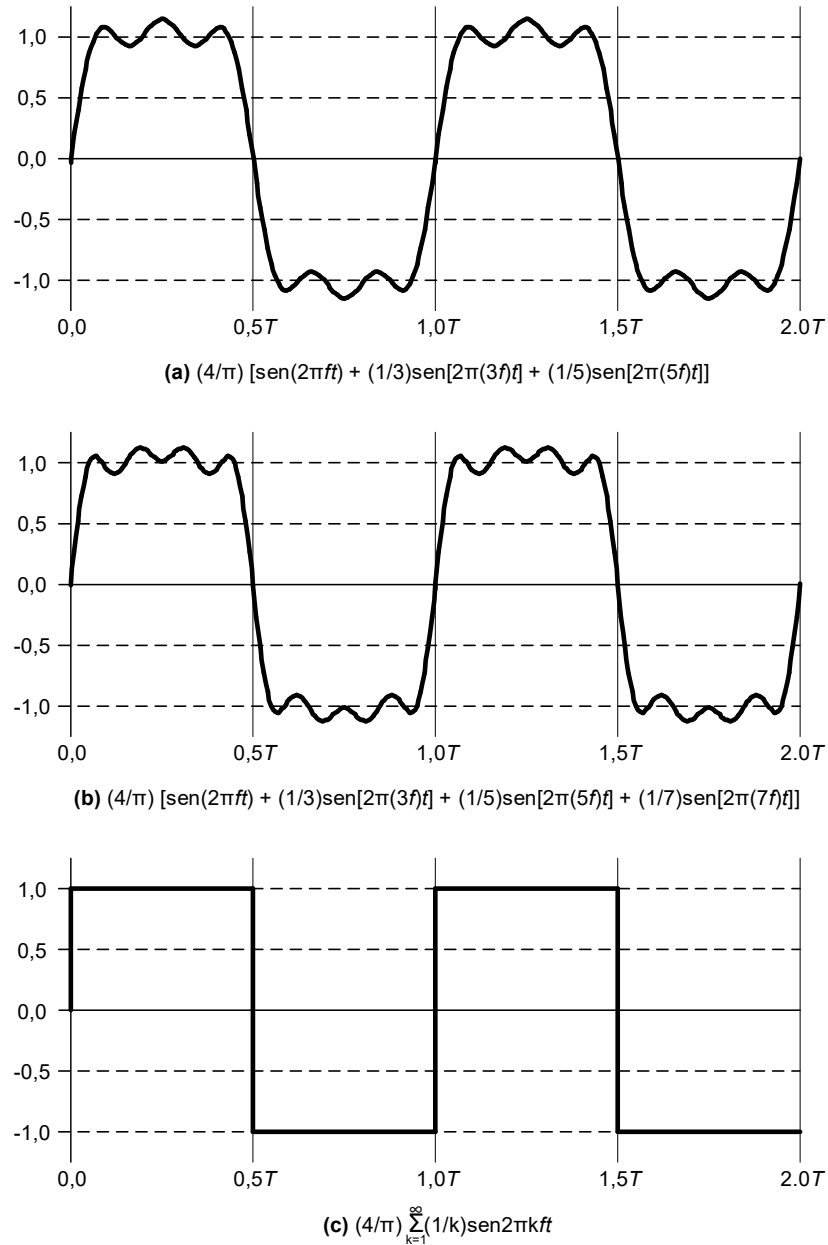


Figura 3.1.2.2: Onda resultante de sumar varias ondas senos

Función en el Dominio de la Frecuencia

De análisis anterior también se puede decir que para una señal con una función $s(t)$ que expresa la amplitud de la señal en cada instante de tiempo, existe una función $S(f)$ en el dominio de la frecuencia que expresa las frecuencias componentes de esa señal. A la izquierda de la Figura 3.1.2.3 se muestran, las ondas correspondientes a las funciones $s_2(t)$, $s_3(t)$ y $s(t)$, y a la derecha las respectivas funciones $S_1(f)$, $S_2(f)$ y $S(f)$. Cada par de funciones ($s(t)$ y $S(f)$), representan la misma señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, respectivamente.

El análisis de Fourier demuestra que $S(f)$ es siempre discreta cuando el rango en el tiempo de $s(t)$ va de $-\infty$ a $+\infty$. También se cumple que $S(f)$ es continua cuando la duración de $s(t)$ es finita en el tiempo.

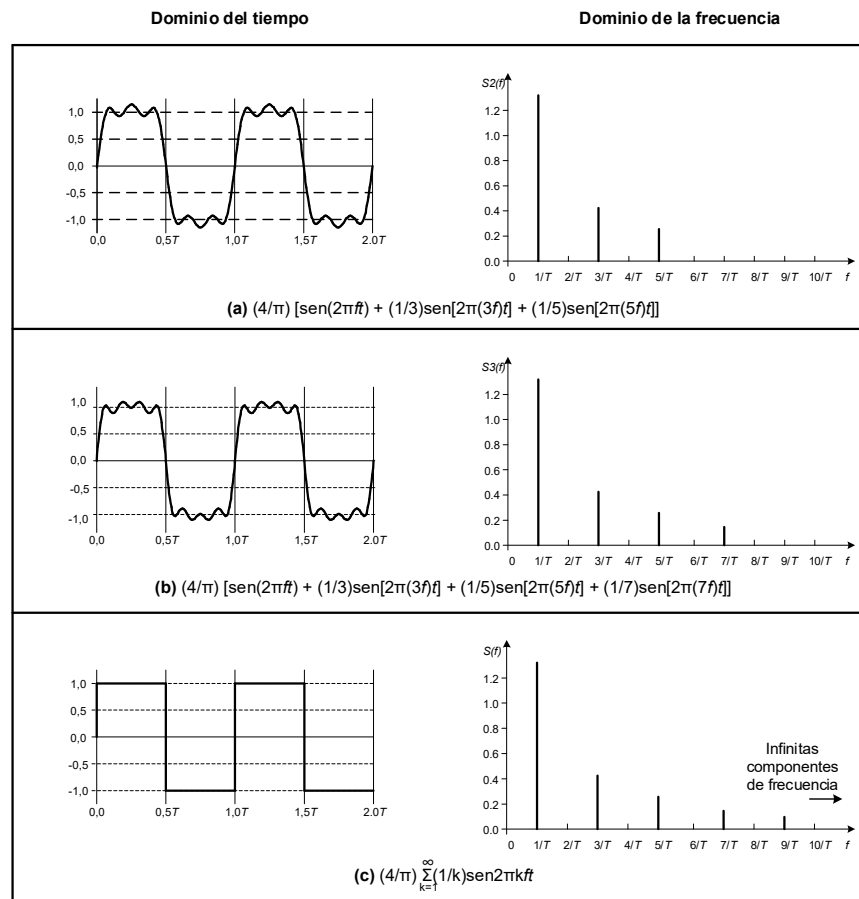


Figura 3.1.2.3: Funciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia

Espectro de Frecuencia y Ancho de Banda

Se llama espectro de frecuencia de una señal al rango de frecuencias que ella contiene. Por ejemplo, para la señal de la Figura 3.1.2.2(a) el espectro de frecuencia se extiende desde f a $5f$ como se muestra en la Figura 3.1.2.3(a).

Ancho de Banda de una Señal

El ancho de banda absoluto de una señal es el ancho del espectro de frecuencia de la misma. En el caso de la señal de la Figura 3.1.2.3(a) el ancho de banda es $4f$, puesto que $5f - f = 4f$. En teoría, muchas señales, como la onda cuadrada mostrada en la Figura 3.1.2.3(c), tienen ancho de banda infinito. Sin embargo, los sistemas de comunicaciones sólo pueden aceptar señales con anchos de banda finitos. En una señal real la mayor parte de la energía está contenida en una banda de frecuencias relativamente angosta. A esta banda se la denomina ancho de banda efectivo o simplemente ancho de banda.

Ancho de Banda de un Medio de Transmisión

Cabe aclarar que el concepto de ancho de banda se aplica tanto a una señal como a un medio de transmisión. El ancho de banda de un medio de transmisión es el límite máximo que puede ocupar el espectro una señal o la suma de los espectros de varias señales

que lo atraviesan. Cuando el ancho de banda de la señal de entrada es mayor que el ancho de banda del medio, la señal resultante sufre la limitación de su espectro que es impuesta por el ancho de banda del medio. Esto da como resultado una señal de salida con un espectro más reducido que el de la señal de entrada.

Componente de Continua

Una componente particular que puede tener una señal real es la llamada componente de continua o componente constante. Esta componente se llama así porque se trata de una corriente o tensión continua, es decir, tiene una amplitud constante a lo largo del tiempo y su frecuencia es de valor 0. Por ejemplo, en la Figura 3.1.2.4 se muestra el resultado de adicionar una componente de continua a la señal de la Figura 3.1.2.1(d). Cuando no existe la componente de continua el promedio de la amplitud de una señal es cero como se puede ver en la representación de las señales en el dominio del tiempo. Mientras que, cuando una señal tiene componente de continua, tiene una componente de frecuencia cero y un promedio de amplitud distinta de cero.

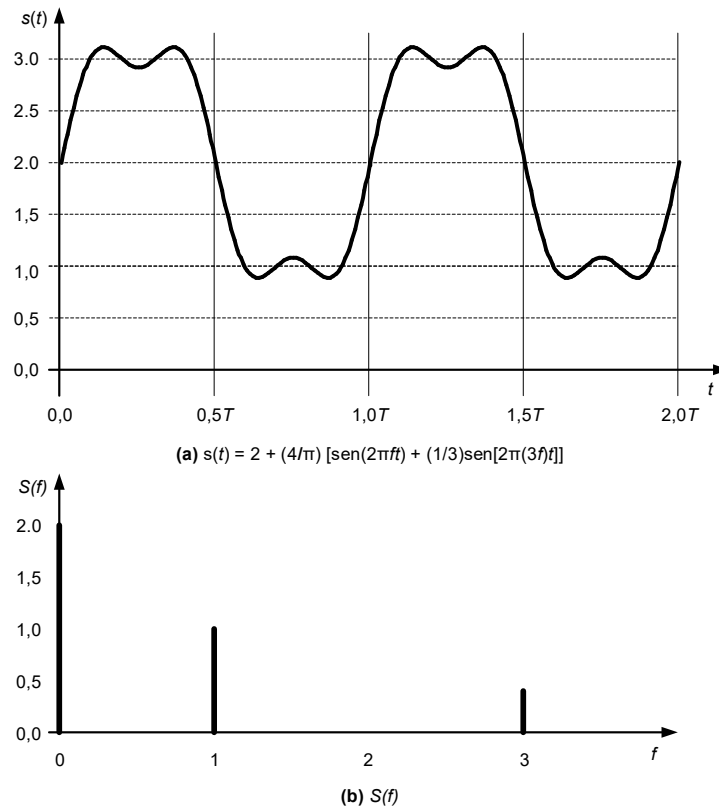


Figura 3.1.2.4: Señal con componente de continua

3.1.3. Velocidad de los Datos usando una Onda Cuadrada

Es útil analizar la relación que existe entre la velocidad de transmisión del dato con la forma de la señal que lo transporta. Se debe aclarar que son diversas las formas que puede tener la señal que transporta un dato dado, acción que se conoce como codificación. Este tema se analiza con detalle en el Capítulo 5, pero aquí se tratarán algunos aspectos cuando el dato se codifica mediante una onda cuadrada en que el pulso positivo representa, por ejemplo, el binario 1 y el pulso negativo el binario 0. Una onda cuadrada, por lo tanto, representa una secuencia alternada de 1's y 0's; es decir, 101010...

La pregunta aquí es ¿Qué relación existe entre la velocidad de transmisión de los datos y el ancho de los pulsos de la onda cuadrada? De acuerdo a la Figura 3.1.3.1, “un” bit es la mitad del período de la onda, es decir, $T/2$. Por definición de velocidad de transmisión de datos (cantidad de bits por unidad de tiempo), $v = 2/T = 2f_1$, donde f_1 es la frecuencia de la componente fundamental de la onda cuadrada. Obsérvese que la relación $v = 2/T$ es válida solamente cuando un bit es representado por un pulso de ancho $T/2$, donde T es el período de la onda cuadrada.

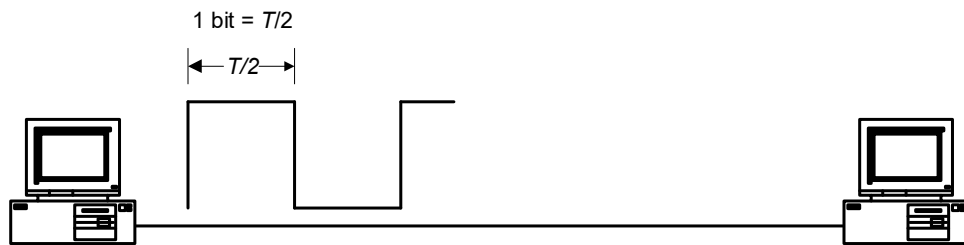


Figura 3.1.3.1: Transmisión de bits codificados por una onda cuadrada

Relación entre Velocidad de los Datos y Ancho de Banda

El concepto de ancho de banda efectivo de una señal es un poco impreciso cuando se dice que “es el ancho de banda dentro del cual está la mayor parte de la energía de la señal”. La expresión “mayor parte” es algo arbitraria en relación al diseño de los sistemas de comunicación. En este sentido, aunque una onda pueda contener frecuencias en un amplio rango, un medio de transmisión real, sólo aceptará una banda limitada de frecuencias.

Considérese nuevamente la onda cuadrada como medio para codificar una secuencia alternada de 1's y 0's. Se vio que la misma es representada por la función:

$$s(t) = A (4/\pi) \sum_{k=1, k \text{ impar}}^{\infty} (1/k) \text{sen}(2\pi k f_1 t)$$

Esta expresión indica que la onda cuadrada tiene infinitas componentes de frecuencia y, por lo tanto, un ancho de banda infinito. Sin embargo, la amplitud de la k -ésima componente es $1/k$; es decir, es tanto más pequeña cuánto más alta sea la frecuencia de la componente. Siendo la energía proporcional al cuadrado de la amplitud, se puede

decir que la mayor parte de la energía se encuentra concentrada en las primeras componentes de frecuencias. Caben aquí las preguntas:

- a) ¿Qué sucede si se limita el ancho de banda a las primeras componentes de frecuencia?
- b) ¿Qué relación tiene el ancho de banda con la velocidad de los datos? Las respuestas de estas dos preguntas se obtienen analizándose los tres casos siguientes.

Caso I: Onda con Tres Componentes y $f = 1$ MHz

Supóngase que se dispone de un sistema de transmisión digital con capacidad para transmitir señales con un ancho de banda de 4 MHz y se intenta transmitir una secuencia alternada de 1's y 0's empleando una onda cuadrada. Si se aproxima la misma a la forma de onda de la Figura 3.1.2.2 (a) se observa que, si bien esta onda se parece a una onda cuadrada “distorsionada”, es lo suficientemente parecida para que un receptor pueda discriminar entre un binario 0 y un binario 1. Ahora, si se toma $f = 10^6$ ciclos/segundo = 1 MHz, entonces se tiene la señal:

$$s(t) = \sin [(2\pi \cdot 10^6)t] + (1/3) \sin [(2\pi \cdot 3 \cdot 10^6)t] + (1/5) \sin [(2\pi \cdot 5 \cdot 10^6)t]$$

El ancho de banda de la misma es: frecuencia límite superior menos frecuencia límite inferior = $5 \times 10^6 - 1 \times 10^6 = 4\text{MHz}$.

Siguiendo con la onda de la Figura 3.1.2.2(a), obsérvese que para $f = 1\text{MHz}$ el período de la frecuencia fundamental es $T = 1/10^6\text{seg} = 10^{-6}\text{seg} = 1 \mu\text{seg}$. Luego, si se considera que esta forma de onda representa una secuencia de 1's y 0's, se puede ver que un bit ocurre cada $0.5 \mu\text{seg}$, o bien, dos bits cada $1 \mu\text{seg}$, esto significa que la velocidad de datos es de $2 \times 10^6 \text{ bits/seg} = 2\text{Mbps}$. Como conclusión del análisis del presente caso se deduce que a través un ancho de banda de 4MHz se puede transmitir datos con una velocidad de hasta 2Mbps con una calidad razonable.

Caso II: Onda con Tres Componentes y $f = 2$ MHz

Supóngase ahora que el sistema de transmisión digital tiene un ancho de banda de 8MHz. Considérese nuevamente la Figura 3.1.2.2(a), pero ahora con $f = 2\text{MHz}$. Siguiendo la misma línea de razonamiento anterior, el ancho de banda de la señal es $(5 \times 2 \times 10^6)\text{Hz} - (2 \times 10^6)\text{Hz} = 8\text{MHz}$. En este caso $T = 1/f = 0.5\mu\text{seg}$. Este resultado indica que un bit ocurre cada $0.25 \mu\text{seg}$ para una velocidad de datos de 4Mbps.

Caso III: Onda con Dos Componentes y $f = 2$ MHz

Ahora supóngase que la onda de la Figura 3.1.2.1(c) (resultante de la suma de sólo dos componentes de frecuencia) es una aproximación adecuada a una onda cuadrada. Es decir, la diferencia entre un pulso positivo y uno negativo es lo suficientemente grande para que esa forma de onda pueda representar adecuadamente una

secuencia alternada de 1's y 0's. Considérese ahora que se toma $f = 2\text{MHz}$. Utilizando la misma línea de razonamiento de los ejemplos anteriores, el ancho de banda de la señal de la Figura 3.1.2.1(c) es $(3 \times 2 \times 10^6)\text{Hz} - (2 \times 10^6)\text{Hz} = 4\text{MHz}$. Pero en este caso $T = 1/f = 0.5\mu\text{seg}$; es decir, “un” bit ocurre cada $0.25\mu\text{seg}$, lo que significa una velocidad de datos de 4Mbps.

Se puede resumir el análisis realizado de la siguiente forma:

- Caso I: Ancho de banda = 4Mhz, velocidad de transmisión = 2Mbps (usando 3 componentes).
- Caso II: Ancho de banda = 8Mhz, velocidad de transmisión = 4Mbps (usando 3 componentes).
- Caso III: Ancho de banda = 4Mhz, velocidad de transmisión = 4Mbps (usando 2 componentes).

Conclusiones de los Casos I, II y III

- Casos I y II: Muestran que, para una señal con un número dado de componentes, para lograr una velocidad de los datos dos veces mayor es necesario duplicar el ancho de banda de la señal. Bajo las mismas condiciones, en general se cumple que, para lograr una mayor velocidad, el ancho de banda de la señal necesario debe ampliarse en la misma proporción.
- Casos I y III: Muestran que, cuando se dispone de un dado ancho de banda, se puede tener mayor velocidad en los datos si se reducen las componentes de la señal.

Conclusiones sobre Ancho de Banda vs Velocidad de los Datos

- Hay una relación directa entre la velocidad de los datos y el ancho de banda de la señal que los transporta. Considerando una señal con un número dado de componentes de frecuencias, se tiene: a mayor velocidad de datos mayor es el ancho de banda efectivo requerido. Visto de otra forma: cuanto mayor es el ancho de banda de un sistema de transmisión, mayor es la velocidad de los datos que se pueden transmitir a través de ese sistema.
- En teoría, como se vio para la onda cuadrada, una señal digital tiene un ancho de banda infinito. Si se intentara transmitir esta señal a través de un medio, la naturaleza física del medio limitará el ancho de banda y realmente transmitirá una señal con un ancho de banda finito. Este recorte de frecuencias produce una distorsión en la señal de llegada respecto de la original.
- Por otro lado, cuanto mayor es el ancho de banda de la señal transmitida, mayor es el ancho de banda requerido del medio, y mayor es el costo de la transmisión.

Por lo tanto, el costo y el diseño práctico de los sistemas de comunicación exigen que la información a transmitir deba aproximarse a una señal con mínimo ancho de banda.

- No obstante, limitar el ancho de banda produce distorsiones en la señal, lo que hace dificultosa la tarea de interpretación de la información recibida por parte del receptor. Esto se debe a que, a mayor limitación del ancho de banda, mayor es la distorsión producida en la señal y mayor es la posibilidad de errores en la detección.

Las conclusiones anteriores se hacen a partir de considerar el caso particular de una onda cuadrada usada para transmitir una secuencia alternada de 1's y 0's.

Es útil considerar cuando no hay una variación alternada del valor de los bits, sino que hay secuencias de bits cuyo un valor se mantiene constante, como se muestra en la Figura 3.1.3.2. En éste caso se presenta una secuencia de bits que fluyen a una velocidad de 2.000 bits por segundo. En dicha figura se observa que con una señal con un ancho de banda de 2.500Hz e, incluso, de 1.700Hz se obtiene una representación muy buena. A partir de esta observación se pueden generalizar estos resultados. Si la velocidad de los datos es B bps, se puede obtener una buena representación otorgando a la señal que los representa un ancho de banda de $2B$ Hz. Sin embargo, a menos que el ruido presente sea muy alto, el patrón de bits puede ser recuperado con un ancho de banda menor que $2B$ Hz.

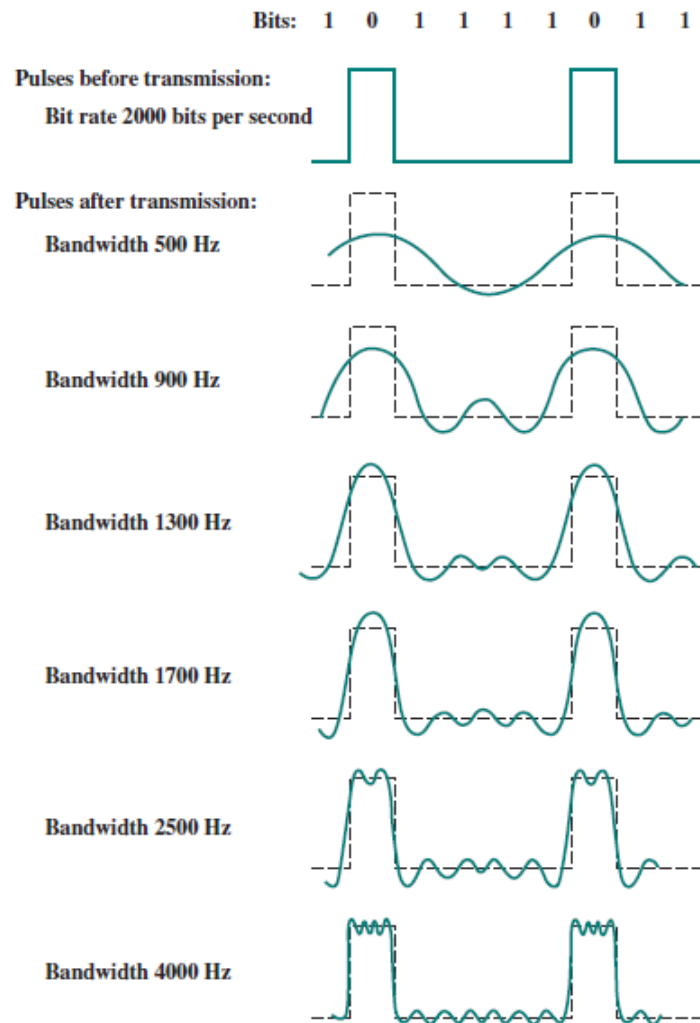


Figura 3.1.3.2: Efecto del ancho de banda en una señal