

## SEÑALES, SISTEMAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

Debido a la gran importancia que en el contexto de la información y las telecomunicaciones, tienen las señales y los sistemas, el propósito de este capítulo consiste en presentar las ideas y los conceptos necesarios para que se entienda lo que es una señal y un sistema, así como la manera en que interactúan en las telecomunicaciones. No es únicamente en dicha área donde han adquirido importancia; también en otros campos del conocimiento, tales como aeronáutica, astronáutica, acústica, sismología, ingeniería biomédica, medicina en general (recuérdese la importancia que tienen los electrocardiogramas y los electroencefalogramas, así como las tomografías axiales computarizadas y los estudios basados en resonancia magnética nuclear), sistemas de generación y distribución de energía eléctrica, control de procesos de transformación (ingeniería química) y de manufactura (ingeniería industrial o mecánica), uso doméstico y entretenimiento (vale la pena resaltar el efecto que recientemente han tenido los discos compactos, conocidos comúnmente como CD, en los cuales, a pesar de tratarse de señales acústicas de alta fidelidad, es decir, música, cada una de sus componentes genera y procesa algún tipo de información; este ejemplo será analizado más adelante).

En cada una de esas áreas del conocimiento, las señales utilizadas son de distinta naturaleza: en acústica se trata de señales generadas por fuentes de sonido como la voz, la música o cualquier clase de ruido; en control de procesos pueden ser señales de tipo térmico, mecánico o eléctrico generadas por los procesos mismos; en medicina pueden ser señales eléctricas o magnéticas generadas por el organismo humano; en sismología se trata de señales mecánicas, es decir, movimientos de la corteza terrestre. Sin embargo, todas ellas tienen algo en común: cada señal tiene una o más características que reflejan el comportamiento de uno o varios fenómenos físicos; es decir, que en alguna de sus características contiene información acerca de los fenómenos físicos que entran en juego.

Para analizar esto con mayor detalle, considérese como ejemplo el área de la sismología. El fenómeno físico participante en la generación de un sismo es el movimiento brusco de las capas que forman la corteza terrestre. Como estos movimientos generalmente son de tipo "impulsivo", producen, a su vez, movimientos en la superficie terrestre, ocasionando lo que se conoce como un sismo. Dicho movimiento tiene ciertas características, tales como intensidad y naturaleza ondulatoria. Si el movimiento de la superficie terrestre se traduce de alguna manera a una señal eléctrica, las características de la señal sísmica se preservan, pero en este caso se contaría con una señal que podría ser estudiada con mayor facilidad que la señal mecánica original. Considerando que un posible futuro gran sismo que afectaría de manera muy negativa a la ciudad de México podría generarse en la costa del estado de Guerrero, recientemente se instaló en esa zona un conjunto de sensores (sistemas que detectan los movimientos de las capas terrestres con base en aceleraciones) que generan señales eléctricas características de los movimientos de tipo mecánico por lo común asociadas a los sismos. Estas señales son transmitidas vía radio a la ciudad de México. Como los movimientos generados por el sismo viajan a lo largo de la superficie terrestre a una velocidad de aproximadamente 300 metros por segundo, y las señales de radio viajan a la velocidad de la luz, las señales eléctricas transmitidas por este medio son recibidas en México antes de la llegada de las ondas sísmicas (es decir, del temblor). Con ello, los habitantes de la ciudad de México dispondrán de un tiempo valiosísimo antes de la llegada del sismo, durante el cual, si la población está bien capacitada y entrenada, se pueden realizar labores de evacuación.

En este ejemplo se aprecia la dependencia que existe entre el tiempo y una señal: cualquier persona que haya estado presente durante un sismo, recordará que conforme avanza el tiempo los movimientos de la tierra cambian de sentido, se percibe una especie de "vaivén" o de "sube y baja", y, afortunadamente, también conforme avanza el tiempo, la intensidad de los movimientos disminuye hasta que todo vuelve a su estado inicial de reposo.

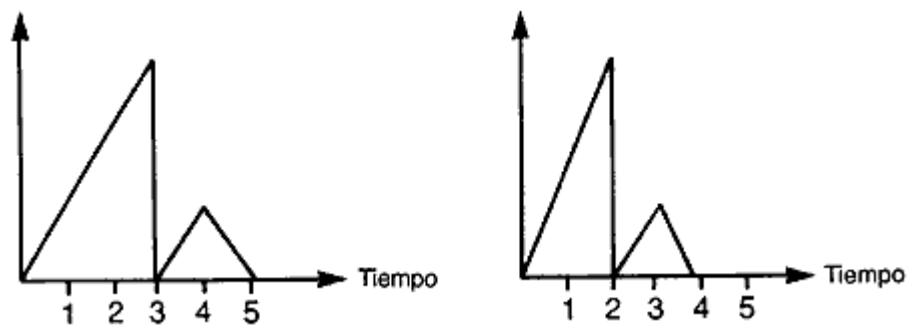
Esta dependencia del tiempo es una de las características más importantes de casi todas las señales que serán tratadas en este libro. En términos un poco más formales, las características de la señal son "una función del tiempo". Para ilustrar esto, en la figura II.1 se presentan dos señales aparentemente iguales en forma, pero distintas entre sí porque su relación con el tiempo es diferente: la primera tiene una duración de 5 segundos, elevándose a su valor máximo en 3 segundos, mientras que la segunda sube a su valor máximo en 2 segundos y tiene una duración total de  $11/3$  segundos.

En lo sucesivo, para indicar de manera explícita que la señal es función del tiempo, se utilizará la siguiente notación:

**y**, **x**, u otra letra indica la amplitud de la señal;

**t** representa el tiempo;

**y(t)** o **x(t)** indica que **y** o **x** son función del tiempo.



**Figura II.1** Dos señales con igual forma pero distinta relación temporal.

En los ejemplos mencionados, las señales varían de una manera continua en función del tiempo; esto significa que conforme avanza el tiempo la señal adquiere valores dentro de un intervalo continuo. Ello se puede aclarar si se analiza un ejemplo donde esto no ocurra. Considérese una señal proveniente de un contador de vehículos al pasar por una caseta de peaje en una carretera. En este caso, el valor que adquiere la señal de conteo puede ser uno de los números asociados con

un proceso de conteo: a lo largo del tiempo pueden haber pasado por la caseta 1, 82 ó 197 vehículos, pero el número de vehículos no puede haber sido 63.3. A diferencia del primer caso, en que se habla de "señales continuas en amplitud" o "señales analógicas", esta segunda clase de señales se denomina "señales continuas en el tiempo, discretas en amplitud": la señal únicamente puede tomar, a lo largo del tiempo, valores de un cierto conjunto, que en este ejemplo, son los números enteros 0, 1, 2, 3, 4, 5... etc. Los cambios entre los valores enteros pueden ocurrir en cualquier instante (este hecho es lo que la hace continua en el tiempo).

En la figura II.2 se ilustra una señal  $x(t)$  que es continua en el tiempo y continua en amplitud, y una señal  $y(t)$  que es continua en el tiempo pero discreta en amplitud.

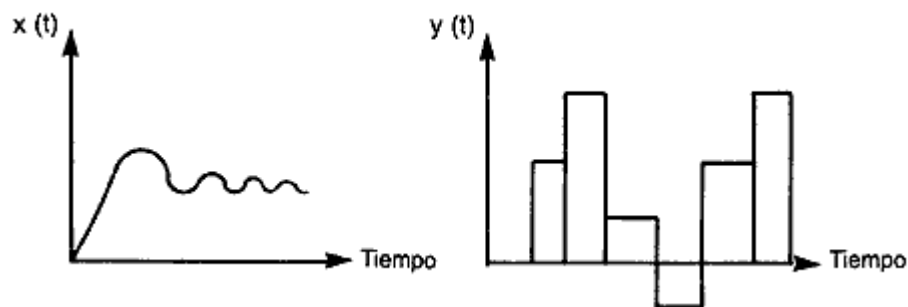


Figura II.2. Señales  $x(t)$  y  $y(t)$ .

Por otra parte, ambas clases de señales tienen un valor determinado para cada valor del tiempo. Sin embargo, existe la posibilidad de que una señal adquiera valores únicamente en ciertos instantes de tiempo (por ejemplo, cada segundo, cada minuto o cada año). Esto puede deberse, ya sea a que así es el fenómeno físico asociado, o bien porque no se tienen los mecanismos para medir las características de las señales más que en determinados instantes. Para ilustrar esta clase de señales, denominadas "discretas en el tiempo", a diferencia de las primeras que son "continuas en el tiempo", supongamos que la señal de interés proviene de las imágenes captadas por una cámara de cine. Una cámara de cine toma en realidad fotografías fijas a razón de entre 24 y 30 fotografías por segundo (esta velocidad es lo suficientemente grande como para engañar al ojo humano y dar la

impresión de que se trata de imágenes de objetos en movimiento). En este ejemplo se trata de muestras de imágenes en movimiento, captadas lo suficientemente rápido como para que su contenido de información no se pierda. Este fenómeno, interesante e importante dentro de las telecomunicaciones, se denomina teorema del muestreo. H. Nyquist lo postula de la siguiente manera:

No es necesario observar todo el tiempo una señal analógica o continua en el tiempo para poder decir cuál es su valor en cualquier momento, aunque la señal no haya sido observada en ese instante. Es suficiente observar sus valores en instantes suficientemente cercanos entre sí, para poder reconstruir la señal de la misma manera que si no se hubiera dejado de observar la señal en ningún instante. La restricción es que el tiempo entre las observaciones (técnicamente éstas se conocen como las "muestras" de la señal) debe ser lo suficientemente pequeño para poder captar aun las variaciones más rápidas

Este principio, si bien no es válido universalmente, sí es lo suficientemente general para ser aplicable a una gran cantidad de señales (las señales que de alguna manera son de interés práctico), y, de hecho, es uno de los pilares de las telecomunicaciones digitales (esto será analizado más adelante). Sus implicaciones son muy profundas: por ejemplo, en lugar de tener que guardar toda la evolución de una señal a lo largo del tiempo, es suficiente guardar un conjunto de las muestras de la señal, sin perder la posibilidad de reconstruir toda la señal a partir de sus muestras.

En el ejemplo de la cámara de cine, cada cuadro de la película que representa una imagen fija de la escena filmada es una muestra de la realidad continua, y la reconstrucción de la señal a partir de dichos cuadros o muestras fijas la realizan el ojo y el cerebro humanos de manera tal que el observador en ningún momento se percata de la naturaleza discreta de lo que está viendo.

En la figura II.3 se ilustra una señal analógica  $x(t)$ , así como su versión muestreada, que designaremos  $x[mT]$ , donde las muestras ocurren en los instantes en que el tiempo  $t$  toma los valores  $T, 2T, 3T, \dots$ , etc. Estos instantes se llaman *tiempos de muestreo*, y al tiempo entre muestras consecutivas se le llama *intervalo de muestreo*.

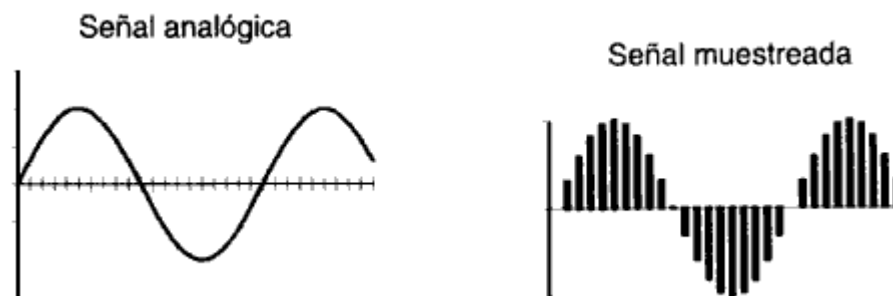


Figura II.3. Teorema de muestreo.

Finalmente, cuando una señal discreta en el tiempo sólo puede tomar valores de amplitud discretos, entonces se trata de una señal discreta tanto en el tiempo como en amplitud. Este tipo de señales ha cobrado una gran importancia en las comunicaciones digitales, ya que los sistemas modernos de telecomunicaciones son eficientes y efectivos precisamente debido a este tipo de señales. A las señales que son discretas en el tiempo y en amplitud se les denomina *señales digitales*, y cuando la amplitud de la señal solamente puede tomar uno de dos valores entonces se trata de una *señal digital binaria*.

Antes de seguir con la identificación y clasificación de las señales vale la pena introducir el concepto de sistema; por una parte, esto facilitará las explicaciones que siguen, y por la otra, es por medio de un sistema como se procesan las señales para realizar lo que de ellas se espera.

Se denomina "sistema" al conjunto de componentes o dispositivos del mundo físico que interactúan entre sí, que aceptan señales como entradas, las transforman y generan otras señales a su salida. En la figura II.4  $x(t)$ ,  $S[x(t)]$ ,  $y(t)$ , representan,

respectivamente, la entrada al sistema, el sistema que transforma la señal de entrada, y la salida del sistema.

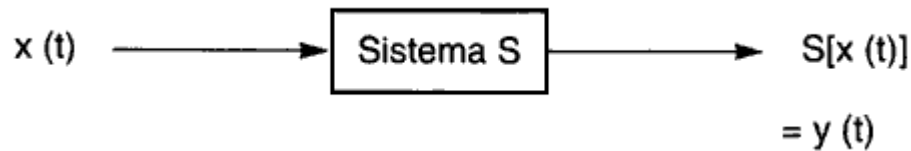


Figura II.4. Entrada  $x(t)$ , sistema  $S$  y salida  $y(t)$ .

Un sistema puede ser visualizado como una caja negra del mundo físico que transforma la señal a su entrada para generar la señal a su salida.

Los siguientes son ejemplos sencillos de sistemas, y en cada caso se identifica cuál es la entrada y cuál la salida: a) *Equipo de sonido*. La entrada es una señal de música (codificada eléctrica, mecánica u ópticamente) que puede provenir de un disco fonográfico (conocido coloquialmente como LP), una cinta magnética, un disco compacto o una antena de radio; la salida es una señal de audio. De hecho, el equipo de sonido puede ser considerado como un conjunto de sistemas, donde las salidas de unos son las entradas de otros; por ejemplo, el primer sistema puede ser el tocadiscos de CD. Su entrada es una señal grabada precisamente en el CD; esta señal es procesada ópticamente por el sistema, y se genera a la salida una señal eléctrica que a su vez es la entrada del amplificador. La salida del amplificador es una réplica de la entrada. Si además se cuenta con altavoces, entonces la señal eléctrica amplificada es convertida por los altavoces en réplicas acústicas. b) *Televisor*. La entrada es una señal eléctrica proveniente de una antena, de un cable o de una videograbadora, y la salida es una señal visual en la pantalla del televisor y una señal acústica en los altavoces de éste.

c) *Muestreador*. Este sistema, mencionado en párrafos anteriores, tiene como entrada una señal continua en el tiempo, y a su salida una señal discreta en el tiempo, donde cada muestra tiene una amplitud igual o proporcional a la de la señal original en el tiempo de muestreo (figura II.5).

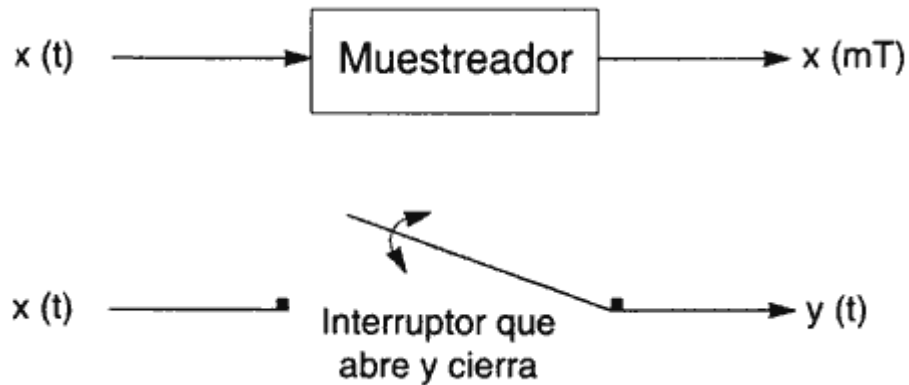


Figura II.5. Muestreador como sistema.

d) *Cuantizadores*. También tienen funciones importantes en las telecomunicaciones. Visto como sistema, la entrada a un cuantizador es cualquier señal continua, y la salida es una versión cuantizada de la misma; si la entrada es continua en el tiempo y en amplitud, la salida es continua en el tiempo, pero discreta en amplitud (figura II.6).

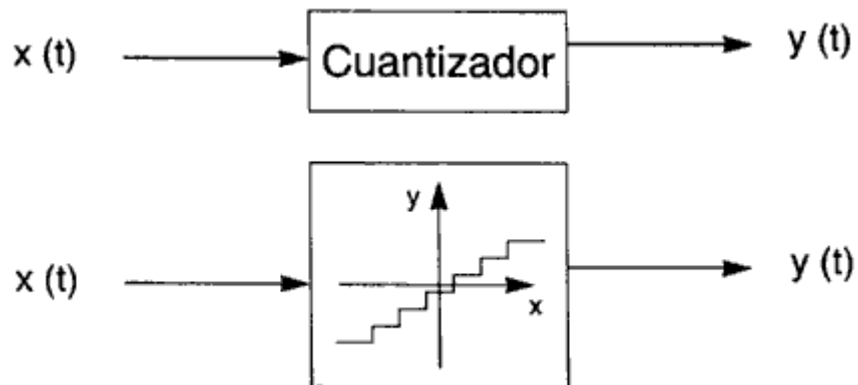


Figura II.6. Cuantizador como sistema.



Los ejemplos del equipo de sonido y el televisor ilustran que es posible interconectar sistemas, de manera tal que la salida de unos sean las entradas de otros, generando de esta manera sistemas más generales. En la figura II.7 se ilustra la conexión en serie de dos sistemas S1 y S2. Se puede observar que la salida de S1 es la entrada de S2, y que la salida de S2 es la transformación que realiza la conexión de ambos sistemas sobre la entrada de S1.



**Figura II.7. Cascada de sistemas.**

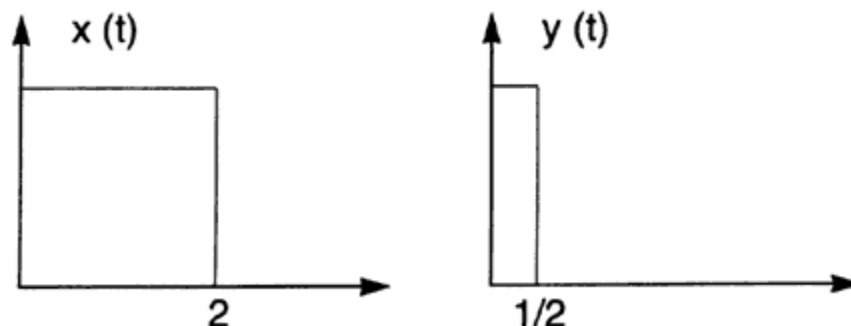
Habiendo establecido los conceptos básicos de un sistema es posible hablar ahora con más detalle sobre las señales digitales. Una señal digital es discreta en el tiempo, y únicamente puede tomar valores de un conjunto finito de símbolos o valores (cuando el número de símbolos es 2, por ejemplo, 0 y 1, se trata de una señal binaria). La forma de convertir señales digitales en general a señales binarias será tratada más adelante.

Una señal digital puede provenir de los siguientes tipos de fuentes: 1) Una fuente discreta en el tiempo, que genera señales digitales, como números, letras o texto. Estas señales son digitales porque los números o letras que genera la fuente (símbolos de la fuente o alfabeto de la fuente) sólo pueden pertenecer a un conjunto finito de símbolos. Si son números decimales, cada símbolo que genera la fuente únicamente puede ser un número perteneciente al conjunto 0, 1, 2, 3..., 9. Si son letras del abecedario, cada símbolo puede ser una letra del conjunto A, B, C..., X, Y, Z. 2) Una fuente que genera señales discretas en el tiempo y continuas en amplitud, caso en el cual hay que generar una señal discreta en amplitud a partir de las señales continuas. Para realizar este proceso, se necesita cuantizar cada valor de la fuente, es decir, aproximar cada valor continuo por medio de uno discreto. La cuantización puede ser, por ejemplo, por redondeo de cada muestra, es decir,

redondeando cada valor continuo al valor discreto más cercano (más adelante se verá esto con más detalle). 3) Una fuente continua en el tiempo y continua en amplitud. En este caso es necesario muestrear la señal continua, para posteriormente cuantizarla de acuerdo con lo descrito anteriormente (figura II.6).

Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, aunque una señal contiene información de interés en alguna de sus características —por ejemplo, en la variación respecto al tiempo de la amplitud o la duración—, no debe ser confundida con la información que contiene. En la figura II.8 se presentan dos señales que aparentemente tienen la misma forma, pero que difieren en su duración; de hecho, estas dos señales podrían corresponder a un "punto" y una "raya" de una señal telegráfica.

Partiendo entonces de las ideas anteriores, y estando claro que, si bien una señal contiene información, no es lo mismo una señal que la información que ésta contiene, cabe plantearse la siguiente pregunta: ¿en qué parte o en qué característica de una señal está contenida la información? La respuesta a esta cuestión ha sido una de las razones de ser de los ingenieros en telecomunicaciones de las últimas décadas. Más específicamente, ha habido un interés definitivo en la manera de hacer que una señal contenga la información de interés en alguna de sus características, tratando de que ello ocurra de manera eficiente y económica.

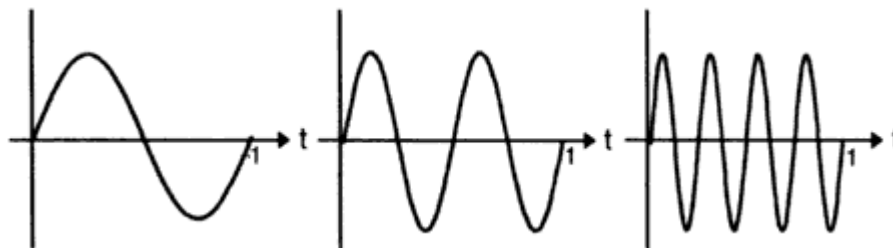


**Figura II.8. Señales iguales en forma pero con distinta duración.**

Para profundizar más en esto es importante introducir el concepto de una señal senoidal. Recuérdese que  $y(t)$  representa una señal; se dice que una señal  $z(t)$  es una señal senoidal, cuando su representación es del tipo:

$$z(t) = a(t) \text{ sen } \omega t$$

En esta expresión,  $a(t)$  es la amplitud de la señal (en este momento se puede suponer que  $a(t)$  es una constante, es decir,  $a(t) = a$ ;  $\text{sen}$  representa la función trigonométrica del seno;  $t$  es el tiempo; y  $\omega$  la frecuencia de la señal. En la figura II.9 se ilustran señales senoidales en las cuales  $a = 1$ , y la frecuencia  $\omega$  toma los valores 1, 2 y 4. Se puede apreciar que cuando  $\omega = 4$  la frecuencia de la señal es mayor que cuando  $\omega = 1$ , y esto se traduce en una variación mucho más rápida de la señal respecto al tiempo. La frecuencia de una señal se mide en hertz (Hz), en memoria de H. Hertz, quien por primera vez estudió el fenómeno, o bien en kilohertz (1 kHz = 1000Hz), o incluso, megahertz (1 MHz = 1 000 000 Hz). Un Hz representa una variación de un ciclo completo en un segundo; 1 MHz representa 1 millón de ciclos por segundo.



**Figura II.9. Señales senoidales con diferentes frecuencias.**

Aparte de que por sí mismas son de gran interés matemático, la importancia de las ondas o señales senoidales radica en que, en un conjunto de condiciones generales, muchas señales pueden ser expresadas como la suma de ondas o señales senoidales (véase figura II.10). Este hecho fue establecido en 1822 por el

matemático J. Fourier (1768-1830). Un ejemplo ilustrativo de la composición de señales por medio de ondas senoidales es la música generada por órganos o sintetizadores electrónicos: las tonalidades que generan son la suma de distintas combinaciones de tonos "puros". En ingeniería de comunicaciones, una señal senoidal (de una sola frecuencia) es lo que en acústica (señales auditivas) sería un "tono puro".

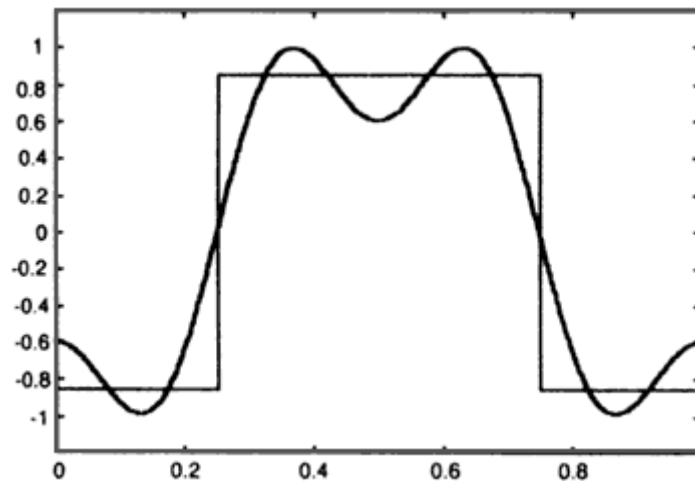


Figura II.10. Un pulso como la suma de senoides.

No todas las personas pueden escuchar las frecuencias más altas (tonos agudos) generados por el órgano, y hay combinaciones de tonos que al oído de una persona le parecen agradables y al de otra desagradables. En la ingeniería de comunicaciones a este fenómeno se le conoce como *respuesta en frecuencia de un sistema* (en este caso, del oído humano). El rango de frecuencias contenidas en una señal se conoce como el ancho de banda de la señal. Por ejemplo, existen pequeños silbatos que generan tonos de frecuencias muy altas, que no pueden ser escuchados por el promedio de los seres humanos porque las frecuencias son más altas que las que su oído les permite percibir (son de "ultrasonido", es decir, "de un sonido más allá de los que el oído percibe"), pero que se usan para dar órdenes a

los perros, que sí perciben dichos sonidos, lo cual quiere decir que el oído de un perro tiene una respuesta en frecuencia más amplia que el oído de un ser humano.

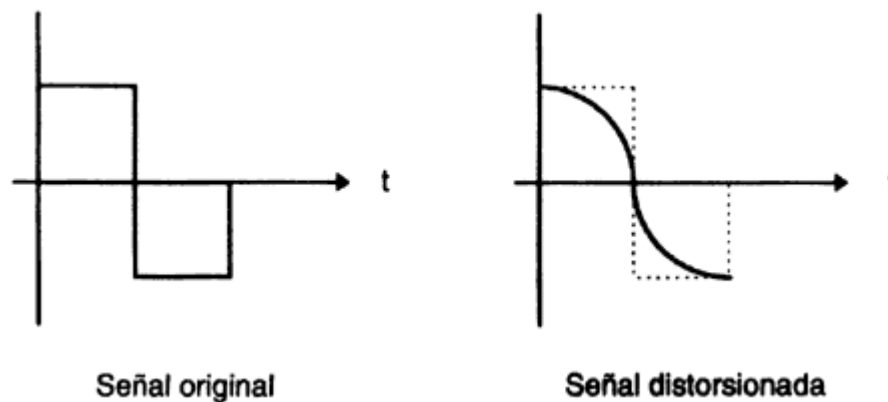
Para ilustrar aún más este concepto, considérese por ejemplo, la música reproducida por medio de un equipo electrónico. Normalmente, al ser humano le parece más agradable, más real, la música reproducida por medio de un equipo que tenga el calificativo de "alta fidelidad". Ello significa que este equipo es capaz de reproducir señales cuyas frecuencias son tan altas que un equipo que no es de "alta fidelidad" no alcanza a reproducirlas, pero que en una sala de conciertos sí podría escuchar. En una sala de conciertos, la información la generan los instrumentos musicales; las vibraciones mecánicas producidas por ellos son transportadas en lo que comúnmente se conoce como ondas acústicas que llegan a los oídos del auditorio. Es interesante notar que cada uno de los instrumentos puede generar en cualquier instante de tiempo un tono de cualquier frecuencia o combinaciones de ellas (dentro de un rango especificado por una frecuencia mínima y una máxima), y con cualquier intensidad, nuevamente en un rango de intensidades mínima y máxima.

Un equipo de alta fidelidad debe ser capaz de reproducir señales hasta de 20 kHz (que está por arriba de la frecuencia máxima que percibe el oído humano), y los silbatos para perros a que se ha hecho referencia generan tonos cuyas frecuencias son del orden de 30 kHz.

Así como una señal puede ser caracterizada por su dependencia respecto al tiempo, también existe la posibilidad de caracterizarla de acuerdo con las señales senoidales que pueden ser sumadas para formar la señal. Esto se conoce como "espectro en frecuencia de la señal". Se entiende por el "ancho de banda de una señal" la cantidad de frecuencias que están contenidas en una señal.

Para entender estos conceptos, analicemos la posibilidad de transmitir música utilizando una línea telefónica. Realizando este experimento se puede comprobar que no es posible transmitir música de alta fidelidad por este canal, debido a que la

música tiene componentes en frecuencia cercanos a 20 kHz, mientras que el canal telefónico sólo es capaz de transmitir tonos hasta de cerca de 4 000 Hz. Los 20 kHz son el ancho de banda de la señal, y los 4 000 Hz son el ancho de banda del canal telefónico. Si se realiza el experimento, se notará que la música que se escucha difiere de la versión original; a este efecto se le conoce como "distorsión": la música de alta fidelidad es distorsionada por el canal telefónico. El efecto de transmitir una señal de gran ancho de banda por un canal de un ancho de banda menor se ilustra en la figura II.11.



**Figura II.11. Distorsión por anchos de banda diferentes.**

Como parte de esta introducción a las señales y los sistemas, se presentan a continuación algunos problemas interesantes en los sistemas de telecomunicaciones, que se resuelven procesando una señal por medio de algún tipo de sistema: *a) Amplificación de una señal.* Como ya se vio anteriormente, un amplificador es un sistema que tiene a su salida una réplica de la señal de entrada, cuya amplitud fue amplificada por el sistema.

*b) Suma de señales.* Este sistema tiene dos o más señales de entrada, y la salida de este sistema es precisamente la suma de las entradas (figura II.12).

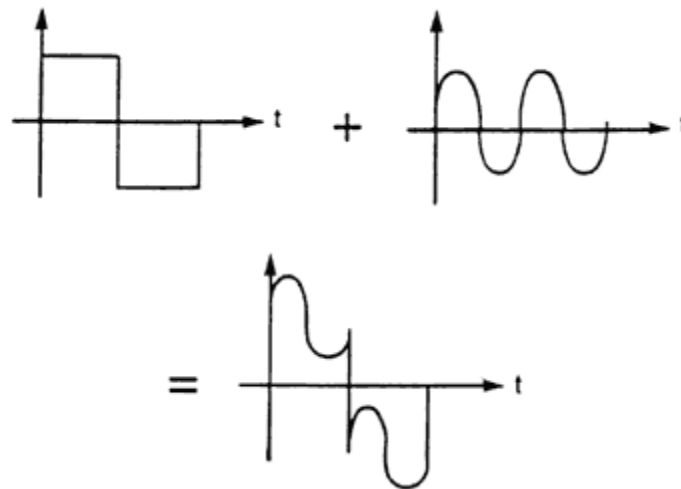


Figura II.12. Suma de señales.

c) *Multiplicador de señales.* Este sistema, como el anterior, tiene dos o más señales de entrada, y la salida es el producto de ellas. Se conoce también con el nombre de modulador de amplitud (figura II.13), ya que, si una de las señales (de baja frecuencia) multiplica a otra de alta frecuencia (portadora) la salida del sistema genera un espectro igual al de la señal moduladora, pero trasladado a la frecuencia de la portadora. Esto es la base de lo que se conoce como AM (amplitud modulada o modulación de amplitud). En este proceso se "sobrepone" el contenido de información de la señal moduladora sobre otra señal (portadora).

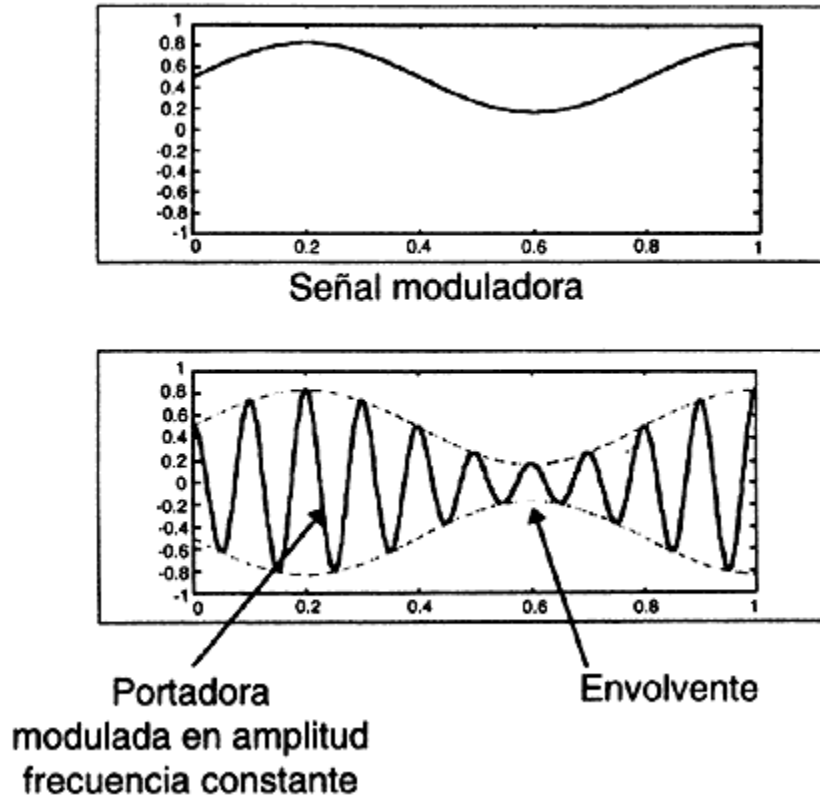


Figura II.13. Modulación en amplitud y en frecuencias.

d) *Codificación de la fuente.* Este sistema fue mencionado en la introducción, y realiza el procesamiento necesario para convertir una señal analógica (continua en el tiempo y en amplitud) en una señal digital. Este sistema consiste en la conexión en serie de un muestreador, un cuantizador y un codificador (figura II.14).

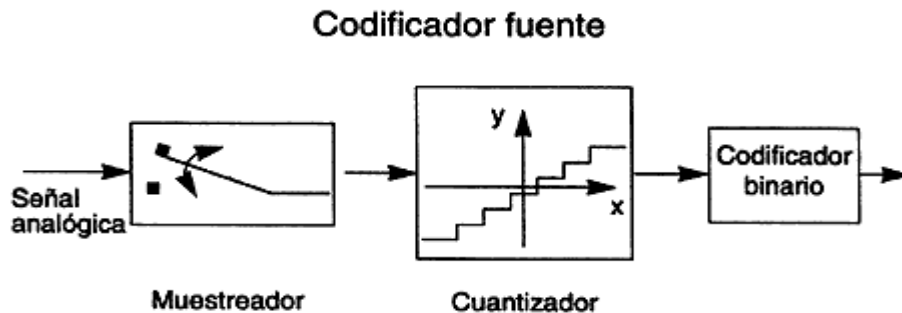


Figura II.14. Codificador fuente.



e) *Filtrado*. Por medio de un filtro se eliminan ciertas componentes de frecuencia de una señal. Un ejemplo de esto fue planteado al hablar de la posibilidad de transmitir música por un canal telefónico. Existen diversos tipos de filtros que, dependiendo de la porción del espectro que eliminan, pueden ser paso-bajas (eliminan las frecuencias altas), paso-altas (eliminan las frecuencias bajas), paso-banda (sólo dejan pasar frecuencias dentro de una banda) o supresor de banda (eliminan las componentes dentro de una banda). Estos filtros se ilustran en la figura II.15. Cabe mencionar que, en las figuras, si en alguna o algunas frecuencias la amplitud es cero, esto significa que de la señal de entrada se eliminan todas las componentes en las frecuencias donde esto ocurre, generando de esta manera la señal filtrada.

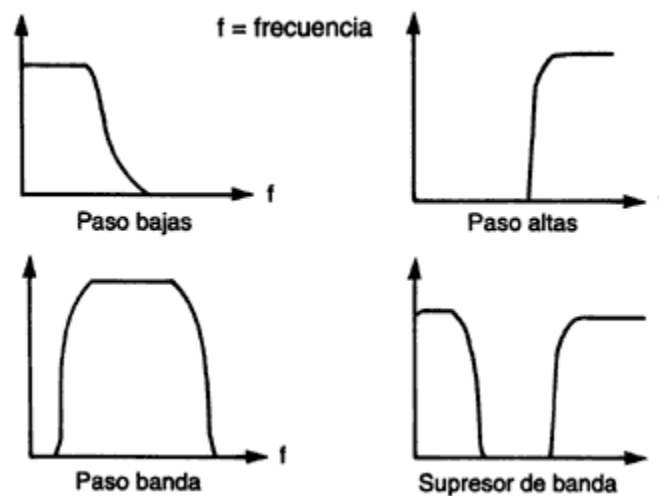


Figura II.15. Filtros.

Para concluir este capítulo, es indispensable hablar sobre el peor enemigo de las telecomunicaciones: el ruido (a pesar de ser enemigo de las telecomunicaciones, es un aliado de los ingenieros en telecomunicaciones, ya que, de no haber ruido en las transmisiones, no habría ingenieros cuya función fuera eliminar su efecto).

Así como en el lenguaje cotidiano el ruido es aquello que molesta, que perturba, que impide realizar alguna tarea, el "ruido" en las telecomunicaciones es todo aquello que modifica el contenido de información de una señal. Como la fuente desea que la información llegue a su destino lo más parecida a aquella generada por la fuente, el hecho de que se introduzca ruido actúa en contra del proceso de comunicación. El ruido en las telecomunicaciones es, por lo tanto, una distorsión: en el sonido, en el caso de la telefonía; en la imagen, en el caso de la televisión; errores, en el caso de la telegrafía, etc. No es posible hasta el momento tener un sistema de comunicaciones en el cual no haya ruido. Pero, por fortuna, los distintos procesos de ruido en los canales han sido modelados matemáticamente, de manera tal que estos modelos reflejen con verdad la realidad y, por lo tanto, el efecto del ruido pueda ser disminuido. En la figura II.16 se muestran señales que corresponden a muestras de ruido.

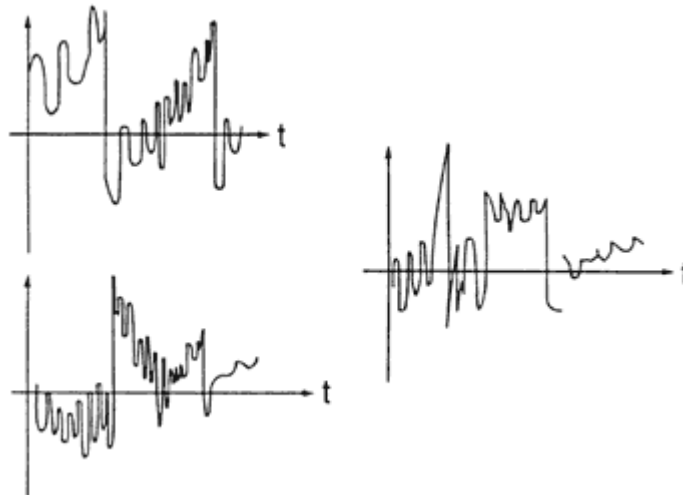
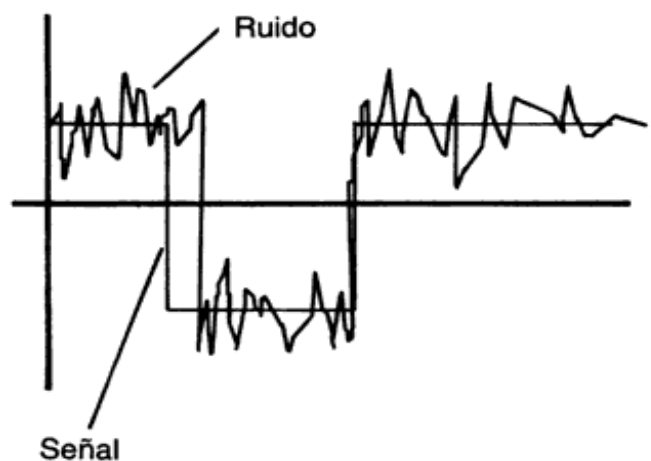


Figura II.16. Muestras de ruido.

Se puede apreciar que en todos los casos las representaciones del ruido tienen trayectorias que son aleatorias, difícilmente predecibles, por lo cual es necesario recurrir a modelos probabilísticos para su análisis. Para apreciar realmente lo que es el ruido, conviene "sintonizar" un radioreceptor en una frecuencia en que no

haya ninguna transmisión, preferentemente en AM. Como puede escucharse, existe una especie de "zumbido", que es precisamente el ruido en el canal.

Aunque el ruido puede afectar de diversas maneras una transmisión (sumándose o multiplicándose con la señal que contiene la información), en este libro se analizarán únicamente casos en que el efecto del ruido es aditivo. Esto se ilustra en la figura II.17, donde se muestra una señal binaria (que toma valores positivos o negativos), el ruido en la transmisión y la suma de la señal más el ruido.



**Figura II.17. Señal binaria más ruido.**

Las ideas anteriores permiten plantear un problema adicional de las telecomunicaciones y que se presenta principalmente en las comunicaciones en que las señales son digitales. Supongamos que se transmite una señal binaria a través de un canal ruidoso, tal como se presenta en la figura II.17, al recibirse la señal en el receptor, la señal que fue transmitida tiene una forma diferente a la que se transmitió. Entonces, una de las principales funciones del receptor consiste en tomar una decisión, basada en la señal distorsionada, acerca de la señal que se transmitió: ¿se trata, en cada instante, de un "1" o se trata de un "0"? Este problema se conoce con el nombre de "detección". El problema de detección también tiene mucha importancia en algunos aspectos de navegación aérea: como será analizado más adelante, el sistema conocido como "radar" (que significa *radio detection and*

*ranging*, es decir, detección y medición de distancias por radio) consiste en la emisión de pulsos electromagnéticos de duración corta; cuando en su trayectoria encuentran algún obstáculo, parte de la energía se refleja en dicho objeto extraño, y esa energía reflejada, a su vez, es recibida en una central. Como la señal reflejada normalmente contiene poca energía, tiene una amplitud pequeña, que puede ser distorsionada con facilidad por el ruido atmosférico. Entonces es necesario tomar una decisión entre las dos siguientes posibilidades: ¿la señal recibida proviene de una onda reflejada, o se trata únicamente de ruido?