

Capítulo 10

Tópicos del audio

10.1. El ruido

Nos referiremos en este capítulo al ruido eléctrico, y no al ruido acústico. Se denomina ruido a toda perturbación indeseada de la señal de naturaleza aleatoria. Cuando es determinística (es conocida) se denomina interferencia.

Cuando decimos que el ruido es aleatorio, queremos decir que puede modelarse estadísticamente (cómo la probabilidad de que un dado tirado al azar ofrezca un determinado valor) pero no predecirse.

En los sistemas electrónicos existen muchos tipos de ruido: el ruido térmico, el ruido $1/f$, el ruido de cuantificación, etc. El estudio del ruido es un tema harto complejo y no tenemos espacio más que para un rápido análisis.

El ruido $1/f$ tiene lugar en los dispositivos activos, y es dominante a baja frecuencia, siendo habitualmente despreciable por encima de 1 kHz. El ruido de cuantificación es analizado en el apartado 10.4.

10.1.1. El ruido térmico

Lo primero que puede decirse del ruido térmico es que *está siempre presente*. Su existencia impide amplificar una señal de forma indefinida, ya que cualquier proceso de amplificación introduce siempre un 'ruido' añadido que no estaba en la entrada, tanto más cuanto más se amplifique la señal.

La amplitud del ruido térmico puede modelarse cómo un proceso gaussiano de promedio cero. Esto quiere decir que es más probable obtener un ruido añadido de bajo nivel que de alto. Podemos calcular la probabilidad de que el valor instantáneo de ruido sea superior a un determinado valor. Si llamamos V_n al valor eficaz de ruido (el que mediríamos con un polímetro de verdadero valor eficaz), obtenemos la siguiente tabla de probabilidad:

x	$P[x(t)] > x$
$2 \cdot V_n$	32 %
$3 \cdot V_n$	13 %
$4 \cdot V_n$	4,6 %
$5 \cdot V_n$	1,6 %
$6 \cdot V_n$	0,27 %
$7 \cdot V_n$	0,047 %
$8 \cdot V_n$	0,0063 %

Esto quiere decir que la probabilidad de obtener valores instantáneos cada vez más altos disminuye rápidamente al aumentar el umbral.

La luz blanca está compuesta de luz de todos los colores visibles (de todas las frecuencias ópticas visibles). Por analogía se define el *ruido blanco* como aquel que tiene componentes espectrales de todas las frecuencias, o dicho de otro modo, en un determinado ancho de banda encontraremos la misma potencia de ruido con independencia de la frecuencia central de la banda. El ruido térmico tiene características de ruido blanco.

El ruido depende de parámetros bien conocidos, por lo que puede minimizarse reduciendo estos:

- **Temperatura:** El ruido térmico se debe al movimiento errático de los electrones a causa de la temperatura. Por tanto, a más temperatura, más ruido térmico. Para mejorar el ruido, podemos enfriar el circuito, cosa que se hace en los receptores de radio de los radiotelescopios, pero en pocos casos más.
- **Ancho de banda:** al tener el ruido termico una distribución uniforme en frecuencia (ruido blanco), cuanto mayor sea el ancho de banda efectivo, mayor potencia de ruido tendremos. El ruido se puede minimizar restringiendo el ancho de banda de las señales.
- **Factor de ruido:** depende de la calidad de los componentes utilizados, expresado a través de un parámetro que se denomina *Factor¹ de Ruido** (F). El cómo reducir el factor de ruido de un circuito no es una cuestión trivial. Una regla general es que corrientes excesivas o demasiado débiles tienden a empeorarlo. Existen amplificadores operacionales diseñados para obtener mínimo ruido en la banda de audio, como por ejemplo, el NE5534.
- **Resistencia:** La tensión de ruido en bornas de una resistencia es directamente proporcional a su valor ohmico. Esta es la razón por la que deben evitarse valores demasiado altos de resistencia en circuitos sensibles al ruido. En los circuitos de audio de bajo nivel, es habitual trabajar con impedancias de 600 Ohm en las entradas de señal.
- **Constante de Boltzmann:** El ruido también depende de la constante de Boltzmann, pero como este señor murió en 1906, ha quedado fijada para siempre y es imposible conseguir mejoras en este parámetro.

10.1.2. La relación señal a ruido

Se denomina *relación señal a ruido* (SNR, *Signal to Noise Ratio*) a la relación entre la potencia de señal deseada y la potencia de ruido que existe en un determinado punto. Se mide en decibelios.

¹Noise Figure, habitualmente mal traducido como Figura de Ruido.

La relación señal a ruido puede medirse o calcularse. Una forma sencilla de medida (no siempre posible) es medir el nivel de señal a la salida de un circuito en presencia de señal y en ausencia de la misma. La relación entre ambas es la relación señal a ruido. Este método de medida es posible porque el ruido térmico es aditivo. Otras fuentes de ruido son multiplicativas (cómo el *ruido shott* de los amplificadores ópticos) y este método no puede emplearse.

La Relación Señal a Ruido es uno de los parámetros de medida de calidad de amplificadores y sistemas de procesado de señal en general.

10.2. Medidas con señales sinusoidales

10.2.1. Descomposición en series de sinusoides

A lo largo del libro se ha mencionado el uso de señales sinusoidales para analizar el comportamiento de un circuito. Podría parecer una decisión arbitraria, pues un circuito destinado al procesado -amplificación o filtrado- de señales de audio debe vérselas con señales de naturaleza muy distinta.

Sin embargo, las señales sinusoidales tienen una curiosa propiedad: toda señal periódica puede generarse cómo suma de señales sinusoidales de frecuencia múltiplo de la señal de origen².

Expresado en forma matemática, la señal $x(t)$ de periodo T puede descomponerse cómo:

$$x(t) = A_0 + A_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_1\right) + A_2 \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{T}t + \varphi_2\right) + \dots \quad (10.1)$$

O si se prefiere expresar en función de la frecuencia de la señal ($F_s = \frac{1}{T}$):

$$x(t) = A_0 + A_1 \cdot \cos(F_s \cdot t + \varphi_1) + A_2 \cdot \cos(2 \cdot F_s \cdot t + \varphi_2) + \dots \quad (10.2)$$

En estas formulas, los coeficientes A_x y φ_x , amplitud y fase de las componentes sinusoidales, dependen de la señal $x(t)$.

El corolario de este artificio matemático es muy importante. Dado que cualquier señal puede descomponerse cómo suma de sinusoides, un sistema lineal queda perfectamente caracterizado si conocemos su función de transferencia para señales sinusoidales de diferentes frecuencias. Para conocer la respuesta a una determinada señal, bastaría hacer la descomposición de la señal, ver la respuesta del sistema para cada una de las sinusoides y volver a sumar estas respuestas individuales.

Por si fuera poco, el asunto de la periodicidad de las señales no es una restricción, ya que el principio enumerado puede aplicarse a una descomposición en series de Fourier cambiante en el tiempo.

Otro importante corolario es que todo sistema lineal puede analizarse en el *dominio del tiempo* o de la *frecuencia*. Esto quiere decir que podemos trabajar indistintamente con los valores instantáneos de una señal (dominio del tiempo) o con los vectores de amplitud y fase de la descomposición en serie de Fourier (dominio de la frecuencia). Unas veces uno resultará más adecuado que el otro.

²El proceso matemático que permite calcular este desarrollo se denomina *Descomposición en Series de Fourier*

10.2.2. Frecuencia fundamental y armónicos

Denominaremos:

- **Frecuencia fundamental** a la primera componente de la serie, que tiene una frecuencia igual a la de la señal a descomponer.
- **Armónicos**, al resto de componentes, comunmente de amplitudes más pequeñas que la fundamental.

Por ejemplo, la nota musical LA tiene una frecuencia (fundamental) de 440 Hz. Todas las notas LA del mundo tienen esta frecuencia. Se distingue una LA de una flauta, de un violín o de un cantor por la presencia de diferentes relaciones de armónicos. Así pues, una flauta genera sinusoides casi puras, libres de armónicos. Los instrumentos de cuerda son muy ricos en armónicos.

10.3. La distorsión

10.3.1. Distorsión armónica

La no linealidad de un sistema produce lo que se denomina *distorsión armónica*. Recordamos que llamamos *sistema lineal* a aquel que ofrece una salida doble para una entrada doble, mitad para entrada mitad... Ningún sistema del mundo es lineal, aunque todo sistema puede modelarse cómo tal en un determinado margen dinámico. Fuera de este, exhibirá un comportamiento cada vez menos lineal. Ya vimos en el capítulo de los amplificadores que las sinusoides de salida ven recortadas sus crestas a una determinada amplitud.

Un sistema lineal responde a una estimulación con una senoide, con otra de la misma frecuencia, acaso desfasada, y de amplitud diferente. Reparemos en que una senoide no tiene armónicos. Por contra, un sistema no-lineal deformará la senoide de modo que la señal resultante puede descomponerse en series de Fourier, con cierta presencia de armónicos.

Pues bien, se denomina *distorsión armónica* a la relación de amplitudes que hay entre la señal de frecuencia fundamental y sus armónicos, considerados cómo un todo.

Es muy común medir la distorsión armónica en porcentaje, aunque es más adecuado hacerlo en decibelios.

Ejemplo: si medimos a la salida de un sistema atacado por una senoide de 1 kHz un tono de 1 kHz de 1 V_{rms} y un tono de 3 kHz de 10 mV_{rms}, decimos que su distorsión es del 1%.

La distorsión se puede medir con filtros de rechazo de banda muy abruptos que atenúan fuertemente la señal de frecuencia fundamental. Si se compara el valor eficaz de la tensión de salida (dominada por la señal fundamental) con esta misma señal a la que se le ha eliminado la fundamental, podemos obtener la medida de la distorsión armónica. Si además de distorsión, la señal contiene ruido, la medida no es capaz de distinguir uno de otro, y se denomina SINAD (*Signal to Noise and Distortion*, Señal a ruido más distorsión).

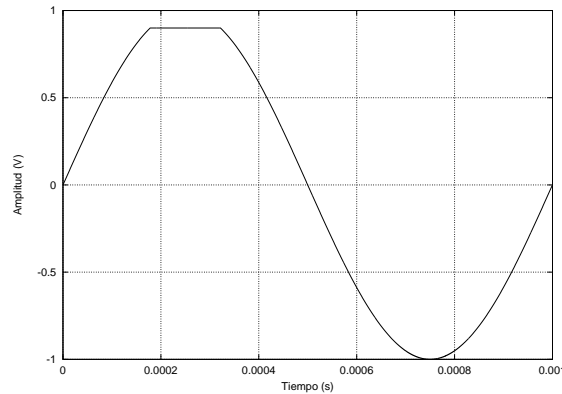


Figura 10.1: Forma de onda de un periodo señal distorsionada

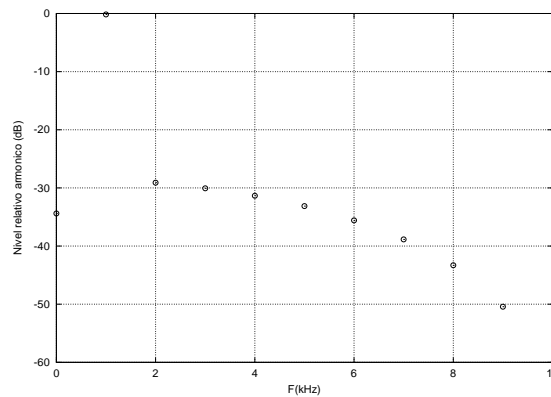


Figura 10.2: Niveles fundamental y armónicos

10.3.2. Un ejemplo

Veamos un ejemplo que considera tanto el aspecto de la descomposición en series de Fourier cómo el de la distorsión.

Consideremos la señal de la figura 10.1, que es una senoide de 1 kHz, 1 Vp, levemente recortada en las crestas positivas. Niveles aparte, se trata de la salida típica de un amplificador en saturación.

Si hacemos una descomposición en series de Fourier, y representamos las amplitudes de los elementos del sumatorio en una escala logarítmica, sobre un eje horizontal de frecuencia, obtenemos la figura 10.2. Esta gráfica tiene un significado muy físico. Indica la distribución de energía en determinadas bandas, múltiplos de la fundamental. La escala se ha representado tomando cómo referencia una senoide de 1 Vp. Cómo podemos comprobar, la frecuencia fundamental tiene una energía igual a la de la senoide sin tullir. Los armónicos contienen de forma progresiva menos y menos energía (aunque no siempre es así).

Si queremos calcular³ la distorsión armónica de esta señal, no tenemos más que aplicar la fórmula:

³No olvidemos que este se trata de un ejemplo teórico, en el que podemos contar con una señal expresada analíticamente. En la práctica, la medida de la distorsión se hace por métodos diferentes. Sin embargo, si contáramos con un conversor de analógico a digital de una calidad mucho mayor que la de la señal a medir, podríamos hacer uso de la misma técnica aquí empleada.

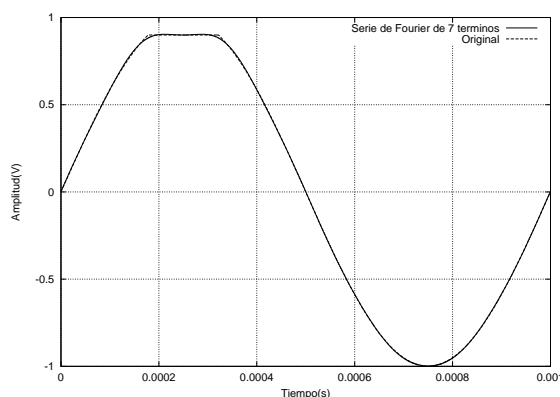


Figura 10.3: Descomposición en series de Fourier

$$D = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}}{A_1} \quad (10.3)$$

donde A_x es el coeficiente de amplitud de la Serie de Fourier para la frecuencia $x \cdot F_s$.

Puede entrarnos la duda de cuantos términos incluir en el sumatorio. Todo dependerá de la precisión que queramos obtener en la medida. Pero no sólo esto, sino también el ancho de banda del propio amplificador: si este atenúa los armónicos, de alguna forma 'reconstruye' la señal. Si calculamos el sumatorio con X términos, el resultado es:

$$D = 6\% \quad (-24 \text{ dB})$$

Podemos hacer un último experimento: vamos a representar gráficamente la suma de los 7 primeros términos de la serie de Fourier, para ver cuánto se parece esta suma a la señal original. El resultado puede verse en la figura 10.3. Conforme el número de terminos incluidos crece, la semejanza de las señales es cada vez mayor.

Para terminar, un dato curioso: si la señal es simétrica, no tiene armónicos pares (a frecuencia $2 \cdot n \cdot F_s$). ¿Porqué?

10.4. Analógico y digital

Imaginemos una situación en la que tenemos que medir una temperatura. Disponemos de un termómetro de mercurio. Un termómetro de este tipo funciona en base a la dilatación de un líquido por efecto de la temperatura. Si el líquido se expande a través de un tubo muy fino, es posible obtener variaciones apreciables del volumen ocupado en función de la temperatura.

El termómetro tiene en sí mismo una *resolución*⁴ enorme. Si miráramos con un microscopio la variación de la columna de mercurio, podríamos medir con toda facilidad milésimas de grado. La *precisión* de la medida dependería de lo uniforme que sea la cavidad por la que se expande el mercurio.

Cuando queremos hacer una medida de temperatura, nos acercamos al termómetro, lo miramos y registramos el valor leído en ese instante.

Pues bien, el termómetro es un instrumento de medida *analógico* y el proceso de medida es una *conversión de analógico a digital*.

⁴Capacidad de distinguir valores de temperatura próximos

- Una señal analógica es aquella que es continua tanto en su magnitud, como a lo largo del tiempo. Es el caso de la medida de la temperatura que realiza el termómetro.
- Una señal digital tiene valores discretos (por ejemplo intervalos de una décima de grado en un termómetro clínico) en tiempos discretos. Esto quiere decir que sólo es posible obtener cierto número de resultados (a intervalos de una décima de grado) en cierto instantes (cuando se lee)

Imaginemos que tenemos que hacer un registro de la temperatura de una habitación. Podríamos optar por dos soluciones:

- Usar un artefacto que mediante un sistema de luz y espejos hiciera un registro sobre papel continuo que se desplaza a velocidad constante mediante un mecanismo de relojería.
- Pedir a una persona que cada un cierto intervalo de tiempo (un cuarto de hora, por ejemplo) mida la temperatura en un termómetro (calibrado en grados, por ejemplo) y la anote en un papel, junto con la hora de medida.

El primero de los métodos es un registro analógico, pues es continuo en la magnitud y el tiempo. El segundo es digital, pues ha sido cuantificado tanto en la amplitud (con una resolución de un grado) como en el tiempo (a intervalos de un cuarto de hora).

Conviene hacer un elenco de características de uno y otro:

- Los métodos analógicos suelen ser más sencillos de implantar que los digitales
- La copia de los registros digitales está menos sujeta a degradación que la analógica, siendo posible realizar copias idénticas de un registro digital, cosa imposible en uno analógico, en el que siempre se produce un incremento del ruido y la distorsión (ver capítulos 10.1 y 10.3).
- En un sistema digital, si queremos tener resultados adecuados debemos poner bien cuidado en que, tanto la resolución de la medida como el intervalo de la misma, sean suficientes. De otro modo, la información registrada puede quedar muy mermada o ser inservible. Para el control de un horno industrial puede ser suficiente una resolución de diez grados, pero para la medida de la temperatura corporal se necesita una décima. En el primer caso puede bastar una medida de la temperatura cada minuto, pero si queremos estabilizar de forma muy precisa un pequeño refrigerador para conservar medicamentos, necesitaremos muchas medidas de temperatura por segundo. Volveremos sobre este punto.
- Las medidas realizadas con un sistema digital son susceptibles de ser tratadas matemáticamente, de modo que podríamos (por ejemplo) estimar comportamientos futuros.

Concluimos en que ninguno de los métodos es intrínsecamente mejor que el otro, y cual es mejor dependerá de las aplicaciones.

El ejemplo anterior podría haberse realizado hace más de 100 años, mucho antes de la revolución electrónica. Y sin embargo, es en tiempo reciente cuando ha cobrado máxima utilidad. Ha sido el resultado de la confluencia de la capacidad de procesar electrónicamente señales analógicas, convertirlas a digital mediante dispositivos de calidad y bajo coste, y tratarlas digitalmente con una potencia de cálculo inusitada.

Conviene detenernos un poco más despacio en los requisitos necesarios para que la conversión de digital a analógico contenga errores aceptables.

10.4.1. Muestreo a suficiente velocidad

El llamado *criterio de Nyquist* establece el requisito de la frecuencia de muestreo mínima para que no se produzca error en el proceso de muestreo temporal. Dice “*la frecuencia de muestreo mínima es de dos veces el ancho de banda de la señal*”. Por ejemplo, para los circuitos de telefonía se establece una banda de 400 a 4000 Hz, con lo que el ancho de banda es de 3600 Hz. La frecuencia de muestreo mínima es de 7200 Hz. Sin embargo, en este caso, existen razones prácticas por las que es conveniente elevar este límite al doble de la frecuencia máxima, resultando una frecuencia de muestreo mínima de 8 kHz, y esta es la frecuencia de muestreo que se usa en los circuitos telefónicos digitales.

Si muestreamos un sistema de ancho de banda limitado de manera compatible con el criterio de Nyquist, es posible recuperar toda la información presente en la señal analógica. Toda, sin consideraciones adicionales.

El problema es que ningún sistema está completamente limitado en banda. Esto tiene dos implicaciones:

- Será necesario filtrar la señal antes del muestreo para atenuar lo más posible las componentes de señal fuera de la banda deseada.
- Los inevitables resuidos de fuera de banda sufrirán una traslación de frecuencia (*aliasing*, en inglés).

El trabajo del diseñador es el de lograr que estas inevitables imperfecciones tengan un efecto suficientemente bajo, todo ello a mínima complejidad y coste.

10.4.2. Muestreo con suficiente resolución

Dependiendo de la aplicación, necesitaremos mayor o menor resolución en las medidas. Por ejemplo, los CD almacenan música cuantificada con 16 bits por cada canal (estéreo). Esto quiere decir que existen $2^{16} = 65536$ niveles de cuantificación de la señal eléctrica. Es posible modelar la cuantificación como un ruido que se añade a la señal, de modo que la señal real es igual a la cuantificada, más un pequeño residuo. Este pequeño ruido (llamado *ruido de cuantificación*) es tanto más pequeño cuantos más niveles de cuantificación se usan. Los mencionados 16 bits permiten obtener relaciones señal a ruido de cuantificación (SNR) de algo más de 100 dB, lo que es más que suficiente para el oído humano, incluso cuando se cuentan con las mejores condiciones acústicas⁵. En estudios de grabación se usan 20 ó 24 bits.

En resumen, el ruido de cuantificación puede llegar a ser tan pequeño como queramos y es tarea del diseñador el encontrar un equilibrio entre las prestaciones necesarias, la complejidad y el coste involucrado.

⁵No olvidemos que cuando escuchamos música también nos llegan los ruidos del ambiente que nos rodea, que degradan la relación señal a ruido final. Especialmente cuando el entorno es un coche