

espectro de amplitud – amplitude spectrum

Authored by
memjavad

October 25, 2025

RECOMMENDED CITATION

memjavad (2025). *espectro de amplitud – amplitude spectrum*. Spanish Psychological Databases. Retrieved from <https://spanish.arabpsychology.com/?p=1516>

Espectro de Amplitud

Primary Disciplinary Field(s): Procesamiento de Señales, Análisis de Fourier, Acústica, Ingeniería Eléctrica

1. Definición Central

El **espectro de amplitud** es una representación fundamental en el ámbito del procesamiento de señales, que permite visualizar la distribución de la energía o la magnitud de las componentes sinusoidales de una señal compleja en función de sus frecuencias constituyentes. En esencia, actúa como un "ADN" frecuencial de la señal, descomponiéndola desde el dominio temporal (tiempo) al dominio frecuencial. Esta herramienta es indispensable porque, en muchas aplicaciones de ingeniería y física, la información crucial no reside en cómo evoluciona una señal con el tiempo, sino en las frecuencias específicas que la componen y la intensidad relativa de cada una de ellas, lo que proporciona una visión clara de los patrones periódicos subyacentes. El espectro de amplitud se deriva directamente de la [Transformada de Fourier](#) (TDF), siendo específicamente el módulo o la magnitud de la función compleja resultante de dicha transformación.

Cuando se aplica la Transformada de Fourier a una señal real de tiempo continuo, el resultado es una función de valor complejo en el dominio de la frecuencia. Este valor complejo, para cada frecuencia, posee dos atributos esenciales: una magnitud (la amplitud) y un ángulo (la fase). El espectro de amplitud se enfoca exclusivamente en la magnitud, indicando cuánto "peso" o cuánta contribución tiene una determinada frecuencia en la composición total de la señal. Por lo tanto, si una señal contiene un tono puro de 100 Hz y otro de 500 Hz, el espectro de amplitud mostrará picos en esas dos ubicaciones de frecuencia, y la altura de cada pico será proporcional a la intensidad de ese tono en la señal original. Esta capacidad de desagregación es vital para identificar ruidos, armónicos o componentes de interés que podrían estar ocultos en la representación temporal.

Es crucial diferenciar el espectro de amplitud del **espectro de fase** y del **espectro de potencia**. Mientras que el espectro de amplitud proporciona la magnitud de las ondas sinusoidales, el espectro de fase almacena la información sobre los desfases relativos de esas componentes de frecuencia. Ambas partes, amplitud y fase, son necesarias para reconstruir la señal original completa en el dominio del tiempo. Por otro lado, el espectro de potencia (o densidad espectral de potencia, DSP) se relaciona con la energía o potencia de las frecuencias. Generalmente, el espectro de potencia es el cuadrado del espectro de amplitud, y es preferido en aplicaciones donde la energía total de la señal es la métrica principal, como en el análisis de ruido aleatorio o la caracterización de sistemas de comunicación.

La interpretación del espectro de amplitud requiere una comprensión profunda de las unidades y

la normalización. Las unidades del espectro de amplitud dependen directamente de las unidades de la señal original en el dominio del tiempo. Por ejemplo, si la señal de entrada es un voltaje (medido en voltios), el espectro de amplitud tendrá unidades de Voltios/Hz (o unidades de voltaje si se trata de un espectro discreto normalizado). Además, la forma en que se visualiza el espectro (lineal o logarítmica, típicamente en decibelios) afecta drásticamente la percepción de la distribución de la energía. La representación logarítmica es común en acústica y telecomunicaciones, ya que permite visualizar un rango dinámico mucho más amplio, facilitando la identificación de componentes de baja intensidad junto a los picos dominantes de alta intensidad.

2. Fundamentos Matemáticos: Derivación de la Transformada de Fourier

El espectro de amplitud encuentra su base matemática ineludible en la Transformada de Fourier, una herramienta desarrollada para demostrar que cualquier función periódica puede ser descompuesta en una suma infinita de funciones sinusoidales (senos y cosenos). Para una señal continua en el tiempo, $x(t)$, su Transformada de Fourier, $X(f)$, se define mediante una integral que mapea la señal al dominio de la frecuencia. La función $X(f)$ es, en general, compleja, expresándose como $X(f) = \text{Re}(f) + j \cdot \text{Im}(f)$, donde $\text{Re}(f)$ es la parte real e $\text{Im}(f)$ es la parte imaginaria. El espectro de amplitud, denotado como $|X(f)|$, es simplemente la magnitud de este número complejo, calculado utilizando el teorema de Pitágoras: $|X(f)| = \sqrt{\text{Re}(f)^2 + \text{Im}(f)^2}$.

Para el caso práctico de señales discretas (muestreadas digitalmente), la herramienta utilizada es la **Transformada Discreta de Fourier** (DFT), o su implementación computacionalmente eficiente, la [Transformada Rápida de Fourier](#) (FFT). La FFT toma una secuencia finita de N muestras en el tiempo y produce una secuencia de N valores complejos en la frecuencia. Cada uno de estos valores complejos representa la amplitud y fase de una de las N frecuencias discretas (o "contenedores de frecuencia", conocidos como *bins*) que componen la señal. La magnitud de estos valores complejos forma el espectro de amplitud discreto, que es la representación más común utilizada en el procesamiento digital de señales, desde el análisis de audio hasta la adquisición de datos sísmicos.

La precisión y la resolución del espectro de amplitud generado por la FFT están directamente ligadas a dos parámetros cruciales del muestreo: la **frecuencia de muestreo** (F_s) y el **número de muestras** (N). La frecuencia de muestreo determina el rango máximo de frecuencias que se puede observar en el espectro (limitado por el Teorema de Nyquist a $F_s/2$). Por otro lado, el número de muestras N determina la resolución frecuencial del espectro, es decir, la distancia entre los *bins* de frecuencia. Una mayor resolución (mayor N) permite distinguir componentes de frecuencia que están muy cerca una de la otra, lo cual es fundamental en tareas como el diagnóstico de fallas en maquinaria, donde los armónicos pueden estar espaciados muy finamente.

En el contexto de señales reales (que son la norma en la ingeniería), el espectro de amplitud exhibe una propiedad de simetría fundamental: el espectro en frecuencias negativas es un reflejo especular del espectro en frecuencias positivas. Esto significa que $|X(-f)| = |X(f)|$. Esta simetría, conocida como **simetría hermitiana** para la función compleja $X(f)$, permite que, en la práctica, solo se visualice y analice la mitad positiva del espectro de frecuencia, desde 0 Hz hasta la frecuencia de Nyquist. Aunque la Transformada de Fourier produce frecuencias negativas por razones matemáticas de completitud, en el mundo físico, la energía se distribuye típicamente solo en el rango positivo de las frecuencias.

3. Desarrollo Histórico y Contexto

El concepto subyacente al espectro de amplitud se remonta a principios del siglo XIX con la obra de Jean-Baptiste Joseph Fourier. Su trabajo sobre la propagación del calor lo llevó a postular que cualquier función periódica, incluso aquellas con discontinuidades, podría ser representada como una suma infinita de funciones trigonométricas. Inicialmente, este concepto se aplicó a las series de Fourier para señales periódicas, sentando las bases para la descomposición de señales en sus componentes armónicas. Sin embargo, no fue hasta el desarrollo de la Transformada de Fourier continua que el concepto de un espectro de frecuencia, aplicable a señales aperiódicas y transitorias, se formalizó plenamente, aunque la visualización explícita de la "amplitud" como una gráfica de magnitud versus frecuencia se consolidó más tarde con el avance de la electrónica y la instrumentación.

Durante la primera mitad del siglo XX, con el auge de las telecomunicaciones y la ingeniería de radiofrecuencia, la necesidad de analizar y caracterizar el ancho de banda y la modulación de las señales hizo que el análisis espectral se convirtiera en una herramienta central. Ingenieros como Claude Shannon y Harry Nyquist formalizaron las limitaciones y los requisitos del muestreo (Teorema de Muestreo), lo que permitió la transición del análisis de espectros continuos a espectros discretos. Instrumentos como los analizadores de espectro analógicos se desarrollaron para medir directamente la magnitud de las componentes de frecuencia, transformando el concepto teórico en una medición práctica y esencial para el diseño de filtros y sistemas de comunicación.

El desarrollo que catapultó el espectro de amplitud al centro del procesamiento de señales moderno fue la invención del algoritmo de la **Transformada Rápida de Fourier** (FFT) por Cooley y Tukey en 1965. Antes de la FFT, el cálculo de la DFT era computacionalmente prohibitivo para secuencias largas. La eficiencia algorítmica de la FFT (reduciendo la complejidad de $O(N^2)$ a $O(N \log N)$) hizo posible el análisis espectral en tiempo real en computadoras digitales. Este avance democratizó el uso del espectro de amplitud en casi todas las disciplinas científicas y de ingeniería, permitiendo el análisis detallado de grabaciones de audio, datos sísmicos, señales biológicas y vibraciones mecánicas con una velocidad y precisión nunca antes vistas.

Hoy en día, el espectro de amplitud no solo es una herramienta de análisis, sino también un concepto de diseño. En el diseño de sistemas de audio, por ejemplo, el conocimiento del espectro de amplitud permite a los ingenieros ecualizar el sonido para lograr una respuesta de frecuencia deseada. En el campo de la imagenología médica (como en la Resonancia Magnética o la Tomografía Computarizada), el procesamiento de los datos brutos a menudo implica una transformación al dominio de la frecuencia para aplicar filtros o realzar características, donde el espectro de amplitud guía la selección de las frecuencias relevantes para la reconstrucción de la imagen. La ubicuidad del concepto subraya su importancia histórica como puente entre las matemáticas puras de Fourier y las aplicaciones prácticas de la ingeniería moderna.

4. Características Clave

Representación de Magnitud Pura: El espectro de amplitud solo representa la intensidad o el valor absoluto (módulo) de las componentes sinusoidales de una señal. Excluye explícitamente la información de fase, lo que significa que dos señales con el mismo espectro de amplitud pero diferente espectro de fase serán diferentes en el dominio del tiempo. Esta característica permite un análisis simplificado de la energía, pero implica una pérdida de información sobre la estructura temporal de la señal.

Simetría Hermitiana para Señales Reales: Para cualquier señal de entrada que sea puramente real (no compleja), su espectro de amplitud resultante será simétrico alrededor del eje de frecuencia cero (DC). Esta simetría se debe a la necesidad de que la Transformada Inversa de Fourier produzca una señal real. En la práctica, esto significa que el contenido informativo del espectro de amplitud se limita al rango de frecuencias positivas, desde 0 Hz hasta la frecuencia de Nyquist.

Ejes Definidos y Unidades Específicas: El eje horizontal (X) siempre representa la **frecuencia** (medida en Hercios, Hz, o radianes por segundo). El eje vertical (Y) representa la **magnitud** o amplitud de la componente de frecuencia. Las unidades de la magnitud dependen de la señal original y de la normalización aplicada. Si la señal es de voltaje, la magnitud podría ser en Voltios o, más comúnmente en análisis de audio, en decibelios (dB), lo que indica una escala logarítmica relativa a un valor de referencia.

Relación Inversa con el Espectro de Fase: A pesar de su independencia en la representación, el espectro de amplitud y el espectro de fase son un par inseparable conocido como el **espectro complejo** de la señal. La información de amplitud responde a la pregunta "¿Qué frecuencias están presentes y con qué intensidad?", mientras que la información de fase responde a "¿Cómo están alineadas en el tiempo esas frecuencias?". La reconstrucción perfecta de la señal original requiere la combinación precisa de ambos espectros.

5. Interpretación y Tipos de Espectro

La interpretación del espectro de amplitud es un arte que requiere identificar patrones clave. Los picos prominentes en el gráfico indican las frecuencias dominantes de la señal. Por ejemplo, en el análisis de vibraciones mecánicas, un pico a 60 Hz podría indicar un problema relacionado con la velocidad de rotación de un motor o una fuente de alimentación cercana. Si aparecen picos adicionales a múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (por ejemplo, 120 Hz, 180 Hz, etc.), estos son **armónicos**, y su presencia y magnitud relativa son cruciales para determinar la forma de onda original de la señal (una onda cuadrada tiene armónicos impares fuertes, mientras que una onda sinusoidal pura solo tiene una componente fundamental).

Existen dos tipos principales de espectros de amplitud en función de la naturaleza de la señal: el **espectro continuo** y el **espectro discreto**. El espectro continuo se deriva de la Transformada de Fourier de señales analógicas (no muestreadas) o funciones matemáticas. Este espectro es una función suave que se extiende a lo largo de todas las frecuencias posibles. Un ejemplo clásico es el espectro de una señal sinusoidal pura, que teóricamente es un impulso (o función delta de Dirac) en la frecuencia fundamental. Sin embargo, en la práctica de la ingeniería, se trabaja casi exclusivamente con el espectro discreto.

El espectro discreto se obtiene mediante la aplicación de la FFT a una secuencia finita de muestras. Este espectro es una colección de valores discretos (los *bins*) que representan la amplitud en frecuencias específicas. La interpretación de este espectro debe tener en cuenta los efectos del muestreo y la ventana. Cuando se analiza una señal que no es periódica dentro del intervalo de muestreo, se produce el fenómeno conocido como **fuga espectral** (*spectral leakage*). Este efecto distorsiona los picos, haciéndolos aparecer más anchos y menos definidos, y puede introducir artefactos no deseados en el espectro. Para mitigar esto, se utilizan funciones de ventana (como la ventana Hanning o Hamming) antes de aplicar la FFT.

Otro aspecto crucial de la interpretación es el análisis de señales de banda ancha, como el ruido blanco o las señales de comunicación moduladas. Estas señales no presentan picos discretos, sino una distribución de energía a través de un rango continuo de frecuencias. En estos casos, el espectro de amplitud muestra la forma de la banda de frecuencia ocupada. Por ejemplo, en la modulación AM, el espectro de amplitud revela la frecuencia portadora central y las bandas laterales que contienen la información. La capacidad de medir el ancho de banda y la potencia total dentro de ese rango es vital para garantizar que la señal se transmita eficientemente sin interferir con otras bandas de frecuencia asignadas.

6. Aplicaciones Cruciales

El espectro de amplitud es la piedra angular de numerosas disciplinas tecnológicas. En el campo de la **acústica y el procesamiento de audio**, es esencial para la síntesis de sonido, la

compresión de audio (como MP3, donde se elimina la información de frecuencia menos audible), y la ecualización. Los ecualizadores gráficos, por ejemplo, operan directamente alterando la magnitud de las bandas de frecuencia, modificando así el espectro de amplitud para lograr un timbre específico o corregir deficiencias acústicas. En el reconocimiento de voz, el análisis espectral (a menudo mediante el uso de cepstrum o coeficientes mel-frecuencia) permite extraer características de frecuencia que son invariantes a la persona que habla pero distintivas del fonema pronunciado.

En la **ingeniería de telecomunicaciones**, el espectro de amplitud define el uso del recurso más valioso: el ancho de banda. Los reguladores de espectro asignan bandas específicas para diferentes tipos de comunicación (radio, televisión, celular), y el espectro de amplitud de una señal transmitida debe encajar estrictamente dentro de su ancho de banda asignado. El análisis espectral permite a los ingenieros monitorear la ocupación del espectro, detectar interferencias, y asegurar que los esquemas de modulación (como OFDM en 4G/5G) distribuyan la potencia de manera eficiente a través de múltiples subportadoras. Un espectro de amplitud bien definido es sinónimo de una transmisión de datos limpia y eficiente.

Una aplicación de alto impacto en la ingeniería industrial es el **monitoreo de condición y el diagnóstico de fallas** en maquinaria rotativa. Los fallos mecánicos (como desequilibrio, desalineación o rodamientos defectuosos) inducen vibraciones con patrones de frecuencia muy específicos. Al colocar acelerómetros y analizar el espectro de amplitud de la señal de vibración, los ingenieros pueden identificar la causa de la falla. Por ejemplo, un pico de amplitud en la frecuencia de la velocidad de rotación del eje puede indicar desequilibrio, mientras que picos a frecuencias armónicas más altas pueden señalar problemas de engranajes o rodamientos. Este análisis predictivo permite el mantenimiento antes de que ocurra una falla catastrófica.

Finalmente, en la **óptica y la espectroscopía**, el espectro de amplitud se utiliza para analizar la composición de materiales. La luz o la radiación electromagnética que interactúa con una sustancia es analizada en términos de las longitudes de onda (que están inversamente relacionadas con la frecuencia) que son absorbidas o emitidas. El patrón de picos y valles en el espectro de amplitud resultante actúa como una huella dactilar química, permitiendo la identificación precisa de elementos y compuestos. Desde la astronomía (analizando el espectro de luz de estrellas distantes) hasta la química analítica, la medición precisa de la amplitud en función de la frecuencia es la base de la caracterización material.

7. Limitaciones y Conceptos Relacionados

A pesar de su poder analítico, el espectro de amplitud posee una limitación inherente: la **pérdida de la información temporal**. Al transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, se pierde el conocimiento exacto de cuándo ocurrieron los eventos de la señal. Por

ejemplo, dos señales que contienen las mismas frecuencias pero que ocurren en órdenes diferentes o en momentos diferentes, tendrán el mismo espectro de amplitud. Esta limitación es crítica para el análisis de señales no estacionarias (cuyas características de frecuencia cambian con el tiempo), como el habla, la música o las señales biológicas.

Para abordar esta limitación, se recurre a técnicas que combinan la información temporal y frecuencial, conocidas como **análisis tiempo-frecuencia**. La herramienta más común en este campo es el [Espectrograma](#), que utiliza la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT). El espectrograma genera una secuencia de espectros de amplitud calculados sobre pequeñas ventanas de tiempo que se superponen. El resultado es una representación tridimensional (frecuencia, tiempo y amplitud), que permite visualizar cómo evoluciona la distribución de la energía a lo largo del tiempo, proporcionando una riqueza de información que el espectro de amplitud simple no puede ofrecer.

Conceptualmente, el espectro de amplitud está íntimamente ligado a la **Densidad Espectral de Potencia (DSP)**. Mientras que el espectro de amplitud se centra en la magnitud de las componentes de voltaje o corriente, la DSP describe cómo se distribuye la potencia de la señal a través del espectro de frecuencia. Para señales determinísticas, la DSP es simplemente el cuadrado del espectro de amplitud. Sin embargo, para señales aleatorias o estocásticas (como el ruido), la DSP se define rigurosamente a través de la Transformada de Fourier de la función de autocorrelación de la señal (Teorema de Wiener-Khinchin). En aplicaciones de ruido y estadística, la DSP es la métrica preferida debido a su relación directa con la potencia promedio de la señal.

Further Reading

[Procesamiento Digital de Señales \(Wikipedia\)](#)

[Transformada de Fourier \(Wikipedia\)](#)

[Análisis de Espectro \(Wikipedia\)](#)

[Amplitude Spectrum \(ScienceDirect\)](#)