

# Adquirir una Señal Analógica: Ancho de Banda, Teorema de Muestreo de Nyquist y Aliasing

Actualizado 30 mar. 2023

## Información general

Aprenda sobre adquirir una señal analógica, incluyendo temas como ancho de banda, error de amplitud, tiempo de incremento, velocidad de muestreo, el Teorema de Muestreo de Nyquist, aliasing y resolución. Este tutorial es parte de la serie Fundamentos de Instrumentos.

## Contenido

- [¿Qué es un Digitalizador?](#)
- [Ancho de Banda](#)
- [Velocidad de Muestreo](#)
- [Resolución](#)
- [Resumen](#)
- [Recursos de Instrumentación Adicionales](#)

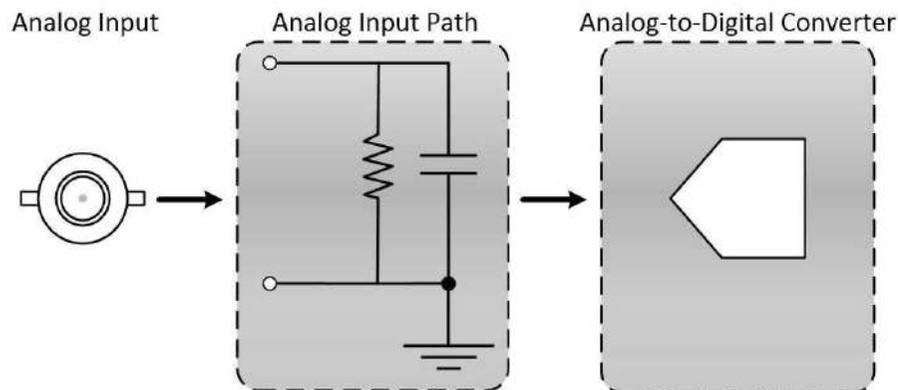
### ¿Qué es un Digitalizador?

Científicos e ingenieros a menudo utilizan un digitalizador para capturar datos analógicos en el mundo real y convertirlos en señales digitales para su análisis. Un digitalizador es cualquier dispositivo que se utiliza para convertir las señales analógicas en señales digitales. Uno de los digitalizadores más comunes es un teléfono celular, que convierte una voz, una señal analógica, en una señal digital para enviar a otro teléfono. Sin embargo, en las aplicaciones de pruebas y medidas, un digitalizador casi siempre se refiere a un osciloscopio o un multímetro digital (DMM). Este artículo se enfoca en osciloscopios, pero la mayoría de los temas también son aplicables a otros digitalizadores.

Sin importar el tipo, el digitalizador es vital para que el sistema reconstruya con precisión una forma de onda. Para asegurarse de seleccionar el osciloscopio correcto para su aplicación, considere el ancho de banda, la frecuencia de muestreo y la resolución del osciloscopio.

## Ancho de Banda

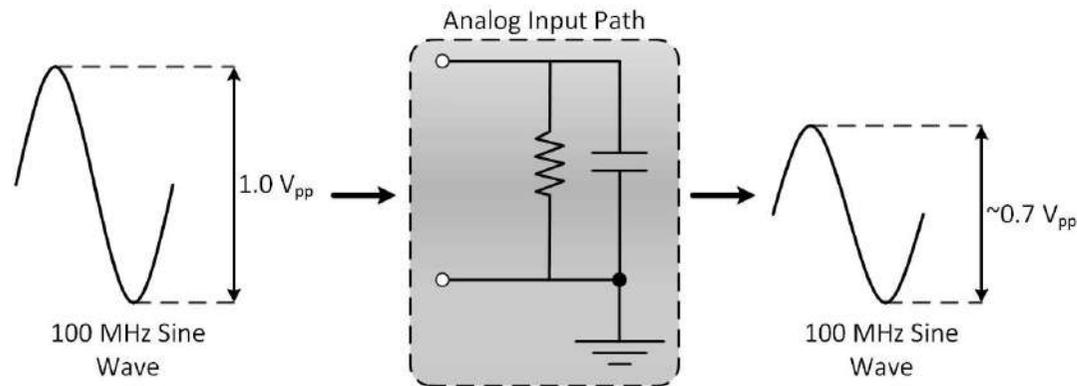
El frente de un osciloscopio consiste en dos componentes: una ruta de entrada analógica y un convertidor analógico-digital (ADC). La ruta de entrada analógica atenúa, amplifica, filtra y/o acopla la señal para optimizarla como preparación para la digitalización por el ADC. El ADC muestrea la forma de onda condicionada y convierte la señal de entrada analógica en valores digitales que representan la forma de onda de entrada analógica. La respuesta de frecuencia de la ruta de entrada provoca una pérdida inherente de información de amplitud y fase.



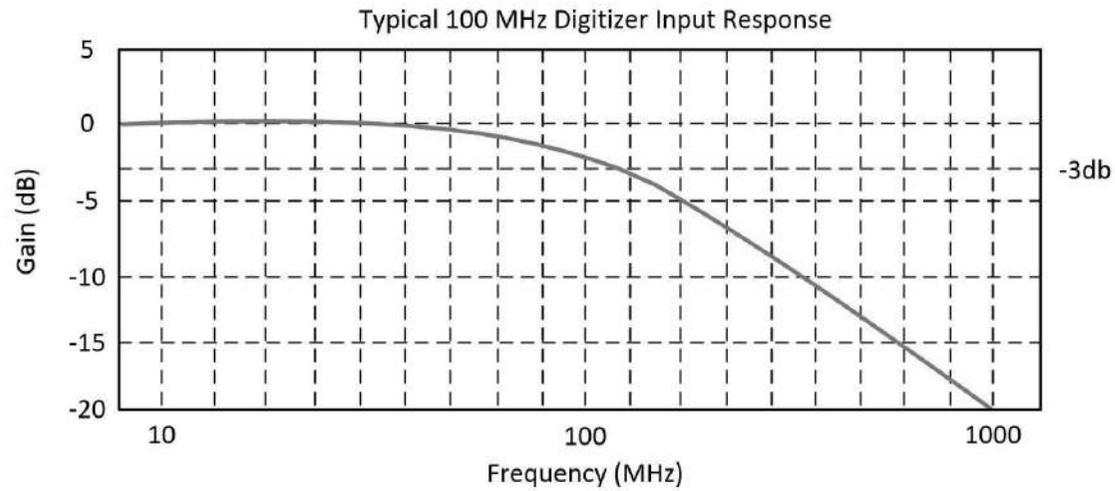
**Figura 1.** El ancho de banda describe el rango de frecuencia en el cual la señal de entrada puede atravesar el frente del osciloscopio, que consta de dos componentes: una ruta de entrada analógica y un ADC.

El ancho de banda describe la habilidad del panel frontal analógico para llevar una señal del mundo exterior al ADC con pérdida de amplitud mínima, desde la punta de prueba o equipo de pruebas a la entrada del ADC. En otras palabras, el ancho de banda describe la diversidad de frecuencias que un osciloscopio puede medir con precisión.

Se define como la frecuencia a la que una señal de entrada sinusoidal se atenúa al 70.7% de su amplitud original, que también se conoce como el punto de -3 dB. Las figuras 2 y 3 muestran la respuesta de entrada típica para un osciloscopio de 100 MHz.



**Figura 2.** El ancho de banda es cuando la señal de entrada se atenúa al 70.7% de su amplitud original.



**Figura 3.** Esta gráfica indica que a 100 MHz, la señal de entrada alcanza el punto de -3 dB.

El ancho de banda se mide entre los puntos de frecuencia inferior y superior, donde la amplitud de la señal cae a -3 dB por debajo de la frecuencia de pasobanda. Esto parece complicado, pero cuando usted lo desglosa en realidad es relativamente fácil.

Primero, usted debe calcular su valor -3 dB.

$$-3 \text{ dB} = 20 \log \frac{V_{out,pp}}{V_{in,pp}}$$

**Ecuación 1.** Calcular el Punto -3 dB.

$V_{in,pp}$  es el voltaje de pico a pico de la señal de entrada y  $V_{out,pp}$  es el voltaje de pico a pico de la señal de salida. Por ejemplo, si introduce una onda sinusoidal de 1 V, el voltaje de salida se puede calcular como  $-3 = 20 \log \frac{V_{out,pp}}{1}$  entonces

$$V_{out,pp} \approx 0.7 V.$$

Debido a que la señal de entrada es una onda sinusoidal, hay dos frecuencias en las que la señal de salida impacta este voltaje; estas se llaman frecuencias de corte  $f_1$  y  $f_2$ . Estas dos frecuencias tienen diferentes nombres, como la frecuencia de corte, frecuencia de cruce, frecuencia de media potencia, frecuencia 3 dB y frecuencia de ruptura. Sin embargo, todos estos términos se refieren a los mismos valores. La frecuencia central,  $f_0$ , de la señal es la media geométrica de  $f_1$  y  $f_2$ .

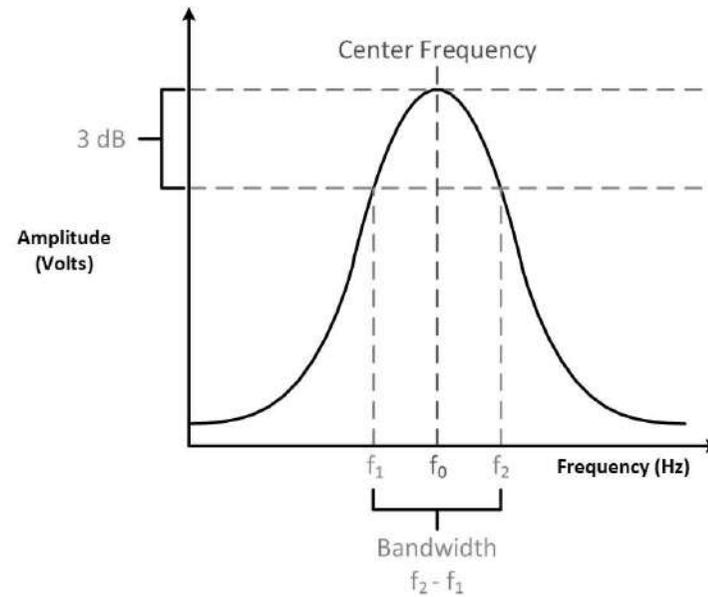
$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$$

**Ecuación 2.** Calcular la Frecuencia Central

Usted puede calcular el ancho de banda (BW) restando las dos frecuencias de corte.

$$BW = f_2 - f_1$$

**Ecuación 3.** Calcular el Ancho de Banda



**Figura 4.** El ancho de banda, la frecuencia de corte, la frecuencia central y el punto 3 dB, están todos conectados.

## Calcular Error de Amplitud

Otra ecuación que por lo general es útil es para error de amplitud.

$$\text{Amplitude Error} = 100 \left( 1 - \frac{R}{\sqrt{1+R^2}} \right), \text{ where } R = \frac{BW}{f_{in}}$$

**Ecuación 4.** Calcular el Error de Amplitud

El error de amplitud se expresa como un porcentaje y R es la relación del ancho de banda del osciloscopio a la frecuencia de la señal de entrada ( $f_{in}$ ).

Usando el ejemplo anterior, usted tiene un osciloscopio de 100 MHz con una señal de entrada de onda sinusoidal de 100 MHz a 1 V y BW = 100 MHz y  $f_{in} = 100$  MHz. Esto significa que R = 1. Entonces solamente tiene que resolver la ecuación:

$$\textit{Amplitude Error} = 100 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 29.3$$

El error de amplitud es 29.3%. Usted puede determinar el voltaje de salida para la señal de 1 V:

$$V_{out,pp} = 1 - \frac{V_{in,pp} * \textit{Amplitude Error}}{100} = 0.7V$$

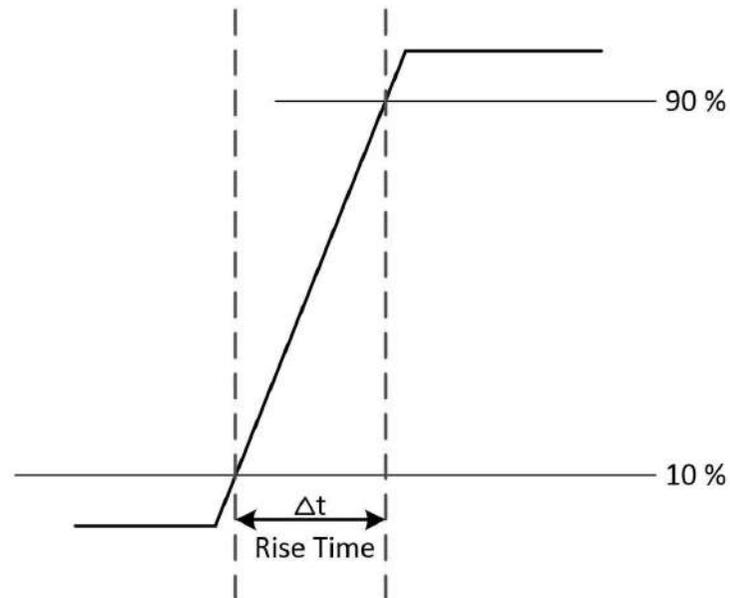
Se recomienda que el ancho de banda de su osciloscopio sea de tres a cinco veces el componente de interés de frecuencia más alta en la señal medida para captar la señal con el mínimo error de amplitud. Por ejemplo, para la onda sinusoidal de 1 V a 100 MHz, usted debe usar un osciloscopio con 300 MHz a 500 MHz de ancho de banda. El error de amplitud de una señal de 100 MHz a estos anchos de banda es:

$$\textit{Amplitude Error @300 MHz} = 100 \left( 1 - \frac{3}{\sqrt{1+3^2}} \right) \approx 5\%$$

$$\text{Amplitude Error @500 MHz} = 100 \left( 1 - \frac{5}{\sqrt{1 + 25^2}} \right) \approx 2\%$$

## Calcular el Tiempo de Incremento

Un osciloscopio debe tener el ancho de banda apropiado para medir con precisión la señal, pero también debe tener suficiente tiempo de incremento para capturar con precisión los detalles de las transiciones rápidas. Esto es más aplicable si se miden señales digitales, como pulsos y pasos. El tiempo de incremento de una señal de entrada es el tiempo de una señal para hacer la transición de un 10% al 90% de la amplitud máxima de la señal. Algunos osciloscopios pueden usar del 20% al 80%, así que asegúrese de revisar su manual de usuario.



**Figura 5.** El tiempo de incremento de una señal de entrada es el tiempo de una señal para hacer la transición de un 10% al 90% de la amplitud máxima de la señal.

El tiempo de incremento ( $T_r$ ) se puede calcular de la siguiente manera:

$$T_r = \frac{k}{BW}$$

**Ecuación 5.** Calcular el Tiempo de Incremento

La constante  $k$  es dependiente del osciloscopio. La mayoría de osciloscopios con un ancho de banda menor a 1 GHz típicamente tienen  $k = 0.35$ , mientras que los osciloscopios con un ancho de banda mayor a 1 GHz, por lo general tienen un valor de  $k$  entre 0.4 y 0.45.

El tiempo de incremento teórico medido  $T_{rm}$  puede ser calculado a partir del tiempo de incremento del osciloscopio  $T_{r0}$  y el tiempo de incremento real de la señal de entrada  $T_{rs}$ .

$$T_{rm} = \sqrt{T_{r0}^2 + T_{rs}^2}$$

**Ecuación 6.** Calcular el Tiempo de Incremento Teórico Medido

Se recomienda que el tiempo de incremento del osciloscopio sea de un tercio a un quinto del tiempo de incremento de la señal medida para captar la señal con error mínimo en el tiempo de incremento.

## Velocidad de Muestreo

La velocidad de muestreo, también conocida como razón de muestreo, no está directamente relacionada con la especificación de ancho de banda. La velocidad de muestreo es la frecuencia a la que el ADC convierte la forma de onda de entrada analógica a datos digitales. El osciloscopio muestrea la señal después de que cualquier atenuación, ganancia y/o filtrado ha sido aplicado a la ruta de entrada analógica y convierte la forma de onda resultante en una representación digital. Lo hace en las imágenes instantáneas, similar a los fotogramas de una película. Cuanto más rápido el osciloscopio realice el muestreo, mayor será la resolución y el detalle que se puede ver en la forma de onda.

## Teorema de Muestreo de Nyquist

El Teorema de Muestreo de Nyquist explica la relación entre la velocidad de muestreo y la frecuencia de la señal medida. Afirma que la velocidad de muestreo  $f_s$  debe ser mayor que el doble del componente de interés de frecuencia más alto en la señal medida. Esta frecuencia por lo general se conoce como la frecuencia Nyquist,  $f_N$ .

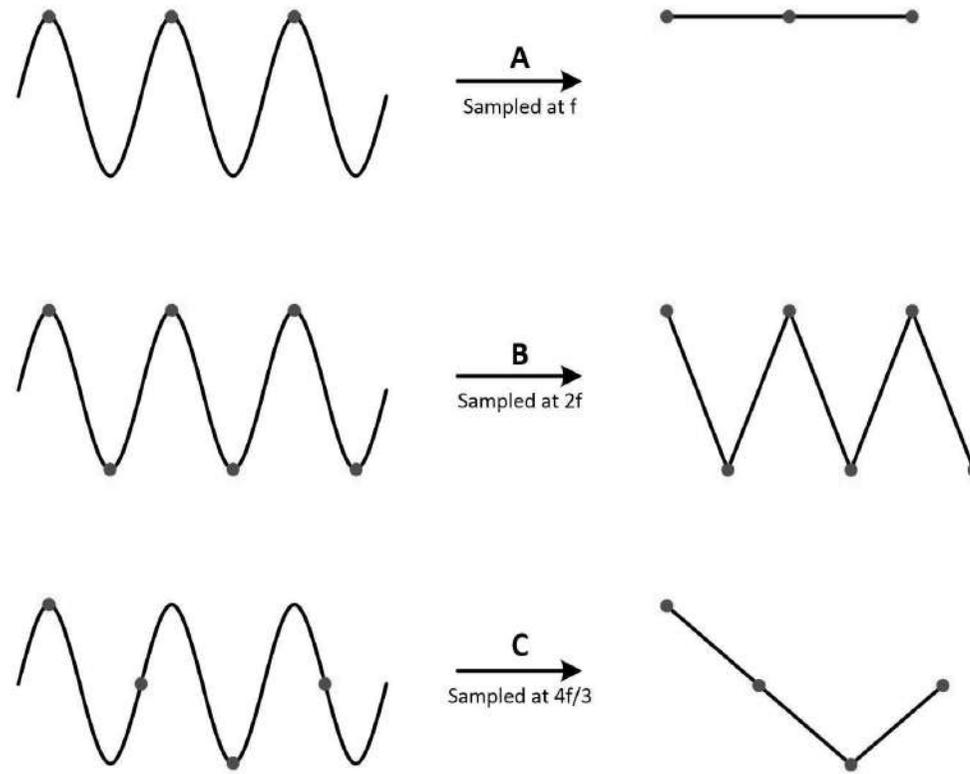
$$f_s > 2 * f_N$$

**Ecuación 7.** La velocidad de muestreo debe ser mayor al doble de la frecuencia Nyquist.

Para entender por qué, eche un vistazo a una onda sinusoidal medida a diferentes velocidades. En el caso A, la onda sinusoidal de frecuencia  $f$  es muestreada a la misma frecuencia. Esos muestreos están marcados en la señal original a la izquierda y a la derecha cuando se construyen, la señal aparece incorrectamente como un voltaje de DC constante. En el caso B, la velocidad de muestreo es el doble de la frecuencia de la señal. Ahora aparece como una forma de onda triangular. En este caso,  $f$  es igual a la frecuencia de Nyquist, que es el componente de frecuencia más alto permitido para evitar aliasing para una frecuencia de muestreo determinada. En el caso C, la velocidad de muestreo es de  $4f/3$ . La frecuencia Nyquist en este caso es:

$$f_N = \frac{f_s}{2} = \frac{4f/3}{2} = \frac{2f}{3}$$

Debido a que  $f$  es mayor que la frecuencia de Nyquist ( $\frac{4f}{3} > \frac{2f}{3}$ ), esta velocidad de muestreo reproduce una forma de onda alias de la frecuencia y la forma incorrectas.

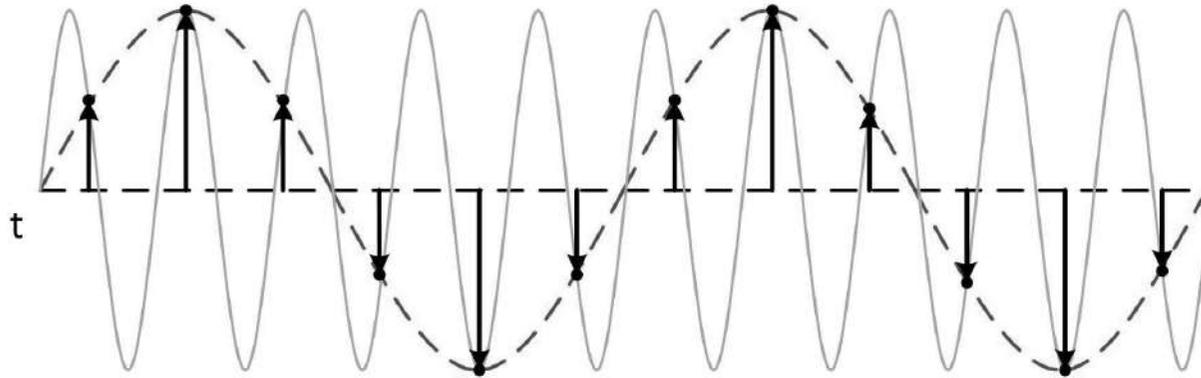


**Figura 6.** Una velocidad de muestreo demasiado baja puede causar reconstrucción inexacta de la forma de onda.

Por lo tanto, para reconstruir con precisión la forma de onda, la velocidad de muestreo  $f_s$  debe ser mayor que dos veces el componente de interés de frecuencia más alto en la señal medida. Por lo general, usted desea muestrear cinco veces más alto que la frecuencia de la señal.

## Aliasing

Si necesita muestrear a una determinada velocidad para evitar aliasing, entonces ¿qué es aliasing?. Si una señal es muestreada a una velocidad de muestreo menor que el doble de la frecuencia Nyquist, los componentes de frecuencias falsas más bajas aparecen en los datos muestreados. Este fenómeno se conoce como aliasing. La siguiente figura muestra una onda sinusoidal de 800 kHz muestreada a 1 MS/s. La línea punteada indica la señal de alias registrada en esa velocidad de muestreo. La frecuencia de 800 kHz usa un alias de vuelta en el pasobanda, apareciendo falsamente como una onda sinusoidal de 200 kHz.



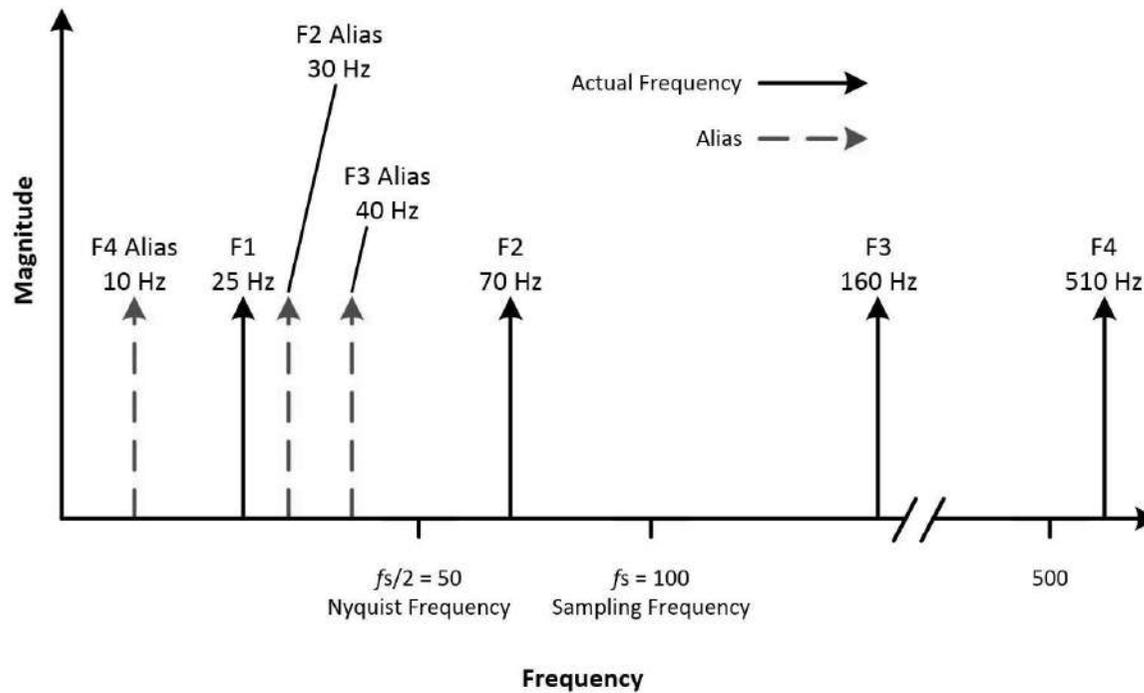
**Figura 7.** Aliasing se produce cuando una velocidad de muestreo es demasiado baja y reproduce una representación incorrecta de forma de onda.

La frecuencia alias  $f_a$  se puede calcular para determinar cómo aparece una señal de entrada a una frecuencia sobre la frecuencia de Nyquist. Es el valor absoluto del múltiplo entero más cercano de la frecuencia de muestreo menos la frecuencia de la señal de entrada.

$$f_a = |\text{closest integer multiple of } f_s * f_s - f|$$

**Ecuación 8.** Calcular la Frecuencia Alias

Por ejemplo, considere una señal con una frecuencia de muestreo de 100 Hz y la señal de entrada contiene las siguientes frecuencias: 25 Hz, 70 Hz, 160 Hz y 510 Hz. Las frecuencias por debajo de la frecuencia Nyquist de 50 Hz son muestreadas correctamente; aquellas superiores a 50 Hz aparecen como alias.



**Figura 8.** Diferentes valores de frecuencia son medidos, algunos de los cuales son frecuencias alias y algunos de los cuales son frecuencias reales de la forma de onda.

Estos son los cálculos para las frecuencias alias:

$$\text{Alias } F1 = |100 - 70| = 30 \text{ Hz}$$

$$\text{Alias } F2 = |2 * 100 - 160| = 40 \text{ Hz}$$

$$\text{Alias } F3 = |5 * 100 - 160| = 40 \text{ Hz}$$

Además de incrementar la velocidad de muestreo, aliasing también se puede prevenir usando filtro antialiasing. Este es un filtro paso bajo que atenúa cualquier frecuencia en la señal de entrada que sea mayor a la frecuencia Nyquist y debe ser introducido antes del ADC para restringir el ancho de banda de la señal de entrada y cumplir con los criterios de muestreo. Los canales de entrada analógica pueden tener filtros analógicos y digitales implementados en hardware para ayudar en la prevención de aliasing.

## Resolución

Otro factor a considerar al seleccionar un osciloscopio para una aplicación es la resolución. Los bits de resolución se refieren al número de niveles verticales únicos que un osciloscopio puede utilizar para representar una señal. Una manera de comprender el concepto de la resolución es comparándolo con una regla. Divida un metro en milímetros; ¿cuál es la resolución? La marca más pequeña en la regla es la resolución — o 1 de entre 1,000.

La resolución de un ADC es una función de la cantidad de piezas en las que la señal máxima se puede dividir. La resolución de amplitud está limitada por el número de niveles de salida discretos que tiene un ADC. Un código binario representa cada división; como tal, el número de niveles puede ser calculado como sigue:

$$\# \text{ of levels} = 2^{\text{Resolution}}$$

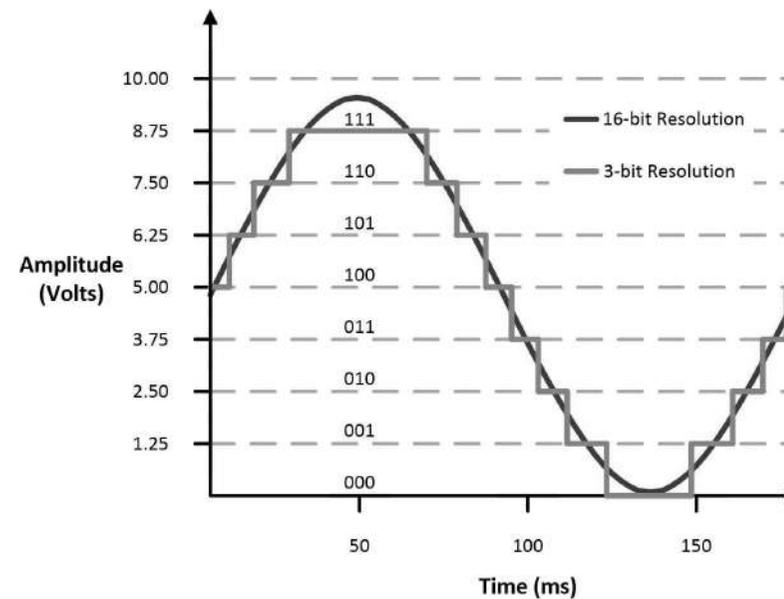
**Ecuación 9.** Calcular los Niveles de Salida Discretos de un ADC

Por ejemplo, un osciloscopio de 3 bits tiene  $2^3$  u ocho niveles. Por otra parte, un osciloscopio de 16 bits tiene  $2^{16}$  o 65,536 niveles. El ancho de código o cambio de voltaje mínimo detectable pueden calcularse como sigue:

$$\text{Code width} = \frac{\text{Device Input Range}}{2^{\text{Resolution}}}$$

**Ecuación 10.** Calcular el Ancho del Código

El ancho de código también se conoce como el bit menos significativo (LSB). Si el rango de entrada del dispositivo es 0 a 10 V, entonces un osciloscopio de 3 bits tiene un ancho de código de  $10/8 = 1.25$  V mientras que un osciloscopio de 16 bits tiene un ancho de código de  $10/65,536 = 305 \mu\text{V}$ . Esto puede significar una gran diferencia en cómo se muestra la señal.



**Figura 9.** Diferencia de una Forma de Onda entre 16 Bits y 3 Bits de Resolución

La resolución que usted necesita depende de su aplicación; cuanto mayor es la resolución, el osciloscopio cuesta más. Tenga en mente que un osciloscopio con alta resolución no necesariamente significa que tiene una alta precisión. Sin embargo, la precisión alcanzable de un instrumento está limitada por la resolución. La resolución limita la precisión de una medida; cuanto mayor es la resolución (número de bits) la medida es más precisa.

Algunos osciloscopios utilizan un método llamado tramado para ayudar a suavizar las señales para obtener la apariencia de una resolución más alta. El tramado implica la adición deliberada de ruido a la señal de entrada. Ayuda a difuminar las pequeñas diferencias en la resolución de amplitud. La clave es añadir ruido aleatorio de tal manera que haga que la señal rebote de un lugar a otro entre los niveles sucesivos. Por supuesto, esto de por sí hace a la señal más ruidosa. Pero, la señal se suaviza promediando este ruido digitalmente una vez que la señal es adquirida.

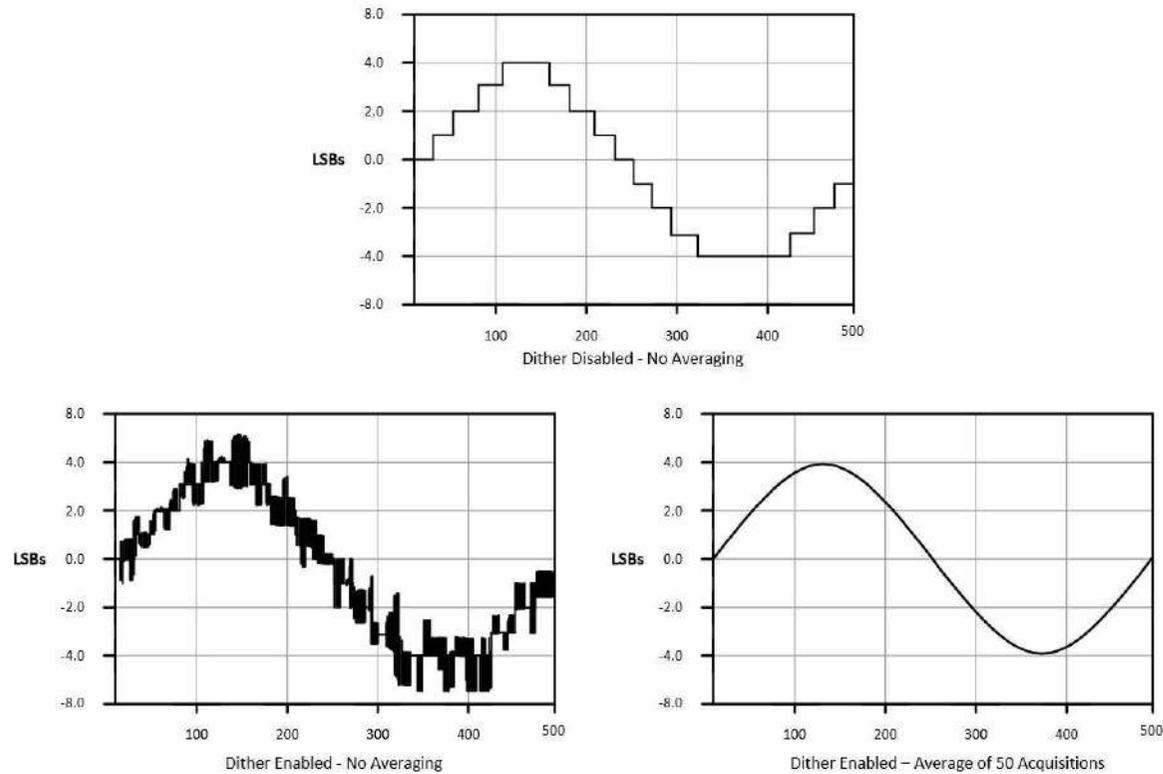


Figura 10. El tramado puede ayudar a suavizar una señal.

## Resumen

- El **ancho de banda** describe el rango de frecuencias que un osciloscopio puede medir de manera precisa. Se define como la frecuencia a la que una señal de entrada sinusoidal se atenúa al 70.7% de su amplitud original, que también se conoce como el punto de -3 dB.
- El ancho de banda es la diferencia entre las **frecuencias de corte**.

- El **error de amplitud** es un porcentaje que es la relación del ancho de banda con las frecuencias de la señal de entrada que ayuda a determinar el ruido en un sistema.
- Se recomienda que el ancho de banda de su osciloscopio sea de **tres a cinco veces** el componente de interés de frecuencia más alta en la señal medida para captar la señal con el mínimo error de amplitud.
- El **tiempo de incremento** de una señal de entrada es el tiempo de una señal para hacer la transición de un 10% al 90% de la amplitud máxima de la señal.
- Se recomienda que el tiempo de incremento del osciloscopio sea de **un tercio a un quinto** del tiempo de incremento de la señal medida para captar la señal con error mínimo en el tiempo de incremento.
- La **velocidad de muestreo** es la frecuencia a la que el ADC convierte la forma de onda de entrada analógica a datos digitales.
- La velocidad de muestreo debe ser **por lo menos el doble** de la frecuencia de interés más alta en la señal, pero la mayoría de las veces debe ser **alrededor de cinco veces mayor**.
- **Aliasing** es cuando los componentes de frecuencia falsa aparecen en los datos muestreados.
- Los bits de **resolución** se refieren al número de niveles verticales únicos que un osciloscopio puede utilizar para representar una señal.
- Cuanto más alta la resolución de un instrumento, mayor la precisión.

## Recursos de Instrumentación Adicionales

[Instrumentos multifunción - Instrumentos de laboratorio integrados en un solo dispositivo de función fija.](#)

Aprenda cómo un instrumento multifuncional que combina un osciloscopio de señal mixta, un generador de funciones, un multímetro digital, una fuente de alimentación DC programable y E/S digitales en un dispositivo y cómo funciona con su PC o iPad para depuración y validación eficientes del diseño de circuitos.

[Explore Osciloscopios Desarrollados para Pruebas](#)

Los osciloscopios son instrumentos esenciales en una variedad de aplicaciones, lo que los hace una necesidad para los sistemas de pruebas automatizadas. Considere una solución modular si su aplicación requiere medir, analizar o procesar datos; si demanda rendimiento más rápido; o si requiere un tamaño pequeño con mínimo consumo de potencia.

Para la lista completa de tutoriales, regrese a la página principal de [Fundamentos de Instrumentos](#).

