

## DOCUMENTO TÉCNICO

# Guía de Ingeniería para Mediciones Exactas con Sensores

## Descripción general

Los sensores convierten un fenómeno físico en una señal eléctrica medible. Pero algunos sensores no responden naturalmente a los fenómenos físicos cambiantes y necesitan acondicionamiento de señales. Antes de poder digitalizar la salida del sensor, la señal podría necesitar circuitos y componentes adicionales para producir una señal que pueda aprovechar todas las capacidades del hardware de medición y reducir los efectos de ruidos provenientes de interferencia externa.

## CONTENIDO

Descripción General.....	1
Termopares, RTD y Termistores.....	2
Galgas Extensiométricas y Sensores Basados en Puente.....	8
Acelerómetros y Micrófonos.....	17
TEDS (Hoja de Datos Electrónica de Transductor).....	29
Elección de un Sistema de Medición con Sensores.....	32

Este documento contiene prácticas recomendadas para conectar los sensores a la instrumentación, implementar acondicionamiento de señales correctamente y reducir las posibles fuentes de error en el sistema.

## Termopares, RTD y Termistores

Los termopares, los RTD y los termistores funcionan sobre el principio de que ciertos materiales responden de manera predecible y medible a variaciones en la temperatura. En los tres casos, la respuesta medida es generalmente bastante pequeña y, como con todas las mediciones de bajo nivel, difícil de medir de manera exacta y confiable. Las capacidades de acondicionamiento correcto de la señal en los componentes del software y hardware del sistema de medición pueden simplificar en gran manera la tarea de medición de temperatura. Las siguientes secciones exponen el acondicionamiento de señales recomendado para mediciones exactas de termopares, RTDs y termistores.

### Requisitos para el Acondicionamiento de la Señal

#### Filtrado

Las mediciones de temperatura a menudo se deben tomar lejos del equipo de medición. Esto significa que los cables del sensor que transportan la señal analógica al digitalizador deben recorrer una larga distancia. A través de la longitud del cable se puede filtrar ruido proveniente del ambiente en la señal analógica y producir mediciones imprecisas. Necesita minimizar este problema mediante la cuidadosa consideración del recorrido del cableado. Evitar las líneas de corriente AC, los tubos fluorescentes y los monitores de computadoras puede ayudar a evitar el ruido de 50/60 Hz que los cables eléctricos emiten a menudo.

También puede utilizar un filtro paso bajo para la señal entrante o incorporar uno en el hardware de medición para ayudar a eliminar las señales de alta frecuencia no deseadas.

#### Aislamiento

En esencia, los termopares, los RTD y los termistores están fabricados con materiales eléctricamente conductivos. Si no toma en cuenta el aislamiento, puede conectar de manera inadvertida una medición que sea potencialmente peligrosa para el hardware de medición o para el usuario.

Considere que esté colocando termopares a la carcasa de un motor eléctrico grande. Los motores grandes a menudo requieren voltajes muy elevados y sufren picos de voltaje incluso mayores durante el funcionamiento. Si la carcasa del motor se expone a uno de estos altos voltajes debido a un corto interno, un pico de voltaje podría llegar al hardware de medición a través del cableado del termopar. Puede utilizar termopares aislados para evitar esto, pero esto produce un tiempo de respuesta más lento y costos adicionales.

Alternativamente, un dispositivo de medición con aislamiento de canales puede ayudar a proteger el circuito del convertidor analógico-digital (ADC) y también a minimizar el ruido proveniente de los canales cercanos. También puede utilizar un dispositivo de medición aislado para tomar mediciones exactas cuando tenga voltajes de modo común altos, al aislar el circuito ADC de la tierra y permitir que la medición flote hasta la señal de interés (dentro de los límites del dispositivo).

### Linealización

La salida de voltaje por unidad de temperatura de un termopar, RTD o termistor no es una relación lineal. Debido a esto, no puede simplemente utilizar un coeficiente de escala para convertir el voltaje medido a una salida de temperatura significativa a través del espectro completo del termopar. La Figura 1, por ejemplo, muestra la salida de voltaje termoeléctrico de varios termopares a través de un rango de temperaturas. Observe la relación no lineal.

TERMOPARES EN DIFERENTES TEMPERATURAS

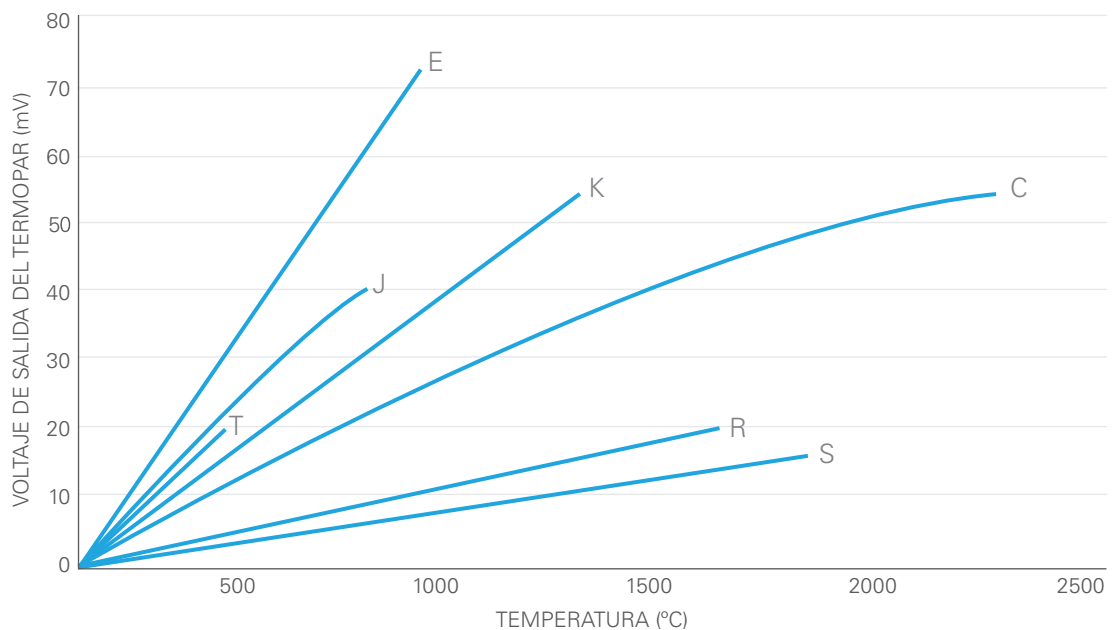


Figura 1. Voltaje de salida del termopar frente a la temperatura<sup>1</sup>

Puede elegir entre dos opciones para escalar mediciones de manera precisa y corregir esta no linealidad:

1. Utilice una tabla de búsqueda e interpolación lineal para los voltajes medidos entre los puntos de datos en la tabla. Esto es bastante efectivo, pero requiere la codificación de una tabla de búsqueda potencialmente grande como el subconjunto de una para los termopares del tipo K que se muestra en la Figura 2 y es mantenida por el National Institute of Standards and Technology (NIST).

<sup>1</sup> Digi-Key: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/may/designing-thermocouple-applications-with-a-sensor-afe>

ITS-90 TABLA PARA EL TERMOPAR DEL TIPO K (VOLTAJE TERMOELÉCTRICO EN mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293

Figura 2. Tabla de búsqueda del termopar del tipo K de NIST<sup>2</sup>

2. Aplique la ecuación voltaje a temperatura para el tipo de sensor que está utilizando para realizar la medición. Por ejemplo, el polinomio de alto orden requerido para cualquier termopar determinado es:

$$E = \sum_{i=0}^n (C_i t^i), \text{ donde}$$

E = Voltaje termoeléctrico en  $\mu\text{V}$

$C_i$  = Coeficientes polinómicos (proporcionado por NIST para cada rango de temperatura)

$t^i$  = Temperatura en  $^{\circ}\text{C}$

Los termistores también requieren una ecuación similarmente compleja para convertir de manera precisa las señales sobre un amplio rango de temperaturas. Los RTD, por el contrario, entregan la respuesta más lineal entre los tres sensores de medición de temperatura. La relación entre resistencia y temperatura para los RTD está definida por la ecuación de Callendar-Van Dusen de la siguiente manera:

$$\text{Para } <0^{\circ}\text{C} : RT = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100^{\circ}\text{C})]$$

$$\text{Para } >0^{\circ}\text{C} : RT = R_0 [1 + AT + BT^2]$$

RT = resistencia RTD a temperatura T

$R_0$  = resistencia nominal RTD a  $0^{\circ}\text{C}$

A, B y C = constantes usadas para escalar el RTD

<sup>2</sup> Base de datos del termopar ITS-90 de NIST: <http://srdata.nist.gov/its90/main/>

Observe que realizar estos cálculos en el software puede requerir de una potencia de cálculo significativa, dependiendo de la cantidad de canales y la frecuencia de muestreo, además del margen operativo de temperatura. Tener una plataforma de software que se integre sólidamente con el hardware de medición puede simplificar en gran medida esta tarea de escalado al proporcionar capacidades integradas de escalamiento.

## Consideraciones Específicas para RTDs y Termistores

### Corriente de Excitación

Los termistores y los RTD son sensores resistivos que requieren una corriente de excitación para generar un voltaje medible en el dispositivo. Una fuente de corriente precisa y constante es fundamental para asegurar un voltaje constante y preciso para la medición. El sistema DAQ que seleccione para las mediciones de su termistor y RTD debería proporcionar una fuente de corriente de excitación que esté diseñada para ser confiable, para que puede lograr las mediciones más exactas y precisas.

### Conexión al hardware con configuraciones de 2, 3 y 4 cables (solo RTD)

Puede comprar los RTD con tres configuraciones de cableado. Las diferencias y los beneficios de cada uno se analizan en detalle en la referencia del sensor RTD. El hardware de medición que seleccione para el sistema necesita ser suficientemente flexible para incorporar los tipos de RTD que requiere la aplicación. Algunos hardware de medición permiten solo RTD con 2 cables, mientras que otros hardware ofrecen detección automática de RTD con 3 o 4 cables. Necesita seleccionar un dispositivo DAQ que esté diseñado para el nivel de resistencia de su RTD, por ejemplo, hay RTD de 100  $\Omega$  o de 1000  $\Omega$ .

## Consideraciones Específicas para Termopares

### Amplificación

Por sí mismos, los termopares producen voltajes muy bajos para un determinado cambio de temperatura que están normalmente en el orden de los milivolts y a veces menos. Por ejemplo, los termopares del tipo K producen solo 40  $\mu\text{V}$  por grado Celsius. La mayoría de los hardware de medición convencional toman las mediciones dentro de un determinado rango, y la resolución del dispositivo determina los cambios detectables más pequeños dentro de ese rango de voltaje. Ya que el voltaje que mide es tan pequeño en el caso de un termopar, es deseable amplificar la señal medida para aprovechar el rango de entrada completo del dispositivo de medición.

#### SALIDAS AMPLIFICADAS DEL TERMOPAR

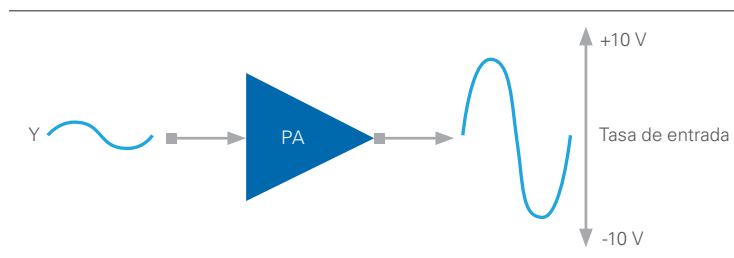


Figura 3. Salidas amplificadas del termopar para detectar cambios pequeños de la señal y utilizar el rango completo de entrada ADC.

En un escenario ideal, la amplificación se produce tan cerca de la medición principal como sea posible. Esto ayuda a evitar la amplificación de cualquier ruido inyectado en la señal a lo largo de la longitud de los cables del termopar. Si la amplificación externa no es posible o si necesita simplificar el sistema de medición, puede usar un dispositivo de medición con un ADC de 24 bits. Este tipo de dispositivos puede proporcionar una sensibilidad de medición en el orden de 0.2 °C.

### Compensación de Unión Fría (CJC)

La naturaleza de una medición de termopar, como se analizó en la descripción general de los termopares, se basa en el diferencial de voltaje creado cuando dos metales distintos se unen y se exponen a alguna temperatura relativa. Esto genera un problema cuando se considera la conexión entre el termopar y los terminales del hardware de medición. En esta conexión, se genera otra unión de metales distintos, que también genera un diferencial de voltaje, según el entorno. Si no tiene en cuenta este “termopar parasitario” secundario, puede distorsionar la medición de temperatura pretendida lo suficiente como para producir un resultado inválido.

Para combatir esto, puede incorporar una medición de referencia o una “medición de unión fría” en el hardware de medición, como se muestra en la Figura 4. Tome esta medición de referencia a una distancia de la medición principal e idealmente adyacente al “termopar parasitario” generado por la conexión del termopar actual a los terminales del dispositivo de medición. Use un sensor de temperatura de medición directa (como un RTD o un termistor) y luego reste la medición de referencia resultante de la medición principal para retirar, o compensar el componente parasitario. Este proceso se conoce como compensación de unión fría o CJC (Cold-Junction Compensation).

#### MEDICIÓN DE UNIÓN FRÍA EN TERMOPAR

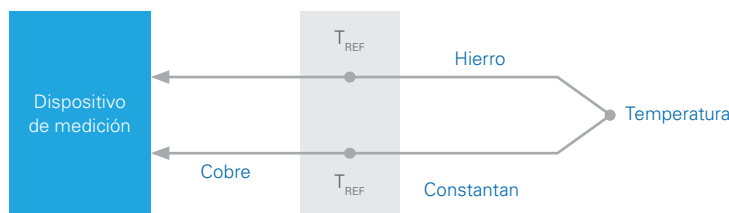


Figura 4. El error de unión fría agrega más voltaje a una medición de termopar.

### Eliminación del error de desfase

Como se analizó anteriormente, la CJC es importante para corregir el efecto del termopar parasitario generado por la conexión de los cables del termopar a los terminales metálicos del hardware. El termopar parasitario produjo un desfase en el voltaje medido que produjo resultados imprecisos. De manera similar, la temperatura ambiente que rodea al dispositivo de medición puede producir un desfase en el voltaje medido con un termopar debido a los voltajes inducidos en el mismo hardware. Para corregir esto, debería medir con regularidad el voltaje latente sin un termopar y restar este valor a cada medición de termopar. Para simplificar este proceso, algunos hardware de medición proporcionan una función de auto-cero para corregir de manera regular o semirregular cualquier voltaje de desfase generado por el medio ambiente. Esto puede mejorar significativamente la exactitud de la medición general.

## COMPENSACIÓN DE AUTO-CERO

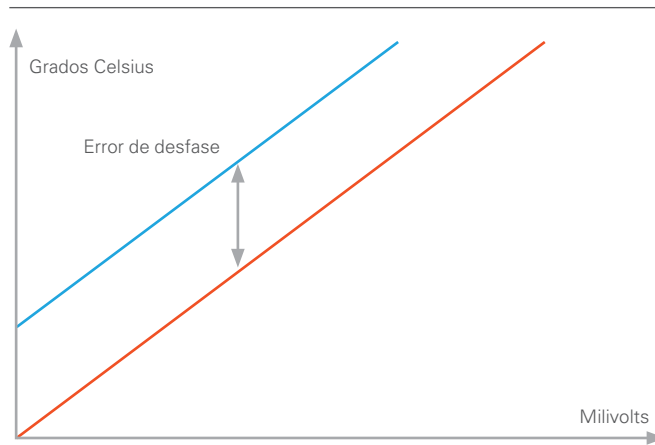


Figura 5. El auto-cero compensa el error de desfase.

**Detección de los termopares desconectados**

Los termopares pueden ser susceptibles a la corrosión y desgaste a lo largo del tiempo debido a su composición (los metales distintos en contacto pueden producir corrosión en algunos ambientes) y el entorno de funcionamiento típico para este tipo de sensores. Un termopar quebrado o desconectado puede no resultar obvio a primera vista para el usuario y puede producir información inválida. La detección del termopar abierto es una característica del hardware que proporciona una pequeña corriente para empujar la entrada de voltaje fuera de rango cuando el hardware detecta una conexión abierta. Puede verificar fácilmente esto en el software. Cuando utilice esta característica, recuerde que la pequeña corriente puede ser una fuente de error de tendencia en aplicaciones de alta precisión. Para corregir esto, puede añadir la detección de termopar abierto con la anulación de desfase de terminal, que toma la diferencia medida con y sin la corriente aplicada y la resta a las mediciones futuras. Esto corrige efectivamente el desfase inducido por el usuario.

## DETECCIÓN DE TERMOPAR ABIERTO



Figura 6. El circuito de detección de termopar abierto empuja el voltaje a un nivel elevado cuando se rompe el termopar.

## Conclusión

Para obtener un nivel confiable de precisión en las mediciones de temperatura, debe atravesar varios niveles de acondicionamiento de señal, algunos recomendados y algunos requeridos. Cuando elija un sistema de medición para termopares, RTD, o termistores, debe considerar el filtrado integrado para eliminar el ruido, el aislamiento para evitar los lazos de tierra y la linealización para traducir el voltaje a la temperatura. Si usa termopares como sensor de temperatura, recuerde estas fuentes adicionales de error que pueden modificar la precisión de medición:

- Error de unión fría: se corrige mediante la compensación de la unión fría o CJC
- Desfase: se corrige mediante el auto-cero y la eliminación de desfase del terminal
- Detección de termopar abierto para garantizar la disponibilidad y confiabilidad del sistema

Aprenda cómo obtener mediciones de temperatura confiables y precisas con el hardware NI.

## Sistemas de medición de termopares de NI

### Sistema de medición de RTD de NI

## Galgas Extensiométricas y Sensores Basados en Puente

Las galgas extensiométricas son dispositivos de detección que funcionan como bloques de construcción para otros tipos de transductores, incluidos sensores de presión, carga y torsión, usados ampliamente en aplicaciones de monitoreo y pruebas estructurales. Aunque las galgas extensiométricas son comunes, son uno de los tipos de sensores más difíciles de usar para acondicionar y adquirir datos confiables. Las mediciones con galgas extensiométricas funcionan midiendo cambios mínimos en la longitud de una hoja metálica debido a la tensión a lo largo de una superficie que a menudo es menor a 5 mm<sup>2</sup>. Varios factores pueden afectar el desempeño de la medición de las galgas extensiométricas, incluyendo problemas de acondicionamiento de señal, ruido eléctrico, fluctuaciones de temperatura y calibración incorrecta. Debido a que los sensores de presión, carga y torque se basan normalmente en una configuración de la galga extensiométrica de puente completo, muchos de estos factores también los afectan. Tenga en cuenta las siguientes recomendaciones para compensar el error y aumentar la exactitud de las mediciones basadas en puente.



## Requisitos para el Acondicionamiento de la Señal

### Terminación de Puente

A menos que esté usando un sensor de puente completo, debe completar el puente de Wheatstone con resistores de referencia. Por lo tanto, los acondicionadores de señal para los sensores basados en puente generalmente proporcionan redes de terminación de medio puente que consisten en dos resistores de referencia de alta precisión. La resistencia nominal de los resistores de terminación es menos importante que la compatibilidad entre los dos resistores. Idealmente, los resistores combinan perfectamente y proporcionan un voltaje de referencia estable de  $V_{EX}/2$  al terminal de entrada negativo del canal de medición. La alta resistencia de los resistores de terminación ayuda a disminuir la caída de corriente desde el voltaje de excitación. Sin embargo, usar resistores de terminación que sean demasiado grandes puede producir un ruido aumentado y errores debido a las corrientes de polarización.

### CIRCUITO PARA GALGA EXTENSIONOMÉTRICA CON ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

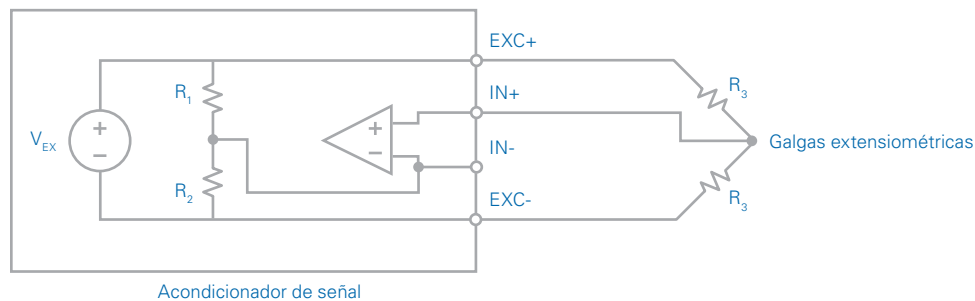


Figura 7. Un acondicionador de señal proporciona la terminación de puente y excitación para un circuito de galga extensiométrica de medio puente.

### Excitación

Los sensores basados en puente requieren un voltaje constante para energizar el puente. Los acondicionadores de señal de puente normalmente incluyen una fuente de voltaje. No se reconoce ningún nivel de voltaje estándar en toda la industria, pero los niveles de voltaje de excitación alrededor de 3 V y 10 V son comunes. Aunque un voltaje de excitación más alto genera un voltaje de salida proporcionalmente más alto, también puede provocar errores mayores debido al autocalentamiento. Igualmente, las pequeñas fluctuaciones en el voltaje de excitación debido a las fuentes de excitación inestables pueden afectar la precisión de las mediciones. Las siguientes secciones ofrecen recomendaciones para minimizar los efectos de los errores generados a partir del autocalentamiento y las fuentes de excitación inestables.

### Amplificación

La salida de las galgas extensiométricas es relativamente pequeña. Por ejemplo, la mayoría de los puentes de galga extensiométrica producen menos de 10 mV/V, o 10 milivolts de salida por volt de voltaje de excitación. Con una excitación de 10 V, la señal de salida es de 100 mV. Por lo tanto, los acondicionadores de señal para sensores basados en puente generalmente incluyen amplificadores para aumentar el nivel de la señal, para incrementar la resolución de la medida y para mejorar las relaciones de señal a ruido.

Los sensores de carga, presión y torque pueden producir voltajes de bajo o alto nivel, según los requisitos de excitación. Los sensores de bajo nivel son normalmente energizados mediante un dispositivo de medición y producen señales de milivolts. Los sensores de alto nivel (o sensores acondicionados) requieren fuentes de energía externa mayores para funcionar y producen señales de  $\pm 5\text{ V}$ ,  $\pm 10\text{ V}$ , o 4 a 20 mA.

### Elección de un Nivel de Excitación Óptimo

Elegir un nivel de excitación óptimo es un equilibrio entre alcanzar una tasa fuerte de señal a ruido y minimizar los efectos de autocalentamiento. En un mundo ideal, se prefieren los altos niveles de voltaje de excitación debido al cambio en el voltaje de salida para un determinado nivel de tensión aumenta en proporción directa al voltaje de excitación. Debido a esto, puede medir de manera más sencilla y exacta los voltajes pequeños generados por los puentes de galgas extensiométricas, especialmente en ambientes ruidosos o cuando se usan cables conductores largos susceptibles al ruido. Sin embargo, debido a que las galgas de lámina son esencialmente dispositivos eléctricos resistivos, los niveles de excitación superiores producen autocalentamiento, lo que presenta múltiples efectos negativos. El autocalentamiento cambia la sensibilidad y resistividad del puente y la capacidad del adhesivo para transferir la tensión. Las galgas extensiométricas raramente se dañan por voltajes de excitación excesivos. La consecuencia normal es la degradación del rendimiento en lugar del fallo de la galga.

Debido a que muchos factores distintos pueden afectar el nivel de excitación ideal de su aplicación, no se puede estandarizar un nivel de voltaje de excitación de puente para un tamaño y un tipo de galga en particular. En general, puede disminuir el autocalentamiento mediante la reducción del nivel de excitación, pero un voltaje de excitación óptimo se determina mejor mediante un procedimiento experimental. Sin carga aplicada, debe examinar el punto cero del canal mientras eleva progresivamente el nivel de excitación. Cuando vea inestabilidad en la lectura cero, debe reducir la excitación hasta que vuelva a estabilizarse. Debe realizar este experimento en las temperaturas más elevadas sobre las que está tomando las mediciones. En ambientes ruidosos, aún puede utilizar los niveles de excitación bajos mediante la protección adecuada de los cables conductores y la colocación del dispositivo de medición cerca de los sensores. Según la configuración de prueba, considere el hardware de medición con factores de forma distribuida que le ofrece flexibilidad máxima en el lugar del sistema.

### Otros factores que afectan la excitación óptima

- **Área mallada de la galga extensiométrica:** Puede disminuir el autocalentamiento mediante la elección de una galga extensiométrica con un área mayor de superficie (longitud activa de la galga x ancho activo de la malla) para una mejor disipación del calor.
- **Resistencia nominal de la galga extensiométrica:** Las galgas de resistencia más altas, por ejemplo 350  $\Omega$  en lugar de 120  $\Omega$ , disminuyen la energía disipada por área de unidad, lo que hace posible un mayor voltaje de excitación.
- **Propiedades del disipador térmico de la superficie de montaje:** Los metales de alta conductividad térmica, tales como el cobre o el aluminio, son excelentes disipadores de calor, que sustraen el calor de la galga extensiométrica. Los metales de baja conductividad térmica, tales como el acero inoxidable o el titanio, son malos disipadores térmicos. La medición de la tensión en el plástico requiere una consideración especial. La mayoría de los plásticos actúan como aisladores térmicos en lugar de disipadores de calor, por lo que se requiere de valores de disipación extremadamente bajos para evitar efectos graves de autocalentamiento. Los plásticos que tienen un alto porcentaje de relleno inorgánico en forma de polvo o fibra presentan un menor problema debido a que dicho relleno ayuda a mejorar la conductividad térmica.

- Técnica de instalación y cableado:** Si se daña la galga durante la instalación, si las pestañas de soldadura se despegan parcialmente debido al calor de la soldadura o si alguna discontinuidad se forma en la línea de pegamento, los altos niveles de excitación pueden producir problemas graves. Una técnica correcta es esencial para obtener un rendimiento consistente en el funcionamiento de todas las galgas extensiométricas, pero particularmente bajo condiciones de alta excitación.

## Compensación por Fuentes Inestables de Excitación

La precisión de una medición basada en puente es directamente proporcional a la estabilidad de la fuente de excitación. Los cambios en la fuente de excitación producen cambios en la salida medida del puente. Como resultado, las fluctuaciones pequeñas de la fuente de excitación se traducen a una representación incorrecta de la tensión. Dos métodos pueden ayudarle a evitar las fuentes de excitación imprecisas e inestables. Puede medir el voltaje que en realidad proporciona la fuente para compensar las fluctuaciones cuando escale los datos en el software o puede referenciar la medición realizada mediante el ADC a la fuente de excitación. El primer método requiere mediciones adicionales, y por ende agrega costos extras y complejidad al sistema.

### CORRECCIÓN DE LAS FUENTES DE ENERGÍA INESTABLES

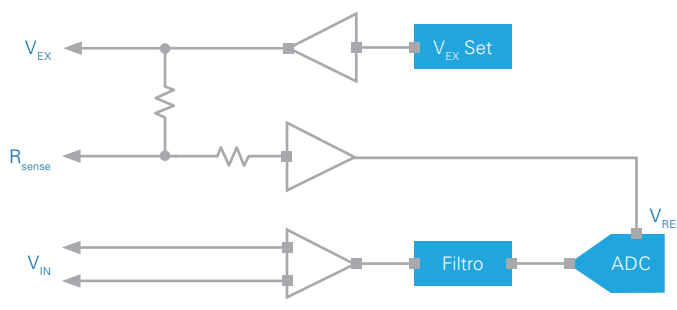


Figura 8. Un diseño ratiométrico usa el voltaje de excitación como una referencia para ADC para corregir las fuentes inestables de energía.

El enfoque ratiométrico elimina la dependencia de la exactitud del voltaje de excitación mediante la medición continua del voltaje de excitación y el escalado de la medición directamente al hardware. El voltaje de excitación se mide continuamente mediante circuitos de precisión en los módulos y se usa para enviar la entrada de referencia del ADC. Con esta implementación, como se muestra en la Figura 8, los módulos regresan los datos como una relación del voltaje de salida del puente y el voltaje de excitación. Este método corrige continuamente y automáticamente los errores en la exactitud del voltaje de excitación.

## Minimizar los Errores Debidos a la Resistencia del Cable Conductor

Los cables conductores largos y los cables de calibre grueso, que presentan una mayor resistencia que el cableado de terminación de puente, pueden ser una fuente importante de error en las mediciones de galgas extensiométricas. Por ejemplo, suponga que cada cable en una galga extensiométrica de conexión de 2 cables tiene 15 m de longitud con una resistencia del conductor  $R_L$  igual a  $1\ \Omega$ . La resistencia del conductor agrega  $2\ \Omega$  al brazo del puente, lo que agrega un error de desfase y reduce la sensibilidad de la salida del puente. Puede compensar este error al medir la resistencia del conductor  $R_L$  y contabilizarla en los cálculos de la tensión. Sin embargo, aparece un problema más difícil por los cambios en la resistencia

del conductor debido a las fluctuaciones de temperatura. El coeficiente de temperatura de los cables de cobre del conductor es normalmente dos órdenes de magnitud mayor que el coeficiente de temperatura de las galgas. Por lo tanto, un pequeño cambio en la temperatura puede generar un error de medición de varios microstrains ( $\mu\epsilon$ ).

Usar una conexión de 3 cables puede eliminar los efectos de la resistencia variable del cable conductor debido a que las resistencias de los conductores afectan las patas adyacentes del puente. Como se ve en la Figura 9, los cambios en la resistencia del cable conductor  $R_{L2}$  no cambian la relación de las patas del puente  $R_3$  y  $R_G$ . Por lo tanto, cualquier cambio en la resistencia debido a la temperatura se cancela entre sí y el puente permanece en equilibrio.

#### GALGA EXTENSIONOMÉTRICA DE 3 CABLES

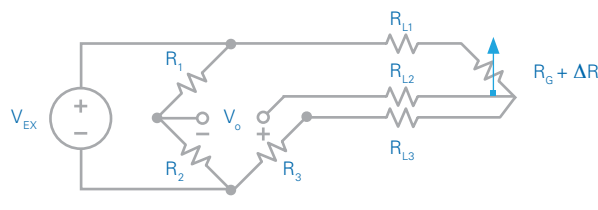


Figura 9. Configuración de galga extensiométrica de 3 cables

#### Análisis Remotos

Si el circuito de la galga extensiométrica está ubicado lejos del acondicionador de señal y de la fuente de excitación, otra fuente posible de error es la caída de voltaje provocada por la resistencia en los cables conductores largos que conectan el voltaje de excitación con el puente. Esto produce la entrega de un voltaje de excitación menor que el pretendido originalmente en el elemento de medición. Algunos acondicionadores de señales incluyen una característica llamada detección remota para compensar este error. Con la detección remota de respuesta, puede conectar cables extras de detección al punto donde los cables de voltaje de excitación se conectan al circuito de puente, como se ve en la Figura 10. Los cables extras de detección regulan el suministro de excitación a través de los amplificadores de retroalimentación negativa para compensar pérdidas del conductor y entregar el voltaje necesario al puente.

#### MEDICIONES DE DETECCIÓN REMOTA

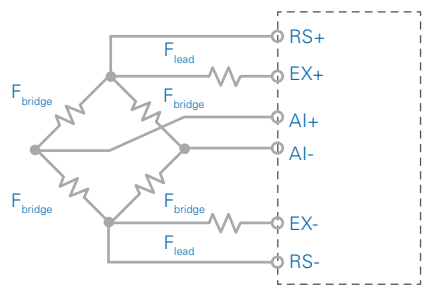


Figura 10. La detección remota mide el voltaje de excitación real entregado al puente a lo largo de grandes distancias.

Un esquema alternativo de detección remota utiliza un canal de medición separado para medir directamente el voltaje de excitación real en todo el puente. Ya que los terminales del canal de medición llevan muy poca corriente, la resistencia del terminal tiene un efecto insignificante en la medición. Entonces puede usar el voltaje de excitación medido en la conversión de voltaje a tensión para compensar las pérdidas del terminal.

## Mejora de la Relación Señal a Ruido

Las galgas extensiométricas y los sensores basados en puente están a menudo en ambientes eléctricamente ruidosos. La relación señal a ruido (SNR) describe la relación entre la amplitud de la señal y la amplitud del ruido. Una SNR mayor normalmente produce una medición menos ruidosa, lo que permite una mejor resolución general. El ruido en las lecturas de tensión puede ser particularmente problemático debido a las pequeñas señales en las mediciones de tensión. Puede mejorar la SNR mediante el aumento de la amplitud general de la señal antes de que el ruido se introduzca en esta o mediante la reducción de la amplitud del ruido.

El ruido introducido por una señal a menudo se puede asociar con frecuencias específicas, por lo que puede utilizar un software para filtrarlo si la frecuencia del ruido es predecible y no interfiere con el ancho de banda de la señal de interés. El tipo de ruido más común es la interferencia de la línea de alimentación, lo que muestra un ruido de 50 Hz o 60 Hz en las mediciones.

Otras técnicas para rechazar el ruido externo para mejorar la SNR incluyen:

- **Reducir la longitud del cable conductor y usar pares trenzados o cables de señal iguales:** De ser posible, reduzca la longitud del cable conductor de la galga extensiométrica y conserve el cable alejado de cualquier fuente potencial de ruido. Usar pares trenzados y cables de señal iguales también ayuda a garantizar que la mayoría del ruido ambiental sea igualmente conducido a los terminales.
- **Use técnicas de protección adecuadas:** Conecte la protección a la referencia del dispositivo de medición, que puede ser COM o EX- (consulte la información del dispositivo), y asegúrese de que lo conecte en solo un extremo del cable. Para los dispositivos aislados que tienen descarga a tierra flotante, la protección se necesita introducir en el mismo potencial que la señal del tablero para que sea efectiva.
- **Aumente la amplitud de la señal:** Con las mediciones de tensión, puede lograr esto mediante ya sea elegir una galga extensiométrica más sensible o aumentar la amplitud del voltaje de excitación. Tenga cuidado si aumenta la amplitud del voltaje de excitación porque si lo aumenta demasiado, los errores de autocalentamiento en la galga extensiométrica pueden superar los beneficios de la SNR logrados con la mayor excitación.
- Las características del dispositivo de medición que pueden ayudar a mejorar la SNR incluyen:
  - **Rango dinámico:** El rango dinámico define el nivel de ruido relativo al rango completo de entrada del dispositivo de medición, y se expresa a menudo en decibeles (dB). Por ejemplo, un dispositivo de medición con un rango dinámico libre de espurios (SFDR) de 106 dB es equivalente a niveles de ruido de aproximadamente 0.0005 por ciento del rango completo de entrada. Esto significa que el dispositivo en sí mismo agrega muy poco ruido adicional.
  - **Relación de rechazo de modo común (CMRR):** Debido a que el ruido de las fuentes externas a menudo se conduce de manera idéntica en todos los cables, una relación de rechazo de modo común alta rechaza un gran porcentaje del ruido conducido.
  - **Detección remota:** Cuando se usa la detección remota, cancela cualquier ruido que sea conducido a los cables de excitación cuando se muestrean los datos, debido a que la detección remota compensa el ruido.

- **Filtros antialias:** Los filtros antialias evitan que los ruidos de alta frecuencia generen un alias en las frecuencias menores. Esta característica no solo mejora el rendimiento general del ruido del dispositivo, sino que también le permite usar filtros de software de manera efectiva ya sea para filtrar frecuencias específicas (filtro de corte) o rangos de frecuencias (filtro paso bajo/paso alto).

## Calibración Correcta

### Equilibrio del Puente

Cuando instala un puente por primera vez, probablemente no lea exactamente cero volts cuando no aplique tensión alguna. Leves variaciones en resistencia entre los brazos del puente y la resistencia del terminal y una condición de instalación con tensión previa generan algún voltaje de desfase inicial distinto de cero. Puede manejar este voltaje de desfase inicial de las siguientes maneras:

1. **Compensación de software:** Con este método, tome una medición inicial antes de aplicar la entrada de tensión y use este desfase en las ecuaciones de conversión de tensión para compensar el desfase de voltaje inicial en las mediciones posteriores. Este método simple y rápido no requiere ajustes manuales. La desventaja del método de compensación de software es que usted no elimina el desfase del puente. Si el desfase es suficientemente grande, limita la ganancia del amplificador que puede aplicar al voltaje de salida, por lo tanto, limita el rango dinámico de la medición.
2. **Circuito de anulación de desfase:** El segundo método de equilibrio utiliza una resistencia ajustable, un potenciómetro, para ajustar físicamente la salida del puente a cero. Al variar la resistencia del potenciómetro, puede controlar el nivel de la salida del puente y ajustar la salida inicial a cero volts.
3. **Anulación de desfase protegido:** El tercer método, como el método de compensación de software, no afecta al puente directamente. El circuito de anulación añade un voltaje DC ajustable, positivo o negativo, a la salida del amplificador de instrumentación para compensar el desfase inicial del puente. Consulte la documentación del dispositivo para determinar los métodos de anulación de hardware que proporciona el dispositivo de medición.

### CALIBRACIÓN DE DERIVACIÓN Y NULA

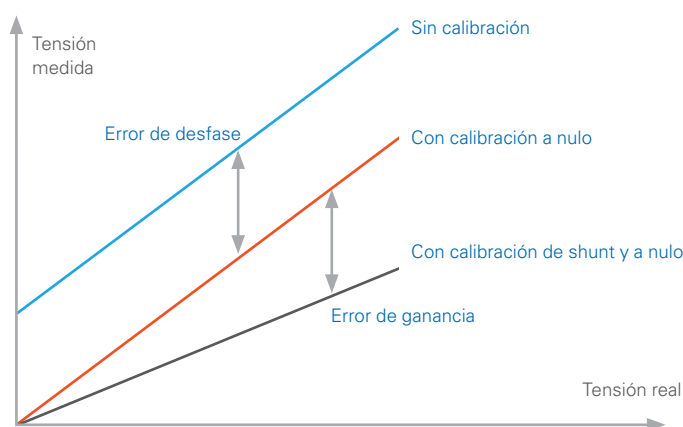


Figura 11. La calibración de derivación y nula ajusta el desfase y el error de ganancia del dispositivo de medición.

### Ajuste de Ganancia

Puede verificar la salida de un sistema de medición de galgas extensiométricas al comparar la tensión medida con una tensión o entrada mecánica calculada o predeterminada. Luego puede usar la diferencia (si la hubiera) entre la tensión calculada y la medida para cada medición como un factor de ajuste de ganancia o factor de calibración. Este procedimiento se llama calibración de shunt y simula la entrada de tensión al cambiar la resistencia del brazo de análisis en el puente por algún valor conocido. Se logra esto mediante la conexión de un resistor grande de valor conocido, conocido como shunt, en paralelo a un brazo del puente para crear un cambio conocido en la resistencia, como se ve en la Figura 12. Ya que el valor del resistor de shunt es conocido, puede calcular la tensión mecánica correspondiente a la caída de voltaje del resistor. Luego mida la salida del puente y compárela con el valor de voltaje esperado para corregir los errores de ganancia en el paso de medición completo.

#### RESISTOR DE DERIVACIÓN

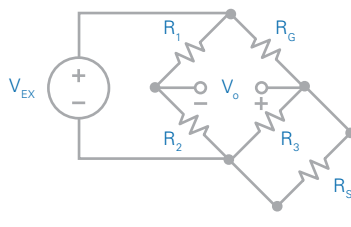


Figura 12. Resistor de shunt conectado a través de R3

### Escalamiento de Mediciones Eléctricas a Unidades de Ingeniería

Una vez que obtuvo un voltaje medible, debe convertir la señal a unidades reales tales como libras (lb) para fuerza o psi para presión. Puede escalar estos valores eléctricos al fenómeno físico que el sensor está midiendo con los siguientes métodos:

- Lineal de dos puntos:** Use dos pares de valores eléctricos y sus valores físicos correspondientes para calcular la rampa y la interceptación en "y" de una ecuación lineal. Luego puede usar esta ecuación para escalar valores eléctricos a valores físicos, inclusive para mediciones que caen fuera del rango de valores especificados para el cálculo de la rampa y la interceptación en "y".
- Tabla:** Proporciona un conjunto de valores eléctricos y los correspondientes valores físicos. El software que acompaña al hardware de medición debe poder realizar escalados lineales entre cada par de valores eléctricos y físicos. Los límites de entrada caen dentro de los valores físicos mínimos y máximos.
- Polinomio:** Proporcione los coeficientes directos e inversos de una ecuación polinómica. Luego el software usa esa ecuación para escalar valores eléctricos a valores físicos. Busque software que pueda calcular un conjunto de coeficientes si solo conoce el otro conjunto.

Las hojas técnicas o certificados de calibración de los fabricantes del sensor a menudo incluyen una tabla de valores eléctricos y físicos o una ecuación polinómica para escalamiento. Si no tiene una tabla o una ecuación polinómica para el sensor, use el escalamiento lineal de dos puntos. Use la salida nominal del sensor y la capacidad del sensor como un par de valores eléctricos y físicos. Use cero para el otro par de valores eléctricos y físicos. Por ejemplo, supongamos que tiene un sensor de presión con acondicionamiento que genera una señal de 0 a 5 V o corriente de 4 a 20 mA. Tanto 0 V como 4 mA corresponden a una medida de presión 0. De manera similar, 5 V y 20 mA corresponden a la capacidad de escala completa o a la presión máxima que el transductor puede medir.

### Utilización de la Tecnología TEDS para una Configuración y Conectividad más Veloz

Como se analizó en la sección anterior, los transductores basados en puente tales como los sensores de celdas de carga, presión o torque requieren varias entradas de la hoja de datos del sensor para convertir correctamente el voltaje de salida del sensor en unidades de ingeniería. Cuando se ajusta y configura un sistema de medición tradicional, debe ingresar manualmente estos parámetros importantes del sensor. Puede reducir este tiempo de ajuste mediante la incorporación al sistema de actuadores y sensores inteligentes con Hoja de Datos Electrónicos del Transductor (TEDS) o IEEE 1451.4. Estos sensores almacenan datos fundamentales tales como fabricante, modelo, rango de escala completa y sensibilidad en un EEPROM en el sensor o cable del sensor. Con la información de la configuración en los sensores, la instrumentación compatible con TEDS se puede comunicar directamente con el sensor y realizar la configuración mediante programación. El software compatible con TEDS también puede escalar automáticamente desde funciones polinómicas proporcionadas por el fabricante del sensor o el laboratorio de calibración. Para más información acerca de la norma IEEE 1451.4 o cómo funcionan los sensores inteligentes TEDS, consulte la [sección TEDS](#) al final de este documento.

### Conclusión

Reducir el ruido y aumentar la resolución es importante para realizar mediciones precisas con galgas extensiométricas y sensores sin acondicionamiento debido a los niveles muy pequeños de voltaje involucrados. Seleccionar el dispositivo de medición correcto puede mejorar en gran medida la integridad de las mediciones de puente. Además de los niveles de ganancia y excitación, debe considerar un dispositivo de medición con un rango dinámico grande, detección de excitación y una arquitectura ratiométrica. Luego, si toma medidas para reducir el ruido introducido en el sistema, puede disminuir el nivel de excitación para reducir los errores de autocalentamiento y mejorar la precisión de la señal del sensor de puente. Debe calibrar su galga extensiométrica periódicamente para registrar los cambios en las características físicas de las variaciones de la galga extensiométrica en la resistencia del cable conductor y para compensar imperfecciones en el sistema de medición.

[Explore sistemas exactos para mediciones de puente con hardware NI.](#)



## Acelerómetros y Micrófonos

Las mediciones de sonido y vibración son fundamentales en una variedad de aplicaciones tales como las pruebas de sonido ambiental o monitoreo de condición de máquina. Tanto los acelerómetros como los micrófonos miden oscilaciones, pero en medios diferentes. Por lo tanto, tienen requisitos de acondicionamiento de señal similares para producir una señal que el hardware de medición pueda leer correctamente. Luego de adquirir los datos, normalmente necesita realizar procesamiento de señales adicionales para mostrar los datos en un formato más significativo. Por ejemplo, las señales de vibración normalmente se convierten al espectro de frecuencia para detectar patrones únicos en los equipos rotativos que puedan indicar una pieza mecánica dañada. Las siguientes secciones incluyen recomendaciones para tomar mediciones precisas con acelerómetros y micrófonos y explorar técnicas de análisis básicas que le ayuden a comprender los datos.

### Requisitos para el Acondicionamiento de la Señal

#### Amplificación

Debido a que la carga producida por un acelerómetro es muy pequeña, la señal eléctrica emitida por el sensor es susceptible al ruido, y debe usar equipos electrónicos sensibles para amplificar y condicionar la señal. Como los acelerómetros piezoeléctricos son fuentes de alta impedancia, debe diseñar un amplificador sensible a la carga con bajo ruido, una impedancia de entrada alta y una impedancia de salida baja.

Los sensores piezoeléctricos electrónicos integrados (IEPE) integran el amplificador de carga o amplificador de voltaje cerca del sensor para asegurar una mejor inmunidad al ruido y un empaquetado más conveniente. Sin embargo, estos sensores requieren una excitación de corriente de 4 a 20 mA para operar el circuito dentro de ellos.

#### Excitación

Como se mencionó en la sección anterior, los sensores IEPE requieren una corriente externa para energizar el amplificador. Los valores comunes de excitación IEPE son 2.1 mA, 4 mA y 10 mA. Consulte las especificaciones de su dispositivo para obtener una lista de valores de corriente IEPE soportados que necesita para su sensor.

De manera similar a los acelerómetros, los micrófonos se pueden energizar externamente o internamente. Los micrófonos de condensador polarizado externamente requieren 200 V desde una fuente de energía externa. Asegúrese de que la fuente que use proporcione energía limpia en el voltaje nominal y que no conecte más micrófonos a la alimentación que su capacidad. Los micrófonos de condensador prepolarizados se energizan mediante preamplificadores IEPE que requieren una fuente de corriente constante.

#### Acoplamiento de CA

Permitir el acondicionamiento de la señal IEPE genera un desfase de voltaje DC igual al producto de la corriente de excitación por la impedancia del sensor. La señal adquirida del sensor está compuesta tanto por los componentes de AC como de DC, y el componente de DC desfasa al componente de AC de cero. Como se muestra en la Figura 13, esto puede reducir la resolución de la medición debido a que la amplificación de la señal de AC está limitada para evitar saturar el rango de entrada del ADC. Puede resolver este problema al

implementar un acoplamiento de AC. También conocido como acoplamiento capacitivo, el acoplamiento de AC utiliza un capacitor en serie con la señal para filtrar el componente de DC de una señal. Cuando se implementa en el hardware, el acoplamiento de AC le puede ayudar a aplicar un rango de entrada más angosto para mejorar la resolución de amplitud AC y el rango dinámico utilizable del canal. Cuando se implementa en el software, el acoplamiento de AC puede eliminar datos erróneos de DC que invalidan la integración de procesamiento de señal y los resultados de la medición como RMS y niveles pico. El acoplamiento de AC también atenúa la desviación de DC de largo plazo que tienen los sensores debido al tiempo de uso y efecto de la temperatura.

#### FILTROS DE ACOPLAMIENTO DE AC Y DC

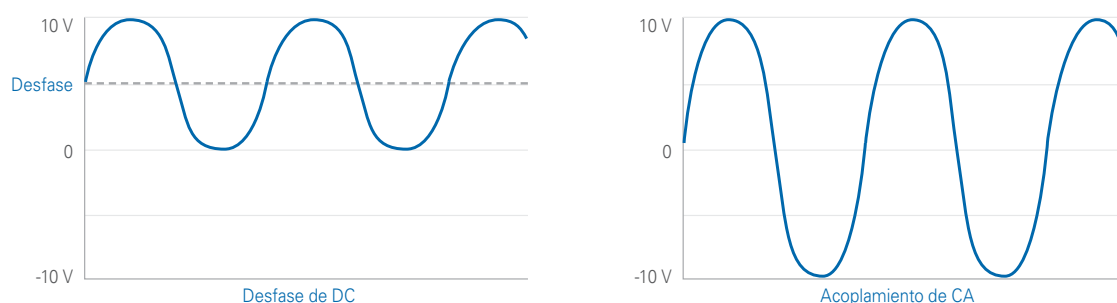


Figura 13. El acoplamiento de AC filtra el componente de DC de una señal para aumentar la resolución de la medición.

#### Conexión a tierra

La conexión a tierra del sensor realizada incorrectamente puede generar un lazo de tierra que crea una fuente de ruido en el sistema de medición. Puede evitar esto al garantizar que, ya sea la entrada del sistema de medición o el sensor, tenga descarga a tierra, pero no ambos. Si el sensor tiene descarga a tierra, lo debe conectar en configuración diferencial. Si el sensor es flotante, debe conectar la entrada inversora del sistema de medición a tierra.

Referencia de fuente	Configuración del canal
Flotante	Seudodiferencial
Conectado a Tierra	Diferencial o pseudodiferencial

Tabla 1. Configuraciones del Canal de Entrada Analógica

#### Filtros antialias

El aliasing es una preocupación común cuando se realizan mediciones de sonido y vibración. Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, la frecuencia más elevada que se puede analizar es la frecuencia de Nyquist ( $f_N$ ), que es la frecuencia de muestreo del ADC dividida entre dos. Cualquier frecuencia analógica mayor a la frecuencia de Nyquist aparece como una frecuencia entre 0 y  $f_N$  después del muestreo. Sin el conocimiento detallado de la señal original, no puede distinguir esta frecuencia de alias de las frecuencias que realmente se encuentran entre 0 y  $f_N$ .

Un filtro paso bajo normalmente es suficiente para atenuar el ruido de frecuencia alta que genera el aliasing. Sin embargo, si el corte del filtro no es muy pronunciado, las frecuencias que están justo por encima de la frecuencia Nyquist pueden no ser totalmente atenuadas y pueden volver a aparecer como alias en la porción válida de la señal. Una forma de filtro paso bajo, un filtro antialias se caracteriza por un banda de paso plana y un corte rápido. Este filtro ayuda a preservar las señales que están justo debajo de la frecuencia de Nyquist y a atenuar las señales que están justo por encima de la frecuencia de Nyquist. En la Figura 14, se usan dos filtros para eliminar el ruido de alta frecuencia. El filtro paso bajo elimina el ruido en  $f_3$ , pero el corte lento atenúa el ruido solo en  $f_2$ , que volvió a crear un alias en la señal. El filtro antialias elimina ambos componentes de frecuencia de la señal adquirida.

#### FILTROS ANTIALIASING

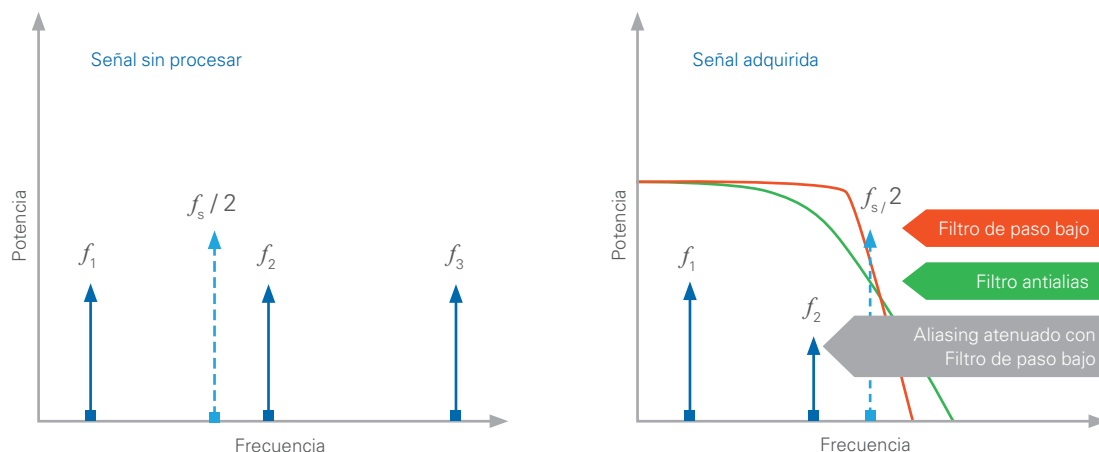


Figura 14. Los filtros antialias con corte pronunciado ayudan a atenuar el ruido que está justo por encima de la frecuencia de Nyquist.

#### Rango dinámico

El rango dinámico se define como la relación entre las señales más grandes y las señales más pequeñas que un dispositivo puede medir al mismo tiempo. Expresado en decibeles, el rango dinámico es de  $20 \log (V_{\text{máx}}/V_{\text{mín}})$ . Por ejemplo, un dispositivo con un rango de entrada de  $\pm 10 \text{ V}$  y un rango dinámico superior a 110 dB puede tener una relación de voltaje de 106.

Los ADC tradicionales con resolución menor generalmente tienen 16 bits, lo que le da un rango dinámico de aproximadamente 90 dB. La mayoría de los sensores ofrecen 110 dB o más de rango dinámico, por eso los dispositivos de 16 bits no pueden medir el rango completo del sensor dentro de las señales de bajo nivel sumergidas en el ruido eléctrico de la medición. La instrumentación con una resolución de 24 bits puede ofrecer hasta 120 dB de rango dinámico, por lo que puede detectar señales menores y obtener lo máximo de los sensores.

### Muestreo simultáneo

En algunas aplicaciones tales como mapeo de ruido, pruebas de impacto y mediciones de intensidad de sonido, la información de fase entre dos canales separados es fundamental. En estos casos, se requiere de muestreo simultáneo, lo que significa que debe realizar la conversión analógica a digital en el mismo instante para todos los canales.

### Escalamiento de Unidades Lineales a Unidades Relativas en Decibeles

Use las unidades relativas, tales como decibeles (dB), para mostrar los resultados de espectro y escalado cuando quiera mostrar componentes grandes y pequeños en la misma escala. Por ejemplo, en la Tabla 2, la potencia de sonido de un suspiro se compara con la del motor de un cohete. La comparación de estos valores es más manejable usando una escala logarítmica.

Referencia de Fuente	Potencia de sonido (watt)	Potencia de sonido (dB)
Suspiro	0,00000000001 W	10 dB
Transbordador espacial	100000000 W	200 dB

Tabla 2. Comparación de la potencia de sonido de ejemplo

Use la siguiente ecuación para convertir unidades lineales a unidades relativas en dB para valores de amplitud:

$$\text{dB} = 20 \log \frac{V}{V_0}$$

Use la siguiente ecuación para convertir unidades lineales a unidades relativas en dB para valores de potencia:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

Normalmente se utilizan unidades relativas de referencia de dB para el umbral de audición de 20  $\mu\text{Pa}$  para reportar mediciones acústicas tales como el nivel de presión de sonido y espectros de octavas parciales. Para mediciones de potencia de sonido, la referencia es 1 pW. Para las mediciones de respuesta de frecuencia, a menudo se utiliza una ganancia de uno como la referencia de dB. En este caso, los valores negativos de dB para la magnitud indican atenuación, los valores positivos de dB indican ganancia, y 0 dB es equivalente a una ganancia de uno. Debido a que cada dominio de medición puede utilizar una referencia específica, necesita especificar la referencia de dB cuando reporte los resultados en dB.

### Conservación de la Calidad de la Señal al Usar Cables Largos

Cuando se usan cables muy largos con sensores IEPE, la capacitancia agregada en el cable puede afectar la respuesta de frecuencia del sensor mediante el filtrado de algunos de los contenidos de alta frecuencia. Además, el ruido y la distorsión pueden filtrarse a la señal de medición si no tiene suficiente corriente para impulsar la capacitancia del cable. En general, le debería preocupar utilizar cables de grandes longitudes con sensores IEPE solo si le interesa un rango de frecuencia superior a 10 kHz cuando utiliza un cable con un largo superior a 100 pies (30 m).

Para determinar más exactamente el efecto de los cables largos, debe determinar experimentalmente las características eléctricas de alta frecuencia. Utilice un generador de funciones para proporcionar la amplitud máxima de la señal esperada dentro de un amplificador de impedancia de salida baja y ganancia unitaria en serie con el sensor. Compare la relación de la señal original con la relación de la señal medida en el campo. Si la señal está atenuada, entonces debe aumentar la corriente utilizada para enviar la señal hasta tener una relación 1:1. Tenga cuidado de no enviar corriente excesiva en tramos de cables cortos o cuando se realicen pruebas a temperaturas elevadas. Cualquier corriente no utilizada por el cable se utiliza para energizar los equipos electrónicos internos, y esto genera calor que puede causar que el sensor supere la especificación de temperatura máxima.

### Reducción del Tiempo de Ajuste y Configuración con Tecnología TEDS

Los sensores compatibles con TEDS portan un EEPROM integrado de autoidentificación que almacena una tabla de parámetros e información del sensor. El EEPROM contiene datos de calibración, sensibilidad y fabricante del sensor. Con estos parámetros almacenados en los sensores, la instrumentación compatible con TEDS se puede comunicar directamente con el sensor y realizar la configuración mediante programación. El software compatible con TEDS también puede escalar automáticamente desde funciones polinómicas proporcionadas por el fabricante del sensor o el laboratorio de calibración. Para más información acerca de la norma IEEE 1451.4 o cómo funciona TEDS, consulte la [sección sobre TEDS](#) al final de este documento.

### Consideraciones Adicionales para los Micrófonos

Los micrófonos son estables durante largos periodos de tiempo si se los utiliza adecuadamente. Los componentes de los micrófonos son frágiles y se pueden dañar si se los utiliza incorrectamente. Los siguientes consejos le pueden ayudar a mantener mediciones precisas con los micrófonos:

- Siempre calibre la cadena de medición completa, incluso el micrófono, antes de comenzar la medición. Para mediciones altamente críticas, como una precaución extra, quizás quiera realizar una nueva calibración luego de finalizar las mediciones para asegurarse de que el sistema aún continúa dentro de las tolerancias.
- Para mediciones al aire libre, los micrófonos se deben proteger adecuadamente del medio ambiente. Esto pueden incluir protecciones para la lluvia, picos anti-aves y calentadores integrados para evitar la condensación.
- Para evitar que las vibraciones influyan la medición, quizá necesite colocar un soporte de impacto al micrófono. Revise las especificaciones del micrófono para la sensibilidad de vibración.
- Para las mediciones reproducibles, asegúrese de que el micrófono esté montado firmemente y en una ubicación precisamente reproducible en comparación tanto con la unidad que está siendo probada como con el entorno.
- Para mediciones con trípode o sostenidas en la mano, considere utilizar un brazo de extensión de micrófono para ayudar a disminuir las observaciones no deseadas.
- Observe cuidadosamente las restricciones del fabricante acerca de las longitudes del cable. La degradación de la señal primero aparece en las frecuencias más altas y en los niveles de sonido elevados con cables largos. Verifique la SNR del cable con el micrófono conectado. Revise que no haya zumbidos e interferencia o señales transitorias de los generadores, motores eléctricos, unidades de aire acondicionado, teléfonos celulares, instalaciones de radar, transmisores de radio o TV y otras fuentes potenciales de interferencia cercanos.

## Técnicas de Análisis en el Dominio del Tiempo

### Nivel

Quizá el análisis de medición más básico relacionado con el sonido y la vibración sea el nivel. Puede realizar mediciones de niveles de vibración y niveles de sonido con señales en el dominio del tiempo. La media cuadrática (RMS) mide la energía (por lo tanto, el potencial destructivo) de señales de vibración y sonido de variación dinámica. Se calcule el RMS al elevar la señal al cuadrado, promediarla durante un período de tiempo y luego sacar la raíz cuadrada del resultado.

$$\text{Nivel}_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{x_0 + x_1^2 + \dots + x_n}{n}}$$

Una medición común de nivel de sonido es el nivel de presión de sonido. Este valor siempre se expresa relativo a una presión de referencia de 20 µPa (umbral de audición humana).

El problema principal con las mediciones basadas en un promedio es que el resultado de la medición cambia según la longitud que elige para el intervalo de su cálculo. Esa es la razón por la que mediciones como la del nivel de presión de sonido tienen intervalos estándares. También puede utilizar dos métodos principales para encontrar el RMS: promedio lineal y promedio exponencial.

### Promedio lineal

El promedio lineal, o nivel de sonido continuo equivalente (Leq), es uno de los procesos de cálculo de promedio en el tiempo para las mediciones de nivel de sonido. Todos los puntos se ponderan de la misma forma durante un periodo de tiempo finito en el promedio lineal. Se utiliza para medir la exposición a largo plazo en un determinado entorno (por ejemplo, la medición del ruido del tráfico en una intersección durante una hora). Calcule Leq mediante la integración del cuadrado de la señal durante un intervalo de tiempo específico, dividido por el intervalo de tiempo. El resultado representa un sonido estable imaginario que tiene la misma energía que el sonido que se está midiendo.

#### MEDICIÓN DE EXPOSICIÓN DE SONIDO DE LARGO PLAZO

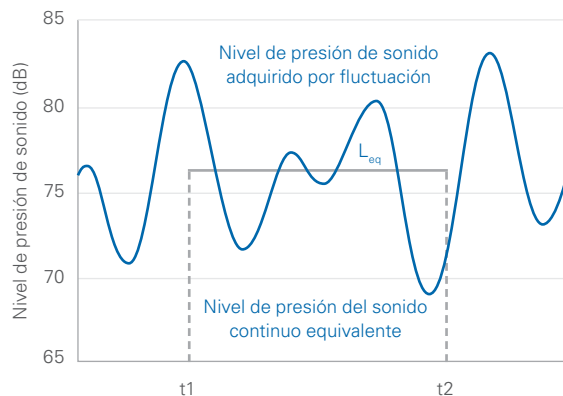


Figura 15.  $L_{eq}$  se usa para cuantificar la exposición al sonido a largo plazo en un determinado entorno.

### Promedio exponencial

El promedio exponencial es un proceso de cálculo de promedio continuo que pondera los datos actuales y pasados de manera diferente. El peso dado a los datos pasados comparado con los datos actuales depende de la constante temporal exponencial, que define la rampa de una ventana que decae exponencialmente.

El modo de promedio exponencial admite las siguientes constantes temporales estándares:

- **Lento:** Usa una constante temporal de 1000 ms. El promedio lento es útil para rastrear los niveles de presión de sonido de señales con niveles de presión de sonido que varían lentamente.
- **Rápido:** Usa una constante temporal de 125 ms. El promedio rápido es útil para rastrear los niveles de presión de sonido de señales con niveles de presión de sonido que varían rápidamente.
- **Impulso:** Usa una constante de tiempo muy rápida de 35 ms si la señal está aumentando, pero una constante temporal muy lenta de 1500 ms si la señal está disminuyendo. El promedio de impulso es útil para rastrear aumentos sorprendentes en el nivel de presión de sonido (durante un impacto o un disparo ruidoso) y grabar los aumentos de tal manera que tenga un registro de los cambios.

## Técnicas de Análisis en el Dominio de la Frecuencia

### Transformada de Fourier

El análisis de frecuencia es más comúnmente utilizado para analizar señales de vibración y de sonido. Una señal de dominio temporal discreta muestra cómo evoluciona una señal muestra por muestra durante un tiempo. Cualquier forma de onda en el dominio del tiempo se puede representar por la suma acumulada de senos y cosenos. Esta descomposición de señales complejas son la base de la transformada de Fourier y del procesamiento de la señal digital. El espectro de dominio de frecuencia correspondiente muestra cuánto las frecuencias diferentes contribuyen a la señal general (Figura 16). Esto es útil para analizar señales estacionarias con componentes de frecuencia que no cambian en el tiempo.

#### ESPECTROS DE AMPLITUD DE FRECUENCIA

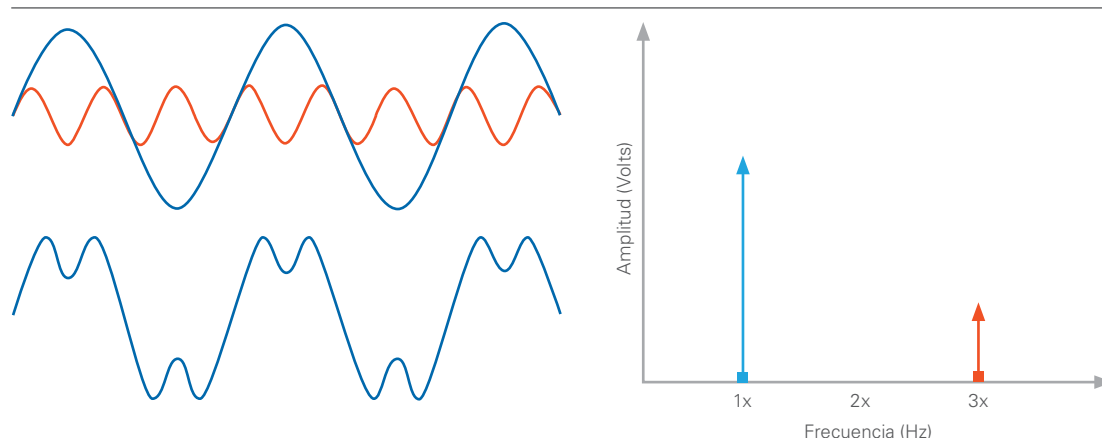


Figura 16. El espectro de frecuencia muestra amplitudes diferentes y frecuencias de componentes sinusoidales.

La Transformada de Fourier Rápida (FFT) transforma una forma de onda temporal continua en sus componentes sinusoidales. Debido a que los dispositivos de medición toman muestras de formas de onda y las transforman a valores discretos, debe utilizar la transformada de Fourier discreta (DFT) para operar sobre señales con hardware digital. Este algoritmo produce componentes del dominio de frecuencia en valores discretos, o binarios. Una de las limitaciones de la DFT es que supone que está operando sobre una señal periódica con una cantidad entera de periodos. Obtener exactamente una cantidad entera de ciclos mientras se realizan las muestras de una señal es difícil. Cuando la cantidad de periodos no es un número entero, los puntos finales son discontinuos. Esto hace que la energía en una frecuencia se filtre en otras frecuencias, como se muestra la Figura 17.

#### MEDICIÓN DE PERIODOS NO ENTEROS

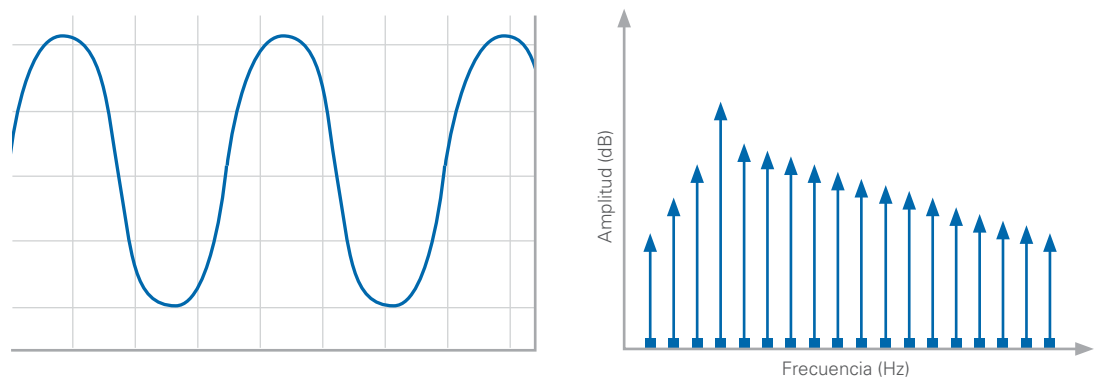


Figura 17. Medir una cantidad no entera de periodos genera un filtrado espectral en el dominio de la frecuencia.

Puede minimizar los efectos del filtrado espectral mediante el uso de una técnica llamada control de flujo o windowing. Windowing consiste en la multiplicación del registro temporal por una ventana de longitud finita con una amplitud que varía suavemente y gradualmente hacia cero en los bordes. Esto hace que los puntos extremos de la forma de onda se encuentren y, por lo tanto, generen una onda de forma continua sin transiciones irregulares.

#### MINIMIZACIÓN DEL FILTRADO ESPECTRAL

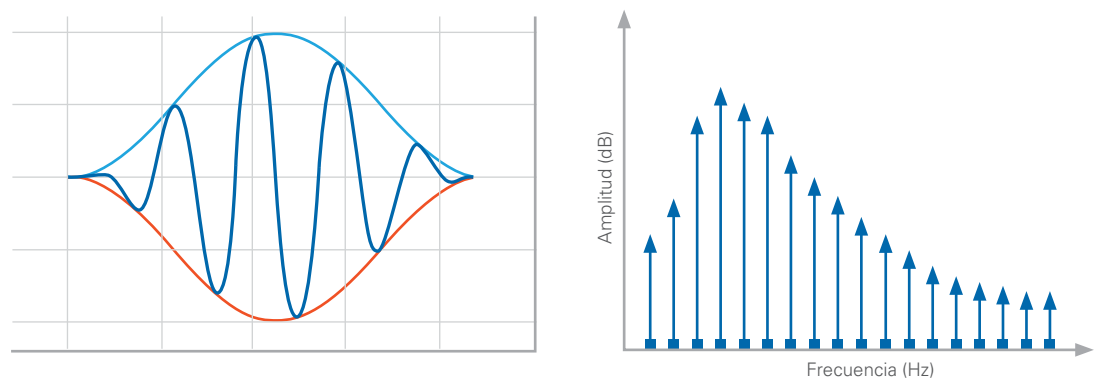


Figura 18. La utilización de una ventana minimiza los efectos del filtrado espectral.



El tipo de ventana que utilice depende del tipo de señal que está adquiriendo. En muchos casos, puede no conocer lo suficiente acerca de la señal, por lo tanto, necesita experimentar con ventanas diferentes para encontrar la mejor. En general, la ventana Hanning (Hann) es satisfactoria para la mayoría de las aplicaciones. La ventana Hann tiene una resolución de frecuencia mejor que otras ventanas y toca el cero en ambos extremos, lo que elimina todas las discontinuidades. La Tabla 3 enumera los tipos de ventanas comunes, los tipos de señales correctas y las aplicaciones de ejemplo.

Ventana	Características	Aplicaciones y tipos de señal
Rectangular (sin ventana)	Señales transitorias que son más cortas que la longitud de la ventana; trunca una ventana dentro de un intervalo de tiempo finito	Transitorios de corta duración tales como impacto  Identificación de frecuencias muy poco espaciadas con amplitudes casi iguales  Rastreo de orden
Hanning	Señales transitorias que son más largas que la longitud de la ventana; forma sinusoidal con extremos que alcanzan el cero	Procesamiento general sobre señales estacionarias  Onda sinusoidal o una combinación de ondas sinusoidales
Hamming	Señales transitorias que son más largas que la longitud de la ventana; una versión modificada de la ventana de Hanning que es discontinua en los bordes	Ondas sinusoidales muy poco espaciadas
Flat Top	La mejor exactitud de amplitud de todos los tipos de ventana pero limita la selectividad de frecuencia	Mediciones de amplitud precisas y de un solo tono sin componentes de frecuencia cercanos  El tono dominante para el cual la amplitud es un problema tal como un desequilibrio

Tabla 3. Ventanas y otras aplicaciones

### Análisis de Orden

Otra limitación de la FFT es que no contiene ninguna información temporal. Varias características mecánicas de maquinaria rotativa o reciprocante, tales como motores, bombas, compresores y turbinas, cambian con la velocidad. Puede observar algunas fallas mecánicas, tal como la resonancia, solo cuando la velocidad de rotación se aproxima a o supera la velocidad crítica. Sin embargo, cuando cambia la velocidad de rotación, el ancho de banda de la frecuencia de cada armónico se vuelve más ancho. Como resultado, algunos componentes de frecuencia se pueden superponer. El espectro de potencia resultante de la FFT ya no puede ayudarle a identificar los componentes de vibración característicos porque no aparecen picos obvios en el espectro.

Con el análisis de orden, por otro lado, puede identificar datos en varios órdenes, o armónicos, de la velocidad de rotación. Se realiza la normalización de órdenes mediante el remuestreo de los datos en el dominio angular (puntos por revoluciones) en lugar del dominio temporal (puntos por segundo). El primer orden se refiere a la velocidad a la que gira la máquina. A partir de allí, cada orden es un múltiplo correspondiente de la velocidad de rotación. El segundo orden es dos veces la velocidad de rotación, el tercer orden es tres veces la velocidad de rotación, y así sucesivamente. Con la utilización del análisis de orden, puede analizar las variaciones de la señal debido a cambios en la velocidad.

Por ejemplo, la Figura 19 muestra allí, cada orden es un múltiplo cFFT para identificar y cuantificar los componentes de frecuencia de la vibración de un ventilador de computadora. Observe que la señal de vibración general del ventilador de la computadora es la superposición de la vibración del eje, la bobina y las palas. El eje gira a la misma velocidad que la velocidad de rotación del ventilador de la computadora, mientras que las velocidades de rotación de las bobinas y de las aspas son cuatro y siete veces la velocidad del ventilador de la computadora, respectivamente.

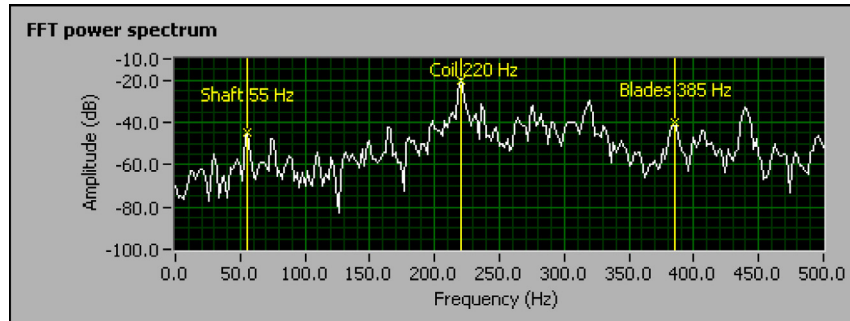


Figura 19. Componentes de frecuencia de la señal de vibración del ventilador de una computadora

La Figura 20 muestra el espectro de potencia de la FFT del ventilador de la computadora cuando la velocidad de rotación cambia de 1000 a 4000 revoluciones por minuto (rpm). Observe que no puede identificar ningún pico obvio asociado con las partes mecánicas particulares en el trazado del espectro de potencia de la FFT.

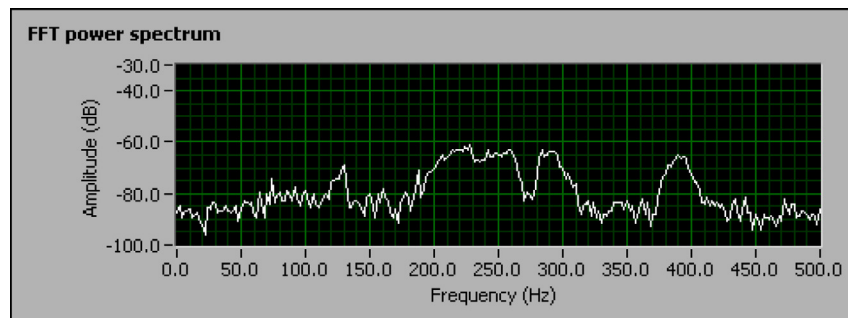


Figura 20. El espectro de potencia FFT no muestra picos mientras cambia la velocidad de rotación del ventilador.

Sin embargo, el trazado del espectro de potencia de orden en la Figura 21 muestra claramente picos definidos asociados con las distintas piezas mecánicas. El pico en el primer orden corresponde a la vibración del eje. El pico en el cuarto orden corresponde a la vibración de las bobinas. El pico en el séptimo orden corresponde a la vibración de las aspas.

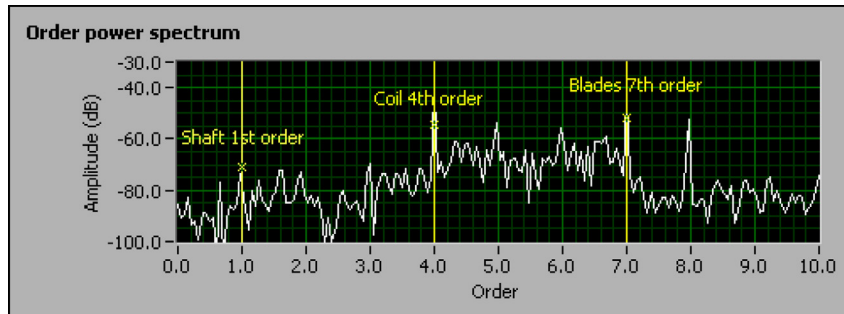


Figura 21. El espectro de potencia de orden identifica los picos mediante la normalización de la velocidad de rotación.

### Análisis de Octavas para el Sonido

El análisis de octavas es una técnica para analizar señales acústicas y de audio. Mide la energía espectral con filtros pasa bandas logarítmicamente espaciados. La escala logarítmica hace énfasis sobre las frecuencias bajas a medias, y el agrupamiento de las bandas de frecuencia imita mejor al oído humano o cómo las personas perciben el sonido. Por ejemplo, normalmente no se podría notar la diferencia entre 350 Hz y 351 Hz. La potencia en cada banda se calcula y se muestra en un gráfico de barras con una escala de registro para el eje x, como se muestra en la Figura 22.

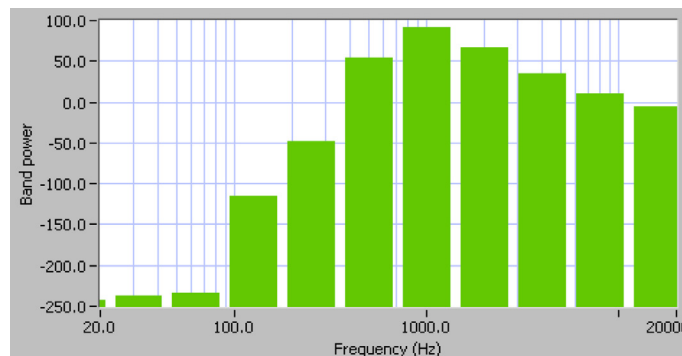


Figura 22. El análisis de octavas agrupa las bandas de frecuencia en una escala logarítmica para imitar la forma en que los seres humanos perciben el sonido.

Una octava es el intervalo entre dos frecuencias, una de las cuales es el doble de largo que la otra. Por ejemplo, las frecuencias de 250 Hz y 500 Hz están separadas por una octava, al igual que las frecuencias de 1 kHz y 2 kHz. La resolución de los filtros de octavas está limitada porque el rango de 16 Hz a 16 kHz tiene solamente 11 octavas. Para superar el problema de la resolución limitada de los filtros de octavas, puede utilizar los filtros conocidos como filtros de octavas parciales. En lugar de cubrir una octava con un único filtro, se aplican N filtros por octava para mejorar la resolución, cómo se muestra en la Figura 23. Las bandas parciales típicas son 1/3 de octava con tres bandas por octava, 1/12 de octava con 12 de bandas por octava y 1/24 de octava con 24 bandas por octava. Las normas ANSI e IEC definen las especificaciones para estos filtros de bandas de octavas y de bandas de octavas parciales.

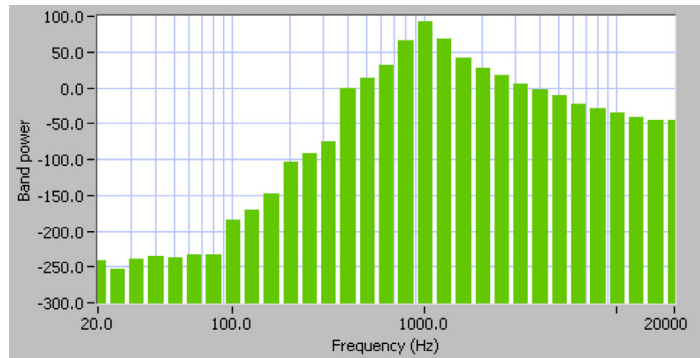


Figura 23. Los filtros de octavas parciales proporcionan una mejor resolución.

Debido a que se apoya en gran manera sobre el filtrado digital, el análisis de octavas parciales es una operación con gran demanda de CPU. Aumentar la cantidad de filtros aplicados a una señal aumenta las exigencias sobre el CPU y puede generar un aumento de tiempo de cálculo. En general, el análisis en línea de la tercera octava requiere de aproximadamente 10 veces la potencia de procesamiento de los cálculos espectrales de FFT en el mismo índice de muestra.

## Procesamiento y Análisis de Señales Adicionales

Esta guía ha cubierto el acondicionamiento de señales necesario y prácticas básicas de procesamiento de señales para tomar mediciones de vibración y sonido exactas. La siguiente lista contiene una descripción general de algunas otras técnicas de análisis que quizá quiera realizar. Consulte la documentación del software de medición para determinar si éstas y otras funciones no enumeradas están incluidas o disponibles con un paquete de análisis por separado.

- La transformada de Fourier de corto tiempo extrae el contenido de frecuencia de las señales que cambian relativamente lentamente con el tiempo.
- El espectro de respuesta de impacto caracteriza un entorno mecánico dinámico para ayudarle a estimar el daño potencial de un choque específico a un componente.
- La detección de envolvente extrae la señal de modulación o la señal envolvente de una señal de amplitud modulada para identificar fallas mecánicas que tengan un efecto de modulación de amplitud en la señal de vibración de una máquina.
- Los filtros de ponderación acústicos reflejan las no linealidades del oído humano o miden el ruido de frecuencia de audio en los circuitos de comunicaciones de radio o telefónicas.
- La detección de tonos identifica el tono con máxima amplitud o todos los tonos con una amplitud que superen un umbral especificado.
- El análisis de distorsión identifica la distorsión armónica total (THD), THD más ruido y el índice de distorsión y señal a ruido (SINAD).
- La medición y generación de onda de seno barrido caracteriza la respuesta de frecuencia dinámica de un dispositivo bajo prueba.

## Conclusión

Revise cuidadosamente las especificaciones de su acelerómetro o micrófono para seleccionar un dispositivo de medición que tenga el rango dinámico, la ganancia, la tasa de muestreo y el nivel de excitación apropiados para su sensor. También puede considerar el muestreo simultáneo si está correlacionando mediciones a través de canales diferentes y filtros antialias integrados para reducir los efectos del ruido de alta frecuencia. La evaluación del software de medición para técnicas de procesamiento de señales, tales como windowing o cálculo de promedios, pueden proporcionar una mejor representación del fenómeno acústico o de vibración que esté intentando medir.

[Explore los sistemas exactos de medición de vibración y sonido con el hardware de NI.](#)

## Hoja de Datos Electrónica de Transductores (TEDS)

Cuando conecta un sensor al sistema de medición, debe proporcionar manualmente los parámetros importantes del sensor, como el rango, la sensibilidad y los coeficientes de escala, para que el software use y escale adecuadamente los datos del sensor. Normalmente, encuentre estas especificaciones mediante la identificación del fabricante y el número de modelo del sensor y buscando la información que necesite en la hoja de datos correspondientes. Puede automatizar este proceso de configuración mediante la utilización de sensores inteligentes con Hoja de Datos Electrónica de Transductores (TEDS), que contiene todo lo que necesita saber para realizar una medición. La instrumentación y el software compatible con TEDS puede luego leer estos datos para configurar la adquisición y aplicar los factores de escalamiento.

La TEDS se implementa para un sensor en una de dos maneras. Primero, la TEDS puede estar almacenada en la memoria interna, normalmente de una EEPROM en el sensor mismo o en el cable. Segundo, una TEDS virtual puede existir como un archivo separado que se puede descargar de Internet. Una TEDS virtual se usa para almacenar datos para sensores anteriores si la memoria interna o el EEPROM no está disponible. Una TEDS virtual también es valiosa en aplicaciones para las que las condiciones de operación del sensor evitan el uso de cualquier instrumento electrónico, tales como los EEPROM, en el sensor.

La norma IEEE 1451.4 define del método para codificar la información de la TEDS para una amplia gama de tipos de sensores. Como mínimo, una TEDS de IEEE 1451.4 contiene información del fabricante, número de modelo y número de serie del transductor. Normalmente, una TEDS también describe los atributos importantes del sensor o del actuador, como rango de medición, sensibilidad, coeficientes de temperatura e interfaz eléctrica. La Tabla 4 muestra un ejemplo de una TEDS para una célula de carga.

Para cubrir tan amplio rango de sensores y al mismo tiempo conservar el uso de la memoria al mínimo, la norma IEEE 1451.4 utiliza plantillas que definen las propiedades específicas para los distintos tipos de sensores. Cada tipo de sensor, desde los amplificadores de carga a los termistores, tienen su propia plantilla. Además de estas 16 plantillas estándares, los sensores pueden tener una de las tres posibles plantillas de calibración: una tabla de calibración, una curva de calibración (polinómica) y una tabla de respuesta de frecuencia. Para una exactitud mejorada de medición, el software y el hardware compatible con TEDS puede utilizar la tabla de búsqueda de calibración del sensor o una tabla de ajuste de curva para proporcionar una mejor descripción del sensor. Con la previa aceptación por parte del fabricante, puede almacenar hasta 128 puntos de calibración o los coeficientes para un polinomio de orden múltiple segmentado.

TEDS básica	Identificación del fabricante	21
	ID Modelo	19
	Carta de versión	D
	Número de serie	8451
TEDS estándar y extendido <i>(los campos varían según el tipo de transductor)</i>	Fecha de calibración	10-Feb-14
	Rango de medición	± 100 lb
	Salida eléctrica	±3 mV/V
	Impedancia del puente	350 Ω
	Excitación, Nominal	10 VDC
	Excitación, Mínima	7 VDC
	Excitación, Máxima	18 VDC
Área del usuario	Tiempo de respuesta	333,3 μs
	Ubicación del sensor	R32-1
	Identificación del registro de calibración	543-0123

Tabla 4. Ejemplo de TEDS para célula de carga

### Conexión al Hardware de Medición

La norma IEEE 1451.4 define dos tipos de interfaces de modo combinado: Clase 1 de Dos Cables y Clase 2 de Cables Múltiples. La interfaz de dos cables Clase 1, mostrada en la Figura 24, funciona con transductores energizados por corriente constante, tales como los acelerómetros. Los transductores Clase 1 incluyen diodos o conmutadores analógicos que se pueden usar para multiplexar la señal analógica con la información TEDS digital en el único par de cables.

#### INTERFAZ DE DOS CABLES

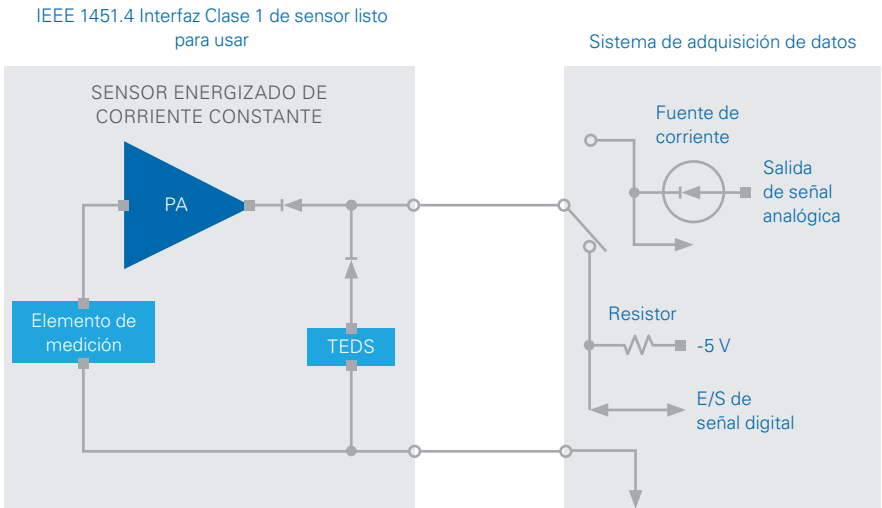


Figura 24. Esta interfaz de dos cables Clase 1 multiplexea datos TEDS digitales y medición analógica.

La interfaz Clase 2 utiliza una conexión diferente para las porciones analógicas y digitales de la interfaz de modo mixto. La entrada y salida analógica de los sensores se deja sin modificaciones, y el circuito digital para TEDS se agrega en paralelo. Luego puede implementar transductores plug-and-play con prácticamente cualquier tipo de sensor o actuador, incluyendo termopares, RTDs, termistores, sensores de puente, celdas electroquímicas y sensores de lazos de corriente de 4 a 20 mA. La Figura 25 ilustra la implementación de una interfaz modo mixto Clase 2.

#### INTERFAZ DE CABLE MÚLTIPLE

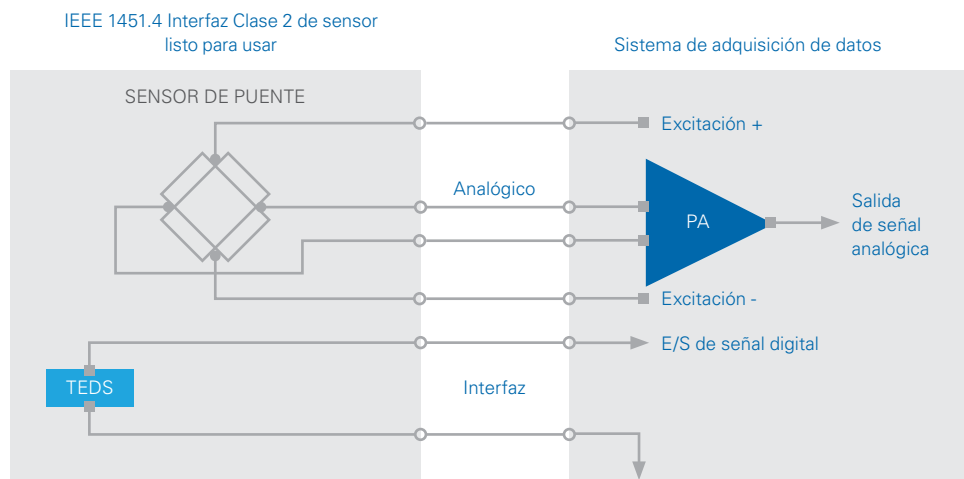


Figura 25. Esta interfaz de cable múltiple Clase 2 permite la funcionalidad plug and play.

### Conclusión

Enfrenta muy poco riesgo al adoptar TEDS debido a que la implementación de la tecnología TEDS no manipula ni cambia la salida analógica del sensor, por lo que permanece compatible con la interfaz analógica tradicional. Las capacidades plug and play ofrecidas con los dispositivos y sensores TEDS ayudan a reducir el tiempo de ajuste mediante la eliminación de la necesidad de revisar varias hojas de datos de fabricantes y certificados de calibración. Además, eliminan la posibilidad de error por parte del técnico o del ingeniero, quien de lo contrario tendría que configurar manualmente el sistema y posiblemente configure los parámetros del sensor incorrectos por equivocación.

## Elección de un Sistema de Medición de Sensores

Esta guía ha revisado varios requisitos para realizar mediciones exactas de sensores. Cuando configure su sistema de medición, comience con la fuente y considere cualquier acondicionamiento de señales necesario para las características eléctricas del sensor. Asegúrese de que la instrumentación ofrezca el rango dinámico o resolución, clasificación y rango de entrada que mejor satisfagan sus necesidades de aplicación. Por último, elija del paquete de software que más efectivamente le ayude a adquirir, escalar y analizar los datos de medición.

NI ofrece una amplia variedad de hardware DAQ que va desde los dispositivos de medición única hasta los sistemas modulares de alto rendimiento. Las plataformas presentan módulos de canales múltiples con acondicionamiento integrado de señales tales como amplificación, filtrado, excitación y aislamiento para conectividad directa y mediciones exactas de sensores. La entrada y salida específica del sensor ayuda a reducir el costo el sistema total y la posibilidad de error debido a que no tiene que construir y mantener el circuito de acondicionamientos de señales personalizado. Además, puede usar los controladores del hardware de NI junto con software de aplicación como LabVIEW para escalar los datos a las unidades deseadas y realizar el análisis con funciones de procesamiento de señal integradas.

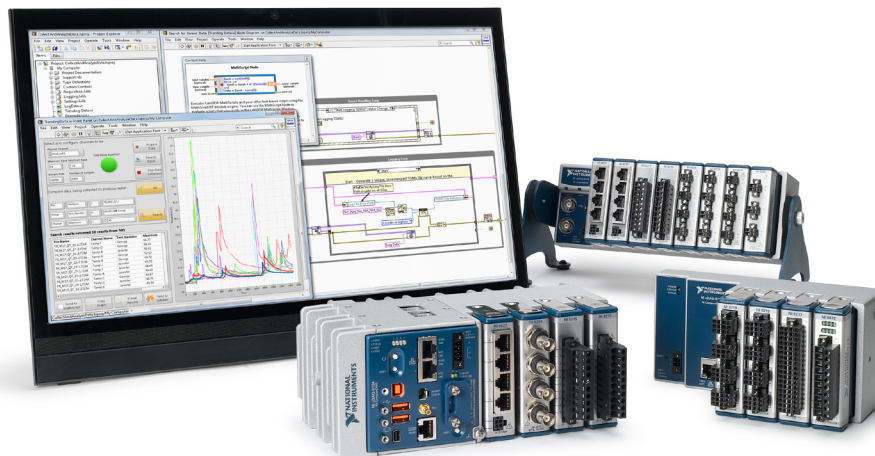


Figura 26. El hardware CompactDAQ proporciona conectividad directa del sensor en USB, Ethernet, Wi-Fi y factores de forma independiente.