

ARTIGO TÉCNICO

Guia de engenharia para medições de alta exatidão com sensores

Visão geral

Os sensores convertem um fenômeno físico em um sinal elétrico mensurável. No entanto, alguns sensores não respondem naturalmente às mudanças nos fenômenos físicos e requerem condicionamento de sinais. Antes da digitalização da saída do sensor, o sinal pode precisar de outros componentes e circuitos para produzir um sinal que possa aproveitar todos os recursos do hardware de medição e reduzir os efeitos de ruído provenientes de interferência externa.

CONTEÚDO

Visão geral	1
Termopares, RTDs e termistores	2
Sensores baseados em ponte e strain gages	8
Acelerômetros e microfones	17
TEDS (Datasheet de transdutores eletrônicos)	29
Escolhendo um sistema de medição de sensores	32

Este documento apresenta as melhores práticas para conectar sensores a instrumentos, implementar condicionamento de sinais adequado e reduzir potenciais fontes de erro em seu sistema.

Termopares, RTDs e termistores

Os termopares, os RTDs e os termistores operam sob o princípio de que determinados materiais respondem de modo previsível e mensurável a variações na temperatura. Nos três casos, a resposta medida é normalmente bem pequena e, como com todas as medições de baixo nível, é difícil fazer uma medição com exatidão e de modo confiável. Os recursos adequados de condicionamento de sinais nos componentes de hardware e software de seu sistema de medição podem simplificar bastante a tarefa de medição de temperatura. As próximas seções abordam o condicionamento de sinais necessário para medições de termopar, RTD e termistor.

Requisitos para o condicionamento de sinais

Filtragem

As medições de temperatura muitas vezes devem ser feitas distantes do equipamento de medição. Isso significa que os fios dos sensores que carregam o sinal analógico para o digitalizador precisam alcançar uma longa distância. Devido ao comprimento do cabo, o ruído do ambiente operacional pode penetrar no sinal analógico e levar a medições imprecisas. Para minimizar esse problema, você precisa considerar cuidadosamente onde faz o seu cabeamento. Evitar linhas de alimentação CA, iluminação fluorescente e monitores de computador pode ajudar a evitar o ruído de 50/60 Hz na linha de alimentação que eles geralmente emitem.

Você pode também aplicar um filtro passa baixa no sinal de entrada ou incluir um filtro no hardware de medição para ajudar a remover sinais de alta frequência indesejados.

Isolação

Em seu núcleo, os termopares, os RTDs e os termistores são feitos de materiais eletricamente condutivos. Se você não considerar a isolação, poderá transferir incorretamente uma medição potencialmente perigosa para o hardware de medição do usuário.

Por exemplo, se consideramos a utilização de termopares no invólucro de um motor elétrico grande. Motores grandes muitas vezes requerem tensões muito altas e sofrem até mesmo maiores picos de tensão durante a operação. Se o invólucro do motor estiver exposto a uma dessas altas tensões devido a um curto interno, o pico de tensão pode passar para o hardware de medição por meio do fio do termopar. Para evitar que isso ocorra, você pode usar termopares com isolação, mas isso produz um tempo de resposta mais demorado e um custo adicional.

Por outro lado, um dispositivo de medição com isolação entre canais pode ajudar a proteger o circuito do conversor analógico-digital (ADC) e minimizar o ruído de canais adjacentes. Você pode também usar um dispositivo de medição com isolação para fazer medições com alta exatidão quando há altas tensões de modo comum, isolando o circuito do ADC do terra e permitindo que a medição flutue até o sinal de interesse (dentro dos limites do dispositivo).

Linearização

A saída de tensão por unidade de temperatura de um termopar, RTD ou termistor não possui uma relação linear. Nesse caso, você não pode simplesmente aplicar um coeficiente de escala para converter a tensão medida em uma saída de temperatura relevante em toda a faixa do termopar. A figura 1, por exemplo, mostra a saída de tensão termoelétrica de vários termopares em uma faixa de temperaturas. Observe a relação não linear.

TERMOPARES EM TEMPERATURAS DIFERENTES

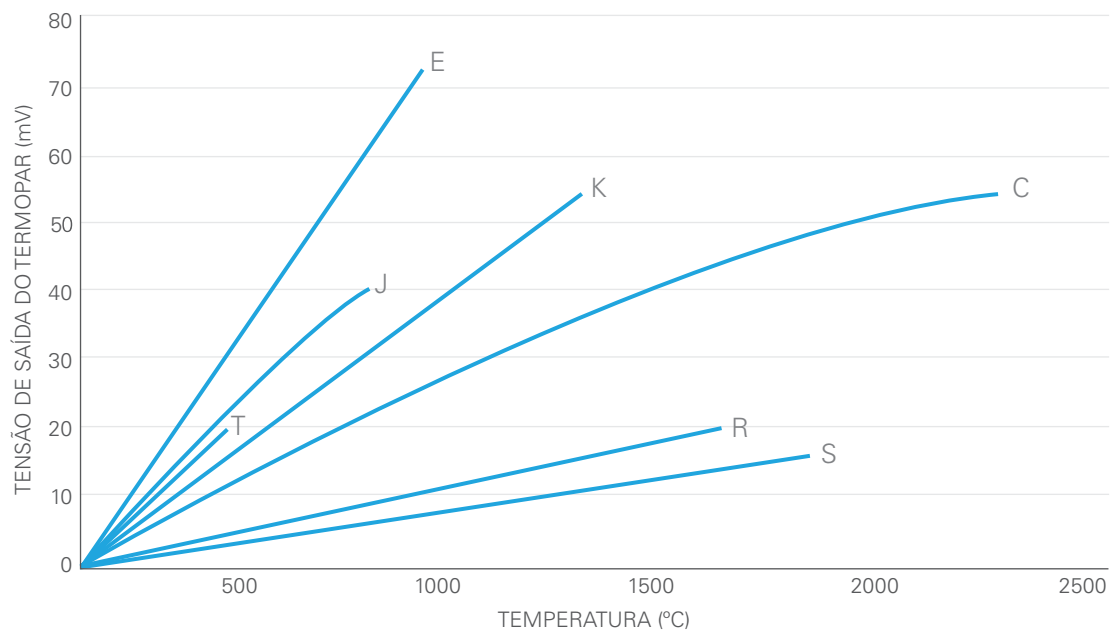


Figura 1. Tensão de saída de termopar versus temperatura¹

Você pode escolher entre duas opções para dimensionar com exatidão as medições e corrigir essa não linearidade:

1. Use uma tabela de consulta, conhecida também como “look-up table” e a interpolação linear para tensões medidas entre pontos de dados na tabela. Isso é bastante eficaz, mas requer a codificação de uma tabela look-up potencialmente ampla como o subconjunto de termopares do tipo K ilustrado na figura 2 pelo National Institute of Standards and Technology (NIST).

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

TABELA ITS-90 PARA TERMOPAR DO TIPO K (TENSÃO TERMOELÉTRICA EM 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. Tabela look-up 2 de termopar do tipo K ilustrado pelo NIST²

2. Aplique a equação tensão-temperatura no tipo de sensor que você estiver usando para fazer a medição. Por exemplo, o polinomial de alta ordem necessário para qualquer termopar é:

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

E = Tensão termoelétrica em μV

C_i = Coeficientes polinomiais (fornecido pelo NIST para cada faixa de temperatura)

t = Temperatura em $^{\circ}C$

Os termistores também requerem uma equação complexa similar para converter com exatidão os sinais em uma ampla faixa de temperaturas. Por outro lado, entre esses três sensores de medição de temperatura, os RTDs oferecem a resposta mais linear. A relação entre resistência e temperatura para os RTDs é definida pela equação Callendar-Van Dusen conforme demonstrado abaixo:

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

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

RT = resistência do RTD na temperatura T

R_0 = resistência nominal do RTD em $0^{\circ}C$

A, B e C = constantes usadas para ajustar a escala do RTD

² NIST ITS-90 Thermocouple Database: <http://srdata.nist.gov/its90/main/>

Observe que fazer esses cálculos no software pode exigir grande capacidade de processamento dependendo da quantidade de canais, taxa de amostragem e faixa de temperatura de operação. Ter uma plataforma de software que se integra perfeitamente com o hardware de medição pode simplificar bastante essa tarefa de ajuste de escala oferecendo recursos de escalabilidade.

Considerações sobre RTD/Termistores específicos

Corrente de excitação

Os termistores e os RTDs são sensores resistivos que requerem uma excitação de corrente para criar uma tensão mensurável no dispositivo. É fundamental uma fonte de corrente precisa e constante para garantir uma tensão consistente e de alta exatidão para a medição. O sistema de aquisição de dados escolhido para suas medições com termistor e RTD deve oferecer uma fonte de excitação de corrente especificada como segura, de modo que você possa obter as medições mais precisas e de maior exatidão.

Como conectar-se ao hardware usando configurações com 2, 3 e 4 fios (somente para RTDs)

Você pode adquirir RTDs em três configurações de conexão. As diferenças e os benefícios de cada uma dessas configurações são discutidos detalhadamente na sessão de referência de sensores RTD. O hardware de medição escolhido para o seu sistema precisa ser suficientemente flexível para incorporar os tipos de RTDs de que sua aplicação precisa. Alguns dispositivos de hardware de medição permitem apenas RTDs de 2 fios, ao passo que outros dispositivos de hardware oferecem detecção automática de RTDs de 3 ou 4 fios. Você precisa escolher um dispositivo de aquisição de dados que seja projetado para o nível de resistência de seu RTD, por exemplo, RTDs de 100 Ω ou 1000 Ω .

Considerações sobre termopares específicos

Amplificação

Os termopares produzem tensões bem pequenas para uma determinada variação na temperatura que tipicamente gira em torno de millivolts e às vezes até menos. Por exemplo, os termopares do tipo K apresentam apenas 40 μV por grau Celsius. A maioria dos dispositivos de hardware de medição convencionais faz medições dentro de uma determinada faixa, e a resolução do dispositivo determina a menor mudança detectável dentro dessa faixa de tensão. No caso de um termopar, como a tensão que você está medindo é bem pequena, você pode querer amplificar o sinal medido para aproveitar toda a faixa de entrada do dispositivo de medição.

SAÍDAS AMPLIFICADAS DO TERMOPAR

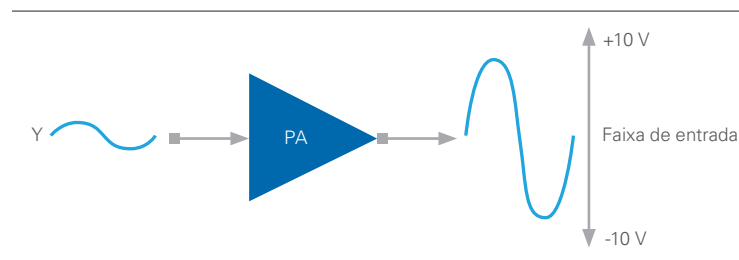


Figura 3. Amplifique as saídas do termopar para detectar variações menores no sinal e use toda a faixa de entrada do ADC.

Em um cenário ideal, a amplificação ocorre o mais próximo possível da medição principal. Isso ajuda a evitar a amplificação de qualquer ruído introduzido no sinal ao longo dos fios do termopar. Se não for possível fazer amplificação externa ou se você precisar simplificar no sistema de medição, você pode usar um dispositivo de medição com um conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits. Esse tipo de dispositivo pode oferecer sensibilidade à medição na ordem de até 0.2 °C.

Compensação por junta fria (CJC)

Conforme discutido na seção de visão geral dos termopares, a natureza de uma medição com termopar depende do diferencial de tensão criado quando dois metais diferentes são colocados juntos e expostos a alguma temperatura relativa. Surge um problema quando se considera a conexão entre o termopar e os terminais de seu hardware de medição. Nessa conexão, é criada outra junção de metais diferentes que também gera um diferencial de tensão, dependendo do ambiente. Se você não considerar esse “termopar parasita” secundário, ele pode desvirtuar significativamente a medição de temperatura desejada, produzindo um resultado inválido.

Para evitar isso, você pode incluir uma medição de referência ou “medição de junta fria” em seu hardware de medição, conforme ilustrado na figura 4. Essa medição de referência é feita um pouco distante da medição principal e preferencialmente de modo adjacente ao “termopar parasita”, conectando o termopar propriamente dito aos terminais do dispositivo de medição. Use um sensor de temperatura de medição direta (como um RTD ou termistor) e depois subtraia a medição de referência resultante da medição principal, para remover ou compensar o componente parasita. Esse processo é denominado compensação por junta fria CJC.

MEDIÇÃO COM TERMOPAR POR JUNTA FRIA

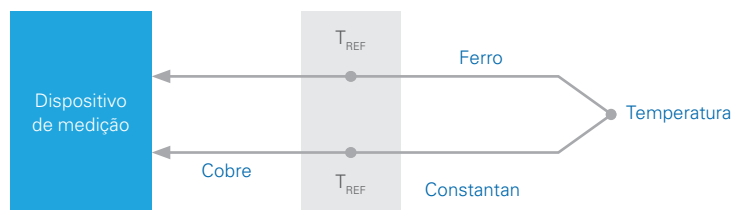


Figura 4. O erro de junta fria acrescenta mais tensão em uma medição com termopar

Como remover erros de offset

Conforme discutido anteriormente, a compensação por junta fria é importante para corrigir o efeito do termopar parasita criado ao conectar fios do termopar aos terminais de seu hardware. O termopar parasita gera um offset na tensão medida levando a resultados imprecisos. Da mesma forma, a temperatura ambiente que envolve um dispositivo de medição pode levar a um offset na tensão medida a partir do termopar devido às tensões provocadas no hardware propriamente dito. Para corrigir isso, você precisa medir regularmente a tensão latente sem um termopar e subtrair esse valor de cada medição com termopar. Para simplificar esse processo, alguns dispositivos de hardware de medição oferecem uma função de zeragem automática para corrigir regularmente qualquer tensão de offset gerada pela temperatura ambiente. Isso pode melhorar bastante a exatidão de sua medição.

COMPENSAÇÃO COM ZERAGEM AUTOMÁTICA

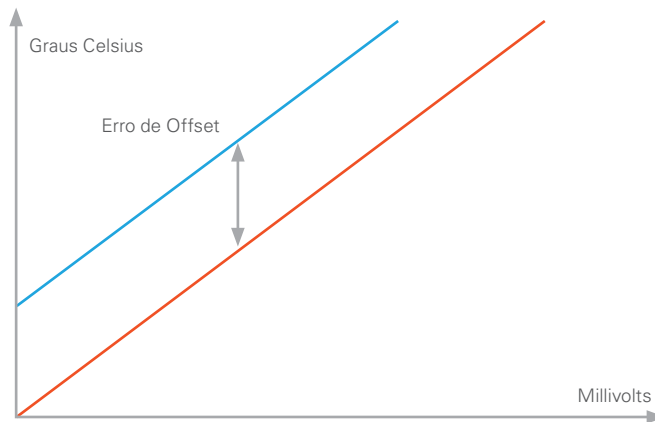


Figura 5. A zeragem automática compensa o erro de offset.

Deteccção de termopares desconectados

Os termopares podem ser suscetíveis à corrosão e deteriorar ao longo do tempo devido à sua composição (contato físico entre metais diferentes pode gerar corrosão em alguns ambientes) e o ambiente operacional típico para esse tipo de sensor. Um termopar quebrado ou desconectado pode não estar visível logo de imediato para o usuário e pode produzir dados inválidos. A deteção de termopar aberto é um recurso do hardware que oferece uma corrente pequena para pressionar a entrada da tensão fora da faixa quando o hardware detecta uma conexão aberta. Você pode verificar isso facilmente no software. Ao usar esse recurso, lembre-se de que a corrente pequena pode ser uma fonte de erro de polarização em aplicações de alta exatidão. Para corrigir isso, você pode juntar a deteção de termopar aberto com a zeragem de offset do condutor, que considera a diferença medida com e sem a corrente aplicada e a subtrai de medições futuras. Isso corrige efetivamente um erro de offset provocado pelo usuário.

DETECCÃO DE TERMOPAR ABERTO

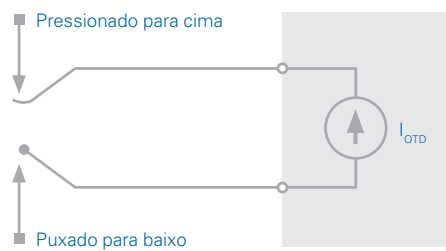


Figura 6. O circuito de deteção de termopar aberto pressiona a tensão para cima quando o termopar rompe.

Conclusão

Para obter um nível confiável de exatidão em suas medições de temperatura, você precisa avançar por muitas camadas de condicionamento de sinais, algumas recomendadas e algumas necessárias. Ao escolher um sistema de medição para termopares, RTDs ou termistores, você precisa considerar o filtro integrado para remover ruído; a isolamento, para evitar loops de terra; e a linearização, para dimensionar a tensão à temperatura. Se você estiver usando termopares como seu sensor de temperatura, não se esqueça de que essas outras fontes de erro podem impactar a exatidão da medição.

- Erro de junta fria - corrigido por compensação de junta fria (CJC)
- Erro de offset - corrigido pela zeragem automática e zeragem de offset do condutor
- Detecção de termopar aberto para garantir a segurança e o tempo de operação do sistema

Saiba como adquirir medições de temperatura seguras e de alta exatidão com o hardware NI.

Sistemas de medição com termopares NI

RTD Sistemas de medição

Sensores baseados em ponte e strain gages

Strain gages são dispositivos de detecção fundamentais para o funcionamento de muitos outros tipos de transdutores, como os de pressão, carga e torque. Esses dispositivos são amplamente usados em aplicações de monitoramento e teste estruturais. Embora sejam comuns, os strain gages são um dos tipos de sensores mais difíceis de serem usados, em termos de condicionamento e aquisição de dados segura. As medições com strain gage operam detectando pequenas mudanças no comprimento de uma folha metálica devido à tensão em uma superfície muitas vezes menor do que 5 mm². Diversos fatores podem afetar o desempenho da medição de seus strain gages, como problemas de condicionamento de sinais, ruído elétrico, oscilações na temperatura e calibração indevida. Como os sensores de torque, carga e pressão são tipicamente baseados em uma configuração de strain gage de ponte completa, eles também são afetados por muitos desses fatores. Considere as seguintes recomendações para compensar o erro e aumentar a exatidão de suas medições baseadas em ponte.

Os sensores de carga, pressão e torque podem produzir alta ou baixa tensão, dependendo dos requisitos de excitação. Os sensores de baixo nível são tipicamente alimentados por um dispositivo de medição e apresentam sinais millivolt. Os sensores de alto nível (ou sensores condicionados) requerem fontes de alimentação externas mais altas para operar e apresentam sinais de $\pm 5\text{ V}$, $\pm 10\text{ V}$ ou $4\text{--}20\text{ mA}$.

Como escolher um nível de excitação ideal

Escolher um nível de excitação ideal significa um equilíbrio entre obter uma forte relação sinal-ruído e minimizar os efeitos do auto-aquecimento. Idealmente, é preferível altos níveis de excitação de tensão porque a modificação em uma tensão de saída de um determinado nível de deformação aumenta em proporção direta à tensão de excitação. Por isso, você pode medir com exatidão e mais facilidade as tensões pequenas geradas por pontes de strain gage, principalmente em ambientes ruidosos ou quando são utilizados longos fios de conectores não propensos a ruído. No entanto, como os gages de folha são basicamente dispositivos elétricos resistivos, os maiores níveis de excitação geram auto-aquecimento, produzindo diversos efeitos negativos. O auto-aquecimento modifica a sensibilidade e resistividade da ponte e a capacidade adesiva de transferir a deformação. Os strain gages são raramente danificados por tensões de excitação excessivas. O resultado comum é a degradação do desempenho em vez de falha no gage.

Como muitos fatores diferentes podem afetar seu nível de excitação ideal, você não pode padronizar um nível de tensão de excitação de ponte para um tipo e tamanho específico de gage. No geral, você pode reduzir o auto-aquecimento diminuindo o nível de excitação, mas uma tensão de excitação ideal é mais bem determinada por um procedimento experimental. Sem nenhuma carga aplicada, você deve examinar o ponto zero do canal enquanto aumenta progressivamente o nível de excitação. Quando aparecer instabilidade na leitura zero, você deverá reduzir a excitação até a estabilidade retornar. Esse experimento deve ser feito na temperatura mais alta na qual você estiver fazendo as medições. Em ambientes com ruído, você ainda pode usar baixos níveis de excitação blindando adequadamente os fios do condutor e colocando o dispositivo de medição próximo aos sensores. Dependendo da configuração de seu teste, considere o hardware de medição com formatos distribuídos que oferecem a você máxima flexibilidade na instalação do sistema.

Outros fatores que afetam a excitação ideal

- **Área do strain gage:** Você pode reduzir o auto-aquecimento escolhendo um strain gage com uma área de superfície maior (comprimento do gage x largura das grades do gage) para obter melhor dissipação térmica.
- **Resistência nominal do strain gage:** Gages com resistência mais altas, como $350\ \Omega$ em vez de $120\ \Omega$, diminuem a capacidade por unidade de área dissipada para possibilitar uma maior tensão de excitação.
- **Propriedades do dissipador térmico da superfície de montagem:** Metais com alta condutividade térmica, como o cobre ou alumínio, são excelentes dissipadores térmicos, que afastam o aquecimento do strain gage. Metais com baixa condutividade térmica, como aço inoxidável ou titânio, são dissipadores térmicos fracos. A medição de deformação em plástico requer uma consideração especial. A maioria dos plásticos age como isolantes térmicos em vez de dissipadores térmicos. Desse modo, são necessários valores de excitação extremamente baixos para evitar graves consequências de auto-aquecimento. Plásticos que são fortemente carregados de filtros inorgânicos de forma fibrosa ou em pó apresentam um problema menor porque esses filtros ajudam a melhorar a condutividade térmica.

- **Técnica de instalação e conexão:** Se o gage estiver danificado durante a instalação, se os terminais de solda estiverem parcialmente desconectados devido ao aquecimento da soldagem, ou se é formada alguma descontinuidade na linha de cola, os altos níveis de excitação podem gerar problemas graves. Usar a técnica adequada é fundamental para obter um desempenho consistente em toda a operação do strain gage, mas especialmente sob condições de alta excitação.

Compensação de fontes de excitação instáveis

A exatidão de uma medição baseada em ponte é diretamente proporcional à estabilidade da fonte de excitação. Mudanças na fonte de excitação geram modificações na saída medida da ponte. Desse modo, pequenas oscilações na fonte de excitação se traduzem em uma deturpação da deformação. Dois métodos podem ajudá-lo a evitar fontes de excitação imprecisas ou instáveis. Você pode medir a tensão fornecida pela fonte para compensar as oscilações quando dimensionar os dados no software ou você pode consultar a medição feita pelo ADC em relação à fonte de excitação. O primeiro método requer outras medições, o que consequentemente aumenta o custo e a complexidade do sistema.

CORREÇÃO DE FONTES DE ALIMENTAÇÃO INSTÁVEIS

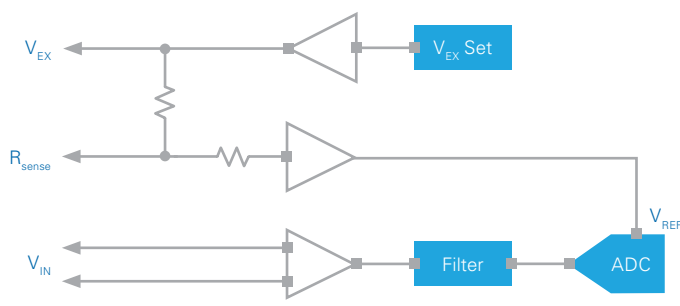


Figura 8. Um projeto ratiométrico usa a tensão de excitação como uma referência para o ADC corrigir fontes de alimentação instáveis.

A abordagem ratiométrica elimina sua dependência da exatidão da tensão de excitação detectando continuamente a tensão de excitação e dimensionando a medição diretamente no hardware. A tensão de excitação é constantemente detectada por circuitos de precisão nos módulos e usada para acionar a entrada de referência do ADC. Ao usar essa implementação, conforme ilustrado na figura 8, os módulos apresentam dados como uma relação da tensão de saída da ponte e a tensão de excitação. Esse método corrige continuamente e automaticamente os erros na exatidão da tensão de excitação.

Como minimizar os erros da resistência do fio

Longos fios e pequenos fios de gage, que apresentam maior resistência do que os fios do complemento de ponte, podem ser a principal fonte de erro na medição com strain gage. Por exemplo, suponha que cada fio em um strain gage de conexão com 2 fios tenha 15 metros e uma resistência do fio RL igual a 1 Ω . A resistência do fio acrescenta 2 Ω ao braço da ponte, o que adiciona um erro de offset e reduz a sensibilidade da saída da ponte. Você pode compensar esse erro medindo a resistência do fio RL e contabilizá-lo no cálculo da deformação. Entretanto, surge um problema mais difícil a partir das variações na resistência do fio devido às oscilações na temperatura. O coeficiente de temperatura dos fios de cobre é tipicamente duas ordens

de grandezas maior do que o coeficiente de temperatura dos gages. Portanto, uma pequena variação na temperatura pode gerar um erro de medição de diversos microstrains ($\mu\epsilon$).

Usar uma conexão com 3 fios pode eliminar os efeitos da resistência variável do fio porque as resistências dos fios afetam os braços adjacentes da ponte. Conforme visto na figura 9, as variações na resistência do fio, R_{L2} , não modificam a relação dos braços da ponte R_3 e R_G . Portanto, quaisquer variações na resistência devido à temperatura cancelam uma a outra, e a ponte permanece equilibrada.

STRAIN GAGE A 3 FIOS

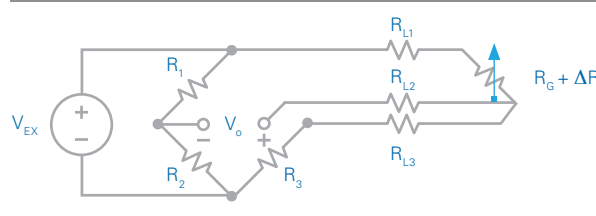
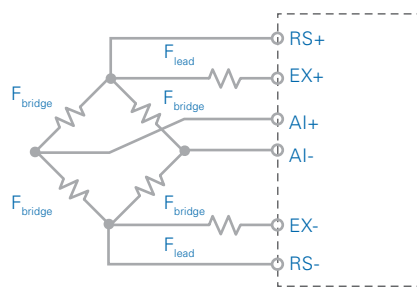


Figura 9. Configuração do strain gage a 2 fios

Detecção remota

Se o circuito do strain gage estiver distante do condicionador de sinais e da fonte de excitação, as quedas de tensão geradas pela resistência nos fios longos que conectam a tensão de excitação à ponte serão uma possível fonte de erro. Isso resulta em fornecer uma tensão de excitação mais baixa do que a originalmente desejada através do elemento de detecção. Por isso, alguns condicionadores de sinais possuem um recurso denominado detecção remota para compensar esse erro. Com a detecção remota de feedback, você conecta fios extras de detecção no ponto em que os fios da tensão de excitação são conectados ao circuito de ponte, conforme ilustrado na figura 10. Os fios extras de detecção regulam o fornecimento de excitação por meio de amplificadores de feedback negativo para compensar perdas nos cabos e oferecer a tensão necessária para a ponte.

MEDIÇÕES DE DETECÇÃO REMOTA



A Figura 10. A detecção remota mede a tensão da excitação real fornecida à uma ponte em longas distâncias.

Um esquema alternativo de detecção remota utiliza um canal de medição separado para medir diretamente a tensão de excitação real fornecida à ponte. Como os cabos do canal de medição transportam uma corrente muito pequena, a resistência do cabo não exerce efeito significativo na medição. Você poderá então usar a tensão de excitação medida na conversão tensão-deformação para compensar perdas nos cabos.

Como melhorar a relação sinal-ruído

Os strain gages e os sensores baseados em ponte ficam muitas vezes em ambientes eletricamente ruidosos. A relação sinal-ruído (SNR) descreve a relação da amplitude do sinal à amplitude do ruído. Uma SNR maior resulta tipicamente em uma medição com menos ruído, permitindo uma melhor resolução geral. O ruído nas leituras da deformação pode ser particularmente problemático devido aos pequenos sinais nas medições de deformação. Você pode melhorar a SNR aumentando a amplitude geral do sinal antes do ruído ser inserido nele ou reduzindo a amplitude do ruído.

O ruído apresentado por uma fonte externa pode muitas vezes estar associado a frequências específicas, então você pode usar o software para filtrá-lo se a frequência do ruído for previsível e não interferir na largura de banda do sinal de interesse. O tipo de ruído mais comum é a interferência na linha de alimentação, que mostra até 50 Hz ou 60 Hz de ruído nas medições.

Outras técnicas para rejeitar ruído externo melhorando, portanto, a SNR incluem:

- **Reduzir o comprimento do fio e usar pares trançados ou fios de sinais correspondentes:** Se possível, reduza o comprimento do fio do strain gage e mantenha o fio distante de quaisquer potenciais fontes de ruído. Usar um par trançado e fios de sinais correspondentes também ajuda a garantir que a maior parte do ruído do ambiente seja conduzido uniformemente aos cabos.
- **Usar técnicas adequadas de blindagem:** Conecte a blindagem à referência do dispositivo de medição, que pode ser COM ou EX- (consulte a documentação de seu dispositivo), e cuide para conectá-la a somente uma extremidade do cabo. Para os dispositivos com isolamento que têm um terra flutuante, a blindagem precisa flutuar com a mesma potência que os sinais da placa para ser eficaz.
- **Aumentar a amplitude do sinal:** Com as medições de deformação, você pode fazer isso escolhendo um strain gage mais sensível ou aumentando a amplitude da tensão de excitação. Seja cuidadoso se você estiver aumentando a amplitude da tensão de excitação porque se você aumentá-la muito, os erros de auto-aquecimento no strain gage podem ultrapassar os benefícios da SNR obtida com uma maior excitação.
- Os recursos do dispositivo de medição que podem ajudar a melhorar a SNR incluem:
 - **Faixa dinâmica:** A faixa dinâmica define o nível de ruído relativo à faixa de entrada total do dispositivo de medição e é muitas vezes especificada em decibéis (dB). Por exemplo, um dispositivo de medição com uma faixa dinâmica sem espúrios (SFDR) de 106 dB é equivalente a níveis de ruído de aproximadamente 0.0005 por cento da faixa de entrada total. Isso significa que o dispositivo contribui muito pouco para outros ruídos.
 - **Relação de rejeição do modo comum (CMRR):** Como o ruído de fontes externas é muitas vezes conduzido uniformemente em todos os fios, uma relação de alta rejeição de modo comum rejeita um grande percentual do ruído conduzido.
 - **Detecção remota:** Ao usar a detecção remota, você anula qualquer ruído que é conduzido aos cabos de excitação quando você amostra os dados porque a detecção remota compensa o ruído.
 - **Filtros antialiasing:** Os filtros antialiasing evitam que o ruído de alta frequência tenha o efeito de aliasing em frequências mais baixas. Esse recurso não apenas melhora o desempenho do dispositivo contra ruído, mas também permite que você use filtros de

software com eficiência para filtrar frequências (filtro de rejeição de faixa) ou faixas de frequências (filtro passa baixa / passa alta).

Calibração adequada

Balanceamento da ponte

Ao instalar uma ponte pela primeira vez, você provavelmente não irá ler exatamente zero volts quando não aplicar nenhuma deformação. Pequenas diferenças de resistência entre os braços da ponte e as resistências dos cabos e uma condição de instalação pré-deformada geram uma tensão de offset inicial diferente de zero. Você pode gerenciar essa tensão de offset inicial das seguintes maneiras:

1. **Compensação por software:** Com esse método, você faz uma medição inicial antes de ligar a entrada do strain gage e usa esse offset nas equações de conversão de deformação para compensar a tensão de offset inicial em medições subsequentes. Esse método é simples, rápido e não requer ajustes manuais. A desvantagem do método de compensação por software é que o offset da ponte não é removido. Se o offset for suficientemente grande, ele limitará o ganho do amplificador que você poderá aplicar à tensão de saída, limitando, assim, a faixa dinâmica da medição.
2. **Circuito de zeragem de offset:** O segundo método de balanceamento usa uma resistência ajustável, ou potenciômetro, para ajustar fisicamente a saída da ponte em zero. Ao ajustar a resistência do potenciômetro, você pode controlar o nível da saída da ponte colocando-o em um valor inicial de 0 V.
3. **Zeragem de offset com buffer:** O terceiro método, da mesma forma que o método de compensação por software, não afeta a ponte diretamente. Um circuito de zeragem soma uma tensão CC ajustável, positiva ou negativa, à saída do amplificador da instrumentação, para compensar o offset inicial da ponte. Consulte a documentação do dispositivo para verificar os métodos de zeragem por hardware disponibilizados pelo seu dispositivo de medição.

CALIBRAÇÃO DE SHUNT E ZERAGEM

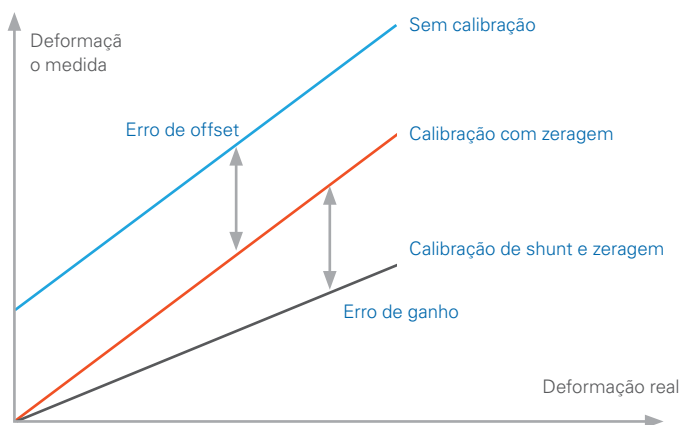


Figura 11. A calibração de shunt e zeragem ajustam o offset e erro de ganho do dispositivo de medição.

Ajuste de ganho

Você pode verificar a saída de um sistema de medição com strain gage, comparando a deformação medida com uma deformação ou entrada mecânica calculada ou predeterminada. Você pode usar a diferença (se houver) entre a deformação calculada e medida para cada medição como um fator de ajuste de ganho ou fator de calibração. Esse procedimento é chamado calibração de shunt e simula a entrada do strain, modificando a resistência do braço de detecção na ponte por algum valor conhecido. Você pode fazer isso desviando, ou conectando, um resistor grande de um valor conhecido em paralelo com um braço da ponte para criar uma variação conhecida na resistência, conforme observado na figura 12. Como o valor do resistor de shunt é conhecido, você pode calcular a deformação mecânica correspondentes à queda da tensão do resistor. Em seguida, você mede a saída da ponte e a compara com o valor de tensão esperado para corrigir os erros de ganho em todo o percurso da medição.

RESISTOR DE SHUNT

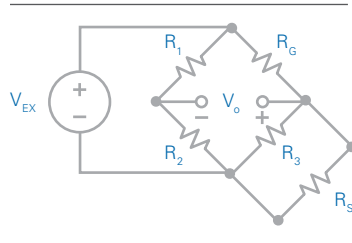


Figura 12. Resistor de Shunt conectado através do R3

Dimensionamento de medições elétricas em unidades de engenharia

Após obter a tensão mensurável, você precisa converter o sinal em unidades reais, como Newton (N) para força ou psi para pressão. Você pode dimensionar esses valores elétricos para o fenômeno físico que o sensor mede com os seguintes métodos:

- **Linear de dois pontos:** Use dois pares de valores elétricos e seus valores físicos correspondentes para calcular a inclinação e a intercepção em y de uma equação linear. Você pode usar essa equação para dimensionar valores elétricos à valores físicos, incluindo medições que estão fora da faixa de valores especificados para o cálculo da inclinação e intercepção em y.
- **Tabela:** Oferece um conjunto de valores elétricos e os valores físicos correspondentes. O software que acompanha seu hardware de medição precisa poder fazer dimensionamento linear entre cada par de valores elétricos e físicos. Os limites da entrada devem estar dentro dos menores e maiores valores físicos.
- **Polinomial:** Oferece os coeficientes reversos e futuros de uma equação polinomial. Então, o software usa essa equação para dimensionar os valores elétricos em valores físicos. Procure por um software que possa calcular um conjunto de coeficientes se você souber somente o outro conjunto.

Os certificados de calibração e datasheets de fabricantes de sensores muitas vezes incluem uma tabela de valores elétricos e físicos ou uma equação polinomial para dimensionamento. Se você não tiver uma tabela ou equação polinomial para o seu sensor, use o dimensionamento linear de dois pontos. Use a saída nominal do sensor e a capacidade do sensor como um par de valores físicos e elétricos. Use zero para o outro par de valores físicos e elétricos. Por exemplo, suponha que você tenha uma pressão condicionada que produz um sinal de 0-5 V ou corrente de 4–20 mA. Tanto 0 V quanto 4 mA correspondem a uma medição de pressão 0. Da mesma forma, 5 V e 20 mA correspondem a capacidade em escala real ou a pressão máxima que o transdutor pode medir.

Como o usar a tecnologia TEDS para obter conectividade e configuração mais rápidas

Conforme discutido na seção anterior, os transdutores baseados em ponte, como célula de carga, pressão ou sensores de torque, requerem diversas entradas a partir do datasheet do sensor para converter adequadamente a tensão da saída do sensor em unidades de engenharia. Ao instalar e configurar um sistema de medição tradicional, você precisa inserir manualmente esses parâmetros importantes do sensor. Você pode reduzir esse tempo de configuração equipando o seu sistema com o padrão IEEE 1451.4 ou atuadores e sensores inteligentes TEDS (Data sheet de transdutores eletrônicos). Esses sensores armazenam os principais dados, como fabricante, modelo, faixa de condições reais e sensibilidade em um EEPROM no sensor ou no cabo do sensor. Com as informações de configuração nos sensores, os instrumentos compatíveis com TEDS podem se comunicar diretamente com o sensor e fazer a configuração programaticamente. O software compatível com TEDS também pode ser dimensionado automaticamente a partir das funções polinomiais oferecidas pelo fabricante do sensor ou laboratório de calibração. Para obter mais informações sobre o padrão IEEE 1451.4 ou como os sensores inteligentes TEDS operam, consulte a seção TEDS na parte final deste documento.

Conclusão

Reduzir o ruído e aumentar a resolução são medidas importantes para fazer medições de alta exatidão com strain gages e sensores de ponte não condicionados devido aos pequenos níveis de tensão envolvidos. Escolher o dispositivo de medição certo pode melhorar significativamente a integridade de suas medições com ponte. Além de obter um nível de excitação, você precisa considerar um dispositivo de medição com uma ampla faixa dinâmica, detecção de excitação e uma arquitetura ratiométrica. Então, se você tomar medidas para reduzir o ruído apresentado no sistema, você pode reduzir o nível de excitação para reduzir os erros de auto-aquecimento e melhorar a exatidão do sinal de seu sensor de ponte. Você precisa calibrar o seu strain gage periodicamente para cuidar das mudanças nas características físicas das variações do strain gage na resistência do fio e para compensar as imperfeições no sistema de medição.

Explore sistemas de medição de alta exatidão com ponte usando o hardware NI.

Acelerômetros e microfones

As medições de som e vibração são críticas em uma variedade de aplicações como teste de ruído ambiental ou monitoramento de condição de máquina. Os acelerômetros e os microfones medem oscilações, mas em meios diferentes. Desse modo, eles possuem requisitos de condicionamento de sinais similares para produzir um sinal que o hardware de medição possa ler adequadamente. Após adquirir os dados, geralmente você precisa fazer outro processamento de sinais para exibir os dados em um formato mais compreensível. Por exemplo, os sinais de vibração são comumente convertidos em espectro de frequência para o equipamento rotativo detectar assinaturas únicas que podem indicar uma parte mecânica com falha. As próximas seções abordam recomendações para fazer medições de alta exatidão com microfone e acelerômetro e explora técnicas básicas de análise para ajudá-lo a obter mais informações a partir de seus dados.

Requisitos para o condicionamento de sinais

Amplificação

Como a carga produzida por um acelerômetro é muito pequena, o sinal elétrico produzido pelo sensor é sensível ao ruído, dessa forma, precisamos usar circuitos eletrônicos sensíveis para amplificar e condicionar o sinal. Como os acelerômetros piezoelétricos são fontes de alta impedância, você precisa projetar um amplificador sensível à carga com baixo ruído, alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.

Os sensores piezoelétricos com eletrônica embarcada (IEPE) integram o amplificador de carga ou o amplificador de tensão próximo ao sensor para garantir melhor imunidade ao ruído e tamanho conveniente. No entanto, esses sensores precisam de 4–20 mA de excitação de corrente para operar o circuito dentro deles.

Excitação

Conforme mencionado na seção anterior, os sensores IEPE exigem uma corrente externa para alimentar o amplificador. Os valores comuns de excitação do IEPE são 2.1 mA, 4 mA e 10 mA. Veja a lista de valores de corrente de IEPE fornecidos nas especificações de seu dispositivo.

Do mesmo modo que os acelerômetros, os microfones podem ser alimentados externamente ou internamente. Os microfones condensadores polarizados externamente precisam de 200 V de uma fonte de alimentação externa. Verifique se a fonte de alimentação que você está usando oferece energia limpa na tensão nominal e cuide para não conectar mais microfones do que a fonte pode suportar. Os microfones condensadores pré-polarizados são alimentados por amplificadores IEPE que precisam de uma fonte de corrente constante.

Acoplamento CA

O offset de tensão CC gerado quando o condicionamento de sinais IEPE está ativado é igual ao produto da corrente de excitação e impedância do sensor. O sinal adquirido a partir do sensor é formado por componentes CC e CA, sendo que o componente CC desloca o componente CA com relação ao zero. Conforme ilustrado na figura 13, isso pode diminuir a resolução de sua medição porque a amplificação do sinal CA é limitada para evitar a saturação da faixa de entrada do ADC. Você pode solucionar esse problema implementando o acoplamento CC.

Também conhecido como acoplamento capacitivo, o acoplamento AC usa um capacitor em série com o sinal para filtrar o componente CC a partir do sinal. Quando implementado no hardware, o acoplamento CA pode ajudá-lo a inserir uma faixa de entrada mais estreita para melhorar a resolução de amplitude CA e a faixa dinâmica utilizável do canal. Quando implementado no software, o acoplamento CA pode remover dados CC errôneos que invalidam a integração do processamento de sinais e os resultados da medição, como RMS e níveis de pico. O acoplamento CA também atenua a variação CC de longo prazo dos sensores provocada por efeitos do envelhecimento e da temperatura.

FILTROS DE ACOPLAMENTO CA E CC

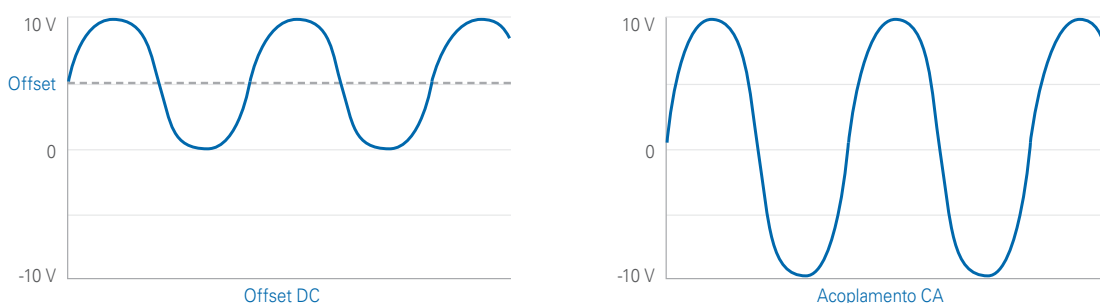


Figura 13. O acoplamento CC filtra o componente CC do sinal para melhorar a resolução da medição.

Aterramento

O aterramento inadequado de seu sensor pode resultar em loops de terra que criam uma fonte de ruído em seu sistema de medição. Você pode evitar isso garantindo que o sensor ou a entrada do sistema de medição esteja aterrada, mas não ambos. Se o sensor estiver aterrado, precisaremos conectá-lo de maneira diferencial. Se o sensor estiver flutuando, precisaremos conectar o sistema de medição invertendo a entrada com o terra.

Referência da fonte	Configuração do canal
Flutuante	Pseudodiferencial
Aterrado	Diferencial ou pseudodiferencial

Tabela 1. Configurações do canal de entrada analógico

Filtros antialiasing

Aliasing é uma preocupação comum ao fazer medições de som e vibração. De acordo com o teorema de Nyquist-Shannon, a maior frequência que pode ser analisada é a frequência de Nyquist (f_N), que é a frequência de amostragem do ADC dividida por dois. Qualquer frequência analógica maior do que a frequência de Nyquist aparece como uma frequência entre 0 e f_N após a amostragem. Sem um conhecimento detalhado do sinal original, você não pode distinguir essa frequência de aliasing a partir de frequências que estão entre 0 e f_N .

Um filtro passa baixa é geralmente suficiente para atenuar o ruído de alta frequência que é gerado no aliasing. No entanto, se cada ordem do filtro não for muito acentuada, as frequências acima da frequência de Nyquist podem não ser totalmente atenuadas e ter o efeito de aliasing dentro da parte válida do sinal. Os filtros antialiasing são uma forma de filtro passa baixa caracterizado por uma banda de passagem plana e rápidas alterações de atenuação. Esse filtro ajuda a preservar sinais abaixo da frequência da frequência de Nyquist e atenuar os sinais acima da frequência de Nyquist. Na figura 14, dois filtros são usados para eliminar o ruído de alta frequência. O filtro passa baixa elimina o ruído em f_3 , e uma baixa ordem atenua o ruído apenas em f_2 , o que apresenta o efeito aliasing dentro do sinal. Os filtros antialiasing removem os componentes de frequência do sinal adquirido.

FILTROS ANTIALIASING

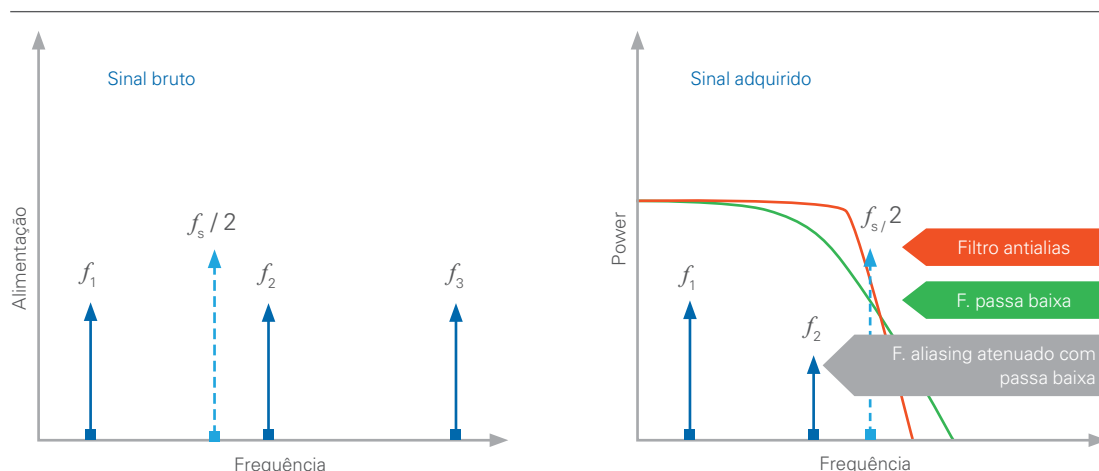


Figura 14. Filtros antialiasing de alta ordem (com steep roll-off) ajudam a atenuar o ruído logo acima da frequência de Nyquist

Faixa dinâmica

A faixa dinâmica é definida como a relação entre os menores e maiores sinais que um dispositivo pode medir ao mesmo tempo. Expresso em decibéis, a faixa dinâmica é $20 \log (V_{\max}/V_{\min})$. Por exemplo, um dispositivo com uma faixa de entrada de ± 10 V e uma faixa dinâmica maior do que 110 dB pode ter uma relação de tensão de 106. Os ADCs tradicionais de resolução mais baixa geralmente têm 16 bits, oferecendo uma faixa dinâmica de aproximadamente 90 dB. A maioria dos sensores oferece 110 dB ou mais de faixa dinâmica, então os dispositivos de 16 bits não podem medir toda a faixa do sensor dentro dos sinais de baixo nível permeados no ruído elétrico da medição. Instrumentos com 24 bits de resolução podem oferecer até 120 dB de faixa dinâmica, permitindo que você detecte sinais menores e extraia o melhor de seus sensores.

Amostragem simultânea

Em algumas aplicações, como mapeamento de ruído, teste de impacto e medições de intensidade do som, as informações da fase entre os dois canais separados são fundamentais. Nesses casos, é preciso a amostragem simultânea, o que significa que você precisa fazer a conversão analógico-digital ao mesmo tempo em cada canal.

Dimensionamento de unidades lineares em unidades relativas em decibéis

Use unidades relativas, como decibéis (dB), para exibir resultados escalares e de espectro quando você quiser exibir componentes pequenos e grandes na mesma escala. Por exemplo, na tabela 2, a potência de som de um sussurro é comparada a de um motor de foguete. Comparar esses valores é mais gerenciável usando uma escala logarítmica.

Referência da fonte	Potência do som (watt)	Potência do som (W)
Sussurro	0,00000000001 W	10 dB
Foguete	100000000 W	200 dB

Tabela 2. Exemplo de comparação de potência de sons

Use a seguinte equação para converter unidades lineares em unidades relativas em dB os para valores de amplitude:

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

Use a seguinte equação para converter unidades lineares em unidades relativas em dB para valores de amplitude:

$$\text{dB} = 20 \log \frac{P}{P_0}$$

Geralmente, usamos unidades relativas de referência dB para o limiar de audição de 20 μPa para apresentar medidas acústicas, como nível de pressão de som e espectro de oitava fracional. Para as medições de potência de som, a referência é 1 pW. Para medições de resposta de frequência, muitas vezes usamos um ganho de um como a referência dB. Nesse caso, os valores dB negativos da magnitude indicam atenuação, os valores dB positivos indicam ganho e 0 dB é equivalente a um ganho de um. Como cada domínio da medição pode usar uma referência específica, você precisa especificar a referência dB ao apresentar os resultados em dB.

Como manter a qualidade dos sinais ao usar cabos longos

Quando você usa cabos longos com sensores IEPE, a capacitância incluída no cabo pode afetar a resposta da frequência do sensor filtrando alguns dos componentes de alta frequência. Além disso, o ruído e a distorção podem penetrar no sinal de sua medição se você não tiver corrente suficiente para conduzir a capacitância do cabo. No geral, você precisa se preocupar em usar cabos de comprimento longo com sensores IEPE apenas se estiver interessado em uma faixa de frequência maior do que 10 kHz enquanto estiver usando um cabo mais comprido do que 100 ft (30 m). Para determinar com maior exatidão o efeito dos

cabos longos, você precisa determinar experimentalmente as características elétricas de alta frequência. Use um gerador de função para alimentar a amplitude máxima do sinal esperado em um amplificador com baixa impedância de saída e ganho de unidade em série com o sensor. Compare a relação do sinal original com a relação do sinal medido no escopo. Se o sinal for atenuado, você precisa aumentar a corrente usada para conduzir o sinal até que você tenha uma relação 1:1. Tenha cuidado para não fornecer corrente excessiva ao longo de lances curtos do cabo ou ao fazer testes em temperaturas elevadas. Qualquer corrente não utilizada pelo cabo é utilizada para alimentar componentes eletrônicos internos e gera aquecimento, que pode fazer com o que o sensor exceda sua especificação máxima de temperatura.

Como reduzir o tempo de instalação e configuração com a tecnologia TEDS

Sensores TEDS contêm uma EEPROM de identificação, onde são armazenadas uma tabela de parâmetros e informações sobre o próprio sensor. A EEPROM contém dados de calibração, de sensibilidade e do fabricante do sensor. Com esses parâmetros armazenados nos sensores, os instrumentos compatíveis com TEDS podem se comunicar diretamente com o sensor e fazer a configuração programaticamente. O software compatível com TEDS também pode ser dimensionado automaticamente a partir das funções polinomiais oferecidas pelo fabricante do sensor ou laboratório de calibração. Para obter mais informações sobre o padrão IEEE 1451.4 ou como os TEDS operam, consulte a seção TEDS na parte final deste documento.

Outras considerações sobre os microfones

Os microfones ficam estáveis durante longos períodos se forem manuseados adequadamente. Os componentes do microfone são frágeis e podem ser danificados pelo mau uso. Veja algumas dicas que podem ajudá-lo a manter medições de alta exatidão com microfones:

- Sempre calibre toda a rede de medição, incluindo o microfone, antes de iniciar a medição. Para as medições extremamente críticas, como uma precaução adicional, você pode querer fazer uma nova calibração logo após as medições serem concluídas para se certificar de que o sistema ainda está dentro da faixa de tolerância.
- Para as medições em ambientes externos, o microfone deve ser equipado com proteção adequada contra eventos do ambiente. Isso pode incluir tampões contra chuva, pontas antipássaros e aquecedores internos para evitar a condensação.
- Para evitar que as vibrações influenciem na medição, você pode precisar usar montagem de choque no microfone. Verifique as especificações de detecção de vibração do microfone.
- Para as medições que podem ser reproduzidas, verifique se o microfone está firmemente montado em um local precisamente reprodutível comparado à unidade testada e ao ambiente.
- Para medições portáteis ou em tripé, considere o uso de um braço de extensão do microfone para reduzir reflexos indesejados.
- Observe cuidadosamente as restrições do fabricante quanto ao comprimento do cabo. A degradação do sinal ocorre primeiro em frequências mais altas e altos níveis de som com cabos longos. Verifique a SNR do cabo com o microfone conectado. Verifique se há zumbido, interferências ou transientes próximo aos geradores, motores elétricos, unidades de ar condicionado, telefones celulares, instalações de radar, transmissores de TV ou rádio e outras potenciais fontes de interferência.

Técnicas de análise no domínio do tempo

Nível

Talvez a análise de medição mais básica relacionada ao som e vibração seja o nível. Você pode fazer medições de som e vibração com sinais no domínio do tempo. A raiz quadrada média (RMS) mede a energia (portanto, o potencial destrutivo) da variação dinâmica de sinais de som e vibração. Calcula-se a RMS elevando o sinal ao quadrado, tirando a média em um período de tempo e obtendo a raiz quadrada do resultado.

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

Uma medição comum do nível do som representa o nível da pressão do som. Esse valor é sempre expressado em relação a uma pressão de referência de 20 µPa (limiar da audição humana).

O principal problema com as medições baseadas em média é que o resultado de sua medição se modifica com base na duração que você escolher para seu intervalo médio. É por isso que medições como nível pressão de som têm intervalos padrão. Você pode usar dois métodos principais para encontrar a RMS: média linear e média exponencial.

Média linear

A média linear, ou nível de som contínuo equivalente (Leq), é um dos processos de média de tempo para medições do nível do som. Na média linear, todos os pontos são calculados igualmente em um período de tempo finito. Ela é tipicamente usada para medir exposição no longo prazo em um determinado ambiente (por exemplo, medição de ruído de tráfego em uma intersecção por uma hora). Calcula-se o Leq integrando o valor quadrado do sinal em um intervalo de tempo fixo e dividindo pelo intervalo de tempo. O resultado representa um som estável imaginário que tem a mesma energia que o som sob medição.

MEDIÇÃO DA EXPOSIÇÃO DO SOM NO LONGO PRAZO

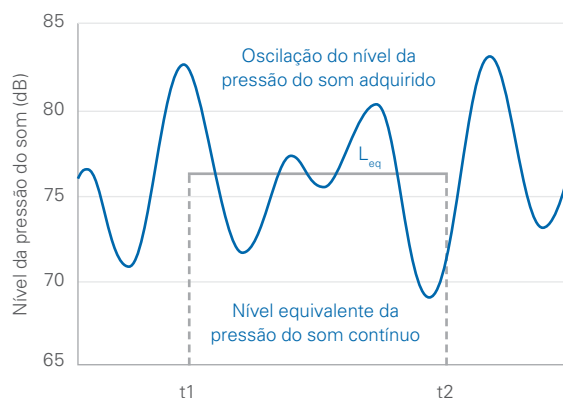


Figura 15. O Leq é usado para quantificar a exposição ao som no longo prazo em um determinado ambiente.

Média exponencial

A média exponencial é um processo de média contínua que pondera os dados atuais e antigo de modo diferente. O peso dos dados antigos em relação aos dados atuais depende da constante de tempo exponencial, que define a inclinação de uma janela de decaimento de forma exponencial.

O modo médio exponencial suporta as seguintes constantes de tempo padrão:

- **Lento:** Usa uma constante de tempo de 1,000 ms. A média lenta é útil para monitorar os níveis de pressão do som dos sinais com níveis de pressão do som que variam lentamente.
- **Rápido:** Usa uma constante de tempo de 125 ms. A média rápida é útil para monitorar os níveis de pressão do som dos sinais com níveis de pressão do som que variam rapidamente.
- **Impulso:** Usa uma constante de tempo bem rápida de 35 ms se o sinal estiver subindo, mas depois uma constante de tempo lento de 1,500 ms se o sinal estiver caindo. A média de impulso é útil para monitorar subidas repentinas no nível da pressão do som (durante um impacto ou uma pancada estrondosa) e gravar essas subidas para que você tenha um registro dessas variações.

Técnicas de análise no domínio da frequência

Transformada de Fourier

A análise de frequência é a mais comumente usada para analisar sinais de som e vibração. Um sinal discreto no domínio do tempo mostra como um sinal amostra por amostra ao longo do tempo. Qualquer forma de onda no domínio do tempo pode ser representada pela soma ponderada de senos e cossenos. Essa desconstrução de sinais complexos é a base da Transformada de Fourier e do processamento de sinais digitais. O espectro correspondente no domínio da frequência mostra o quanto as frequências diferentes contribuem para o sinal principal (figura 16). Isso é útil para a análise de sinais estáveis cujos componentes de frequência não se alteram ao longo do tempo.

ESPECTROS DE AMPLITUDE DE FREQUÊNCIA

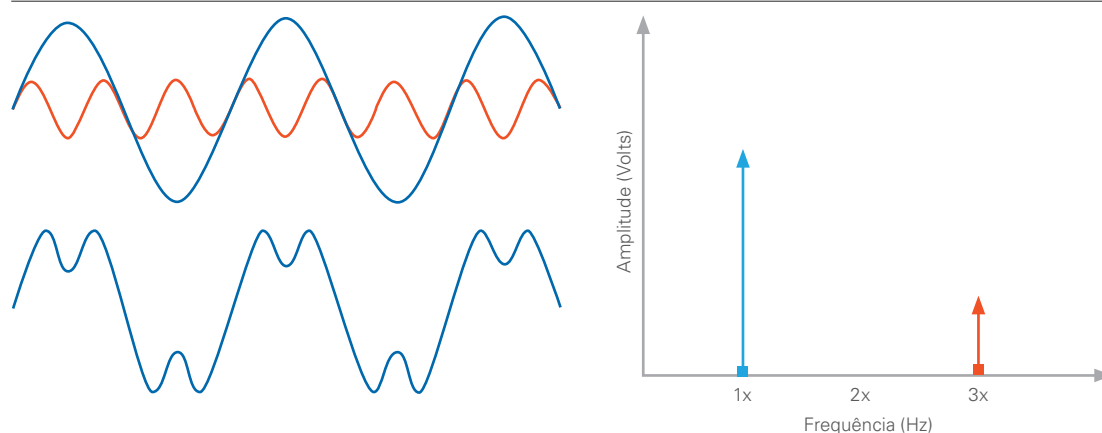


Figura 16. O espectro de frequência mostra diferentes amplitudes e frequências de componentes sinusoidais.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) soluciona a uma forma de onda de tempo contínuo em seus componentes sinusoidais. Como os dispositivos de medição amostram formas de onda e as transformam em valores distintos, você precisa usar a Transformada Discreta de Fourier (DFT) para operar os sinais usando um hardware digital. Esse algoritmo produz componentes no domínio da frequência em componentes ou valores diferentes. Uma das limitações da DFT é que ela presume que está operando um sinal periódico com um número inteiro de períodos. Adquirir exatamente um número inteiro de ciclos enquanto amostra um sinal é uma tarefa difícil. Quando o número de períodos não é um inteiro, as extremidades são descontínuas. Isso faz com que a energia em uma frequência vaze para outras frequências, conforme ilustrado na figura 17.

MEDIÇÃO DE PERÍODOS NÃO INTEIROS

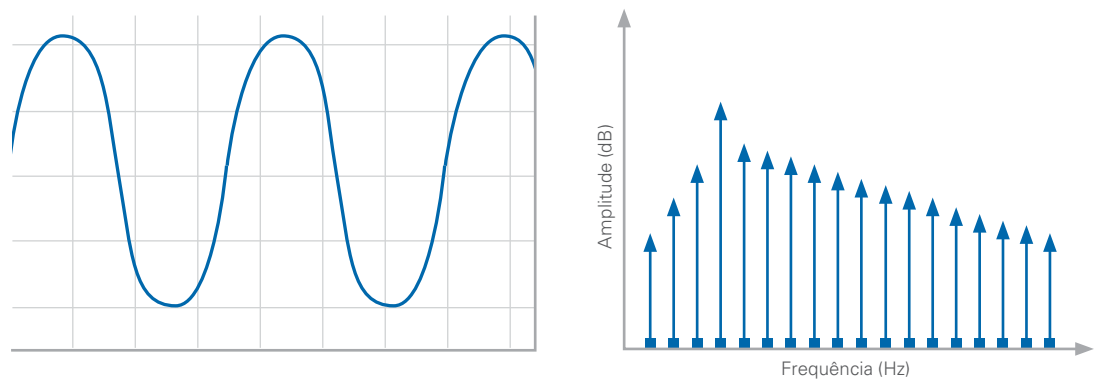


Figura 17. A medição de um número não inteiro resulta em fuga espectral no domínio da frequência.

Você pode minimizar os efeitos da fuga espectral usando uma técnica chamada windowing. Essa técnica consiste em multiplicar o registro de tempo por uma janela de comprimento finito com uma amplitude que varia regularmente e gradualmente em direção a zero nas margens. Isso faz com que as extremidades da forma de onda se encontrem e, portanto, resulta em uma forma de onda contínua sem transições bruscas.

MINIMIZANDO A FUGA ESPECTRAL

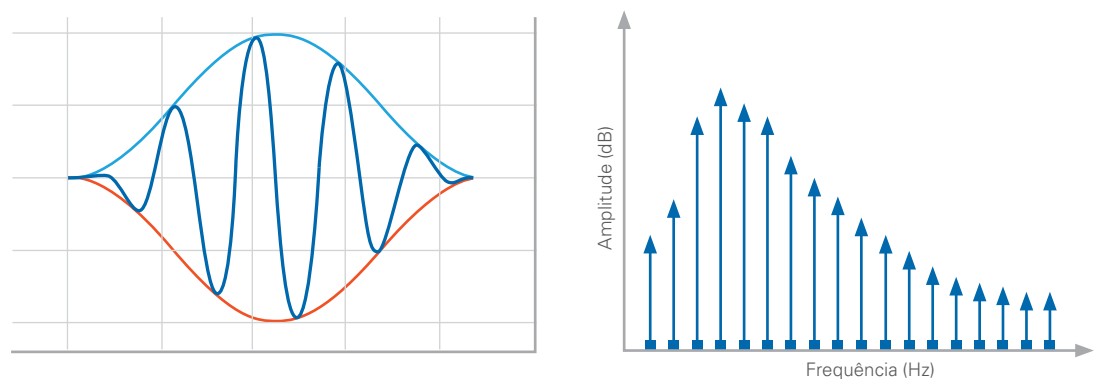


Figura 18. Colocar uma janela minimiza os efeitos da fuga espectral.

O tipo de janela utilizada depende do tipo de sinal que você está medindo. Em muitos casos, você pode não saber o suficiente sobre o sinal, então você precisará experimentar diferentes janelas para encontrar a melhor. No geral, a janela Hanning (Hann) é satisfatória para a maioria das aplicações. A janela Hann possui uma resolução de frequência melhor do que outras janelas e atinge zero em ambas as extremidades, o que elimina todas as descontinuidades. A tabela 3 apresenta tipos comuns de janela, os tipos de sinais apropriados e exemplos de aplicações.

Janela	Características	Tipos de sinais e aplicações
Retangular (sem janela)	Sinais transientes que são menores do que o comprimento da janela; trunca uma janela dentro de um intervalo de tempo finito.	Transientes de curta duração como impacto. Identificação de frequência estreitamente espaçadas com amplitudes quase iguais. Seguimento de ordem.
Hanning	Sinais transientes que são mais longos do que o comprimento da janela; formato sinusoidal com extremidades que atingem o zero.	Processamento geral em sinais estáveis. Onda senoidal ou uma combinação de ondas senoidais.
Hamming	Sinais transientes que são mais longos do que o comprimento da janela; uma versão modificada da janela Hanning que é descontínua nas margens.	Ondas senoidais estreitamente espaçadas.
Flat Top	A melhor exatidão de amplitude de todos os tipos de janela, mas limita a seletividade de frequência.	Medições de alta exatidão de amplitude de um tom sem componentes de frequência próximos. Tom dominante para o qual a amplitude é uma preocupação, como um desequilíbrio.

Tabela 3. Janelas e suas aplicações

Análise de ordem

Outra limitação da FFT é que ela não contém nenhuma informação de tempo. Muitas características mecânicas de máquinas rotativas ou alternativas, como motores, bombas, compressores e turbinas, mudam com a velocidade. Você pode observar algumas falhas mecânicas, como ressonância, apenas quando a velocidade rotacional se aproximar ou passar a velocidade crítica. No entanto, quando a velocidade rotacional muda, a largura de banda da frequência de cada harmônica fica mais ampla. Consequentemente, alguns componentes de frequência podem se sobrepor. O espectro de potência da FFT resultante não poderá mais ajudá-lo a identificar características de componentes de vibração, uma vez que nenhum pico aparente aparecerá no espectro.

Por outro lado, com a análise de ordem, você pode identificar os dados em várias ordens, ou harmônicas, da velocidade rotacional. A normalização da ordem é feita por meio da reamostragem dos dados no domínio regular (pontos por revoluções) em vez de no domínio do tempo (pontos por segundo). A primeira ordem se refere à velocidade na qual a máquina gira. Em seguida, cada ordem é um múltiplo correspondente da velocidade rotacional. A segunda ordem é duas vezes a velocidade rotacional, a terceira ordem é três vezes a velocidade rotacional e assim por diante. Com a análise de ordem, você pode, portanto, analisar as variações devido às mudanças na velocidade.

Por exemplo, a figura 19 usa um espectro de potência FFT para identificar a quantidade de componentes de frequência da vibração da ventoinha de um PC. Observe que o sinal de vibração geral da ventoinha do PC é a superposição da vibração a partir do eixo, bobinas e hélices. O eixo gira na mesma taxa que a velocidade rotacional da ventoinha do PC, ao passo que a velocidade rotacional da bobina e das hélices é quatro a sete vezes a velocidade da ventoinha do PC, respectivamente.

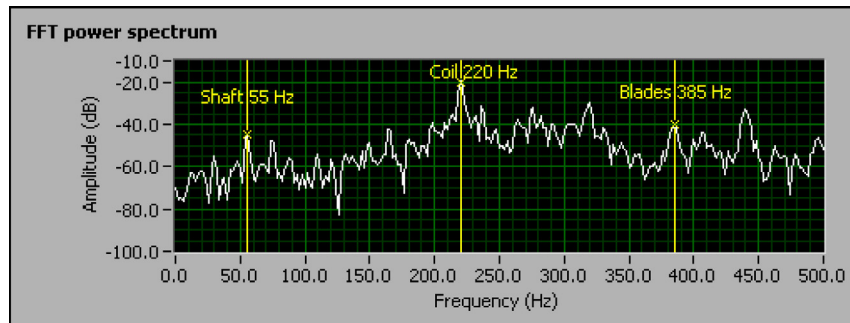


Figura 19. Componentes de frequência do sinal de vibração da ventoinha de um PC

A figura 20 mostra o espectro de potência FFT da ventoinha do PC quando a velocidade rotacional muda de 1.000 para 4.000 revoluções por minuto (rpm). Observe que você não pode identificar quaisquer picos aparentes associados a peças mecânicas específicas no gráfico do espectro de potência FFT.

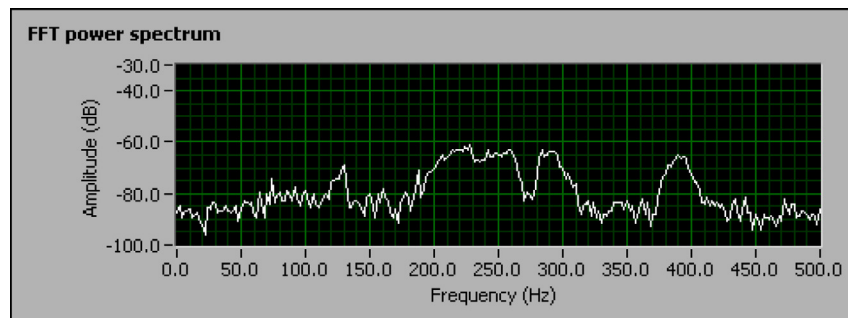


Figura 20. O espectro de potência FFT não mostra picos quando a velocidade rotacional da ventoinha muda.

No entanto, o gráfico do espectro de potência de ordem na figura 21 mostra picos claramente definidos associados a diferentes peças mecânicas. O pico na primeira ordem corresponde à vibração do eixo. O pico na quarta ordem corresponde à vibração das bobinas. E o pico na sétima ordem corresponde à vibração das hélices.



Figura 21. O espectro de potência de ordem identifica picos normalizando a velocidade rotacional.

Análise de oitavas para som

A análise de oitavas é uma técnica para analisar sinais acústicos e de áudio. Ela mede a energia espectral com filtros passa banda espaçados em escala logarítmica. A escala logarítmica enfatiza frequência baixas a médias, e o agrupamento de bandas de frequência simula melhor a audição humana ou como as pessoas percebem o som. Por exemplo, tipicamente, você não pode dizer a diferença entre 350 Hz e 351 Hz. A potência em cada banda é calculada e exibida em um gráfico de barras com uma escala logarítmica para o eixo x, conforme ilustrado na figura 22.

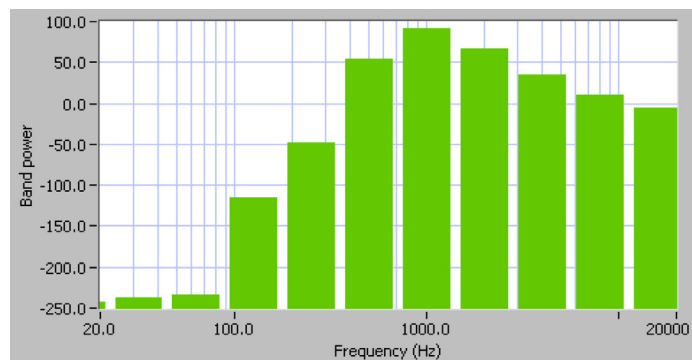


Figura 22. A análise de oitavas agrupa bandas de frequência em uma escala logarítmica para simular como os humanos percebem o som.

Uma oitava é o intervalo entre duas frequências, uma na qual é duas vezes o comprimento da outra. Por exemplo, as frequências de 250 Hz e 500 Hz são uma oitava afastada, uma vez que são frequência de 1 kHz e 2 kHz. A resolução do filtro de oitava é limitada porque a faixa 16 Hz–16 kHz tem apenas 11 oitavas. Para superar a resolução limitada dos filtros de oitava, você pode usar outros filtros conhecidos como filtros de oitava fracional. Em vez de cobrir uma oitava com um único filtro, os filtros N são aplicados em cada oitava para melhorar a resolução, conforme ilustrado na figura 23. Bandas fracionais típicas são 1/3 de oitava com três bandas por oitava, 1/12 de oitava com 12 bandas por oitava e 1/24 de oitava com 24 bandas por oitava. Os padrões ANSI e IEC definem as especificações para esses filtros de banda de oitava e de banda de oitava fracional.

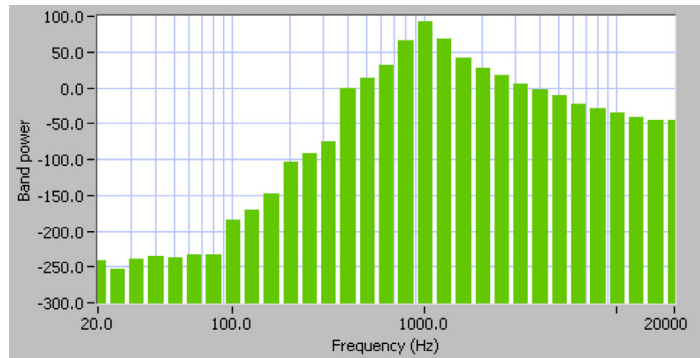


Figura 23. Os filtros de oitava fracional oferecem resolução mais alta.

Como depende bastante da filtragem digital, a análise de oitava fracional é uma operação de que exige alta capacidade de processamento. Aumentar a quantidade de filtros aplicados em um sinal aumenta as exigências em relação à CPU e pode resultar em mais tempo de processamento. No geral, a análise on-line de um terço de oitava requer aproximadamente 10 vezes mais de capacidade de processamento do que os cálculos espectrais FFT na mesma taxa de amostragem.

Outras análises e processamento de sinais

Esse guia abordou práticas básicas de processamento de sinais e condicionamento de sinais necessários para fazer medições de som e vibração com alta exatidão. A lista a seguir contém uma visão geral de algumas outras técnicas de análise que você pode desejar fazer. Consulte a documentação de seu software de medição para verificar se essas ou outras funções não listadas estão incluídas ou disponíveis em um pacote de análise separado.

- A Transformada de Fourier em curto tempo extrai o conteúdo de frequência a partir de sinais que mudam relativamente devagar ao longo do tempo.
- O espectro de resposta a choque mecânico caracteriza um ambiente dinâmico para ajudá-lo a estimar o potencial dano de um choque específico em um componente.
- A detecção de envelope extrai o sinal de modulação ou sinal de envelope a partir de um sinal modulado para identificar falhas mecânicas que têm um efeito de modulação de amplitude no sinal de vibração de uma máquina.
- Filtros acústicos ponderados refletem as não linearidades da audição humana ou medem o ruído de frequência de áudio em circuitos de comunicação de rádio ou telefone.
- A detecção de tom identifica o tom com máxima amplitude ou todos os tons com uma amplitude que excede um limite especificado.
- A análise de distorção identifica a distorção harmônica total (THD), THD e ruído e a relação sinal-ruído e distorção (SINAD).
- A varredura de uma geração e medição de onda senoidal caracteriza a resposta de frequência dinâmica de um dispositivo sob teste.

Conclusão

Veja cuidadosamente as especificações de seu acelerômetro ou microfone para escolher um dispositivo de medição que tenha a faixa dinâmica, o ganho, a taxa de amostragem e o nível de excitação apropriados para o seu sensor. Você também pode querer considerar a amostragem simultânea se você estiver correlacionando medições em canais diferentes e filtros antialiasing integrados para reduzir os efeitos de ruído de alta frequência. A avaliação de um software de medição com relação a técnicas de processamento de sinais, como média e windowing, pode ajudar o oferecer uma melhor representação da vibração ou fenômeno acústico que você estiver tentando medir.

[Explore sistemas de medição de som e vibração de alta exatidão usando o hardware NI.](#)

TEDS (Datasheet de transdutores eletrônicos)

Ao conectar um sensor ao seu sistema de medição, você precisa inserir manualmente parâmetros importantes do sensor, como a faixa, a sensibilidade e fatores de escala, para o software usar adequadamente os dados do sensor e da escala. Normalmente, você encontra essas especificações identificando o número do modelo e do fabricante do sensor e buscando as informações de que você precisa no datasheet correspondente. Você pode automatizar esse processo de configuração usando sensores inteligentes TEDS (Datasheet de transdutores eletrônicos), que contêm tudo o que você precisa saber para fazer uma medição. O software e a instrumentação compatíveis com TEDS podem ler esses dados para configurar a aquisição e aplicar fatores de escala.

O TEDS é implementado em um sensor de uma das duas formas a seguir: O TEDS pode ficar na memória embarcada, tipicamente uma EEPROM, no sensor propriamente dito ou no cabo. Ou um TEDS virtual pode atuar como um arquivo separado que pode ser baixado na internet. Um TEDS virtual é usado para armazenar dados de sensores antigos se a memória embarcada ou EEPROM não estiver disponível. Um TEDS virtual é também valioso em aplicações para as quais as condições operacionais do sensor evitam o uso de qualquer eletrônica, como EEPROMs, no sensor.

O padrão IEEE 1451.4 define o método para codificar a informação do TEDS para uma ampla variedade de tipos de sensores. No mínimo, um TEDS IEEE 1451.4 contém informações sobre o fabricante, o número do modelo e o número serial do transdutor. Geralmente, um TEDS também descreve os atributos importantes do sensor ou atuador, como faixa de medição, sensibilidade, coeficientes de temperatura e interface elétrica. A tabela 4 mostra um exemplo de um TEDS de uma célula de carga.

Para cobrir essa ampla variedade de sensores ao mesmo tempo que mantém pouco consumo dos recursos da memória, o padrão IEEE 1451.4 usa modelos que definem as propriedades específicas para diferentes tipos de sensores. Cada tipo de sensor, de amplificadores de carga a termistores, tem seu próprio modelo. Além desses 16 modelos padrão, os sensores podem ter um desses três possíveis modelos de calibração: tabela de calibração, curva (polinomial) de calibração e tabela de resposta de frequência. Para aumentar a exatidão da medição, o software e hardware compatível com TEDS pode usar a tabela look-up de calibração do sensor ou a tabela de ajustes de curva para oferecer uma melhor caracterização do sensor. Com consentimento prévio do fabricante, você pode armazenar até 128 pontos de calibração ou os coeficientes de um polinomial multiordenado segmentado.

TEDS básico	ID do fabricante	21
	ID do modelo	19
	Versão	D
	Número de série	8451
TEDS padrão e outros <i>(os campos variam de acordo com o tipo de transdutor)</i>	Data de calibração	10-Feb-14
	Faixa de medição	±100 lb
	Saída elétrica	±3 mV/V
	Impedância da ponte	350 Ω
	Excitação, nominal	10 VDC
	Excitação, mínima	7 VDC
	Excitação, máxima	18 VDC
Área do usuário	Tempo de resposta	333,3 μs
	Local do sensor	R32-1
	Cal. Record ID	543-0123

Tabela 4. Exemplo de TEDS de célula de carga

Como se conectar ao hardware de medição

O padrão IEEE 1451.4 define dois tipos de interfaces de modo de sinais mistos: Classe 1 de dois fios e Classe 2 com múltiplos fios. A interface Classe 1 de dois fios, ilustrada na figura 24, opera com transdutores alimentados por corrente constante, como acelerômetros. Os transdutores Classe 1 incluem comutadores analógicos ou diodo que você pode usar para multiplexar o sinal analógico com as informações do TEDS digital sobre o par de fios.

INTERFACE DE DOIS FIOS

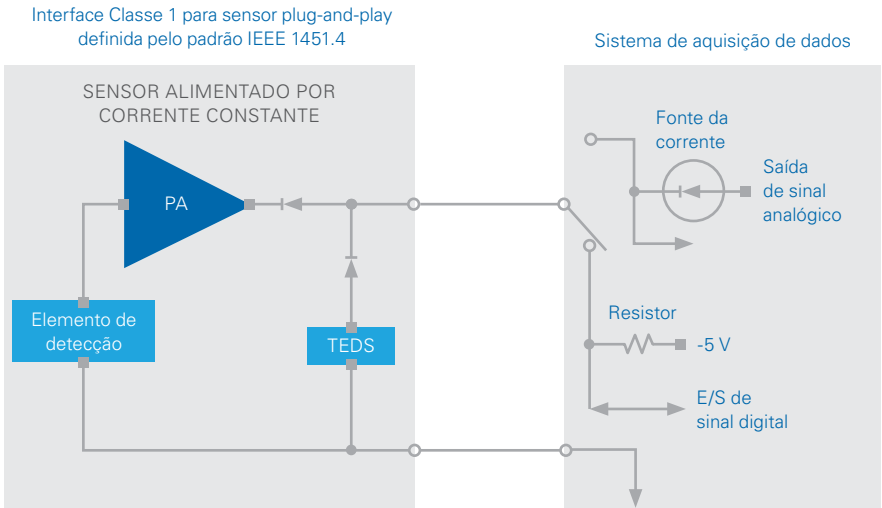


Figura 24. A interface Classe 1 com um a dois fios multiplexa dados digitais do TEDS e medição analógica.

A interface Classe 2 usa uma conexão separada para as partes analógicas e digitais da interface de modo de sinais mistos. A E/S analógica dos sensores fica inalterada e o circuito digital do TEDS é acrescentado em paralelo. Você pode implementar transdutores plug-and-play com praticamente qualquer tipo de sensor ou atuador, como termopares, RTDs, termistores, sensores de ponte, células químicas eletrolíticas e sensores de loop de corrente de 4–20 mA. A figura 25 ilustra a implementação de uma interface Classe 2 de modo de sinais mistos.

INTERFACE COM MÚLTIPLOS FIOS

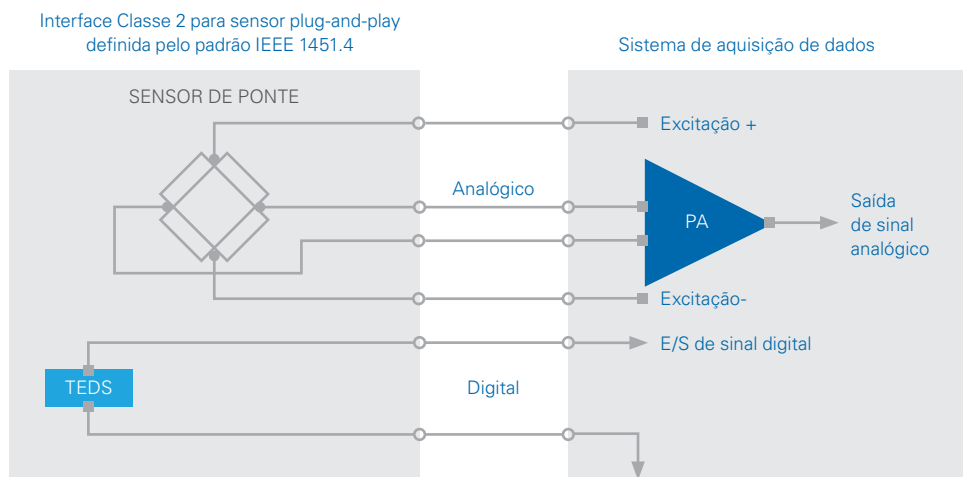


Figura 25. A interface Classe 2 de múltiplos fios permite a função plug-and-play.

Conclusão

A adoção do TEDS oferece poucos riscos porque a implementação dessa tecnologia não manipula ou modifica a saída analógica do sensor, de modo que ela permanece compatível com as interfaces analógicas tradicionais. Os recursos plug-and-play oferecidos com dispositivos e sensores TEDS reduzem o tempo de configuração eliminando a necessidade de verificar certificados de calibração e datasheets de vários fornecedores. Além disso, eles eliminam a possibilidade de erro pelo técnico ou engenheiro, que de outro modo teriam que configurar o sistema manualmente e possivelmente configurariam os parâmetros errados do sensor por engano.

Escolhendo um sistema de medição de sensores

Este guia revisou diversos requisitos para fazer medições de alta exatidão com sensores. Ao configurar o seu sistema de medição, comece com a fonte de seu sinal e considere qualquer condicionamento de sinais necessário para as características elétricas de seu sensor. Verifique se o seu instrumento oferece a faixa dinâmica, resolução, taxa de amostragem e faixa de entrada que melhor atende às necessidades de sua aplicação. Por fim, escolha o pacote (suite) de software que ajuda você a adquirir, dimensionar e analisar seus dados de medição com maior eficiência.

A NI oferece uma variedade de hardware de aquisição de dados, desde dispositivos de medição a sistemas modulares de alto desempenho. As plataformas PXI e CompactDAQ oferecem módulos multicanais com condicionamento de sinais integrado, como amplificação, filtragem, excitação e isolamento para conectividade direta e medições de alta exatidão com sensores. As E/Ss para sensores específicos ajudam a reduzir o custo total do sistema e a probabilidade de erro porque você não precisa criar e manter um circuito de condicionamento customizado. Além disso, você pode usar os drivers de hardware NI com software de aplicação como o LabVIEW para dimensionar seus dados em unidades desejadas e fazer análise usando funções integradas de processamento de sinais.

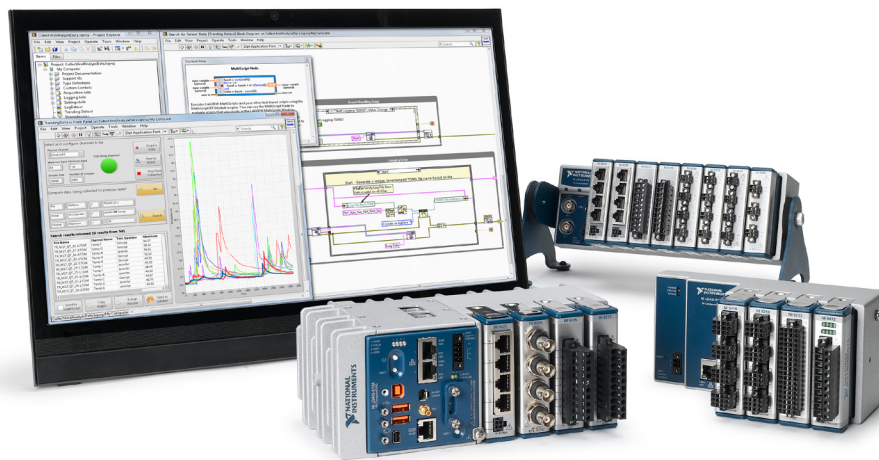


Figura 26: O hardware CompactDAQ oferece conectividade direta ao sensor em formatos USB, Ethernet, Wi-Fi e autônomos.