



Universidade Federal de Campina Grande
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
Instrumentação Eletrônica 2024.1

Prof. Jaidilson Jó da Silva

**ESTUDO DIRIGIDO: SENSORES, ATUADORES E
APLICAÇÕES**

GUSTAVO BORBUREMA RAMOS MEDEIROS
JOSÉ ROBERTO DO NASCIMENTO ARCANJO
LUCAS RODRIGUES ALBINO
ROGÉRIO MOREIRA ALMEIDA
THIAGO HENRIQUE DE OLIVEIRA SILVA

Campina Grande - PB
2024

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	1
2	MEDIDORES DE VIBRAÇÃO	2
2.1	Fundamentação Teórica	2
2.2	Funcionamento do Sensor de Vibração	2
2.3	Aplicações Práticas	4
2.3.1	Monitoramento de Máquinas: Manutenção Preditiva e Análise de Falhas	4
2.3.2	Controle de Qualidade: Vibração em Processos de Manufatura	5
3	MEDIDOR DE DEFORMAÇÃO	6
3.1	Fundamentos Teóricos	6
3.2	Funcionamento do Sensor de Deformação	6
3.3	Tipos de Extensômetros e Suas Aplicações	6
3.4	Aplicações Práticas	8
3.4.1	Testes Estruturais: Engenharia Civil e Aeroespacial	8
3.4.2	Ensaios de Materiais: Determinação de Propriedades Mecânicas	8
4	SENSORES: MEDIÇÃO DE POSIÇÃO E PROXIMIDADE	10
4.1	Sensores de Posição	10
4.1.1	Potenciômetros	10
4.1.2	LVDT	11
4.1.3	Encoders	11
4.2	Sensores de Proximidade	12
4.2.1	Sensores Ultrassônicos	12
4.2.2	Sensores Infravermelhos	13
4.2.3	Sensores Indutivos e Capacitivos	13
5	SENSORES: MEDIÇÃO DE PRESSÃO E VAZÃO	14
5.1	Sensores de Pressão	14
5.1.1	Sensores de Pressão Absoluta	14
5.1.2	Sensores de Pressão Manométrica	15
5.1.3	Sensores de Pressão Diferencial	16
5.2	Sensores de Vazão	17
5.2.1	Medidores de Vazão de Deslocamento Positivo	17
5.2.2	Medidores de Vazão Eletromagnéticos	18
5.2.3	Medidores de Vazão Coriolis	19
5.2.4	Medidores de Vazão Térmicos	20
6	SENSORES: MEDIÇÃO DE NÍVEL E TEMPERATURA	22
6.1	Fundamentação teórica	22
6.1.1	Sensores de nível	22
6.1.2	Aplicações	26
6.1.3	Sensores de temperatura	26
6.1.4	Aplicações	29
7	ATUADORES	30
7.1	Fundamentação teórica	30
7.1.1	Classificação	30

7.2	Aplicações	31
7.2.1	Motores e inversor de frequência	31
7.2.2	Válvulas eletrônicas	32
7.2.3	Atuadores Pneumáticos e Hidráulicos	33
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35

1 Introdução

A medição e o controle de grandezas físicas são processos essenciais para a operação contínua e eficiente de sistemas em diversos ambientes, incluindo indústrias, residências, automóveis, entre outros. O avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de uma ampla gama de instrumentos e transdutores, que, quando combinados, formam sistemas de instrumentação. Estes sistemas podem ser classificados em malha aberta ou fechada, sendo que a malha fechada se caracteriza pela presença de atuadores, responsáveis por ajustar as grandezas físicas com base em sinais provenientes do sistema de medição.

Diversos transdutores foram desenvolvidos para medir grandezas físicas como temperatura, pressão, aceleração, vibração e parâmetros elétricos. Por exemplo, sensores que utilizam a relação entre variações de alongamento ou compressão em uma superfície e sua resistência elétrica são empregados para medir deformações.

Segundo A. S. Morris e R. Langar [1], os instrumentos de medição possuem características distintas, como precisão, custo e aplicabilidade, que exigem uma classificação cuidadosa.

Os transdutores podem ser classificados em passivos ou ativos com base na origem da energia que utilizam. Transdutores passivos obtêm toda a energia do meio em que estão inseridos, enquanto transdutores ativos recebem energia de uma fonte externa, total ou parcialmente. Além disso, os instrumentos podem ser analógicos ou digitais, dependendo do tipo de sinal que produzem. A linearidade dos instrumentos é outra característica crucial, pois garante a proporcionalidade nas leituras das grandezas.

Este trabalho visa analisar diferentes tipos de sensores e atuadores, avaliando suas aplicações e os princípios físicos associados a cada dispositivo. Serão discutidos como esses dispositivos se adaptam a diversas aplicações e o papel fundamental dos atuadores nos sistemas modernos, especialmente no contexto da Indústria 4.0.

Além disso, será abordada a importância da eletrônica moderna no desenvolvimento de instrumentos para uma ampla gama de aplicações, ressaltando a necessidade de escolhas adequadas em termos de custo e segurança diante da vasta variedade de dispositivos disponíveis no mercado.

2 Medidores de Vibração

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A vibração é o movimento ou oscilação mecânica em torno de uma posição de equilíbrio, comumente observada em máquinas e componentes mecânicos. Em engenharia, as vibrações podem ser classificadas em dois tipos principais: periódicas e aleatórias. Vibrações periódicas repetem-se de maneira regular ao longo do tempo, enquanto as aleatórias não seguem um padrão específico.

A vibração pode ser expressa em diferentes unidades, dependendo da aplicação e do tipo de análise. As unidades métricas (m/s^2) são frequentemente usadas para medir aceleração, enquanto a constante gravitacional “g” (onde $g = 9,81 m/s^2$) é comum em contextos de engenharia para descrever a aceleração em relação à gravidade terrestre.

Essas vibrações podem ser categorizadas de acordo com a natureza do movimento:

- **Livre:** Ocorre devido a uma perturbação inicial, mas não persiste durante todo o movimento. Um exemplo típico é o movimento de um pêndulo que, após ser deslocado, oscila até parar.
- **Forçada:** Resulta de uma força externa contínua que mantém a vibração ao longo do tempo, como a vibração causada por um motor desequilibrado.
- **Amortecida:** A energia vibratória dissipase ao longo do tempo, resultando em uma diminuição gradual da intensidade da vibração. Amortecimento é crucial em muitas aplicações para prevenir danos por vibração excessiva.
- **Não Amortecida:** Neste caso, a energia vibratória não se dissipase, mantendo o movimento vibratório constante. Isso pode ocorrer em sistemas com pouca ou nenhuma resistência interna ao movimento.

Em aplicações industriais, as vibrações podem ter um impacto significativo na integridade de máquinas e estruturas. Vibrações não naturais ou excessivas, especialmente em máquinas rotativas como turbinas, compressores e bombas, podem levar ao desgaste prematuro, falhas catastróficas e interrupções dispendiosas na operação. Portanto, o monitoramento e a medição das vibrações são essenciais para prever falhas e programar manutenções preventivas, garantindo maior segurança operacional e redução de custos.

2.2 FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE VIBRAÇÃO

Os sensores de vibração são dispositivos essenciais para o monitoramento da condição de máquinas e estruturas. Diversos tipos de sensores são empregados para detectar e medir vibrações, cada um adequado para diferentes aplicações e condições ambientais.

Um dos tipos mais comuns de sensores de vibração é o acelerômetro. Este dispositivo é um transdutor que converte a aceleração do movimento em um sinal elétrico. A maioria dos acelerômetros funciona com base no efeito piezoeletrico, onde a aceleração aplicada a um cristal piezoeletrico gera uma carga elétrica proporcional à força aplicada. Essa carga elétrica é

então amplificada e processada para fornecer uma medida precisa da vibração. Acelerômetros piezoelétricos são valorizados por sua linearidade em uma ampla faixa de frequências e por sua capacidade de medir vibrações com alta precisão em ambientes dinâmicos. A figura 1 mostra um tipo de acelerômetro piezoelétrico.

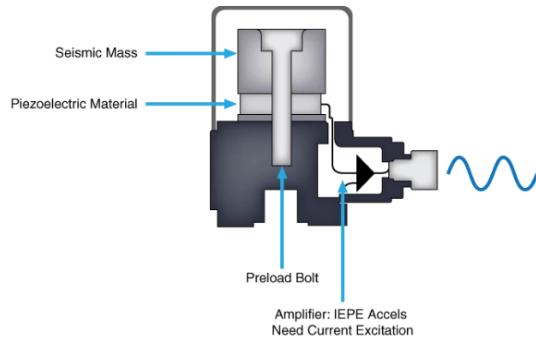


Figura 1: Sinais de tensão de saída dos acelerômetros IPEPE proporcionais à força da vibração no cristal piezoelétrico. <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-vibration-with-accelerometers.html>

Além dos acelerômetros, existem sensores piezoelétricos cerâmicos e sondas de proximidade. As sondas de proximidade, por exemplo, são utilizadas para medir a vibração sem contato direto com o objeto. Esse tipo de sensor é particularmente útil em sistemas rotativos, como eixos e mancais, onde o contato direto poderia interferir na operação ou causar desgaste.

Cada tipo de sensor tem suas próprias vantagens e é escolhido com base em vários fatores, como:

- **Amplitude da vibração:** A faixa de intensidade das vibrações que o sensor pode medir sem saturar ou perder precisão.
- **Sensibilidade:** A capacidade do sensor de detectar pequenas variações na vibração.
- **Quantidade de eixos:** Sensores podem medir vibrações em um, dois ou três eixos, dependendo da complexidade da análise requerida.
- **Restrições ambientais:** Como temperatura, umidade e exposição a substâncias corrosivas que podem afetar o desempenho do sensor.
- **Custo e Peso:** Em aplicações como veículos aéreos não tripulados (VANTs), o peso do sensor é crítico, pois sensores mais pesados podem afetar a performance do veículo.

Em aplicações que envolvem a medição de vibrações em sistemas críticos, como turbinas e compressores, a escolha do sensor certo pode prevenir falhas graves e otimizar a manutenção preventiva. Por outro lado, em sistemas onde o contato físico com o objeto a ser medido é indesejável, como em rolamentos de alta velocidade, as sondas de proximidade oferecem uma solução sem contato. Nas figuras abaixo estão representados alguns sensores de vibração.



Figura 2: Exemplo de sensores de vibração. <https://www.makerhero.com/produto/sensor-de-vibracao-sw-420/>

Os sensores de vibração têm uma ampla gama de aplicações na indústria. Uma das mais importantes é o monitoramento preditivo de máquinas. Sensores de vibração são instalados em motores, compressores, bombas e outras máquinas críticas para monitorar continuamente os níveis de vibração. Quando a vibração excede os limites normais, isso pode indicar um problema iminente, como desalinhamento, desgaste de rolamentos ou desbalanceamento. Detectar esses problemas precocemente permite que a manutenção seja planejada e realizada antes que ocorra uma falha catastrófica, evitando paradas não planejadas e reduzindo os custos de manutenção.

Além do monitoramento de máquinas, sensores de vibração também são utilizados em:

- **Preservação de rolamentos em turbinas:** Onde vibrações excessivas podem indicar problemas que, se não resolvidos, podem levar à falha do sistema.
- **Alarmes residenciais:** Onde sensores de vibração detectam tentativas de intrusão, como a quebra de janelas ou portas, acionando alarmes de segurança.
- **Automatização de processos industriais:** Em combinação com unidades de regulação, os sensores de vibração podem ajudar a automatizar o controle de máquinas, acelerando a produção e evitando avarias causadas por vibrações excessivas.

A integração de sensores de vibração em sistemas automatizados não só aumenta a eficiência operacional, mas também contribui para a longevidade das máquinas, reduzindo custos associados a paradas e reparos.

2.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS

Os medidores de vibração desempenham um papel crucial em várias aplicações práticas, especialmente no monitoramento de máquinas e no controle de qualidade em processos de manufatura. Nessas áreas, a medição precisa das vibrações permite a detecção precoce de problemas, a manutenção preditiva e a garantia da qualidade do produto final.

2.3.1 Monitoramento de Máquinas: Manutenção Preditiva e Análise de Falhas

No contexto industrial, o monitoramento de máquinas é essencial para a manutenção preditiva, uma abordagem que visa prever falhas antes que elas ocorram, minimizando o tempo de inatividade e os custos de reparo. A análise de vibração é uma das técnicas mais eficazes para esse tipo de monitoramento, pois muitas falhas mecânicas, como desalinhamento, desequilíbrio, desgaste de rolamentos e problemas de lubrificação, manifestam-se inicialmente como mudanças nas características vibracionais da máquina.

- **Manutenção Preditiva:** A manutenção preditiva baseada em análise de vibração permite que os técnicos identifiquem sinais precoces de desgaste ou falha potencial em componentes críticos de máquinas, como motores, bombas e compressores. Segundo Silva (2020), a análise de vibração pode detectar anomalias em estágios iniciais, possibilitando intervenções planejadas antes que o problema cause uma parada inesperada. Por exemplo, um aumento súbito na amplitude de vibração de um rolamento pode indicar desgaste ou falta de lubrificação, permitindo que a manutenção seja realizada antes que o rolamento falhe completamente.
- **Analise de Falhas:** Além de prevenir falhas, a análise de vibração também é utilizada para investigar e diagnosticar a causa raiz de falhas após sua ocorrência. De acordo com Santos (2019), a análise detalhada do espectro de vibração pode revelar informações sobre a natureza e a localização de falhas mecânicas, como rachaduras em eixos, problemas de acoplamento e folgas excessivas. Essa análise é fundamental para melhorar a confiabilidade e a eficiência das máquinas, orientando as ações corretivas de forma precisa e eficaz.

2.3.2 *Controle de Qualidade: Vibração em Processos de Manufatura*

O controle de qualidade em processos de manufatura é outra área onde a medição de vibração desempenha um papel vital. A qualidade de muitos produtos depende diretamente da precisão das máquinas e ferramentas utilizadas no processo de fabricação, e as vibrações excessivas podem comprometer essa precisão.

- **Garantia da Qualidade do Produto Final:** Em processos de manufatura, como a usinagem de precisão, as vibrações indesejadas podem levar a imperfeições no acabamento da superfície e a desvios nas dimensões especificadas, comprometendo a qualidade do produto final. Conforme discutido por Almeida e Rodrigues (2021), o monitoramento contínuo das vibrações em máquinas-ferramentas permite ajustes imediatos no processo, garantindo que as tolerâncias rigorosas sejam mantidas. Por exemplo, em operações de fresamento, a vibração excessiva da ferramenta pode causar marcas indesejadas na superfície da peça, exigindo retrabalho ou resultando em produtos rejeitados.
- **Detecção de Defeitos em Tempo Real:** O controle de vibração também é utilizado para a detecção em tempo real de defeitos durante o processo de manufatura. Sensores de vibração podem ser instalados em máquinas para monitorar as condições operacionais e identificar irregularidades que possam indicar problemas como desgaste de ferramentas ou desalinhamento de componentes. Oliveira (2018) observa que o uso de sensores de vibração em sistemas de controle de qualidade automatizados permite uma resposta rápida a condições anômalas, melhorando a eficiência do processo e reduzindo o desperdício de material.

3 Medidor de Deformação

3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O medidor de deformação, também conhecido como extensômetro ou *strain gauge*, é um dispositivo resistivo utilizado para medir deformações em uma superfície submetida a cargas externas. Este sensor é essencial em diversas áreas da engenharia, pois permite a medição precisa de variações de tensão, força, pressão, peso, entre outros, ao converter essas grandezas em alterações na resistência elétrica. A resistência do sensor varia conforme a força aplicada, proporcionando dados críticos sobre a deformação sofrida pela estrutura.

3.2 FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE DEFORMAÇÃO

Quando uma força externa é aplicada a um objeto, ela induz estresse (tensão interna) e deformação (deslocamento físico). O estresse refere-se às forças internas que resistem à deformação, enquanto a deformação é o deslocamento ou mudança na forma da superfície. Os medidores de deformação são projetados para detectar essas pequenas variações na superfície do material ao qual estão acoplados.

O fio resistivo, componente central do sensor, muda sua resistência elétrica em resposta ao alongamento ou compressão da superfície. Essa variação é captada como um sinal elétrico, que é interpretado por um sistema de aquisição de dados, convertendo-o em uma medida de deformação. Essa deformação pode ser traduzida em valores de tensão mecânica, permitindo a análise detalhada das condições operacionais de equipamentos e estruturas.

Os extensômetros são geralmente colados diretamente à superfície do material em estudo. Para garantir a precisão da medição, a superfície deve estar completamente limpa e livre de qualquer contaminação, como tinta ou oxidação. Em particular, o sensor de deformação metálico tipo película consiste em um fio resistor colado à superfície do material através de uma fina camada de resina epóxi. Quando a superfície é submetida a uma carga, a deformação resultante é transmitida ao resistor, cuja resistência elétrica varia de forma linear com a deformação. O diafragma da película, juntamente com o adesivo, desempenha um papel crucial tanto na transmissão da deformação quanto no isolamento elétrico entre a grade da película e a superfície do material.

3.3 TIPOS DE EXTENSÔMETROS E SUAS APLICAÇÕES

A escolha do tipo de extensômetro a ser utilizado depende da aplicação específica. Existem dois tipos principais de extensômetros: uniaxial e roseta.

- **Extensômetro Uniaxial:** É projetado para medir deformações em uma única direção. A instalação deste sensor deve ser cuidadosamente alinhada com a direção longitudinal do material para garantir que ele capture a deformação diretamente na direção da aplicação da carga.

- **Extensômetro Roseta:** Este sensor é capaz de medir deformações em três direções diferentes. Sua instalação é mais versátil, pois a orientação do sensor pode ser em qualquer direção. Após a coleta dos dados, é possível calcular as tensões principais e determinar suas direções.

Esses sensores têm ampla aplicação em diversas indústrias, desde a análise estrutural até o monitoramento de desempenho de máquinas e equipamentos. Esses exemplos podem ser observados na figura abaixo.

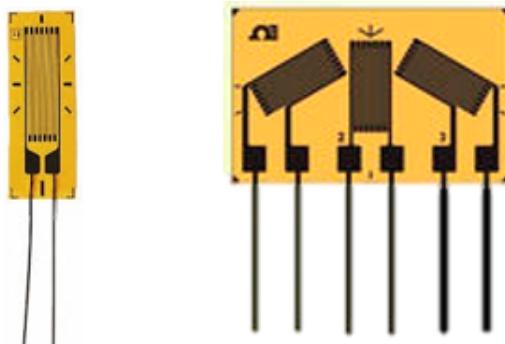


Figura 3: Exemplo de sensor de deformação do tipo uniaxial e roseta, respectivamente.
<https://www.hbm.com/pt>

Empresas especializadas, como a brasileira Omega, oferecem a possibilidade de personalizar os sensores de deformação conforme as especificações do cliente, garantindo que o sensor atenda às necessidades específicas de cada aplicação. A empresa HBM também é renomada na produção de sensores de deformação para aplicações variadas, incluindo aquelas que requerem soluções muito específicas. Um exemplo notável é o sensor RF9 da HBM, projetado para medir a deformação em placas de circuito impresso (*PCB*). Este tipo de sensor é essencial para garantir a integridade e a funcionalidade de componentes eletrônicos em ambientes críticos. Este sensor pode ser observado na figura a seguir.



Figura 4: Exemplo de sensor de deformação tipo RF9 da HBM utilizado em PCBs.
<https://www.hbm.com/pt>

Assim, os medidores de deformação são ferramentas indispensáveis para a engenharia moderna, proporcionando medições precisas que são fundamentais para a segurança e a eficiência

operacional de diversos sistemas. A capacidade de personalização desses sensores permite que sejam adaptados a uma ampla gama de aplicações, desde estudos laboratoriais até monitoramento em campo, garantindo a confiabilidade e a precisão dos dados coletados. A evolução contínua na tecnologia dos extensômetros amplia cada vez mais o leque de aplicações e a precisão das medições, contribuindo significativamente para o avanço da engenharia e das ciências aplicadas.

3.4 APLICAÇÕES PRÁTICAS

Os medidores de deformação são instrumentos fundamentais em diversas áreas da engenharia, desempenhando um papel crucial no monitoramento de tensões e deformações em estruturas, bem como em ensaios de materiais. Essas aplicações são essenciais para garantir a segurança, a integridade estrutural e a otimização do desempenho de materiais e sistemas.

3.4.1 *Testes Estruturais: Engenharia Civil e Aeroespacial*

No campo da engenharia civil e aeroespacial, os medidores de deformação são amplamente utilizados para monitorar as tensões e deformações em estruturas críticas, como pontes, edifícios, aeronaves e espaçonaves. Esses testes estruturais são essenciais para avaliar o comportamento das estruturas sob cargas reais e para identificar potenciais problemas antes que se tornem críticos.

- **Engenharia Civil:** Na engenharia civil, os medidores de deformação, especialmente os extensômetros resistivos e ópticos, são frequentemente instalados em estruturas como pontes e edifícios para monitorar as deformações causadas por cargas dinâmicas e estáticas. De acordo com Silva e Pereira (2020), esse monitoramento é vital para detectar deformações excessivas que possam indicar falhas estruturais iminentes, permitindo a intervenção preventiva. Por exemplo, em uma ponte, a medição contínua das deformações sob tráfego pesado pode revelar a necessidade de reforço estrutural ou manutenção antes que ocorram danos severos.
- **Engenharia Aeroespacial:** No setor aeroespacial, os testes estruturais com medidores de deformação são realizados em aeronaves e espaçonaves para garantir que esses veículos possam suportar as extremas condições de operação, como mudanças bruscas de pressão, vibração e temperatura. Santos (2019) observa que os extensômetros ópticos são particularmente valorizados na indústria aeroespacial devido à sua leveza, precisão e resistência a ambientes adversos. Esses sensores são aplicados em testes de fadiga, onde a medição de pequenas deformações em componentes críticos, como asas e fuselagens, é essencial para prever a vida útil dos materiais e evitar falhas catastróficas.

3.4.2 *Ensaio de Materiais: Determinação de Propriedades Mecânicas*

Os medidores de deformação são também amplamente utilizados em ensaios de materiais, onde são fundamentais para a determinação das propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade, limite de escoamento, resistência à tração e à compressão, e comportamento sob fadiga.

- **Aplicação em Ensaio de Tração:** Em ensaios de tração, os extensômetros resistivos são frequentemente utilizados para medir a deformação longitudinal de uma amostra à medida

que ela é submetida a uma carga crescente. Essa medição é crucial para traçar a curva tensão-deformação do material, que fornece informações detalhadas sobre suas propriedades elásticas e plásticas. Esses ensaios são essenciais para a caracterização de materiais utilizados em aplicações onde a resistência à tração é crítica, como em cabos de aço e componentes estruturais.

- **Ensaios de Fadiga:** Outro importante campo de aplicação dos medidores de deformação é nos ensaios de fadiga, onde os materiais são submetidos a ciclos repetidos de carga para determinar sua durabilidade ao longo do tempo. Segundo Oliveira e Martins (2021), os extensômetros ópticos são particularmente eficazes nesses ensaios, permitindo a detecção de microdeformações que precedem a nucleação de trincas e a eventual falha do material. Esses ensaios são fundamentais na indústria automotiva e aeroespacial, onde a segurança e a longevidade dos componentes são de extrema importância.

4 Sensores: medição de posição e proximidade

A medição de posição pode ser abordada em duas vertentes: linear e angular. A posição linear é a distância entre dois pontos no espaço, enquanto a posição angular é o ângulo formado entre um corpo e uma reta de referência. A proximidade, muitas vezes, é tratada como sinônimo de posição.

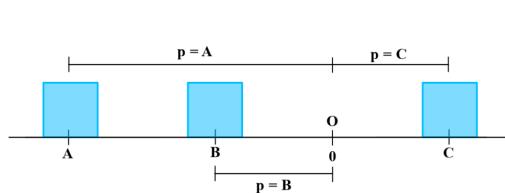


Figura 5: Potenciômetro Rotativo

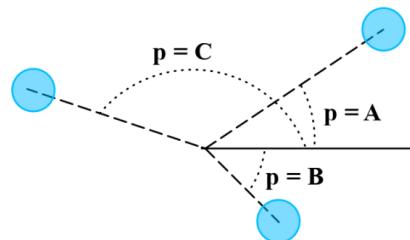


Figura 6: Potenciômetro Deslizante

O conceito de posição angular é definido como um arco de trajetória que comumente é representado por um ângulo. De forma prática, a posição angular se refere ao ângulo que o segmento de reta que liga o corpo à origem faz com uma reta definida como referência.

4.1 SENSORES DE POSIÇÃO

4.1.1 Potenciômetros

Potenciômetros são sensores resistivos que variam sua resistência de acordo com a posição de um cursor. Existem dois tipos principais: rotativos, que medem a posição angular, e deslizantes, que medem a posição linear. A variação da resistência pode ser linear ou logarítmica, sendo possível utilizar um potenciômetro para criar um sensor de posição que gere uma tensão de saída proporcional à posição.

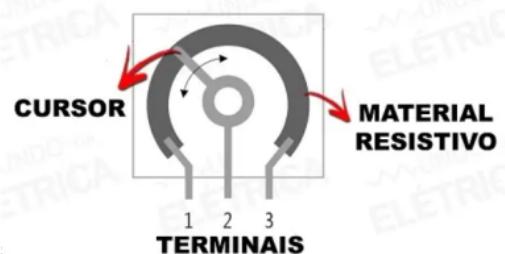


Figura 7: Potenciômetro Rotativo

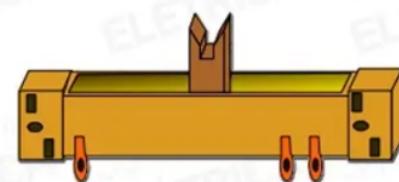


Figura 8: Potenciômetro Deslizante

Como a resistência do potenciômetro varia com a posição (angular ou linear) do cursor, então é possível utilizá-lo como sensor para mensurar essa grandeza.

4.1.2 LVDT

O Transdutor de Deslocamento Variável Linear (LVDT) converte movimento linear em sinais elétricos. Consiste em um cilindro oco com uma haste móvel no interior, conectada a um núcleo magneticamente condutor. A posição do núcleo é convertida em um sinal elétrico utilizando o princípio da indução eletromagnética. Um LVDT requer um oscilador e um demodulador para seu funcionamento, sendo amplamente utilizado em diversas aplicações industriais.

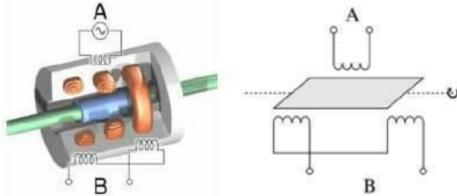


Figura 9: Transdutor de deslocamento variável linear (LVDT)



Figura 10: Estrutura de um LVDT

O LVDT converte a posição da haste em um sinal elétrico, o que o faz ter aplicações como sensor de posição quando o corpo, que se deseja medir a posição, é anexado à haste. Essa conversão é feita com o mesmo princípio de um transformador, ou seja, com o princípio da indução eletromagnética

4.1.3 Encoders

Os encoders são dispositivos que convertem a posição linear ou angular em pulsos elétricos, frequentemente utilizados para medir rotações por minuto (RPM) de motores. Existem dois tipos principais de encoders: absolutos e incrementais. Os encoders absolutos atribuem um código binário único a cada posição, enquanto os encoders incrementais geram pulsos para diferentes posições, permitindo a contagem de deslocamentos.

A tecnologia de detecção em encoders pode ser óptica ou magnética, e suas aplicações abrangem automação e controle de precisão. Os encoders são compostos por emissores, eixos, máscaras e receptores. O eixo é fixado no componente cuja posição se deseja medir, e a máscara controla a passagem do sinal do emissor para o receptor, permitindo a detecção precisa da posição.



Figura 11: Imagem de um encoder comercial

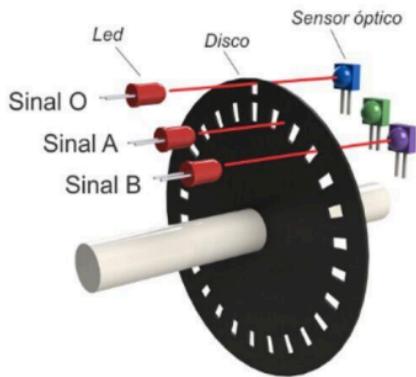


Figura 12: Imagem ilustrativa de um encoder

4.2 SENSORES DE PROXIMIDADE

4.2.1 Sensores Ultrassônicos

Sensores ultrassônicos utilizam ondas sonoras de alta frequência para medir a distância até um objeto. A distância é calculada com base no tempo que a onda leva para retornar após refletir no objeto. Esses sensores são amplamente utilizados em sistemas de detecção de obstáculos e medição de proximidade sem contato físico.

Esses sensores operam com ondas ultrassônicas, que são ondas sonoras em frequências superiores ao limite da audição humana. A partir da emissão e recepção dessas ondas, é possível determinar a posição de objetos.

O princípio físico que sustenta o funcionamento dos sensores ultrassônicos é a reflexão de ondas sonoras. A reflexão ocorre quando uma onda emitida encontra uma superfície e retorna ao meio original. No caso dos sensores de proximidade ultrassônicos, uma onda sonora de alta frequência é emitida, colide com o objeto a ser medido e reflete de volta para o sensor. Este sensor, que também atua como receptor, calcula a distância com base no tempo de retorno da onda refletida.



Figura 13: Sensores Ultrassônicos

4.2.2 Sensores Infravermelhos

Esses sensores operam de maneira semelhante aos sensores ultrassônicos, mas utilizam ondas eletromagnéticas no espectro do infravermelho. Eles são compostos por um emissor e um receptor, que detectam a proximidade com base na intensidade da onda refletida.

Assim como os sensores ultrassônicos, os sensores infravermelhos funcionam com base no princípio de reflexão de ondas. No entanto, ao invés de ondas sonoras, eles emitem uma onda eletromagnética no espectro do infravermelho, que é invisível ao olho humano.

O emissor desses sensores é semelhante a um LED convencional, geralmente com uma cobertura transparente. Quando uma tensão é aplicada aos terminais do emissor, ele emite uma onda infravermelha.



Figura 14: Sensores de Proximidade Infravermelhos

4.2.3 Sensores Indutivos e Capacitivos

Sensores indutivos detectam a presença de materiais metálicos por meio da indução de correntes parasitas em um campo magnético variável. Esses sensores são compostos por um núcleo de ferrite, uma bobina, um circuito oscilador e um circuito disparador. O princípio de funcionamento dos sensores indutivos baseia-se na indução eletromagnética.

O circuito oscilador e a bobina geram um campo magnético variável na face do sensor. Quando um objeto metálico entra nesse campo, ele induz correntes parasitas no metal, alterando o comportamento do campo magnético e acionando o circuito disparador do sensor.

Por outro lado, sensores capacitivos medem a variação de capacitância provocada pela aproximação de um objeto. Eles são capazes de detectar materiais não metálicos, como vidro, madeira e plástico, ampliando seu uso em diversas aplicações onde a detecção de materiais não metálicos é necessária.

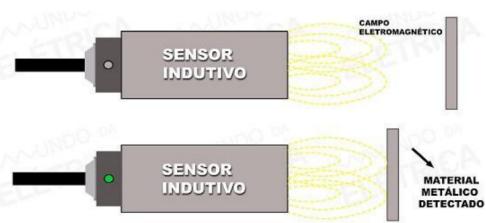


Figura 15: Funcionamento de um Sensor Indutivo

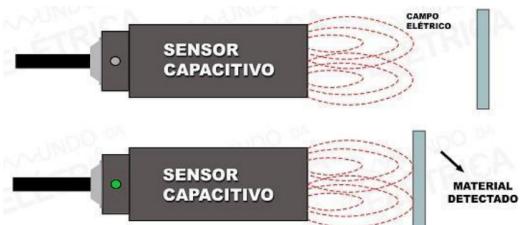


Figura 16: Funcionamento de um Sensor Capacitivo

5 Sensores: medição de pressão e vazão

Esses sensores são essenciais para monitoramento de diversos processos industriais. Os dados fornecidos por esses garantem, a segurança e a qualidade dos processos de modo que utilização desse tornam os meios de produção mais seguros e eficientes.

5.1 SENSORES DE PRESSÃO

Os sensores de pressão geralmente operam com base na deformação de um elemento sensível (membrana ou diafragma) sob a ação da pressão. Esse elemento é ligado a um transdutor, que converte a deformação em um sinal elétrico proporcional à pressão aplicada.

Existem vários tipos de sensores de pressão, incluindo:

5.1.1 *Sensores de Pressão Absoluta*

Medem a pressão relativa ao vácuo absoluto. O princípio básico dos sensores de pressão absoluta é baseado na deformação de um elemento sensível, como uma membrana ou diafragma, devido à força exercida pela pressão do fluido.



Figura 17: Sensor de Pressão Absoluta MD-PS002-150kPa. <http://www.eletrogate.com/>

Membrana ou Diafragma: A parte central do sensor é uma membrana fina e flexível que separa o fluido a ser medido de uma câmara selada que contém um vácuo de referência. Quando o fluido exerce pressão sobre a membrana, esta se deforma.

Deformação e Medição: A deformação da membrana é proporcional à diferença de pressão entre o fluido e o vácuo (referência absoluta). Essa deformação é convertida em um sinal elétrico por meio de um transdutor, que pode ser piezoresistivo, capacitivo, ou piezoelétrico.

Transdutores:

Piezoresistivos: Utilizam a mudança na resistência elétrica de materiais semicondutores devido à deformação causada pela pressão. **Capacitivos:** Medem a variação da capacidade entre

a membrana deformada e uma placa fixa. **Piezoelétricos:** Usam cristais que geram uma carga elétrica quando são deformados pela pressão. **Conversão do Sinal:** O sinal elétrico gerado pelo transdutor é proporcional à pressão absoluta do fluido, podendo ser calibrado e processado para fornecer uma leitura precisa da pressão em relação ao vácuo absoluto.

Entre suas variadas aplicações, destacam-se o uso automotivo (como na medição da pressão dos pneus, instalação em bombas de ar, sensores MAP, e equipamentos de diagnóstico), o uso industrial (em interruptores de pressão e controle, sistemas de freios, medidores portáteis de pressão e detecção de vazamentos), e na área da aerodinâmica, onde atua como um mini sensor de pressão absoluta.

5.1.2 Sensores de Pressão Manométrica

Medem a pressão relativa à pressão atmosférica. O princípio básico dos sensores de pressão manométrica envolve a utilização de um elemento sensível, como uma membrana ou diafragma, que se deforma em resposta à diferença entre a pressão do fluido e a pressão atmosférica.



Figura 18: TRANSMISSOR DE PRESSÃO MANOMÉTRICA 11301G FERTRON.
www.fertronshop.com.br

Membrana ou Diafragma: O sensor possui uma membrana que separa dois lados: um lado está exposto à pressão do fluido a ser medido, e o outro lado está exposto à pressão atmosférica.

Deformação e Medição: Quando a pressão do fluido é maior ou menor do que a pressão atmosférica, a membrana se deforma. A quantidade de deformação é diretamente proporcional à diferença de pressão entre o fluido e a pressão atmosférica.

Transdutores:

Piezoresistivos: Registram a mudança na resistência elétrica devido à deformação da membrana sob a diferença de pressão.

Capacitivos: Medem a variação na capacitância causada pela deformação da membrana, refletindo a diferença de pressão.

Piezoelétricos: Geram uma carga elétrica proporcional à deformação causada pela pressão.

Conversão do Sinal: O sinal elétrico gerado pelo transdutor é proporcional à pressão manométrica, ou seja, à diferença entre a pressão do fluido e a pressão atmosférica. Esse sinal pode ser calibrado para fornecer uma leitura precisa da pressão relativa.

O transmissor 11301G é uma excelente alternativa para medição de pressão manométrica, geralmente utilizado em controles de processos industriais. A parte mecânica deste transmissor é uma derivação da tecnologia de transdutores de pressão para capacitância. A parte eletrônica; nasceu com a tecnologia analógica de 4/20mA, incorporou os microprocessadores digitais transformando este transmissor num produto inteligente.

Dentre as diversas aplicações desse tipo de sensor ele é amplamente utilizado é necessário monitorar a pressão de fluídos em relação à pressão atmosférica, como em sistemas de ventilação, controle de processos industriais, sistemas de freios hidráulicos, e em equipamentos médicos como esfigmomanômetros.



Figura 19: Esfigmomanômetros. <http://www.ispsaude.com.br/>

5.1.3 Sensores de Pressão Diferencial

Medem a diferença entre duas pressões diferentes.

O princípio básico dos sensores de pressão diferencial baseia-se na utilização de um elemento sensível, como uma membrana ou diafragma, que se deforma proporcionalmente à diferença de pressão entre dois lados distintos.

Membrana ou Diafragma: O sensor possui uma membrana central que separa dois compartimentos, cada um conectado a uma fonte de pressão diferente (P1 e P2). Deformação da Membrana: Quando diferentes pressões são aplicadas aos dois lados da membrana, ela se deforma em resposta à diferença entre P1 e P2. A direção e a magnitude da deformação da membrana correspondem à diferença de pressão. **Transdutores:**

Piezoresistivos: Detectam a variação na resistência elétrica causada pela deformação da membrana, convertendo essa mudança em um sinal elétrico proporcional à diferença de pressão.

Capacitivos: Medem a variação na capacidade entre a membrana deformada e as placas fixas de cada lado, que também é proporcional à diferença de pressão.

Piezoelétricos: Geram uma carga elétrica em resposta à deformação da membrana, que é proporcional à diferença de pressão entre os dois lados.



Figura 20: MS-121-LCD / DWYER / SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL (4-20MA) PARA AR PARA BAIXA PRESSÃO (0.1", 0.25", 0.5" W.C.) COM DISPLAY LCD. <http://www.rsa-sensors.com.br/>

Conversão do Sinal: O sinal elétrico gerado pelo transdutor reflete a diferença de pressão ($\Delta P = P_1 - P_2$) entre as duas fontes de pressão. Este sinal é calibrado para fornecer uma leitura precisa da pressão diferencial.

Os sensores de pressão diferencial são essenciais em aplicações onde a pressão relativa entre dois pontos influencia o desempenho do sistema ou a segurança operacional, fornecendo informações valiosas para ajustes e monitoramento em tempo real.

5.2 SENsoRES DE VAZÃO

Sensores de vazão medem a quantidade de fluido que passa por um determinado ponto em um sistema em um intervalo de tempo. Eles podem ser classificados em diferentes categorias, tais como:

5.2.1 Medidores de Vazão de Deslocamento Positivo

Medem diretamente o volume do fluido deslocado. O princípio básico dos medidores de vazão de deslocamento positivo baseia-se na divisão do fluxo do fluido em volumes discretos, que são mecanicamente capturados e deslocados por elementos móveis dentro do medidor. Cada ciclo de captura e deslocamento corresponde a um volume fixo e conhecido de fluido.

Elementos Móveis: O medidor possui elementos móveis, como pistões, engrenagens, ou rotores, que formam câmaras de volume fixo. À medida que o fluido flui através do medidor, ele empurra ou gira esses elementos, preenchendo as câmaras.

Captura e Deslocamento: Cada câmara de volume fixo é preenchida com fluido, e o movimento dos elementos móveis desloca o fluido para fora da câmara, permitindo que uma nova



Figura 21: Medidor de Vazão Tipo Deslocamento Positivo para Processos Industriais.
<http://br.omega.com/>

quantidade de fluido entre. O ciclo se repete continuamente, com cada deslocamento correspondendo a um volume específico de fluido.

Contagem de Ciclos: O número de ciclos (ou rotações, dependendo do tipo de medidor) é contado e registrado. Como cada ciclo corresponde a um volume fixo de fluido, o número total de ciclos em um dado período de tempo permite calcular diretamente o volume total de fluido que passou pelo medidor.

Medida do Volume: A soma dos volumes deslocados durante esses ciclos dá uma medida direta da quantidade total de fluido que passou pelo medidor.

Esse sensor possui diversas aplicações nas indústrias de: óleo, gás, alimentícias, química e em contadores residências de água/gás. Devido a sua elevada precisão e por não ser afetado por mudanças de parâmetros do fluido, como temperatura e pressão.

5.2.2 Medidores de Vazão Eletromagnéticos

Utilizam o princípio da indução eletromagnética para medir a velocidade do fluido. Esse princípio foi estabelecido pela lei de Faraday da indução eletromagnética, que afirma que a tensão induzida em um condutor em movimento em um campo magnético é proporcional à velocidade do movimento e à intensidade do campo magnético.

Campo Magnético: O medidor possui bobinas que geram um campo magnético perpendicular ao tubo de fluxo. Este campo é aplicado ao fluido que está passando pelo medidor.

Movimento do Fluido: Quando o fluido condutor de eletricidade (como água com íons dissolvidos) flui através do campo magnético, as cargas elétricas no fluido são desviadas para os lados do tubo, devido à força de Lorentz. Este movimento das cargas gera uma tensão elétrica.

Tensão Induzida: A tensão induzida é diretamente proporcional à velocidade do fluido. Essa tensão é medida por eletrodos colocados nas paredes internas do tubo, perpendiculares tanto ao campo magnético quanto à direção do fluxo.

Conversão da Tensão em Vazão: O sinal de tensão medido pelos eletrodos é então convertido eletronicamente em uma leitura de vazão. Como a área da seção transversal do tubo é conhecida, a velocidade medida do fluido pode ser convertida diretamente em uma taxa de vazão volumétrica.



Figura 22: Medidor de Vazão Eletromagnético – HHD. <http://rucken.com.br/>

Independência de Condições de Fluido: É importante notar que a precisão dos medidores de vazão eletromagnéticos não depende da densidade, viscosidade, temperatura ou pressão do fluido, mas o fluido deve ser eletricamente condutivo para que o princípio funcione.

Os medidores de vazão eletromagnéticos são valorizados por sua alta precisão, ausência de partes móveis (o que reduz a manutenção), e sua capacidade de medir grandes volumes de fluido em ambientes industriais rigorosos.

5.2.3 Medidores de Vazão Coriolis

Medem diretamente a massa do fluido usando o efeito Coriolis. O princípio físico por trás dos medidores de vazão Coriolis baseia-se na força de Coriolis, que é uma força inercial experimentada por um objeto em movimento em um sistema de referência em rotação. No contexto dos medidores de vazão, essa força é aplicada a um fluido em movimento dentro de tubos oscilantes.

Oscilação dos Tubos: O medidor de vazão Coriolis possui um ou mais tubos pelos quais o fluido flui. Esses tubos são forçados a oscilar em uma frequência natural específica por meio de um atuador vibratório.

Força de Coriolis: Quando o fluido começa a fluir através dos tubos oscilantes, o movimento do fluido dentro dos tubos cria uma força de Coriolis que atua perpendicularmente à direção do fluxo e à direção da oscilação. Essa força faz com que os tubos se deformem ou torçam ligeiramente.

Deformação dos Tubos: A magnitude da deformação ou torção dos tubos é diretamente proporcional à taxa de fluxo de massa do fluido. Sensores colocados nos tubos detectam essa deformação, medindo a diferença de fase ou tempo entre as oscilações nas diferentes partes do tubo.

Conversão para Vazão de Massa: O sinal gerado pelos sensores é processado para determinar a vazão de massa do fluido. Como a deformação causada pela força de Coriolis é proporcional à massa do fluido que passa pelos tubos, o medidor fornece uma medida direta e altamente precisa da vazão de massa.



Figura 23: Medidor de Vazão Coriolis – Rotamass TI – YOKOGAWA. <http://partnner.com.br/>

Medições Adicionais: Além da vazão de massa, o medidor Coriolis também pode medir a densidade do fluido (pela frequência de oscilação dos tubos) e a temperatura, tornando-o uma ferramenta versátil para monitoramento de processos.

Os medidores de vazão Coriolis são reconhecidos por sua alta precisão, confiabilidade e capacidade de medir uma ampla gama de fluidos, incluindo líquidos, gases e fluidos bifásicos, tornando-os uma escolha popular para aplicações industriais críticas.

5.2.4 Medidores de Vazão Térmicos

Baseiam-se na dissipação de calor para medir a vazão de gases. O princípio físico por trás dos medidores de vazão térmicos baseia-se na transferência de calor entre um sensor aquecido e o gás que flui ao redor dele. Quando um gás flui por um sensor aquecido, ele absorve calor do sensor, e a quantidade de calor dissipada está diretamente relacionada à taxa de fluxo do gás.

Sensores Térmicos: O medidor de vazão térmico geralmente possui dois sensores de temperatura, um dos quais é aquecido artificialmente (sensor quente), enquanto o outro mede a temperatura do gás sem aquecimento (sensor de referência).

Dissipação de Calor: À medida que o gás flui sobre o sensor aquecido, ele absorve parte do calor do sensor. Quanto maior a velocidade do gás, mais calor é removido do sensor aquecido, resultando em uma queda de temperatura do sensor aquecido.

Diferença de Temperatura: A diferença de temperatura entre o sensor aquecido e o sensor de referência é medida. Essa diferença de temperatura está diretamente relacionada à taxa de fluxo de massa do gás, pois um fluxo maior resulta em maior dissipação de calor.



Figura 24: Medidor de Vazão Tipo Termal. <http://www.smartinste.com.br/>

Conversão para Vazão de Massa: O sinal gerado pela diferença de temperatura é processado eletronicamente para calcular a vazão de massa do gás. Como a quantidade de calor transferida depende da massa do gás que passa pelo sensor, o medidor fornece uma leitura direta da vazão de massa.

Compensação de Temperatura e Pressão: Alguns medidores de vazão térmicos incluem compensação para variações na temperatura e na pressão do gás, garantindo leituras precisas em diferentes condições operacionais.

Os medidores de vazão térmicos são valorizados por sua precisão na medição de fluxos de massa de gases, sua ausência de partes móveis (o que reduz a manutenção), e sua capacidade de operar em uma ampla gama de condições ambientais e de processo.

Podemos destacar que os sensores de vazão funcionam de acordo com diferentes princípios físicos, dependendo do tipo de fluido (líquido ou gás) e da aplicação. Por exemplo, os medidores magnéticos dependem da condutividade elétrica do fluido, enquanto os medidores de deslocamento positivo utilizam componentes mecânicos para capturar e medir volumes específicos de fluido.

6 Sensores: medição de nível e temperatura

Um sensor é um dispositivo que detecta uma quantidade física e a converte em um sinal que pode ser interpretado por um observador ou por um instrumento.

Conforme Thomazini e Albuque (2020)[35], o termo “sensor” refere-se a dispositivos capazes de ser ativados por diferentes formas de energia presentes no ambiente, como térmica, luminosa, cinética, entre outras. Ao captar essas energias do ambiente, é possível associá-las a uma grandeza específica que precise ser medida, como temperatura, posição, velocidade, entre outras.

Os sensores são considerados um tipo específico de transdutor, que transforma várias formas de energia, como luz, calor e movimento, em energia elétrica. Essa energia elétrica é utilizada para interpretar condições ou características específicas do ambiente. Dependendo da finalidade, os sensores podem ser classificados como analógicos ou digitais [33].

A medição de nível é fundamental, especialmente em processos que envolvem a produção em massa e o controle da vazão de líquidos, além de ser usada para monitorar a taxa de mistura. No entanto, a medição dos níveis de líquidos em diversos processos industriais pode ser um desafio, pois o sistema de medição pode ser significativamente impactado pela diversidade das indústrias e pelos diferentes tipos de líquidos. Indústrias como a petroquímica, o processamento bioquímico, a purificação de água e a farmacêutica são alguns exemplos que utilizam a medição de nível de líquidos.

A medição e o controle da temperatura são vitais tanto em indústrias quanto em aplicações domésticas, como em caldeiras, ambientes e no monitoramento meteorológico, entre outros. A medição precisa da temperatura é essencial para muitos processos industriais, incluindo petróleo e gás, geração de energia, manufatura e controle de processos. Ao medir a temperatura com precisão, é possível otimizar o desempenho, melhorar a eficiência e garantir a segurança. Nos últimos anos, a indústria de medição de temperatura tem experimentado grandes avanços devido ao surgimento de novas tecnologias e inovações. Um dos maiores avanços no setor foi a introdução da tecnologia inteligente, que utiliza sensores digitais e algoritmos avançados para fornecer leituras de temperatura em tempo real, com alta precisão e confiabilidade.

6.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.1.1 *Sensores de nível*

De acordo com Moreira et al. (2020) [31], o nível de um reservatório refere-se à altura do conteúdo presente, seja ele sólido ou líquido. Em muitas situações, a medição desse nível é uma prática comum, especialmente quando se deseja monitorar o volume armazenado.

Existem duas principais categorias para medir o nível: a medição indireta e a medição direta. Na medição indireta, avaliam-se grandezas que são matematicamente derivadas do nível do reservatório, como empuxo, pressão, radiação e propriedades elétricas.

Com base em cálculos matemáticos, é possível determinar o nível do reservatório. A medição direta, por outro lado, consiste em medir diretamente a grandeza, tomando como referência a posição do plano superior da substância medida. Para esse tipo de medição, podem ser utilizados dispositivos como flutuadores, visores de nível, boias e réguas.

6.1.1.1 *Classificação*

A medição de nível pode ser classificada como contínua ou descontínua (pontual). Na medição pontual, sensores aferem pontos específicos em um tanque, indicando, por exemplo, se o nível está alto ou baixo.

De acordo com Lince (2022) [28], no ambiente industrial, os sensores de nível pontual são essenciais para controlar o fluxo de matérias-primas, evitar a cavitação de bombas, prevenir transbordamentos e evitar paradas não programadas de plantas industriais, além de reduzir o risco de acidentes no local de trabalho. Os principais tipos de sensores pontuais incluem a pá rotativa, garfo vibratório, flutuador, sensores capacitivos, condutivos e indutivos, também conhecidos como chaves de nível, que indicam apenas a presença ou ausência de um líquido em um determinado ponto.

No ambiente residencial, sensores de nível pontual são comumente usados para acionar bombas de recalque, onde um sensor detecta o nível mínimo do reservatório para iniciar a bomba, e outro sensor desliga a bomba quando o nível máximo é atingido.

Por outro lado, em algumas aplicações, é necessário um controle contínuo de nível, especialmente no setor industrial, para manter um fluxo constante de matérias-primas e evitar transbordamentos, permitindo um monitoramento mais preciso do nível do reservatório. Sensores de nível contínuo, como flutuadores, sensores capacitivos, de RF-admitância, radares de onda guiada, ultrassônicos e sensores de pressão, são capazes de detectar o nível do produto em tempo real.

Além disso, o uso combinado de transmissores de nível e chaves de nível pode aumentar a confiabilidade e eficácia da medição. Em caso de falha de um dos sistemas, o outro pode continuar a controlar o processo até que o sistema seja restabelecido, proporcionando uma redundância útil que pode ser aplicada conforme necessário.

6.1.1.2 *Princípios de Funcionamento*

SENSOR DE CHAVE BOIA A chave boia 25 é um sensor de nível pontual que funciona como um interruptor automático. Este sensor é composto por um flutuador que, ao alterar sua posição devido à variação no nível do líquido, aciona um contato interno que liga ou desliga o sistema. Esse tipo de sensor é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e confiabilidade, embora seja limitado por não fornecer uma medição contínua do nível, apenas sinalizando níveis pré-definidos como alto ou baixo [32].



Figura 25: Sensor de chave boia

O sensor de chave boia funciona com base no princípio de flutuação, utilizando uma boia projetada para flutuar na superfície do líquido. À medida que o nível do líquido sobe ou desce, a boia acompanha essa variação, movendo-se verticalmente. Dentro da boia ou ao longo de um eixo, há um ímã que se desloca junto com a boia. Quando a boia atinge um ponto predeterminado, o ímã aciona ou desativa um interruptor magnético, conhecido como reed switch. Esse acionamento abre ou fecha um circuito elétrico, enviando um sinal que pode ser usado para ativar alarmes, bombas ou outros dispositivos de controle. Esse sensor é amplamente utilizado devido à sua simplicidade, confiabilidade e baixo custo, sendo ideal para o controle de nível em tanques, reservatórios de água e outros sistemas que requerem monitoramento preciso do nível de líquido.

SENSORES DE PRESSÃO HIDROSTÁTICA De acordo com Oliveira Neto (2023) [32], os sensores de pressão hidrostática operam com base no princípio de que a pressão exercida por um fluido em um ponto específico é proporcional à altura da coluna de líquido acima desse ponto. Essa pressão, também conhecida como pressão hidrostática.

Esses sensores são amplamente utilizados para medir o nível de líquidos em reservatórios. Quando submersos no líquido, a pressão gerada pela coluna de líquido acima do sensor é convertida em um sinal elétrico proporcional à pressão medida. Como essa pressão está diretamente relacionada ao nível do líquido, é possível determinar a altura da coluna de líquido no reservatório.

Os sensores de pressão hidrostática 26 são reconhecidos por sua precisão e confiabilidade, sendo frequentemente empregados em indústrias que exigem monitoramento contínuo e preciso dos níveis de líquidos, como em tanques de armazenamento de água, petróleo, e outros líquidos.



Figura 26: Sensor de pressão hidrostática

Além disso, há variações como os sensores de pressão diferencial, que medem a diferença de pressão entre dois pontos do reservatório. Essa diferença é causada pela variação na altura do fluido entre os dois pontos, permitindo calcular o nível do fluido com maior precisão.

Esses sensores são ideais para aplicações que requerem medições em tempo real e alta precisão, fundamentais para o controle de processos industriais.

SENSORES CAPACITIVOS Os sensores capacitivos [27](#) operam com base na capacidade de detectar variações no campo elétrico gerado por um capacitor. Esses sensores são compostos por duas placas metálicas que geram um campo elétrico. Quando um objeto se aproxima da face sensora, altera o dielétrico (material isolante entre as placas do capacitor), o que modifica a capacidade do circuito.



Figura 27: Sensores Capacitivos

O princípio de funcionamento é explicado por Andrade Filho e Andrade (2020) [\[22\]](#), que descrevem que essa alteração na capacidade é detectada por um oscilador controlado pelo capacitor. A mudança na capacidade altera a frequência de oscilação, gerando um sinal que pode ser comparado a um valor de referência. Essa variação permite que o sensor detecte a presença ou ausência de um objeto, independentemente de ele ser metálico ou não.

SENSORES ULTRASSÔNICOS

6.1.1.3 *Sensores Ultrassônicos*

Os sensores ultrassônicos [28](#) operam emitindo ondas sonoras em frequências entre 25 e 50 kHz, fora da faixa de audição humana. Esses sensores disparam um pulso de som que viaja à velocidade do som (340 m/s) até atingir um objeto, onde a onda sonora reflete de volta ao sensor como um eco. O tempo que o pulso leva para retornar é medido, e essa informação é usada para calcular a distância entre o sensor e o objeto. Sensores ultrassônicos são versáteis e podem detectar uma ampla variedade de materiais sólidos ou líquidos, como metais, plásticos, vidro, madeira, entre outros. Essa tecnologia é eficaz para detecção sem contato, independentemente da forma, cor ou transparência do material. Contudo, certos materiais como superfícies anguladas ou alvos permeáveis, que absorvem mais energia ultrassônica, podem ser mais difíceis de detectar.

Em termos de modos de operação, os sensores ultrassônicos funcionam em três modos principais: modo de reflexão, modo de medição direta e modo de medição pulsada versus contínua. No modo de reflexão, um transmissor emite um pulso de som que ricocheteia em um alvo e retorna ao receptor, permitindo o cálculo da distância. No modo de medição direta, transmissor e receptor são unidades separadas que se movem em relação uma à outra, permitindo triangulação da posição. Já na medição pulsada, o sensor emite pulsos e aguarda seu retorno, enquanto na medição contínua, uma onda constante de ultrassom é analisada continuamente, proporcionando maior sensibilidade e rapidez nas medições [\[32\]](#).

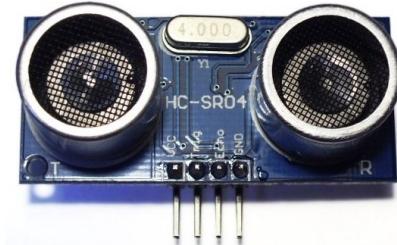


Figura 28: Sensores Ultrassônicos

6.1.2 Aplicações

Os sensores de nível são essenciais para o monitoramento e controle de líquidos em diversas indústrias, desde o armazenamento de materiais perigosos até a gestão de águas residuais.

- **Tratamento de Água:** Sensores de nível ultrassônicos são usados para monitorar o nível de tanques de água em estações de tratamento, assegurando que os processos de purificação e distribuição sejam conduzidos de maneira eficiente e segura;
- **Indústria Química:** Sensores de pressão hidrostática são empregados para medir o nível de líquidos corrosivos em tanques de armazenamento, onde a precisão e a resistência a ambientes agressivos são fundamentais.

6.1.3 Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura têm uma importância crucial em uma ampla gama de aplicações industriais e comerciais em todo o mundo. Eles são utilizados para medir a temperatura de objetos ou ambientes e garantir que processos ocorram dentro de faixas seguras e eficazes. Esses sensores são essenciais para garantir o funcionamento correto de sistemas e para prevenir riscos de falhas ou perigos.

6.1.3.1 Classificação

TERMISTOR O termistor [29](#) é um dispositivo cuja resistência elétrica varia em função da temperatura. A palavra "termistor" é uma combinação de "temperatura" e "resistor", refletindo sua natureza como um tipo de resistor dependente da temperatura. Existem dois tipos principais de termistores: PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo) e NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo). Nos termistores PTC, a resistência aumenta com o aumento da temperatura, enquanto nos NTC, a resistência diminui à medida que a temperatura aumenta. Termistores PTC são

geralmente fabricados a partir de compostos como titanatos de bário, sódio ou chumbo. Já os termistores NTC são produzidos a partir de óxidos de metais como ferro, cromo, manganês, cobalto e níquel. Esses dispositivos são amplamente utilizados em aplicações como circuitos de baterias de lítio, impressoras 3D, osciladores controlados por tensão e em medições de baixas temperaturas. A seleção de um termistor é feita com base na faixa de resistência, como mostrado em tabelas específicas.



Figura 29: *Termistor*

TERMOPAR O termopar **30** funciona com base no efeito Seebeck, onde dois metais diferentes são conectados em uma junção para formar um circuito elétrico. A diferença de temperatura entre as junções gera uma força eletromotriz (f.e.m.), que altera o fluxo de corrente elétrica no circuito. Os termopares são classificados em diversos tipos, como B, C, E, J, K, N, R, S, T, dependendo da combinação de metais utilizados. Eles são amplamente aplicados em indústrias que exigem medição de temperatura em ambientes severos, como na automotiva, em motores de foguetes e aeronaves, processamento de alimentos e geração de energia elétrica. Embora os termopares sejam altamente precisos em termos de medição de temperatura, eles não são tão exatos quanto os RTDs (Detectores de Temperatura de Resistência). Além disso, os termopares precisam de isolamento adequado para evitar corrosão e a precisão dos seus sinais de saída, que não são lineares, é inferior à dos RTDs. Durante o uso de termopares, é crucial evitar contato com campos magnéticos e eletrodos em processos eletrolíticos, além de realizar verificações periódicas para garantir seu funcionamento correto.



Figura 30: *Termopar*

RTDS (RESISTANCE TEMPERATURE DETECTORS) Os Detectores de Temperatura por Resistência (RTDs) baseiam-se na dependência da resistência elétrica de um material em relação

à temperatura. Normalmente, são fabricados com um metal puro que possui um pequeno, mas preciso, coeficiente de temperatura positivo. Os RTDs mais precisos são feitos de fio de platina, sendo bem caracterizados e lineares desde 14°K até temperaturas superiores a 600°C [23].

Os RTDs são utilizados como dispositivo padrão para medição de temperatura. Eles oferecem várias vantagens, como alta estabilidade, linearidade e precisão próxima a $\pm 0,1$ °C em uma ampla faixa de temperatura. Funcionam com base na mudança de resistência devido à variação de temperatura. Se a temperatura aumenta, a resistência elétrica do metal também aumenta; por outro lado, se a temperatura diminui, a resistência diminui. Um pequeno fio enrolado é o elemento sensível de um RTD, que possui alta pureza e geralmente é feito de platina, níquel ou cobre. Tal configuração é conhecida como elemento de fio enrolado. Os Termômetros de Resistência de Platina Padrão (SPRTs) são os RTDs de mais alta precisão, porém são frágeis [29].

Os Detectores de Temperatura por Resistência (RTDs) podem medir a temperatura correlacionando sua resistência elétrica com a temperatura, geralmente empregando elementos de platina. Suas principais vantagens são a alta sensibilidade, linearidade e precisão. Podem ser usados com segurança até 500°C. As desvantagens incluem a sensibilidade à radiação de nêutrons e gamas, e o tempo de resposta (em geral) é mais significativo em comparação aos termopares, o que deve ser considerado ao usá-los em sistemas de proteção de reatores.

Além disso, se uma corrente de excitação for necessária para obter um sinal de voltagem de um RTD (por ser um elemento passivo), seu comportamento é mais preciso e linear em comparação com um termopar [24].

6.1.3.2 *Funcionamento*

TERMISTOR Segundo Diarah et al. [25], os termistores são sensores de temperatura cuja resistência varia de acordo com a temperatura. Existem dois tipos principais de termistores: de coeficiente de temperatura positivo (PTC) e de coeficiente de temperatura negativo (NTC). No PTC, a resistência aumenta com o aumento da temperatura, enquanto no NTC a resistência diminui com o aumento da temperatura, sendo este último o mais comum. Devido à sua composição de materiais semicondutores, os termistores oferecem um nível de sensibilidade muito superior a outros tipos de sensores, mas a relação não linear entre temperatura e resistência requer calibração cuidadosa. Entre as vantagens dos termistores estão seu baixo custo, alta sensibilidade em uma faixa de temperatura reduzida e resposta rápida às mudanças de temperatura.

TERMOPAR Já os termopares, Diarah et al. [25] explicam que são sensores de temperatura amplamente utilizados na indústria devido à sua aceitação generalizada, precisão razoável em uma ampla faixa de medição e custo relativamente baixo. Eles operam com base no efeito Seebeck, que ocorre quando dois metais diferentes são unidos, gerando uma força eletromotriz (fem) proporcional à diferença de temperatura entre as junções. Os termopares são compostos por duas junções, uma de referência (fria) e outra de medição (quente). A diferença de temperatura entre essas junções resulta na geração de uma tensão, que pode ser medida e convertida em temperatura. Dependendo dos materiais utilizados, os termopares podem medir temperaturas extremas, variando de -200°C a mais de 2000°C. Além disso, a construção de um termopar é simples e os materiais necessários são facilmente acessíveis, o que contribui para seu baixo custo e ampla aplicação.

RTDS De acordo com Abeykoon [20], os Detectores de Temperatura por Resistência (RTDs) são dispositivos que medem a temperatura com alta precisão em uma ampla faixa que vai de

-200 °C a 850 °C. Esses sensores funcionam com base na mudança da resistência elétrica de um elemento em resposta à variação de temperatura. A maioria dos RTDs comerciais é feita de platina e, portanto, é conhecida como termômetros de resistência de platina (PRT).

O princípio de funcionamento típico dos RTDs envolve a medição da resistência elétrica de um elemento chamado 'elemento de resistência'. A temperatura é determinada por uma correlação linear entre a mudança na resistência e a temperatura do metal, o que é preciso ao longo de uma ampla faixa de temperaturas. O elemento de resistência é geralmente conectado a uma configuração de ponte de Wheatstone (disponível em configurações de dois fios, três fios e quatro fios para melhorar a precisão da leitura), e o circuito é alimentado por uma fonte de energia externa.

De acordo com King e Fukushima [27], um termômetro RTD pode alcançar uma precisão calibrada de $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou melhor. Comumente, os RTDs comerciais são projetados para ter uma resistência de $100\text{ }\Omega$. Embora os RTDs sejam mais precisos que os termopares convencionais, eles têm um tempo de resposta mais lento (de 0,5 a 5 segundos ou mais) devido à lentidão da condutividade térmica em levar o sensor ao equilíbrio térmico. Como os RTDs são operados por um circuito alimentado externamente, pode ocorrer auto aquecimento do elemento de resistência (ou seja, uma quantidade de potência dissipada é igual a corrente \times resistência). Esse auto aquecimento pode afetar a leitura da temperatura, por isso os RTDs são projetados para operar com uma corrente razoavelmente baixa e constante.

6.1.4 Aplicações

Os sensores de temperatura desempenham um papel crucial em uma ampla gama de aplicações industriais, onde a medição precisa e confiável da temperatura é essencial para o controle de processos, garantia da qualidade do produto e segurança operacional.

- **Indústria Petroquímica:** Termopares são utilizados para monitorar as temperaturas em reatores químicos e fornos, onde as condições são extremas e a precisão é vital para a eficiência do processo;
- **Indústria Farmacêutica:** RTDs são amplamente empregados para garantir o controle de temperatura em processos sensíveis, como a fermentação e o armazenamento de substâncias biológicas, onde a estabilidade térmica é crucial para a integridade do produto.

7 Atuadores

7.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os **atuadores** são dispositivos que realizam uma ação mecânica mediante um sinal de controle, que pode ser elétrico, pneumático, hidráulico, entre outros. Os atuadores são componentes essenciais em sistemas de malha fechada, onde é necessário interferir diretamente no ambiente monitorado, e em sistemas de controle em geral.

Motores elétricos são um exemplo prático de atuadores. Eles podem ser de corrente contínua ou alternada, incluindo motores de precisão, conhecidos como servomotores, entre outros tipos. Associado ao funcionamento dos motores, o **inversor de frequência** é fundamental para um controle mais preciso e seguro. Esse dispositivo é capaz de modificar a velocidade de giro do motor, além de proporcionar recursos de segurança e monitoramento.

Dependendo da aplicação, é crucial selecionar atuadores que se adaptem melhor às necessidades específicas e proporcionem maior segurança. Em diversas aplicações industriais, onde gases inflamáveis entram em contato direto com os dispositivos, o risco de centelhamento pode ser significativo. Nesse contexto, atuadores alimentados pneumáticamente podem ser mais adequados. Em outros processos que exigem aplicação de forças muito elevadas, como em prensas, os atuadores hidráulicos são geralmente mais apropriados.

7.1.1 Classificação

De acordo com C. W. De Silva [2], no livro *Sensors and Actuators: Engineering System Instrumentation*, existem três classificações gerais para atuadores: (1) **Atuadores de processo**: São aqueles que atuam diretamente em um processo. Um exemplo é o motor de uma esteira que transporta pacotes em uma linha de produção. (2) **Atuadores de controle**: São dispositivos que atuam diretamente nos elementos finais de controle e possuem uma maior variação de estados. Por exemplo, um motor-bomba pode estar ligado ou desligado dependendo do nível de fluido em um reservatório. (3) **Servoatuadores**: Atuam em processos de precisão, recebendo um sinal de controle com *feedback* para garantir que a saída apresente um comportamento previamente planejado. Servomotores são um exemplo desse tipo de atuador.

Em geral, os atuadores são de acionamento contínuo, pois a resposta varia de forma contínua de acordo com a entrada. No entanto, existem também atuadores de acionamento incremental, que podem ser considerados atuadores digitais, recebendo um pulso como sinal de entrada e variando a saída de acordo com um incremento fixo. Quanto ao movimento realizado, os atuadores podem produzir movimento linear, como é o caso dos pistões, ou movimento rotacional, como os motores e servomotores.

7.2 APLICAÇÕES

Os atuadores estão presentes em diversas áreas. No sistema de freios ABS de um carro, por exemplo, são utilizados válvulas e bombas hidráulicas que atuam aplicando e liberando a pressão dos freios, evitando que as rodas travem e garantindo maior aderência e controle durante a frenagem. Além disso, atuadores também estão presentes em aparelhos domésticos, como máquinas de lavar, liquidificadores, entre outros.

Na indústria em geral, os atuadores desempenham um papel fundamental. Eles são encontrados em esteiras, moinhos, braços robóticos, empacotadeiras, etc. As próximas seções apresentam alguns exemplos importantes de atuadores amplamente utilizados na indústria. O primeiro deles é o motor elétrico, que é a base para a maioria dos processos, sendo utilizado como atuador de processo, de controle e também como servoatuador em diversas aplicações. O motor de passo, por sua vez, se destaca por seu acionamento incremental, onde o controle é realizado por meio de pulsos elétricos que determinam a posição de saída. Associado ao motor elétrico, também é discutido o inversor de frequência, que é um componente essencial nos sistemas de controle modernos, permitindo uma operação mais controlada dos motores elétricos.

Em seguida, são discutidos os atuadores de movimento linear, que em geral são atuadores de controle, como as válvulas eletrônicas, fundamentais para o controle de fluxo em diversas aplicações. Dentro deste escopo, também são abordados os atuadores alimentados por fluidos sob pressão, que podem ser pneumáticos ou hidráulicos.

7.2.1 *Motores e inversor de frequência*

Os motores elétricos desempenham a função essencial de converter energia elétrica em energia mecânica. Dependendo de sua construção, eles podem desempenhar diferentes papéis como atuadores em uma vasta gama de aplicações industriais. Por exemplo, o motor W22, de 10 ou 12 polos, mostrado na Figura 31a é um motor de corrente alternada (AC) trifásico de uso geral, amplamente empregado como um atuador de processo. Esse motor é comumente utilizado para movimentar cargas, como em sistemas de transporte, ventiladores industriais ou bombas. Seu funcionamento baseia-se na geração de torque, que é proporcionado pela defasagem de 120° entre as fases do sistema trifásico. Essa defasagem cria um campo magnético rotativo, que interage com o rotor, gerando movimento.

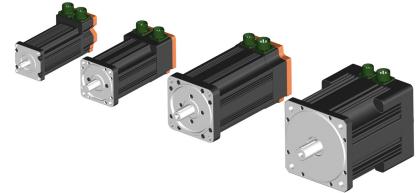
Servomotores, por outro lado, são classificados como atuadores de controle. Esses dispositivos são projetados para operações que exigem alta precisão, processando mais comutações e atuando diretamente no controle de processos dinâmicos. Um exemplo comum é o uso de servomotores em sistemas de correias transportadoras, onde eles movem pacotes em ciclos bem definidos em processos de fabricação. O servomotor SWA, ilustrado na Figura 31b, exemplifica esse tipo de aplicação, onde o controle preciso da posição e velocidade é crucial.

Motores de passo como o Leadshine 573S09, Figura 31c, são outro tipo de atuador, especificamente projetados para movimento rotacional com acionamento incremental. Essa característica permite um controle preciso do movimento, o que é essencial em aplicações que exigem posicionamento exato, como em sistemas de câmeras de segurança, máquinas de gravação a laser, ou impressoras 3D. A capacidade de mover o eixo em pequenos incrementos angulares torna o motor de passo ideal para tarefas que requerem movimentos precisos e repetíveis.

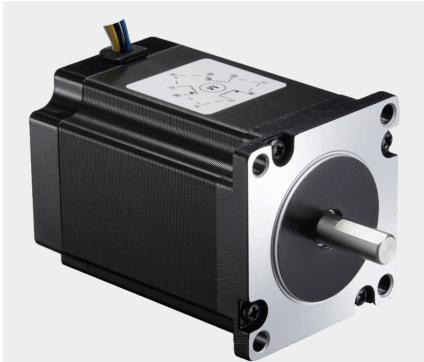
Além dos motores, dispositivos como inversores de frequência são amplamente utilizados para otimizar o desempenho de motores elétricos, ajustando a velocidade de operação conforme a demanda do processo. O inversor de frequência, como o modelo CFW500 da WEG mostrado na



(a) WEG S.A. - HEADQUARTERS.
W22 - 10 & 12 Polos. [18]



(b) WEG S.A. - HEADQUARTERS. Servomotor SWA [17]



(c) Leadshine. Motor de passo 573S09.[16]



(d) WEG S.A. - HEADQUARTERS. Inversor de Frequência CFW500.[19]

Figura 31: Motores e inversor de frequência

Figura 31d, opera modificando a frequência da corrente elétrica que alimenta o motor, o que, por sua vez, ajusta a velocidade de rotação do motor. Este controle da velocidade é obtido através de operações de chaveamento que alteram a forma de onda da alimentação elétrica, proporcionando tanto eficiência energética quanto maior precisão no controle do processo.

7.2.2 Válvulas eletrônicas

As válvulas eletrônicas desempenham um papel crucial no controle de fluxo em diversos processos industriais. Elas são responsáveis por regular a passagem de fluidos, como líquidos, gases ou vapor, através de um movimento linear que é controlado por sinais eletrônicos. Esse movimento linear permite abrir, fechar ou ajustar a posição da válvula, controlando assim a taxa de fluxo de acordo com as necessidades do processo.

Além disso, a capacidade das válvulas eletrônicas de serem integradas a sistemas de automação industrial permite o monitoramento e controle remoto, melhorando a eficiência e a segurança dos processos. Elas podem ser programadas para responder a sinais de controle de

sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ou PLC (Programmable Logic Controller), oferecendo flexibilidade na operação e manutenção dos sistemas.

Um exemplo notável é a válvula Bettis RTS FL, fabricada pela Emerson Electric, ilustrada na Figura 32a. Esta válvula eletrônica é amplamente utilizada em setores industriais críticos, como petróleo e gás, energia, química, HVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), e sistemas de água e esgoto. Sua aplicação em indústrias de petróleo e gás, por exemplo, é vital para o controle preciso de fluidos em ambientes extremos, onde a confiabilidade e a resposta rápida são essenciais para a segurança e a eficiência operacional.

7.2.3 Atuadores Pneumáticos e Hidráulicos

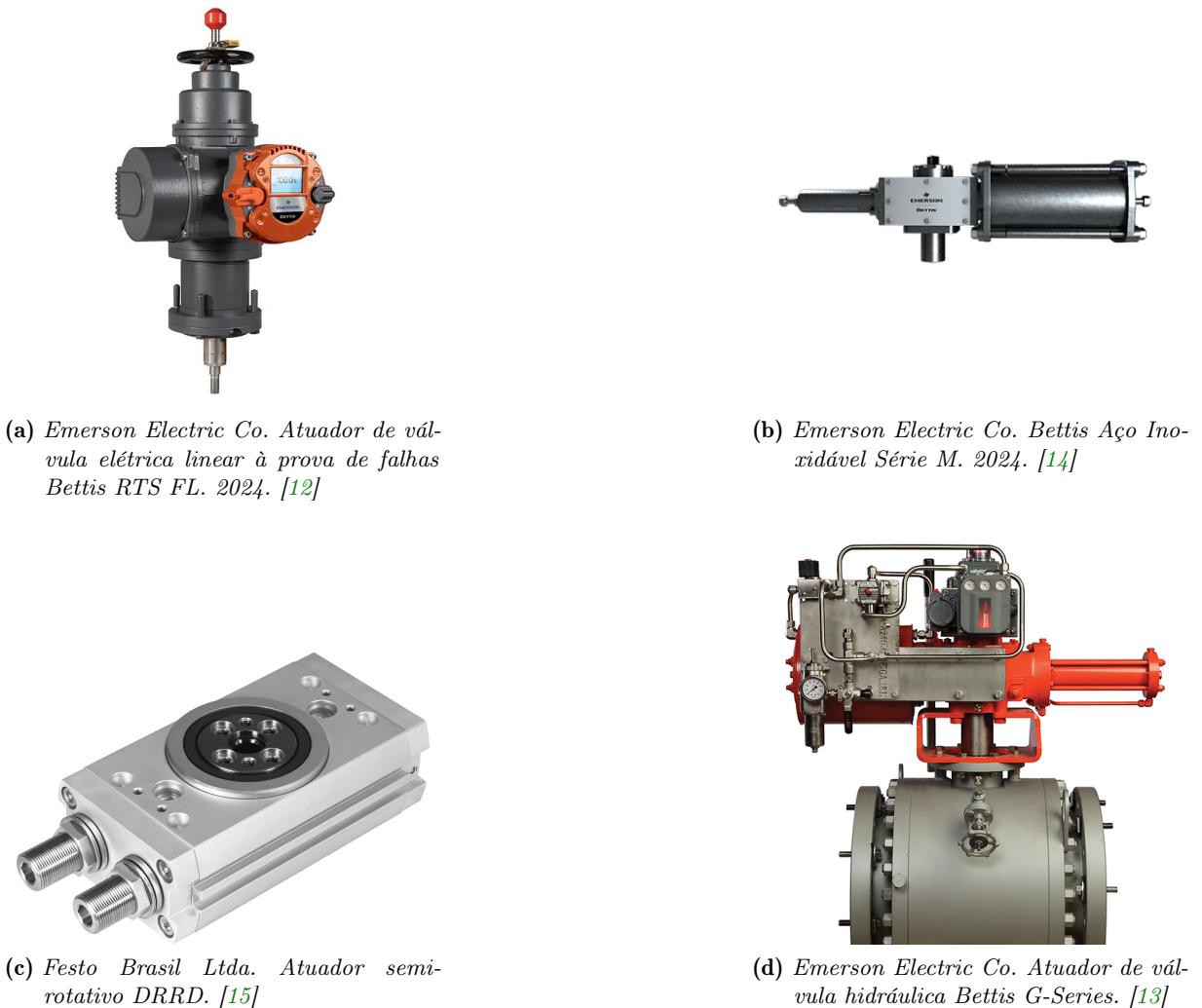


Figura 32: Atuadores eletrônicos, pneumáticos e hidráulicos

Atuadores pneumáticos e hidráulicos são dispositivos que operam através do controle de um fluido pressurizado, que pode ser ar (pneumático) ou óleo (hidráulico). Para o funcionamento desses atuadores, é necessário que o sistema pneumático ou hidráulico esteja em pleno funcionamento. Cada tipo de atuador atende a diferentes necessidades: os atuadores pneumáticos são ideais para processos que requerem alta velocidade e não exigem forças elevadas, enquanto os

atuadores hidráulicos são mais adequados para aplicações que demandam forças muito elevadas, embora operem a uma velocidade naturalmente mais lenta.

Em termos de movimento, os atuadores podem ser de natureza rotacional, como o Atuador Semi-Rotativo DRRD da Festo (Figura 32c), ou de movimento linear, como o Bettis Aço Inoxidável Série M da Emerson Electric (Figura 32b). Esses tipos de atuadores são amplamente utilizados em indústrias que possuem sistemas de alimentação pneumática e podem ser aplicados em processos de controle que requerem muitas variações de estados. Além disso, são frequentemente empregados em aplicações de segurança onde o uso de atuadores elétricos pode ser limitado devido a riscos de ignição.

Atuadores hidráulicos, como o Atuador de válvula hidráulica Bettis G-Series, Figura 32d, são projetados para aplicações desafiadoras, como no controle de válvulas em ambientes industriais exigentes, para os quais a combinação de precisão e força é fundamental para o desempenho e a segurança dos processos.

8 Considerações Finais

Neste trabalho, foi explorada a análise generalizada de instrumentos e suas classificações gerais, destacando a importância desta análise para a construção de projetos de forma otimizada, além disso os principais grupos de sensores e atuadores foram listados e aprofundados, demonstrando a abrangência de dispositivos existentes e como cada tipo se adequa melhor a cada tipo de aplicação.

Os medidores de vibração e deformação são essenciais para a manutenção e a segurança de sistemas mecânicos e estruturas em diversas indústrias. Medidores de vibração permitem o monitoramento contínuo de máquinas, identificando anomalias que podem levar a falhas catastróficas, enquanto medidores de deformação, como os extensômetros, são fundamentais para avaliar a integridade estrutural e determinar as propriedades mecânicas de materiais. Ambos os instrumentos contribuem significativamente para a manutenção preditiva, a otimização do desempenho e a garantia de segurança em ambientes industriais e de engenharia. Sua aplicação correta e o avanço tecnológico contínuo nesses dispositivos permitem um monitoramento cada vez mais preciso, essencial para evitar falhas e garantir a eficiência operacional.

Sensores de medição de posição e proximidade são fundamentais em diversas aplicações, desde automação industrial até sistemas de segurança, permitindo a detecção precisa e eficiente da posição e presença de objetos. A escolha apropriada desses sensores, considerando as características específicas do ambiente e do objeto a ser detectado, é crucial para a eficácia e a confiabilidade dos sistemas de monitoramento e controle. O contínuo avanço tecnológico tem aprimorado a precisão e a versatilidade desses sensores, abrindo novas oportunidades para sua utilização em setores emergentes.

Sensores de medição de pressão e vazão desempenham um papel essencial em diversos setores industriais, permitindo o controle preciso e seguro de processos complexos. A escolha adequada desses sensores, levando em consideração as características do fluido, as condições de operação e as necessidades da aplicação, é fundamental para o sucesso de qualquer sistema de monitoramento e controle. A evolução tecnológica continua a melhorar a precisão, a confiabilidade e a aplicabilidade desses sensores, expandindo suas possibilidades de uso em novos campos.

Sensores de nível e temperatura desempenham papéis cruciais em diversas indústrias, garantindo a precisão e segurança dos processos. Os sensores de nível são essenciais para o monitoramento de líquidos em tanques e reservatórios, proporcionando controle eficiente e prevenção de acidentes. Já os sensores de temperatura são fundamentais para manter condições ideais em processos industriais, evitando falhas e garantindo a qualidade do produto final. A escolha adequada e o uso correto desses sensores são vitais para o sucesso das operações industriais e a segurança dos ambientes de trabalho.

Os atuadores são componentes essenciais na construção de sistemas de controle e instrumentos de malha fechada, desempenhando um papel crucial em uma ampla gama de sistemas modernos. A classificação dos atuadores pode ser feita com base em sua fonte de energia, tipo de movimento e aplicabilidade, e é importante entender como diferentes dispositivos atendem melhor às exigências específicas de cada aplicação, levando em consideração fatores como segurança, capacidade de comutação, força, precisão e velocidade.

Por fim, conclui-se que a análise detalhada na seleção de instrumentos é fundamental para garantir a eficiência e a eficácia no atendimento às diversas demandas que podem surgir em dife-

rentes contextos. Além disso, o avanço contínuo na melhoria das características desses dispositivos é vital para atender à crescente demanda por maior eficiência energética e confiabilidade.

Referências Bibliográficas

- [1] A. S. Morris e R. Langari, *Measurement and instrumentation: theory and application*. Academic Press, 2011.
- [2] C. W. De Silva, *Sensors and actuators: Engineering system instrumentation*. CRC press, 2015.
- [3] R. S. Beebe e R. S. Beebe, *Predictive maintenance of pumps using condition monitoring*. Elsevier, 2004.
- [4] C. Smith, *Process Control Instrumentation Technology*. Prentice Hall, 2013.
- [5] W. L. S. H., *Industrial Sensors and Controls in Communication Networks*. Springer, 2018.
- [6] S. Bennett, *Control Systems: Principles and Design*. Wiley, 2005.
- [7] J. J. da Silva, *Medição de posição, força, conjugado e aceleração*, <https://classroom.google.com/c/NjI4Mzg2MTMxOTE/m/NjYzMzc2ODIxNzQw/details>, Accessed: 2024-03-02, 2024.
- [8] H. Mattede, *Potenciômetro – O que é e como funciona*, <https://www.mundodaeletrica.com.br/potenciometro-o-que-e-como-funciona/>, Accessed: 2024-03-02, 2024.
- [9] O. Engineering, *O que é um LVDT (transdutor de deslocamento variável linear)?*, <https://br.omega.com/prodinfo/lvdt.html>, Accessed: 2024-03-09, 2024.
- [10] E. Cravo, *Encoder: o que é e como funciona*, <https://blog.kalatec.com.br/encoder/>, Accessed: 2024-03-09, 2024.
- [11] Electricity-Magnetism, *Sensor de Proximidade Ultrassônico*, <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/sensor-de-proximidade-ultrassonico/>, Accessed: 2024-03-10, 2024.
- [12] E. E. Co, *Atuador de válvula elétrica linear à prova de falhas Bettis RTS FL*, Accessed: 2024-07-22, 2024. URL: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/automation-solutions/actuators/electric-actuators/bettis-sku-rts-fl>.
- [13] E. E. Co, *Atuador de válvula hidráulica Bettis G-Series*, Accessed: 2024-07-22, 2024. URL: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/bettis-sku-g-series-hydraulic>.
- [14] E. E. Co, *ABettis Aço Inoxidável Série M*, Accessed: 2024-07-22, 2024. URL: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/bettis-sku-m>.
- [15] F. B. Ltda, *Atuador semi-rotativo DRRD*, Accessed: 2024-07-22, 2024. URL: https://www.festo.com.br/pt/p/atuador-semi-rotativo-id_DRRD/?tab=HIGHLIGHTS.
- [16] Leadshine, *Motor de passo 573S09*, Accessed: 2024-07-22, 2024. URL: <https://www.leadshine.com/product-detail/573S09.html>.
- [17] Weg, *Servomotor SWA*, Accessed: 2024-07-22, 2024. URL: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Servoacionamentos/Servomotor/Servomotor-SWA/Servomotor-SWA/p/MKT_WDC_BRAZIL_SERVO_MOTORS_SWA.

- [18] Weg, *Inversor de Frequência CFW500*, Accessed: 2024-07-22, 2024. URL: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%A3ncia/Drives-para-OEMs-e-Uso-Geral/Inversor-de-Frequ%C3%A3ncia-CFW500/Inversor-de-Frequ%C3%A3ncia-CFW500/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_INVERTER_CFW500.
- [19] Weg, *WEG S.A. - HEADQUARTERS. W22 - 10 12 Polos*, Accessed: 2024-08-13, 2024. URL: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-E1%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22---10-%26-12-Pulos/W22---10-%26-12-Pulos/p/MKT_WMO_BR_3PHASE_LV_TEFC_W22_10-12POLE_IR2.
- [20] C. Abeykoon, «Sensing technologies for process monitoring in polymer extrusion: A comprehensive review on past, present and future aspects», *Measurement: Sensors*, 2022.
- [21] B. Aneja, S. Singh, U. Chandna e V. Maheshwari, «Review of temperature measurement and control», *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, vol. 3, pp. 33–40, 2014.
- [22] A. P. Andrade Filho e T. M. Andrade, «Sensores capacitivos, especificação em aplicações de processos industriais», Universidade Federal de Uberlândia e Universidade de Uberaba, rel. téc., 2020.
- [23] H. Austerlitz, *Data Acquisition Techniques Using PCs*, 2^a ed. 2003.
- [24] M. Cappelli e F. Cordella, *Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants*. 2023.
- [25] R. S. Diarah, C. Osueke, A. Adekunle, S. Adebayo, A. B. Aaron e O. O. Joshua, «Types of Temperature Sensors», em *Wireless Sensor Networks—Design, Applications and Challenges*, IntechOpen, 2023, pp. 1–7. DOI: [10.5772/intechopen.110648](https://doi.org/10.5772/intechopen.110648).
- [26] D. R. Doc e D. Listopadu, «Smart temperature sensors for measurement and control», em *International Scientific Conference of FME: Automation Control and Applied Informatics*, Session 4, 1997.
- [27] G. King e T. Fukushima, «RTD interfacing and linearization using an ADuC8xx Micro-Converter», rel. téc., 2004.
- [28] Lince, *O que é Medição de Nível?*, Disponível em: <https://instrumentos-lince.com.br/o-que-e-medicao-de-nivel/>, 2022.
- [29] S. R. Madeti e S. Singh, «Renewable and Sustainable Energy Reviews», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [30] P. Mohindru, «Development of liquid level measurement technology: A review», *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 89, p. 102295, 2022. DOI: [10.1016/j.flowmeasinst.2022.102295](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102295).
- [31] I. M. Moreira et al., «Estudo e implementação de técnicas de medição de nível de água em reservatórios», em *Anais Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT)*, vol. 2, 2020, pp. 458–462.
- [32] P. A. Oliveira Neto, «A aplicação de sensor de pressão para a medição de nível de líquidos em reservatórios», Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, rel. téc., 2023.
- [33] L. F. Patsko, *Tutorial-aplicações, funcionamento e utilização de sensores*. Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica, 2006, p. 84.

- [34] V. Sakthivelpathi, T. Li, Z. Qian, C. Lee, Z. Taylor e J.-H. Chung, «Advancements and applications of micro and nanostructured capacitive sensors: a review», *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 377, p. 115701, 2024. doi: [10.1016/j.sna.2024.115701](https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115701).
- [35] D. Thomazini e P. U. B. d. Albuquerque, *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. Saraiva Educação SA, 2020.