Daniel Thomazini & Pedro Urbano Braga de Albuquerque

Sensores Industriais

Fundamentos e Aplicações

- Funcionamento e Especificações
- Tipos de Sensores e Aplicações na Indústria

BRINDE: Respostas dos exercícios do livro disponíveis na Internet.

EDITORA ÉRICA

4ª EDIÇÃO REVISADA

Índice Analítico

Capítulo 1 - Introdução 17
1.1. Atuadores 17
1.2. Sensor 17
1.2.1. Sensores analógicos 18
1.2.2. Sensores digitais 18
1.3. Transdutor 19
1.4. Conversores A/D e D/A 19
1.5. Transmissor 20
1.6. Características importantes 20
1.6.1. Tipos de saída 20
1.6.2. Sensibilidade 22
1.6.3. Exatidão 22
1.6.4. Precisão 22
1.6.5. Linearidade 22
1.6.6. Alcance (Range) 23
1.6.7. Estabilidade 23
1.6.8. Velocidade de resposta 23
1.6.9. Outras características 23
1.7. Classificação dos instrumentos 24
1.7.1. Quanto à localização 24
1.7.2. Quanto à função 24
1.8. Nomenclatura de instrumentos e malhas de controle 24
1.8.1. Tabelas 27

Capítulo 2 - Sensores de Presença 30
2.1. Sensores ópticos 30
2.2. Sensor óptico por retrorreflexão 31
2.3. Sensor óptico por transmissão 32
2.4. Sensor óptico por reflexão difusa 33
2.5. Cabos de fibra óptica 33
2.6. Características 34
2.6.1. Distância de acionamento S (mm) 34
2.6.2. Fator de correção 34
2.6.3. Terminologias elétricas utilizadas 34
2.7. Sensor infravermelho ativo 35
2.8. Infravermelho passivo 36
2.9. Janela de luz 37

2.10. Barreira ultra-sônica 37
2.11. Aplicações 39

Capítulo 3 - Sensores de Posição 40
3.1. Sensores de proximidade indutivos 40
3.1.1. Sensores indutivos para corrente alternada (AC) 41
3.1.2. Distância de acionamento *versus* freqüência de comutação 41
3.2. Sensores de proximidade capacitivos 43
3.3. Alvo-padrão e aterramento para sensores de proximidade capacitivos 44
3.4. Sensores capacitivos blindados *versus* não-blindados 44
3.5. Fatores de correção de alvo para sensores de proximidade capacitivos 45
3.5.1. Utilização 45
3.5.2. Aplicações 46
3.6. Sensores de proximidade magnéticos 46
3.7. LVDT 47
3.7.1. LVDT com enrolamento aberto 48
3.7.2. LVDT com enrolamento proporcional 48
3.7.3. Prós e contras do uso do LVDT 49
3.7.4. Aplicações 50
3.8. Transformador Diferencial Rotacional Variável - RVDT 50
3.8.1. Especificações 50
3.9. Syncro 51
3.10. Sensor potenciométrico 52
3.11. Encoders 54
3.12. Sensor incremental angular 54
3.12.1. *Encoder incremental linear* 56
3.12.2. Sensor incremental linear magnético 57
3.12.3. Encoder absoluto 58
3.12.4. Encoder absoluto multirrevolução 59
3.12.5. Aplicações 60
3.13. Ultra-sônico 60
3.14. Resolvers 60

Capítulo 4 - Sensores Ópticos 62
4.1. Fotorresistores 62
4.1.1. LDR *(Light Dependent Resistor)* 62
4.2. Fotodiodo e fototransistor 65
4.2.1. Fotodiodo 65
4.2.2. Fototransistor 67
4.3. CCD *(Charge Couple Devices)* 69
4.4. CMOS *(Complementary Metal Oxide Semiconductor)* 71

4.4.1. Sensor ativo e passivo 72
4.4.2. Formato dos sensores de imagens 72
4.5. Fototiristores 73
4.6. Válvulas de ultravioleta - Detectoras de chamas 73
4.6.1. Aplicações 74
4.7. Célula fotovoltaica 75

Capítulo 5 - Sensores de Velocidade 77
5.1. Dínamo taquimétrico (tacogerador) 77
5.2. Alternador taquimétrico 79
5.2.1. Bobina piloto 79
5.2.2. Tacômetro de indução 79
5.3. Reação da armadura 80
5.4. Bobina *pick-up* 80
5.5. Acoplador óptico 82
5.5.1. Fotoacoplador 82

Capítulo 6 - Sensores de Aceleração 85
6.1. Acelerômetros de deslocamento 85
6.2. Acelerômetros de deformação 87
6.3. Acelerômetros a balanço de força 90

Capítulo 7 - Sensores de Temperatura 91
7.1. Termistores *(Thermally Sensitive Resistor)* 91
7.1.1. PTC *(Positive Temperature Coefficient)* 92
7.1.2. NTC *(Negative Temperature Coefficient)* 93
7.2. Termopares 94
7.2.1. Características dos termopares 96
7.2.2. Limites de erros dos termopares 97
7.2.3. Relação temperatura x bitola do fio 98
7.2.4. Termopar com isolação mineral 99
7.2.5. Tipos de junção 99
7.2.6. Cabos de compensação 100
7.3. Termorresistência 100
7.3.1. Termorresistência de platina (Pt-100) 101
7.3.2. Tipos de montagem 101
7.4. Princípio de medição a 2, 3 e 4 fios 102
7.4.1. Ligação a 2 fios 102
7.5. Ligação a 3 fios 103
7.6. Ligação a 4 fios 104
7.7. Termorresistência X termopar 104
7.8. Par bimetálico 105
7.9. Sensores eletrônicos 105

7.9.1. Diodos 105
7.9.2. Transistores 106
7.9.3. Circuitos integrados 106
7.9.4. Circuitos integrados inteligentes 107
7.10. Pirômetros 108
7.10.1. Termopilhas *(Thermopile)* 112

Capítulo 8 - Sensores de Pressão 113
8.1. Células de carga 113
8.1.1. Tipos e fabricação 113
8.1.2. Principais tipos de células de carga 115
8.1.3. Especificações/Características 115
8.1.4. Fatores que interferem na medição de pressão/deformação 116
8.1.5. Aplicações típicas e generalidades 117
8.2. Transdutor de pressão piezoelétrico 119
8.2.1. Princípio de funcionamento 119
8.2.2. Características gerais 120
8.2.3. Especificações 121
8.2.4. Comportamento 122
8.2.5. Condicionador de sinais 122
8.2.6. Calibração 122
8.2.7. Aplicações 122
8.3. Tubos de Bourdon 123
8.4. Sensores de pressão ópticos 125
8.5. Sensor de pressão integrado 126
8.6. Sensor de pressão capacitivo 128

Capítulo 9 - Sensores de Nível 129
9.1. Introdução 129
9.2. Flutuadores 129
9.2.1. Flutuador por acionamento de mercúrio 130
9.2.2. Flutuador com acionamento magnético *reed switch* 130
9.2.3. Flutuador com acionamento por potenciômetro 131
9.2.4. Chave de nível bóia 132
9.3. Eletrodos metálicos - condutivo 132
9.3.1. Utilizando um eletrodo de referência 132
9.3.2. Eletrodos metálicos para verificação de uma única cota 133
9.4. Medição por meio da pressão estática no fundo dos tanques 133
9.4.1. Medição de nível hidrostática 133
9.4.2. Por meio de medição de empuxo 135
9.5. Medição de nível capacitiva 135

9.6. Detecção de nível vibratório (piezoelétrico) 137
9.7. Medição de nível laser 138
9.8. Radar 139
9.9. Radioativos 140
9.10. Strain-Gages - célula de carga 141
9.11. Ultra-Sônico 142
9.12. Alfassônico 143
9.13. Fotoelétricos 143
9.14. Pás rotativas 143
9.15. Chaves de nível diafragma 144
9.16. Medidor de nível por borbulhamento 145

Capítulo 10 - Sensores de Vazão 147
10.1. Pressão diferencial 147
10.1.1. Placa de orifício 148
10.1.2. Tubo Venturi 149
10.1.3. Bocal 150
10.1.4. Tubo de Pitot 151
10.1.5. Descrição funcional de um sensor de pressão diferencial capacitivo 151
10.2. Rotâmetros 153
10.3. Turbina 154
10.4. Sensor óptico 155
10.5. Magnético 155
10.5.1. Sensor de vazão magnético indutivo 155
10.5.2. Bobina de pick-up 156
10.5.3. Acoplamento magnético 157
10.5.4. Rotor de vazão magnético-eletrônico 158
10.6. Ultra-Sônicos 159
10.6.1. Efeito de Coriolis 160
10.7. Medidor de vazão Vortex 162
10.8. Sensor térmico 163
10.9. Engrenagens ovais 164
10.9.1. Movimentos das engrenagens 165
10.10. Tabela comparativa dos sensores de vazão 167
10.11. Medidor de vazão em válvulas 168
10.11.1. Medição de vazão com o uso do C_v 170

Capítulo 11 - Sensores de Tensão, Corrente e Potência 172
11.1. Corrente CC 172
11.1.1. Resistor Shunt 172
11.1.2. Sensor de Efeito HALL 172

11.1.3. Transformador CC 174
11.1.4. Relé térmico - Relé de sobrecarga de corrente 174
11.2. Corrente CA 177
11.2.1. Tipos de TC 179
11.3. Tensão CC 181
11.4. Tensão CA 181
11.5. Transdutores de potência C.A. 182

Capítulo 12 - Sensores de Umidade, Gases e pH 183
12.1. Sensor de umidade 183
12.1.1. A escolha dos sensores de umidade 185
12.1.2. Contaminantes (químicos e partículas) 186
12.1.3. Precisão 186
12.1.4. Manutenção 186
12.1.5. Exigências de durabilidade 187
12.1.6. Sistemas de amostragem 187
12.1.7. Tempo de resposta 188
12.1.8. Pressão 188
12.1.9. Custo 188
12.1.10. Medição de conteúdo de umidade pela medição de umidade de equilíbrio .. 189
12.1.11. Conteúdo de água 189
12.1.12. Saturação 190
12.1.13. Princípios de medição 190
12.1.14. Métodos para medição da umidade 191
12.1.15. Sensor de óxido de alumínio 192
12.1.16. O higrômetro eletrolítico 192
12.1.17. Higrômetros ópticos de condensação 193
12.1.18. Aplicação dos sensores de umidade 194
12.2. Analisadores de gases 195
12.2.1. Tipos de analisadores 195
12.2.2. Como especificar um analisador de gás 196
12.3. Sensores de pH 199
12.3.1. Medidores de pH 200
12.3.2. Controle de medição 201

Capítulo 13 - Exercícios 203

Referências Bibliográficas 216

Índice Remissivo 220

Prefácio

A idéia de desenvolver este trabalho nasceu da grande necessidade de material informativo/didático específico. Apesar da grande variedade de boletins informativos e catálogos de fabricantes, não se encontram com facilidade livros que possam suprir as necessidades de estudantes de graduação, engenheiros e técnicos na indústria e laboratórios de pesquisas nesta área.

O conteúdo foi baseado em notas de aulas e em trabalhos da disciplina de instrumentação e controle dos alunos do curso de Informática Industrial do CEFET/CE - Centro Federal de Ensino Tecnológico do Ceará, e posterior atualização durante o curso de Sensores Industriais no curso de Especialização em Engenharia de Automação Industrial na Universidade de Fortaleza.

Ao longo do processo de industrialização a que nossa sociedade foi e está submetida, foi surgindo a necessidade de medir e conhecer diversas grandezas físicas. Quanto mais tecnologias são desenvolvidas e quanto mais competitivas se tornam as economias, mais complexos e rigorosos se tornam os processos industriais. Por isso mesmo a instrumentação é uma área que está sempre se desenvolvendo e é cada vez mais utilizada, principalmente com a massificação de processos automatizados.

Na maioria dos processos automatizados é necessária uma realimentação do processo para que o dispositivo de controle conheça a saída do sistema e possa tomar as providências necessárias. É justamente a instrumentação que vai viabilizar esse processo de realimentação. Como existem inúmeros processos envolvendo diversas grandezas físicas que podem ser controladas e/ou monitoradas, foram desenvolvidos diversos instrumentos de medição para atender às mais diversas exigências. Seja na indústria, na área médica, pontos comerciais, transportes, etc., as informações quanto ao andamento do processo devem estar sempre disponíveis para serem controladas de forma que o sistema possa trabalhar de acordo com o preestabelecido. Essas informações são coletadas por intermédio das mais diversas variedades de sensores.

A grande diversidade de sensores vem sendo aperfeiçoada ao longo do tempo, principalmente com o desenvolvimento da microeletrônica nos anos 70. Novos materiais foram descobertos e a tendência de miniaturização foi incrementada com a possibilidade cada vez maior da integração do sensor e o circuito de condicionamento dos sinais.

Nos anos 80 iniciou-se o desenvolvimento da produção de sensores integrados e hoje, com as novas tecnologias disponíveis, surgiram sensores inteligentes que podem trabalhar em redes de comunicação serial do tipo barra (pares trançados) com programação endereçável independente.

Os autores

Apresentação

Este livro descreve os fundamentos físicos dos principais tipos de sensores com as mais diversas tecnologias, desde os mais simples elementos sensíveis (uma ampola "REED", por exemplo) até os sensores integrados inteligentes.

A seqüência dos capítulos obedece a uma ordem de importância com relação ao índice de aplicação, começando pelos sensores ópticos, os quais são utilizados tanto na medição de luz como em medições de outras grandezas físicas e aplicações.

Os mesmos sensores, ou seja, o elemento sensível, podem ser aplicados para detecção ou medição de grandezas diferentes, como, por exemplo, os sensores ópticos podem ser utilizados para detectar presença, ou medir velocidade, utilizando os mesmos princípios físicos.

O livro aborda os principais tipos de sensores utilizados principalmente na indústria, mas também em aplicações domésticas e comerciais, passando pelo óptico, capacitivo, indutivo, resistivo, chave de contato, magnético, ultra-sônico, fotorresistivo, fotocondutor, dispositivos de acoplamento de carga, células de carga, termorresistivo, termocondutor, a laser, radioativo, cisalhamento, pressão, *shunt*, efeito HALL, eletrolítico, pHmetro.

Capítulo 1

Introdução

No estudo da automação em sistemas industriais, comerciais, automobilísticos, domésticos, etc., é preciso determinar as condições (ou variáveis) do sistema. É necessário obter os valores das variáveis físicas do ambiente a ser monitorado, e este é o trabalho dos sensores.

Inicialmente é preciso mostrar a diferenciação entre alguns elementos presentes em uma automação de qualquer natureza. Os principais elementos que atuam sobre a automação industrial são os sensores e atuadores, pois eles verificam e interferem no ambiente.

1.1. Atuadores

São dispositivos que modificam uma variável controlada. Recebem um sinal proveniente do controlador e agem sobre o sistema controlado. Geralmente trabalham com potência elevada. Exemplos de alguns atuadores:

- Válvulas (pneumáticas, hidráulicas)
- Relés (estáticos, eletromecânicos)
- Cilindros (pneumáticos, hidráulicos)
- Motores (*step-motor*, syncro, servomotor)
- Solenóides

1.2. Sensor

Termo empregado para designar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa, térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, etc. Conforme indica a figura 1.1.

Um sensor nem sempre tem as características elétricas necessárias para ser utilizado em um sistema de controle. Normalmente o sinal de saída deve ser manipulado antes da sua leitura no sistema de controle. Isso geralmente é realizado com um circuito de interface para produção de um sinal que possa ser lido pelo controlador.

Supondo que a saída de um sensor, ao ser sensibilizado por uma energia externa, é dada por um nível de tensão muito baixo, torna-se necessária a sua amplificação. Essa interface seria então um amplificador capaz de elevar o nível do sinal para sua efetiva utilização.

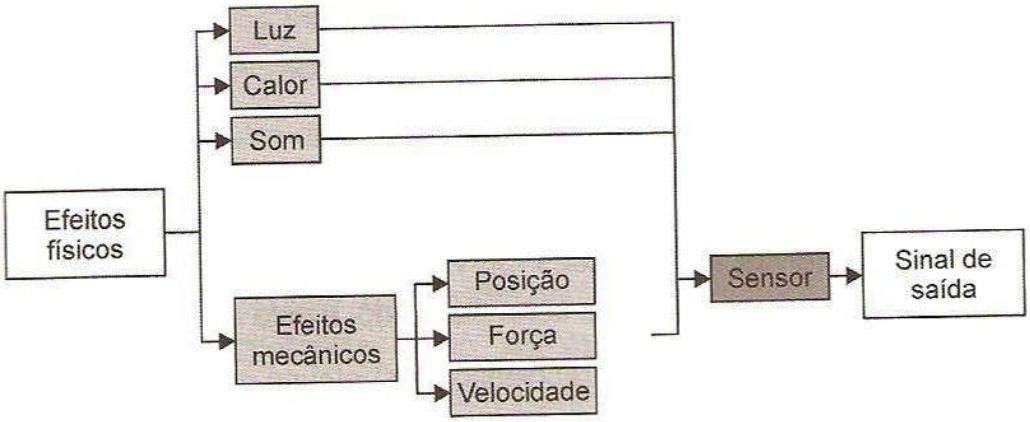


Figura 1.1 - Ilustração das formas de energia em um sensor.

1.2.1. Sensores analógicos

Esse tipo de sensor pode assumir qualquer valor no seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro da sua faixa de operação.

Algumas das grandezas físicas que podem assumir qualquer valor ao longo do tempo são: pressão, temperatura, velocidade, umidade, vazão, força, ângulo, distância, torque, luminosidade. Essas variáveis são mensuradas por elementos sensíveis com circuitos eletrônicos não digitais. A figura 1.2 ilustra a variação de uma grandeza física (temperatura) de forma analógica.

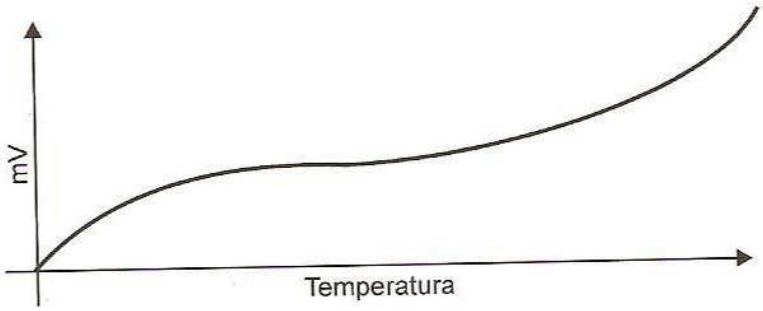


Figura 1.2 - Ilustração da variação de uma grandeza física de um sensor analógico.

1.2.2. Sensores digitais

Esse tipo de sensor pode assumir apenas dois valores no seu sinal de saída ao longo do tempo, que podem ser interpretados como zero ou um. Não existem naturalmente grandezas físicas que assumam esses valores, mas eles são assim mostrados ao sistema de controle após serem convertidos pelo circuito eletrônico do transdutor. É utilizado, por exemplo, em detecção de passagem de objetos, encoders na determinação de distância ou velocidade, etc. A figura 1.3 ilustra a variação da posição de um objeto lida por um encoder incremental.

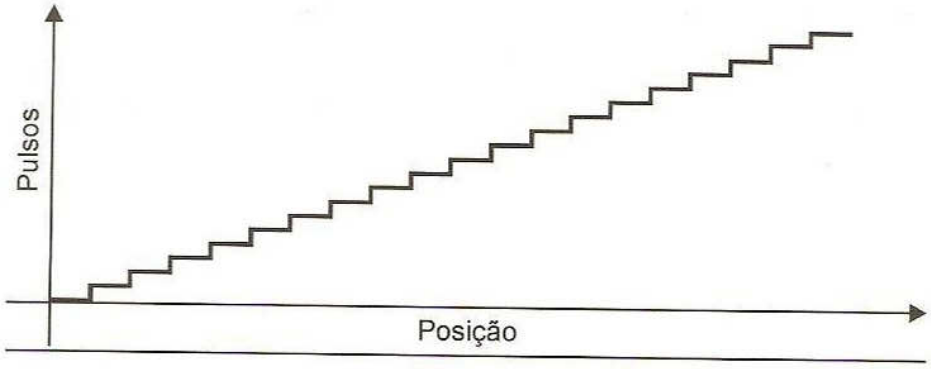


Figura 1.3 - Ilustração da leitura da posição de um objeto por um encoder incremental.

1.3. Transdutor

É a denominação que recebe um dispositivo completo, que contém o sensor, usado para transformar uma grandeza qualquer em outra que pode ser utilizada nos dispositivos de controle. Um transdutor pode ser considerado uma interface às formas de energia do ambiente e o circuito de controle ou eventualmente entre o controle e o atuador.

Os transdutores transformam uma grandeza física (temperatura, pressão, etc.) em um sinal de tensão ou corrente que pode ser facilmente interpretado por um sistema de controle.

Muitas vezes os termos "sensor" e "transdutor" são usados indistintamente. Neste caso, o transdutor é o instrumento completo que engloba sensor e todos os circuitos de interface capazes de serem utilizados numa aplicação industrial.

1.4. Conversores A/D e D/A

É possível converter um sinal analógico em digital e vice-versa por meio dos conversores analógico-digital ou digital-analógico.

Quando a conversão é realizada, parte do sinal é perdida e pode haver pequenas distorções na grandeza realmente medida, conforme indica a figura 1.4.

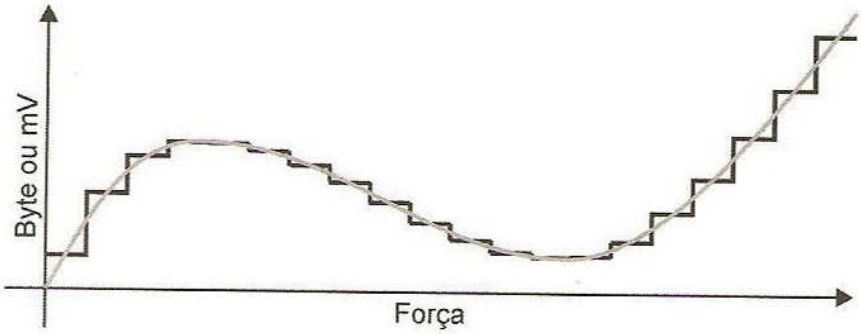


Figura 1.4 - Exemplo de digitalização e linearização de sinais.

Ao transformar um sinal analógico em digital, o número de bits utilizado pelo conversor deve ser previamente escolhido pelo projetista para não obter valores falsos da grandeza física nem superdimensionar o conversor, para não tornar o processo desnecessariamente caro, além de poder torná-lo mais lento durante a conversão.

1.5. Transmissor

Dispositivo que prepara o sinal de saída de um transdutor para utilização a distância, fazendo certas adequações ao sinal as quais se chamam padrões de transmissões de sinais. Um exemplo bastante conhecido é o "loop" 4 a 20 mA, um padrão de transmissão de sinais em corrente.

O termo transmissor é utilizado também para dispositivos que integram um sensor, transdutor e transmissor no mesmo dispositivo.

Os padrões mais utilizados para transmissão de sinais analógicos são: 3 a 15 PSI; 4 a 20 mA; 0 a 20 mA e 0 a 10 V.

Para transmissão de sinais digitais utilizam-se protocolos de comunicação para redes industriais *(fieldbus)*. Os protocolos mais utilizados para transmissores e atuadores são: HART, Asi, Fieldbus Foundation e PROFIBUS-PA.

Os protocolos de comunicação abertos mais conhecidos para comunicação entre controladores lógicos programáveis e outros depósitos são: Modbus, PROFIBUS-DP, Fieldbus Foundation, CAN, LonWorks, Interbus-S e Industrial Ethernet. Os padrões de comunicação serial mais utilizados na camada física desses protocolos são: RS-232, RS-422 e principalmente o RS-485.

Existem protocolos de comunicação industriais proprietários que são também muito utilizados, como, por exemplo, os protocolos da ALLEN-BRADLEY: ControlNET, DH+; DH485; Remote I/O e DeviceNet (utilizado também em transmissores e atuadores).

1.6. Características importantes

Há uma série de características relacionadas aos sensores que devem ser levadas em consideração na hora da seleção do instrumento mais indicado para uma dada aplicação.

1.6.1. Tipos de saída

Digital ou binária: a saída do dispositivo (transdutor ou sensor) é discreta, ou seja, só assume valores "0" ou "1" lógicos (também denominada saída liga-desliga ou on-off). Esse tipo de sensor só é capaz de indicar se uma grandeza física atingiu um valor predeterminado (por exemplo: pressostatos, termostatos, chaves de níveis, fluxostato, etc.). A figura 1.5 exibe a saída de um sensor digital de acordo com a variação da entrada ao longo do tempo.

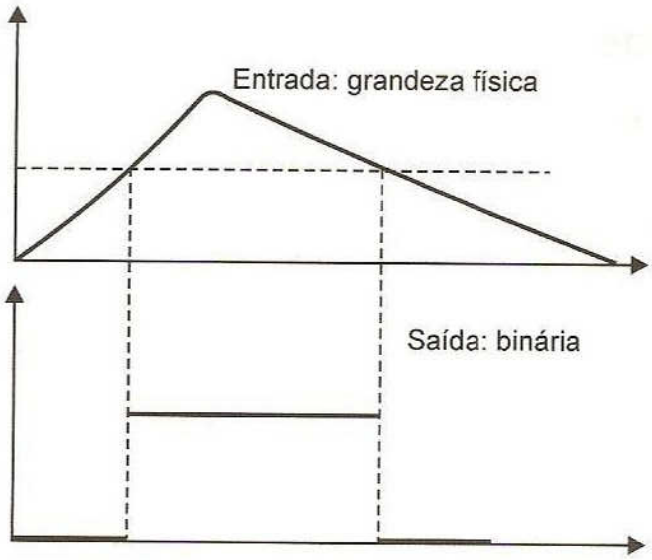


Figura 1.5 - Sensor binário: a saída só varia quando a entrada atinge um valor predeterminado.

Transdutores com esse tipo de saída são largamente utilizados em controle de seqüência de eventos com uso de controladores lógicos programáveis (CLP's).

Existem sensores digitais cujas saídas são codificadas (BCD, código Gray, etc.) ou simplesmente uma seqüência de pulsos cuja freqüência informa quantitativamente a grandeza medida.

- **Analógica:** o transdutor possui uma saída contínua. Neste caso a saída do transdutor é quase uma réplica da grandeza física de entrada. A figura 1.6 mostra o gráfico da saída de um sensor analógico de acordo com a variação da entrada ao longo do tempo.

  Exemplos: célula de carga, transdutor de pressão analógico, etc.

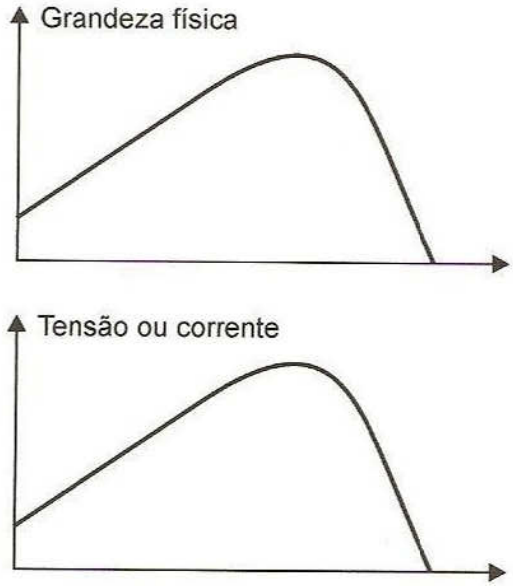


Figura 1.6 - O gráfico da saída de um transdutor analógico (em tensão ou corrente) é a réplica do sinal de entrada.

1.6.2. Sensibilidade

Sensibilidade (ou ganho) é a razão entre o sinal de saída e de entrada para um dado sensor ou transdutor.

No caso de sensores analógicos, a sensibilidade está ligada à relação entre uma variação na grandeza em questão e a variação na medida fornecida pelo instrumento, ou seja, um sensor muito sensível é aquele que fornece uma variação na saída para uma pequena variação da grandeza medida.

1.6.3. Exatidão

Consiste no erro da medida realizada por um transdutor em relação a um medidor padrão.

Segundo o **VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE TERMOS FUNDAMENTAIS E GERAIS DE METROLOGIA,** exatidão é a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro.

1.6.4. Precisão

É a característica relativa ao grau de repetibilidade do valor medido por um transdutor.

Apesar de as definições serem atualmente padronizadas, existem autores e principalmente fabricantes que se referem a essa característica como sendo o erro relativo máximo que o dispositivo pode apresentar.

Vale lembrar que todo sensor possui um erro de leitura que pode ser maior ou menor conforme o tipo de grandeza medida, as condições de operação do sensor, estado de conservação e, é claro, a sua qualidade. Um exemplo de grandeza difícil de ser medida com precisão é a umidade, e por isso a maioria dos sensores comerciais apresenta um erro de leitura entre 2% e 10%.

1.6.5. Linearidade

Esse conceito se aplica a sensores analógicos. É a curva obtida plotando os valores medidos por um transdutor sob teste contra os valores de um padrão. Se o comportamento do transdutor ou sensor for ideal, o gráfico obtido é representado por uma reta, conforme indica a figura 1.7.

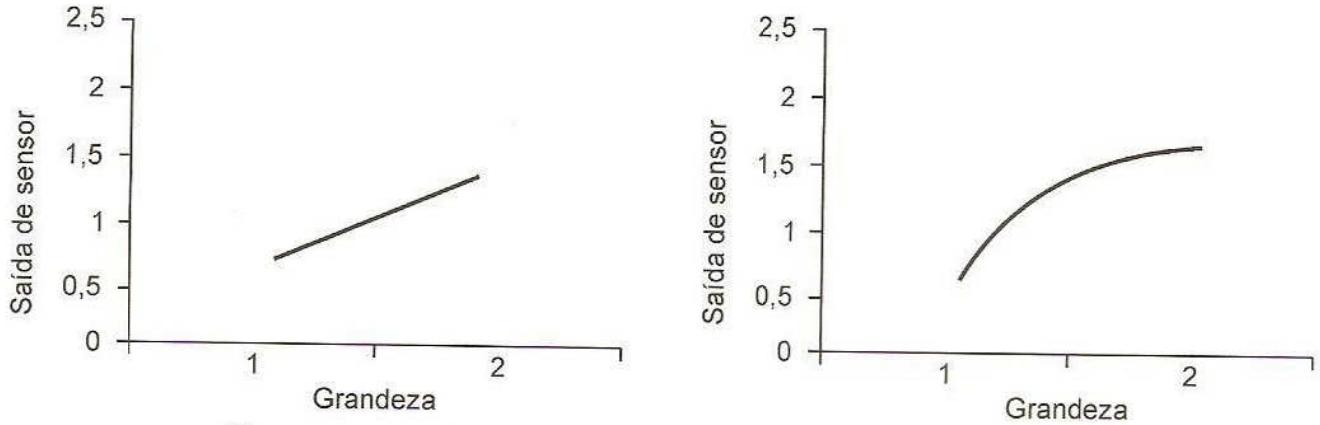


Figura 1.7 - Formas de resposta linear (esquerda) e não-linear (direita).

1.6.6. Alcance *(Range)*

Representa toda a faixa de valores de entrada de um transdutor.

1.6.7. Estabilidade

Está relacionada com a flutuação da saída do sensor. Se a flutuação for muito alta, ou seja, se o sensor possuir uma baixa estabilidade, a atuação do controlador que utiliza esse sinal pode ser prejudicada.

1.6.8. Velocidade de resposta

Trata-se da velocidade com que a medida fornecida pelo sensor alcança o valor real do processo. Em sistemas realimentados o ideal é que o sensor utilizado tenha uma resposta instantânea, pois uma resposta lenta pode prejudicar muito a eficiência do sistema de controle e até impedir que o sistema funcione a contento.

1.6.9. Outras características

Deve-se levar em consideração na especificação dos sensores as seguintes características:

- Facilidade de manutenção
- Custo
- Calibração
- Dimensões
- Faixa de trabalho
- Encapsulamento
- Histerese
- Vida útil

1.7. Classificação dos instrumentos

1.7.1. Quanto à localização

- Instrumentos de painel ou uso interno
- Instrumentos de campo - uso ao tempo

1.7.2. Quanto à função

- Medidores
- Indicadores
- Registradores
- Controladores
- Alarmes

1.8. Nomenclatura de instrumentos e malhas de controle

Para padronizar os documentos utilizados em projetos de instrumentação, foram criadas normas que sugerem uma simbologia para instrumentação para simplificar a análise desses documentos de forma globalizada.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR 8190, apresenta uma simbologia gráfica para representação dos instrumentos e suas funções nas malhas de controle e instrumentação. A NBR 8190 foi baseada na **S.5.1** (*Instrumentation Symbols and Identification*) da *Instrument Society of America* (ISA). Hoje, a ISA é identificada por "*The Instrumentation, Systems, and Automation Society*" .

Regras básicas

O nome de um instrumento é formado por:

- Conjunto de letras que o identificam funcionalmente.
- Primeira letra: identifica a variável medida pelo instrumento.
- Letras subseqüentes: descrevem funcionalidades adicionais do instrumento.
- Número: identifica o instrumento com uma malha de controle. Todos os instrumentos da mesma malha devem apresentar o mesmo número.

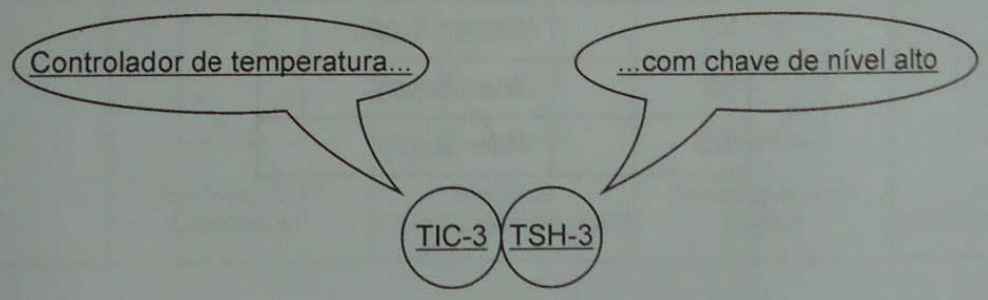
Exemplo:

- Instrumento: registrador controlador de temperatura.

T	RC	- 2	A
Primeira Letra	Letras Subseqüentes	Número da Malha	Sufixo Opcional
Identificação Funcional		Identificação da Malha	
Identificação do Instrumento			

- O que interessa na identificação é a função e não a construção do instrumento.
- Um registrador de pressão diferencial usado para registro de vazão é identificado como FR.
- Um indicador de pressão e um pressostato conectado à saída de um transmissor de nível são denominados: LI e LS.
- Malhas de controle: a primeira letra corresponde à variável medida. Uma válvula de controle que varia uma vazão para controlar um nível é denominada LV.
- Quando as letra C e V são usadas em conjunto, C (Control) deve preceder V (Valve): Válvula de controle Manual: HCV.
- As letras modificadoras devem ser colocadas logo após as letras que modificam.
- Para cada função de um instrumento devem ser colocados junto com o desenho círculos concêntricos tangenciais.

Exemplo: um controlador indicador de temperatura com chave de nível alto. O instrumento pode ser designado como TIC / TSH-3.



- O número de letras não deve ultrapassar quatro. Se o instrumento for registrador e indicador da mesma variável, o I de Indicador pode ser omitido.
- Todas as letras devem ser maiúsculas.

Malhas de controle

Se uma malha possui mais de um instrumento com a mesma identificação, então se adiciona um sufixo à malha: FV-2A, FV-2B, etc. Para o caso de registro de temperatura multiponto utilizam-se TE-25-01, TE-25-02, TE-25-03, etc.

Em fluxogramas não é obrigatório identificar todos os elementos de uma malha. Por exemplo, uma placa de orifício, uma válvula e elementos primários de temperatura podem ser omitidos para representar instrumentos mais importantes. Para fazer a ligação entre os diversos equipamentos, são utilizados símbolos para as linhas que representam as ligações, conforme mostra a figura 1.8.

Suprimento ou Impulso		Sinal de eletromagnetismo guiado	
Sinal não definido		Sinal de eletromagnetismo não guiado	
Sinal pneumático		Ligação de software	
Sinal elétrico		Ligação mecânica	
Sinal hidráulico		Sinal binário pneumático	
Tubo capilar		Sinal binário elétrico	

Figura 1.8 - Símbolos para linhas de instrumentação.

O tipo do suprimento é designado por duas linhas em cima da linha de alimentação:

Abreviação	Significado
AS	*Air Supply*
ES	*Electric Supply*
GS	*Gas Supply*
HS	*Hydraulic Supply*
NS	*Nitrogen Supply*
SS	*Steam Supply*
WS	*Water Supply*

1.8.1. Tabelas

Tabela 1 - Símbolos gerais de instrumentos.

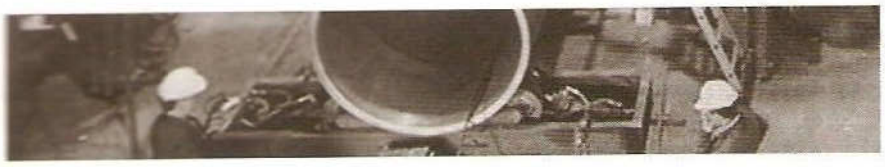
	Montado no campo	Montado no painel principal de controle	Montado atrás do painel principal de controle	Montado em painel local ou do equipamento
Instrumento discreto	Diâmetro = 12mm			
Display compartilhado (*Panel view*)				
Função executada no computador				
PLC	Interface CLP/ Campo/CLP	Interface CLP/Supervisório/CLP	Interface interna (lógica)	Interface CLP/*Panel view*/CLP

Tabela 2 - Significado das letras de identificação.

	Primeira Letra		Letras Subseqüentes		
	Variável medida ou inicial	**Modificadora**	**Função de informação ou passiva**	**Função final**	**Modificadora**
A	Analisador	-	Alarme	-	-
B	Chama de queimador	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
C	Condutividade elétrica	-	-	Controlador	-
D	Densidade ou massa específica	Diferencial	-	-	-
E	Tensão elétrica	-	Elemento primário	-	-
F	Vazão	Razão (fração)	-	-	-
G	Medida dimensional	-	Visor	-	-
H	Comando manual	-	-	-	-
I	Corrente elétrica	-	Indicador	-	-
J	Potência	Varredura ou seletor	-	-	-
L	Nível	-	Lâmpada piloto	-	-
M	Umidade	-	-	-	-
N	Indefinida	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
O	Indefinida	-	Orifício de restrição	-	-
P	Pressão ou vácuo	-	Ponto de teste	-	-
Q	Quantidade ou evento	Integrador ou totalizador	-	-	-
S	Velocidade ou freqüência	Segurança	-	Chave	-
T	Temperatura	-		Transmissor	
U	Multivariável	-	Multifunção	Multifunção	Multifunção
V	Viscosidade	-	-	Válvula	-
W	Peso ou força	-	Poço	-	-
X	Não classificada	-	Não classificada	Não classificada	Não classificada
Y	Indefinida	-	-	Relé ou computação	-
Z	Posição	-	-	Elemento final de controle não classificado	-

Tabela 3 - Exemplos de Nomenclaturas

Primeiras Letras	Variável Inicial ou Medida	Controladores				Dispositivo de Leitura		Chaves e Dispositivos de Alarme			Transistores			Solenóide Relés Disp. Comp.	Elemento Primário	Ponto de Teste	Poço ou Prova	Disp. ou Prova	Disp. Segurança	Elemento Final
		Registro	Indica	Cego	Válvula de Controle auto Atuada	Registro	Indica	High	Low	Comb	Registro	Indica	Cego							
A	Análise	ARC	AIC	AC		AR	AI	ASH	SI	ASHL	ART	AIT	AT	AY	AE	AP	AW	RG		AV
B	Queimador Combustão	BRC	BIC	BC		BR	BI	BSH	BSL	BSHL	BRT	BIT	BT	BY	BE		BW	BG		BZ
C	LIVRE																			
D	LIVRE																			
E	Voltagem	ERC	EIC	EC		ER	EI	ESH	ESL	ESHL	ERT	EIT	ET	EE						EZ
F	Vazão	FRC	FIC	FC	FCV FICV	FR	FT	FSH	FSL	FSHL	FRT	FIT	FT	FY	FE	FP		RG		FV
FQ	Vazão Quantidade	FQRC	FQIC			FQR	FQI	FQS H	FQS L			FQIT	FQT	FQY	FQE					FQV
FF	Flow ratio	FFRC	FFIC	FPC		FFR	FFI	FFSH	FFS L						FE					FFV
G	LIVRE																			
H	Hand		HIC	HC						HS										HV
I	Corrente	IRC	IIC			IR	II	ISH	ISH	ISHL	IRT	IIT	IT	IY	IE					IZ
J	Potência	JRC	JIC			JR	JI	JSH	JSL	JSHL	JRT	JIT	JT	JY	JE					JV
K	Tempo	KRC	KIC	KC	KCV	KR	KI	KSH	KSL	KSHL	KRT	KIT	KT	KY	KE					KV
L	Nivel	LRC	LIC	LC	LCV	LR	LI	LSH	LSL	LSHL	LRT	LIT	LT	LY	LE		LW	LG		LV
M	LIVRE																			
N	LIVRE																			
O	LIVRE																			
P	Pressão Vácuo	PRC	PIC	PC	PCV	PR	PI	PSH	PSL	PSHL	PRT	PIT	PT	PY	PE	PP			PSV PSE	PV
PD	Pressão diferencial	PDRC	PDIC	PDC	PDCV	PDR	PDI	PDS H	PDS L		PDRT	PDIT	PDT	PDY	PE	PP				PDV
Q	Quantidade	QRC	QIC			QR	QI	QSH	QSL	QSHL	QRT	QIT	QT	QY	QE					QZ
R	Radiação	RRC	RIC	RC		RR	RI	RSH	RSL	RSHL	RRT	RIT	RT	RY	RE		RW			RZ
S	Speed Freqüência	SRC	SIC	SC	SCV	SR	SI	SSH	SSL	SSHL	SRT	SIT	ST	SY	SE					SV
T	Temperatura	TRC	TIC	TC	TCV	TR	TI	TSH	TSL	TSHL	TRT	TIT	TT	TY	TE	TP	TW		TSE	TV
TD	Temperatura diferencial	TDRC	TDIC	TDC	TDCV	TDR	TDI	TDS H	TDS L	TSHL	TDRT	TDIT	TDT	TDY	TE	TP	TW			TDV
U	Multivariável					UR	UI							UY						UV
V	Vibração					VR	VI	VSH	VSL	VSHL	VRT	VIT	VT	VY	VE					VZ
W	Peso Força	WRC	WIC	WC	WCV	WR	WI	WSH	WS L	WSH L	WRT	WIT	WT	WY	WE					WZ
WD	Peso Força diferencial	WDR C	WDIC	WDC	WDCV	WDR	WDI	WDS H	WD SL		WDRT	WDIT	WDT	WDY	WE					WDZ
X	LIVRE																			
Y	Evento Estado Presença		YIC	YC		YR	YI	YSH	YSL				YT	YY	YE					YZ
Z	Posição Dimensão	ZRC	ZIC	ZC	ZCV	ZR	ZI	ZSH	ZSL	ZSHL	ZRT	ZIT	ZT	ZY	ZE					ZV
ZD	Gauging desvio	ZDRC	ZDIC	ZDC	ZDCV	ZDR	ZDI	ZDS H	ZDS L		ZDRT	ZDIT	ZDT	ZDY	DEZ					ZDV



Capítulo 2

Sensores de Presença

Os sensores apresentados neste capítulo são utilizados em aplicações industriais e prediais. Em alguns casos podem ser utilizados como sensores de posição.

2.1. Sensores ópticos

São componentes eletrônicos de sinalização e comando que executam detecção de qualquer material sem que haja contato mecânico entre eles.

O princípio de funcionamento do sensor óptico baseia-se na existência de um emissor e de um receptor. A luz gerada pelo emissor deve atingir o receptor com intensidade suficiente para fazer com que o sensor comute sua saída. A figura 2.1 apresenta o princípio de funcionamento de um sensor óptico.

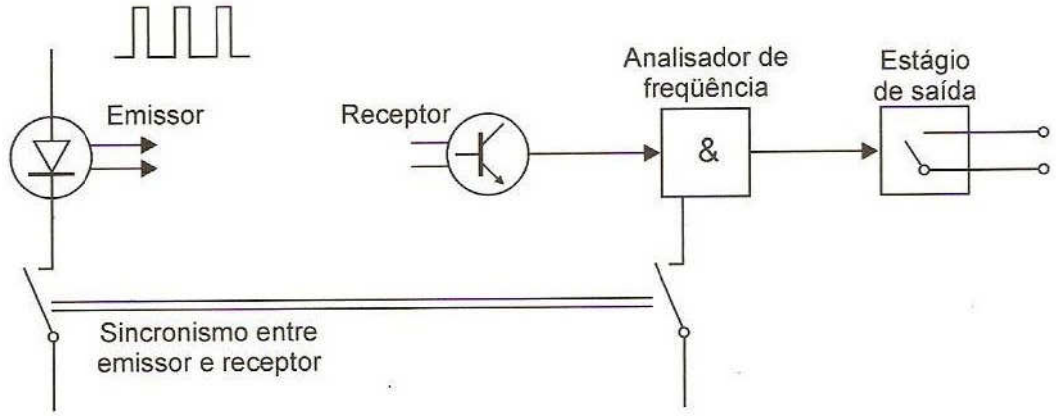


Figura 2.1 - Princípio de funcionamento.

O sinal de luz gerado pelo emissor do sensor óptico é modulado numa determinada freqüência, ou seja, o emissor gera um sinal com um certo número de lampejos por segundo. O receptor do sinal do sensor é acoplado a um filtro que somente considera sinais com a mesma freqüência do emissor. Essa característica é empregada no sensor óptico para minimizar os efeitos de possíveis interferências causadas por outras fontes luminosas que não o emissor.

A figura 2.2 ilustra um diagrama de blocos de um típico sensor óptico, que pode ser dividido da seguinte forma:

- **Oscilador:** gera um sinal elétrico modulado e envia ao emissor.
- **Emissor:** transforma o sinal elétrico vindo do oscilador em um feixe de luz pulsante (modulado), sendo executada a emissão do sinal.

- **Receptor:** converte o sinal de luz pulsante (modulado) em um sinal elétrico modulado.
- **Pré-amplificador:** ajusta o sinal elétrico modulado vindo do receptor a níveis compatíveis com o circuito eletrônico do sensor.
- **Analisador de freqüência:** compara a freqüência do sinal recebido pelo receptor com a freqüência do sinal gerado pelo emissor, considerando apenas os sinais que sejam compatíveis.
- **Discriminador:** compara o nível do sinal recebido do analisador de freqüência com níveis preestabelecidos, definindo o estado do sensor.
- **Estágio de saída:** recebe o sinal do discriminador e comuta a carga.
- **LED:** indicador de estado, sendo acionado pelo discriminador.
- **Fonte de alimentação:** a alimentação do circuito do sensor é feita por um regulador interno.

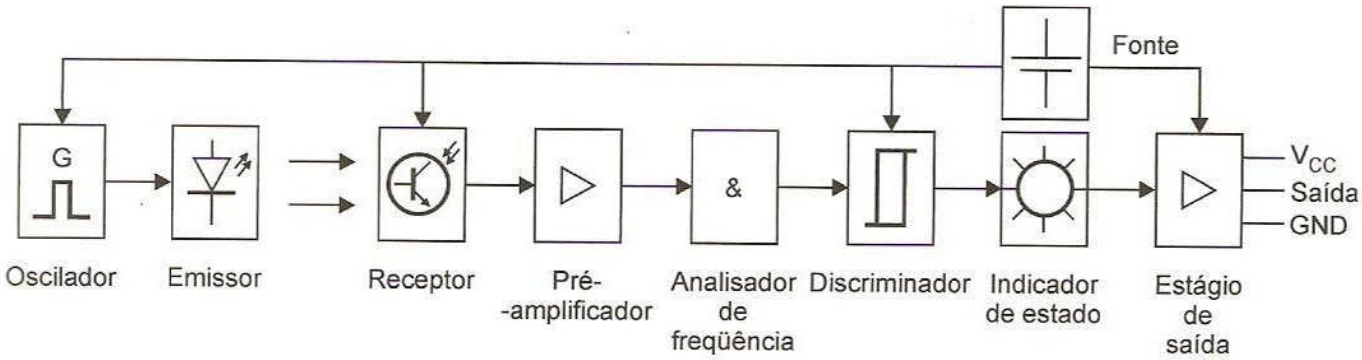


Figura 2.2 - Diagrama de blocos de operação de um sensor óptico.

2.2. Sensor óptico por retrorreflexão

Nesse tipo de sensor o emissor e o receptor também estão montados no mesmo corpo. Um feixe de luz é estabelecido entre o emissor e o receptor por intermédio do refletor. O sensor é ativado quando o objeto interrompe o feixe de luz. O objeto detectado pode deixar passar uma baixa intensidade luminosa desde que o limiar de detecção seja atingido (figura 2.3). Ele também pode refletir a luz de maneira direta ou difusa, desde que não seja detectada pelo receptor do sensor com intensidade suficiente para acioná-lo. Por esta razão, objetos muito transparentes, claros ou brilhantes podem eventualmente não ser detectados por esse tipo de sensor.

O sensor de retrorreflexão possui distância de acionamento totalmente dependente das características do refletor, sendo as condições desse acessório as seguintes: limpeza, dimensão, instalação e características construtivas vitais para o perfeito acionamento do conjunto.

Uma falha no emissor desse tipo de sensor faz com que ele interprete como se o objeto estivesse presente.

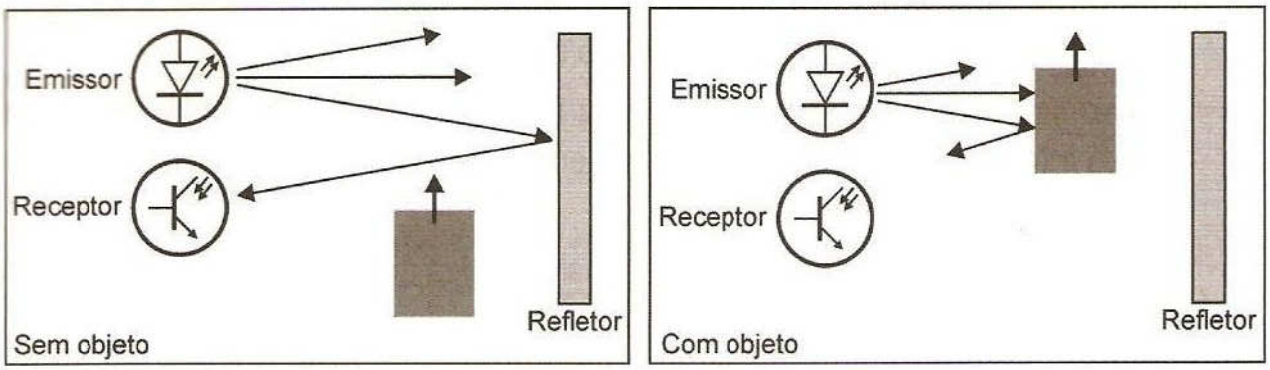


Figura 2.3 - Sensor óptico por retrorreflexão.

2.3. Sensor óptico por transmissão

O sensor óptico de detecção por barreira de luz, ou transmissivo, possui o emissor e o receptor montados em dispositivos separados. Ao serem alinhados, os dois componentes criam entre si uma barreira de luz. A presença de um objeto interrompendo essa barreira faz com que o sensor seja ativado, conforme mostra a figura 2.4.

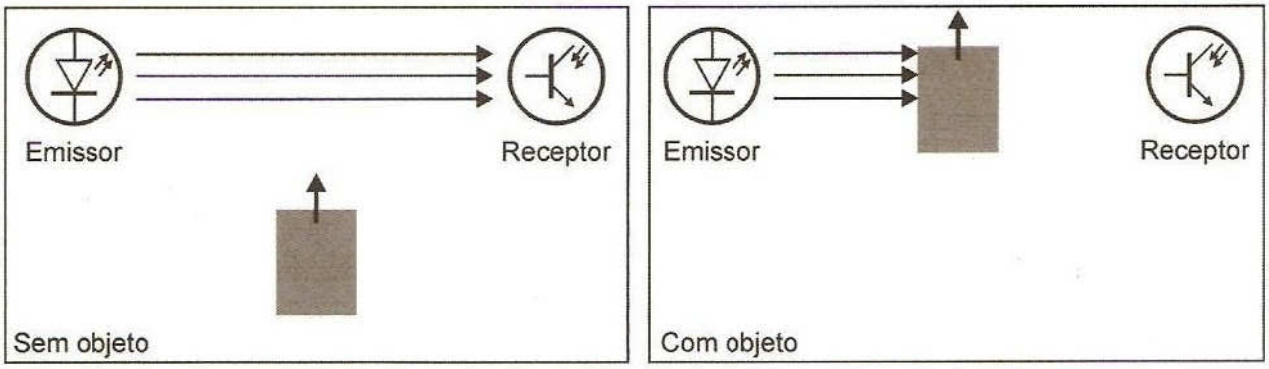


Figura 2.4 - Sensor óptico por transmissão.

A figura 2.5 ilustra uma típica aplicação que utiliza um sensor óptico por transmissão de luz.

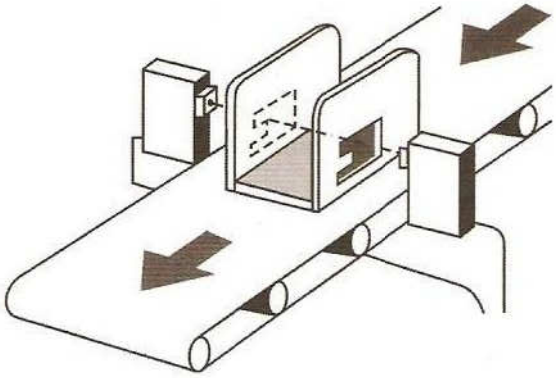


Figura 2.5 - Sensor óptico por transmissão.

2.4. Sensor óptico por reflexão difusa

O sensor óptico de detecção por reflexão difusa possui o emissor e o receptor montados no mesmo dispositivo. A luz enviada pelo emissor cria uma região ativa cuja presença de um objeto faz com que a luz seja refletida de forma difusa, de volta ao receptor, ativando o sensor, como indica a figura 2.6. A figura 2.7 mostra uma aplicação típica para sensores de reflexão difusa.

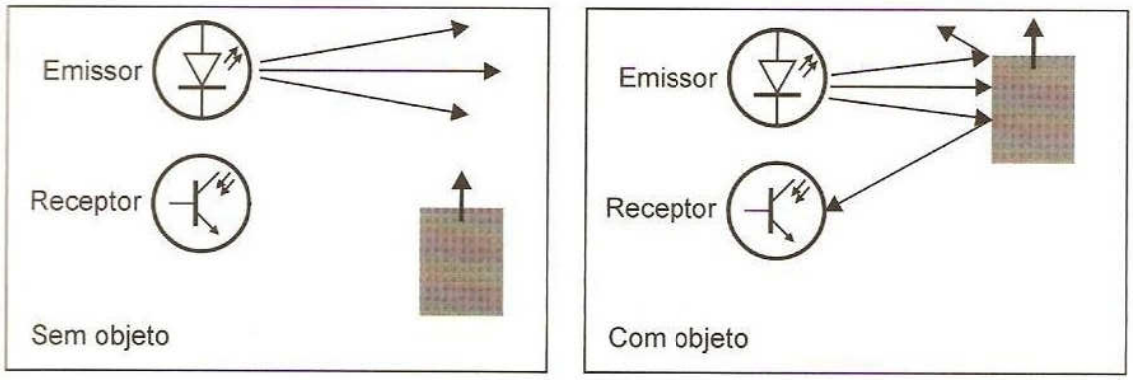


Figura 2.6 - Sensor do tipo reflexão difusa.

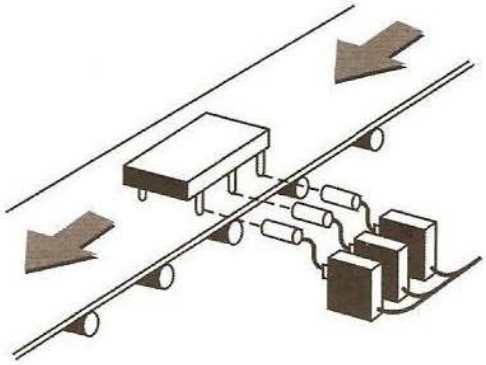


Figura 2.7 - Aplicação de sensores de reflexão difusa.

2.5. Cabos de fibra óptica

São acessórios de grande utilidade para a aplicação em conjunto com alguns modelos de sensores ópticos. Sua função é fazer a transmissão do sinal luminoso do emissor ao local onde se deseja detectar o objeto. Os cabos de fibra óptica reproduzem os efeitos dos sensores por reflexão difusa, retrorreflexão ou barreira de luz. Na figura 2.8 observa-se o princípio de funcionamento das fibras ópticas.

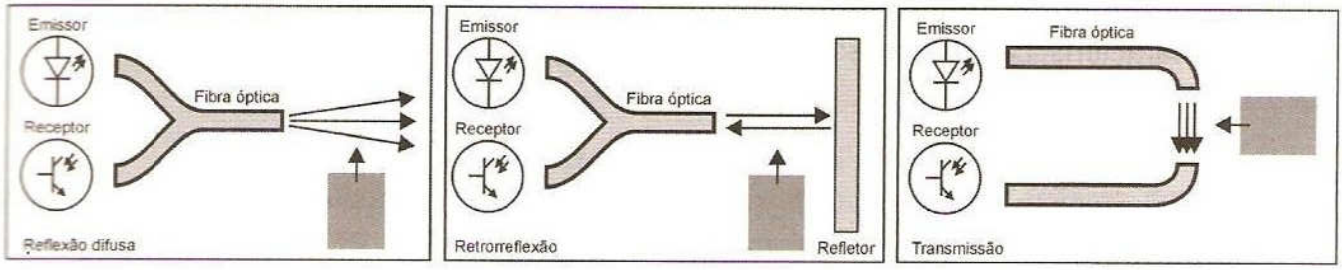


Figura 2.8 - Fibra óptica de vidro.

Devido à tolerância de componentes, raio de luz, curvatura das fibras e qualidade da interface óptica, podem ocorrer diferenças significativas nas distâncias de detecção.

2.6. Características

2.6.1. Distância de acionamento S (mm)

A distância de acionamento define o espaço entre o objeto acionador e a face ativa do sensor no momento em que a saída muda de estado.

2.6.2. Fator de correção

Nos sensores de detecção por reflexão difusa, a distância de acionamento depende das dimensões do objeto a ser detectado, do acabamento da superfície e de sua cor.

Na tabela podem ser observados exemplos do fator de correção para algumas variações de materiais em função do acabamento de sua superfície e da cor.

Tabela 4 - Fator de correção a ser utilizado em diferentes materiais e texturas.

Material	Fator de correção
Cartão Kodak Gray Control	1.0
Isopor branco	1.0...1.2
Metal brilhante	1.2...2.0
Madeira natural	0.4...0.8
Tecido de algodão branco	0.5...0.8
Cartolina preto fosco	0.1
Cartolina preto brilhante	0.3
PVC cinza	0.4...0.8

2.6.3. Terminologias elétricas utilizadas

As simbologias descritas em seguida são utilizadas nas tabelas de dados técnicos que definem as características dos sensores.

Tabela 5 - Características dos sensores ópticos.

s_n	Distância de acionamento nominal
∅	Menor diâmetro detectável
V	Tensão de alimentação do sensor
I	Corrente de saída do sensor
F_c	Freqüência de comutação do sensor
$I_{cons.}$	Corrente de consumo do sensor
V_q	Queda de tensão sobre a saída do sensor
IP	Grau de proteção do sensor
Dim	Dimensões do sensor
Tipo de luz	Tipo de luz emitida pelo sensor (vermelha ou infravermelha)
Conexão	Conexão elétrica utilizada pelo sensor (cabo ou conector)
Função óptica	Define se é um emissor ou receptor

OBSERVAÇÃO: Alguns modelos mencionados possuem proteção contra curto-circuito e inversão de polaridade incorporada. Esses sensores também possuem LED sinalizador de estado e ajuste de sensibilidade.

Os sensores ópticos de corrente contínua são comutadores a três ou quatro fios, dependendo do número de saídas, como ilustra a figura 2.9. A carga a ser comandada deve ser ligada entre a saída e o negativo para o caso de sensores do tipo PNP ou entre a saída e o positivo para o caso de sensores do tipo NPN.

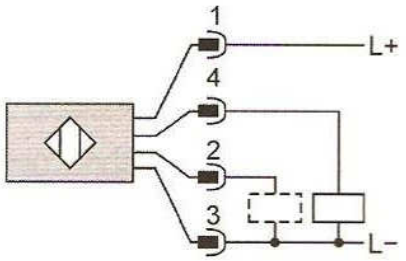


Figura 2.9 - Esquema de conexão do tipo PNP NA+NF (Normalmente Aberto + Normalmente Fechado).

2.7. Sensor infravermelho ativo

Esse tipo de sensor tem o mesmo princípio de funcionamento dos sensores ópticos do tipo barreira, porém utilizados em outro tipo de aplicação (alarmes - sistema de controle de intrusão). A figura 2.10 exibe sensores infravermelhos ativos (IVA) do tipo barreira e retrorrefletivos utilizados em instalações prediais.

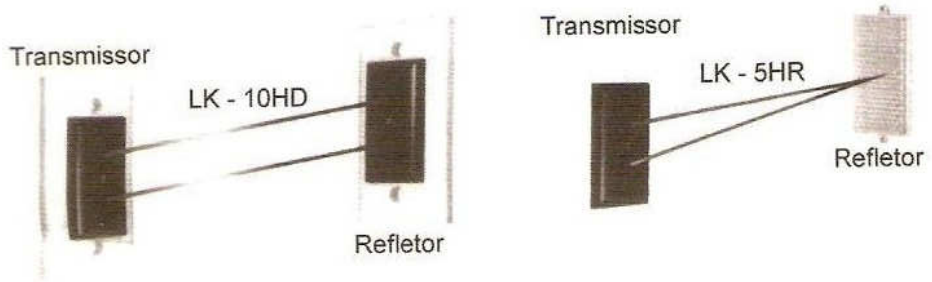


Figura 2.10 - Sensor IVA - detalhe de um receptor.

Constituído por transmissor e receptor, possui suporte ajustável para fácil alinhamento do feixe. Utilizado em aplicações de segurança, como: alarmes, proteção perimetral, iluminação automática, portas de garagem e outras. A figura 2.11 ilustra sensores infravermelhos ativos (IVA) do tipo barreira para uso externo em aplicações prediais.

Figura 2.11 - Sensores IVA comerciais para instalações prediais (figura cedida pela CROW).

2.8. Infravermelho passivo

Trata-se apenas de um receptor de infravermelho com ajuste de sensibilidade. É utilizado principalmente para alarmes de intrusão, pois detecta o calor humano a uma distância razoável (15 a 25 m). O elemento sensitivo desse tipo de sensor é pirotérmico (termopilha) integrado. A figura 2.12 mostra um sensor infravermelho passivo (IVP), utilizado em instalações prediais, com suas curvas de sensibilidade horizontal e vertical.

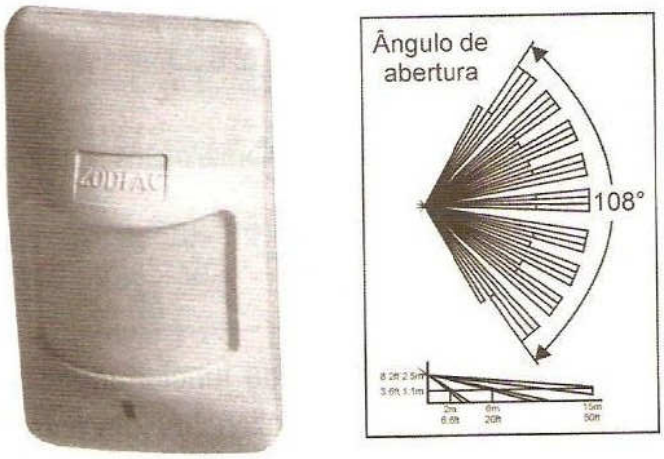


Figura 2.12 - Sensor IVP e o diagrama de sensibilidade da lente (figura cedida pela CROW).

2.9. Janela de luz

Funciona da mesma forma que um sensor de infravermelho ativo. A diferença é que ela monitora uma região bem maior que os sensores IVA. Esses dispositivos são utilizados principalmente em sistemas de segurança de máquinas de indústrias metalúrgicas em que os operários podem sofrer graves ferimentos em função da movimentação das máquinas, como prensas ou esteiras transportadoras. Além disso, podem ser utilizados na detecção de pessoas em elevadores (sistema antifechamento nas portas) ou em controle de acesso a estacionamentos. A figura 2.13 mostra uma aplicação para barreira óptica de proteção.

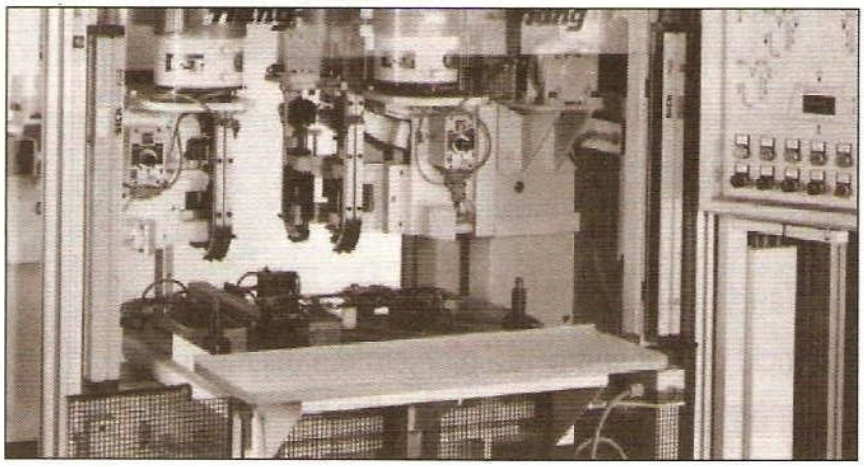


Figura 2.13 - Sistema de segurança com janelas de luz (figura cedida pela Sick Sensor Inteligence).

Esses dispositivos podem possuir desde quatro até vinte feixes de luz entre os elementos sensores. A atribuição é definida pelo comprimento da região a ser monitorada. O exemplo da figura 2.13 ilustrou um dispositivo fotoelétrico de chaveamento de múltiplos feixes em uma estação de montagem.

2.10. Barreira ultra-sônica

Sinais ultra-sônicos são como ondas de som audíveis, porém com freqüências muito mais altas. Os transdutores ultra-sônicos têm cristais de piezelétricos que ressonam a uma freqüência desejada e convertem energia elétrica em energia acústica e vice-versa. As ondas sonoras são transmitidas e refletidas na forma de um cone de um objeto para o transdutor, conforme ilustra a figura 2.14. Um sinal de saída do transdutor é produzido para executar algum tipo de indicação ou controlar uma função.

Exige-se uma distância mínima do sensor para prover um atraso no tempo de forma que os "ecos" podem ser interpretados. Variáveis que podem efetuar a operação de um sensor ultra-sônico incluem: ângulo de superfície do objeto, rugosidade da superfície, mudanças na temperatura ou umidade do ambiente. Os objetos podem ter qualquer tipo de forma refletiva, até mesmo podem ser redondos.

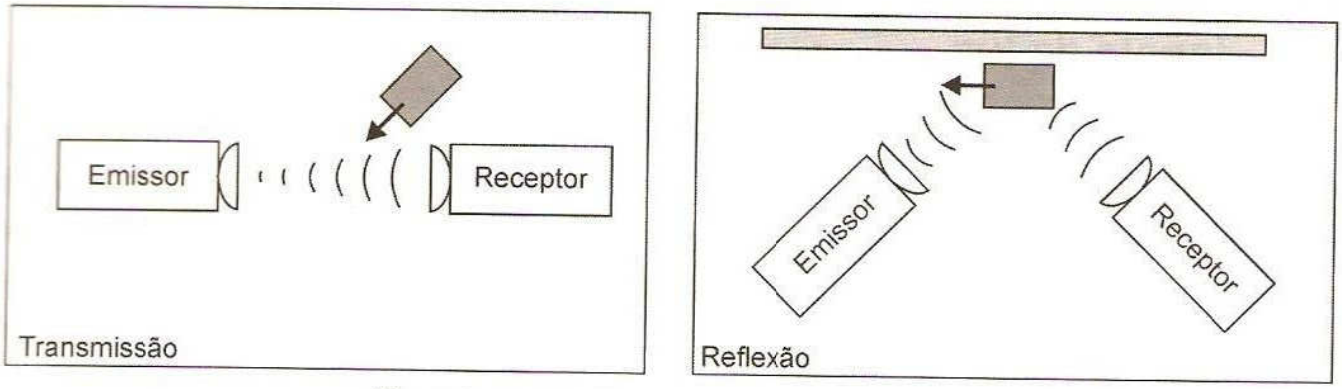


Figura 2.14 - Transmissor/receptor ultra-sônico.

A temperatura pode influenciar o sensor da seguinte forma:

$$DA = 0{,}04826 \times d \times \left(\frac{9}{5}\,^{o}C + 32\right)$$

sendo:

- ***DA*** é a distância aparente do objeto até o transdutor
- ***d*** é a distância do transdutor até o objeto em milímetros
- ***°C*** é o valor da temperatura ambiente

Os sensores de ultra-som têm muitas vantagens na utilização em relação aos sistemas fotoelétricos. Primeiramente eles não podem ser percebidos, o que não ocorre nos sistemas com luz que, se for visível, pode ser facilmente detectada pelo intruso.

A segunda vantagem está no fato de que eles refletem em muitos objetos e na reflexão não formam nenhum padrão visível, o que não ocorre com a luz. Uma parede é um excelente refletor para os sinais e desta forma possibilita sua utilização como elemento do próprio sistema de alarme.

A distância máxima que o transmissor pode ser colocado do receptor é da ordem de 15 m, mas isso varia sensivelmente em função das condições dos locais a serem protegidos.

A figura 2.15 mostra um transdutor fabricado pela Migatron Corp. modelo RPS-409A-IS, que possui saída analógica de 0-10 V e máxima distância sensora de 2 m, recomendado para ambientes perigosos.

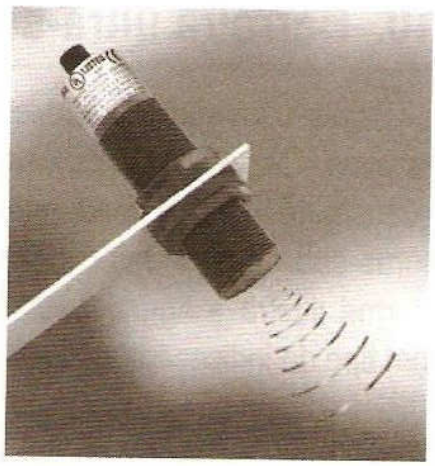


Figura 2.15 - Transdutor ultra-sônico para ambientes perigosos (figura cedida pela Migatron Corp).

2.11. Aplicações

Os sensores ultra-sônicos podem ser utilizados para os mais diversos fins, incluindo: medidas de diâmetro de rolos, detecção de quebra de fios, presença de pessoas, medição de densidade, etc., conforme indica a figura 2.16.

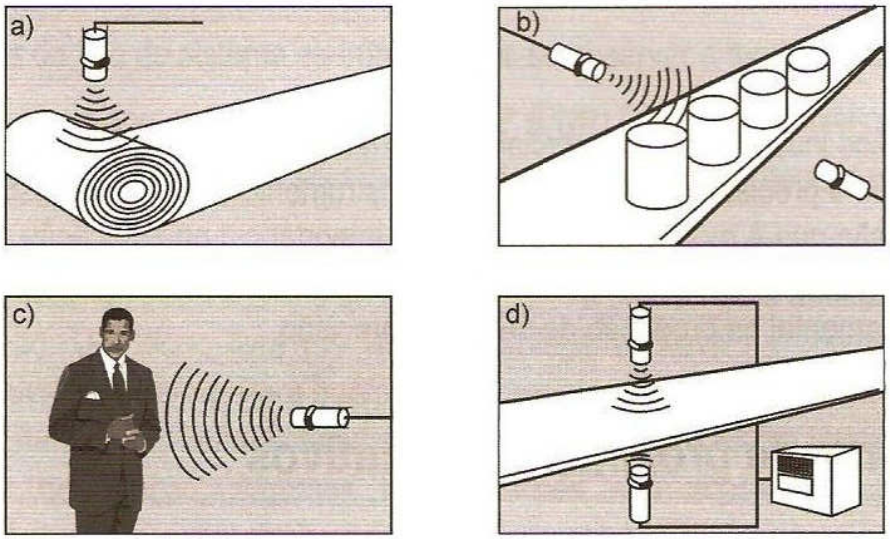


Figura 2.16 - Algumas aplicações de sensores ultra-sônicos.

Capítulo 3

Sensores de Posição

Em processos industriais ou comerciais, os sensores de posição são utilizados em várias aplicações em que a precisão e a sensibilidade do instrumento devem ser ajustadas em função do tipo de operação que é monitorado. Têm grande importância na fabricação de máquinas de ferramentas, em que é necessário definir a posição da ferramenta de corte para chegar a um micrômetro, fundamental na produção de peças de precisão.

3.1. Sensores de proximidade indutivos

São dispositivos de proximidade sem contato que utilizam um campo de freqüência de rádio com um oscilador e uma bobina.

A presença de um objeto altera esse campo e o circuito eletrônico do sensor pode descobrir a alteração. Um sensor de proximidade indutivo inclui um circuito oscilador LC, um comparador de sinal e um chaveador. A bobina desse circuito oscilador gera um campo eletromagnético de alta freqüência. Esse campo é emitido à face do sensor.

Se um objeto metálico se aproxima da face do sensor, são induzidas correntes de Foucault. As perdas resultantes tiram energia do circuito oscilador, reduzindo as oscilações. O comparador de sinal atrás do oscilador LC converte essa informação em um sinal bem definido. A figura 3.1 mostra um diagrama de blocos para facilitar o entendimento do princípio de funcionamento.

A medida de proximidade, posição e deslocamento de objetos são essenciais em muitas aplicações diferentes: posição de válvula, detecção de nível, controle de processo, controle de máquina, segurança, etc.

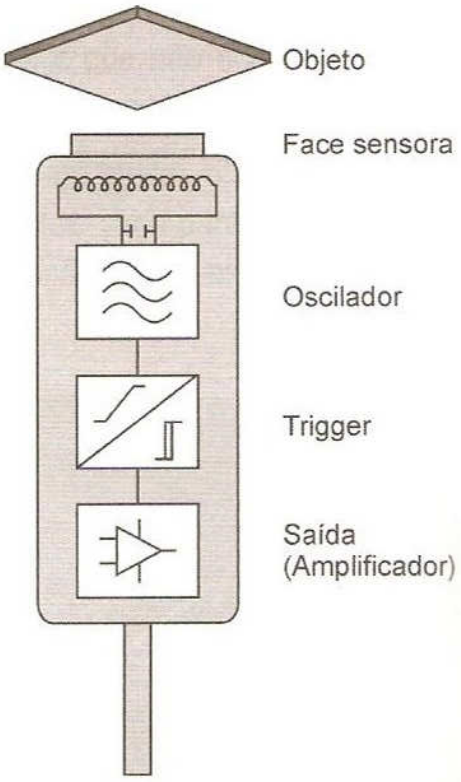


Figura 3.1 - Princípio de funcionamento.

Nesse caso o amplificador de saída incorporado ao sensor é constituído de transistor que tanto pode ser NPN como PNP, compatível com circuitos integrados, transistorizados e acionamento direto de relés.

Há chaves de aproximação indutivas para corrente contínua que têm um circuito independente para a alimentação. Compreendem três ou quatro condutores, dois dos quais para alimentação, um para contato NA e/ou um para contato NF.

Na escolha do tipo de sistema eletrônico, deve-se observar a modalidade de ligação:

- Chaves de aproximação acionadas em P (PNP) ligam o potencial positivo à carga.
- Chaves de aproximação acionadas em N (NPN) ligam o potencial negativo à carga.

As chaves de aproximação para corrente contínua devem ser equipadas com protetor de polarização. Em caso de troca dos fios de ligação + e –, a chave não é danificada e não ocorre função de ligação. Um diodo livre (*de retorno*) protege a chave na ocorrência de tensões indutivas excessivamente altas. Para que a saída transistorizada não receba potencial flutuante por impulsos perturbadores quando ligada a um comando eletrônico, a chave é acionada por um pré-resistor de ligação. Algumas especificações são importantes para sensor de proximidade indutivo, incluindo distância sensora, repetibilidade, campo ajustável e mínima distância do alvo.

3.1.1. Sensores indutivos para corrente alternada (AC)

Neste caso o amplificador de saída incorporado ao sensor é constituído de um tiristor, que atua diretamente sobre um relé, contator ou chave magnética.

Um tipo de chave de aproximação indutiva para ligação em corrente alternada é construído segundo o sistema de dois condutores. A ligação é efetuada de forma idêntica às das chaves fim de curso mecânicas, em série com a carga. A chave recebe sua tensão de alimentação por meio da carga e assim está pronta para entrar em operação.

Também passa pela carga uma pequena corrente de vazamento ou esvaziamento. A chave acionada (amortecida) provoca uma queda de tensão de cerca de 8 V. As chaves de aproximação para corrente alternada são providas de dispositivos de segurança contra tensões excessivas da rede.

3.1.2. Distância de acionamento *versus* freqüência de comutação

A distância nominal de acionamento S_n é um dado do sensor de aproximação apresentado nas tabelas dos fabricantes. A distância real de acionamento S_r pode afastar-se em até 10% da distância nominal de acionamento, pois depende de fatores como temperatura e o material a ser detectado. As figuras 3.2 e 3.3 mostram detalhes de S_n.

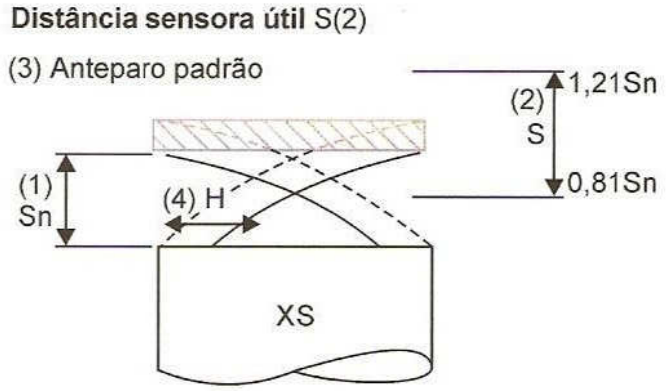


Figura 3.2 - Distância sensora.

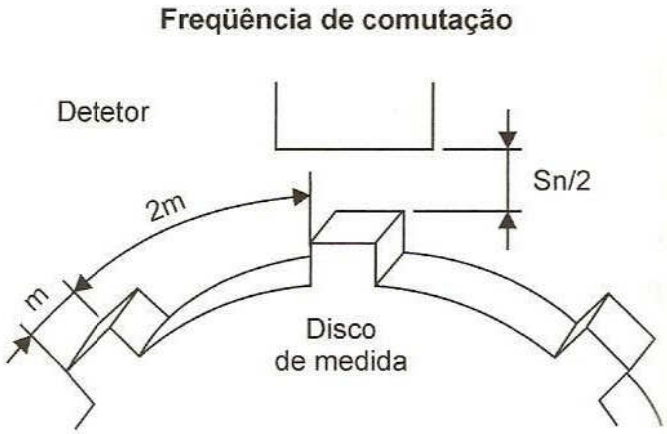


Figura 3.3 - Freqüência de comutação.

3.1.2.1 Precauções

Efeitos de metais e influência mútua: quando o sensor for instalado num painel metálico ou instalar duas ou mais unidades do mesmo sensor frente a frente ou lado a lado, deve-se deixar uma distância mínima, como mostra a figura 3.4, para que o sensor seja acionado somente pelo objeto a ser detectado.

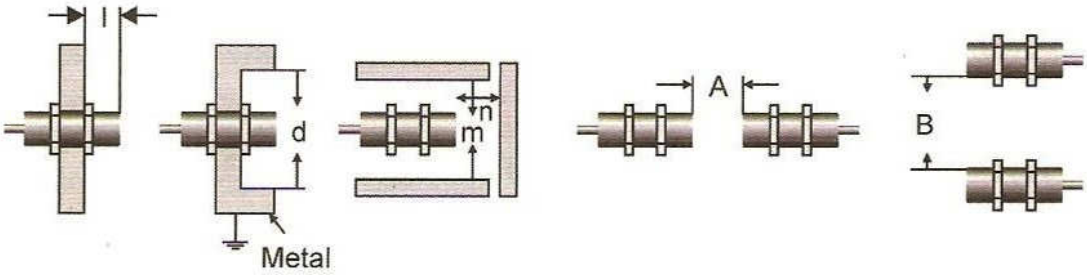


Figura 3.4 - Influência mútua entre sensores indutivos.

3.1.2.2 Características gerais

Os sensores indutivos apresentam algumas características comuns, independentes do tipo de aplicação, dentre as quais podemos destacar:

- Não possuem peças móveis e atuam sem contato físico.
- São totalmente vedados, tornando possível o uso em água, óleos, poeira, etc.
- Têm grande precisão na repetição do ponto de comutação (repetibilidade).
- Substituem com vantagens as chaves fim de curso e microchaves.

3.1.2.3 Aplicação

Os detectores de proximidade são concebidos para realizar as seguintes tarefas:

- Controle de presença ou ausência, fim de curso;
- Detecção de passagem, de posicionamento;
- Contagem de peças.

Sua utilização é particularmente recomendada quando:

- A velocidade de ataque e o funcionamento são elevados;
- Em condições ambientais severas, presença de poeira, óleo de corte, agentes químicos, umidade, vapores, choques e vibrações;
- Peças a detectar são de pequenas dimensões ou frágeis;
- Automatismo estático.

Os detectores de proximidade são freqüentemente utilizados em:

- Máquinas de montagem, máquinas operatrizes, sistemas de usinagem e prensas;
- Máquinas de embalagem, transporte e armazenagem, conforme exibe a figura 3.5.

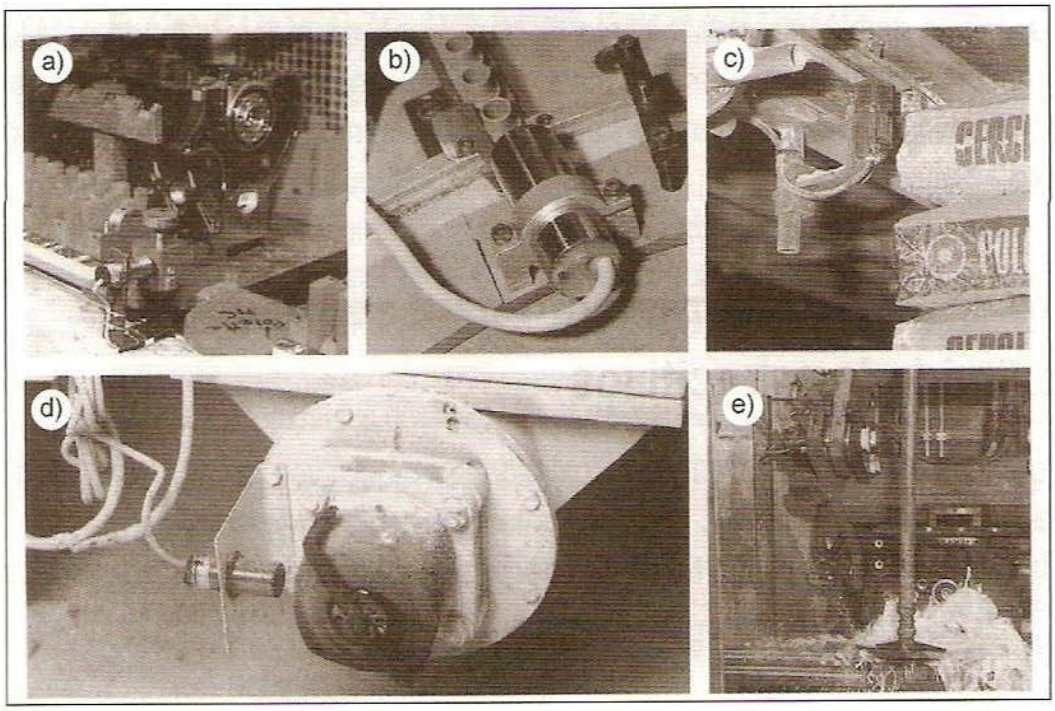


Figura 3.5 - Exemplo de algumas aplicações dos sensores indutivos. a) Máquina operatriz, b) prensa, c) máquinas de embalagens, d) sistemas de armazenagem e e) sistemas de usinagem.

3.2. Sensores de proximidade capacitivos

Os sensores de proximidade capacitivos são projetados para operar gerando um campo eletrostático e detectando mudanças nesse campo, que acontecem quando um alvo se aproxima da face ativa. As partes internas do sensor consistem em uma ponta capacitiva, um oscilador, um retificador de sinal, um circuito de filtragem e um circuito de saída.

Na ausência de um alvo, o oscilador está inativo. Quando o alvo se aproxima, ele aumenta a capacitância do circuito com a ponta de compensação. Quando a capacitância atinge um valor determinado, o oscilador é ativado, o que ativa o circuito de saída e faz com que ele comute seu estado (de "aberto" para para "fechado" ou vice-versa).

A figura 3.6 mostra um diagrama de blocos para facilitar o entendimento do princípio de funcionamento.

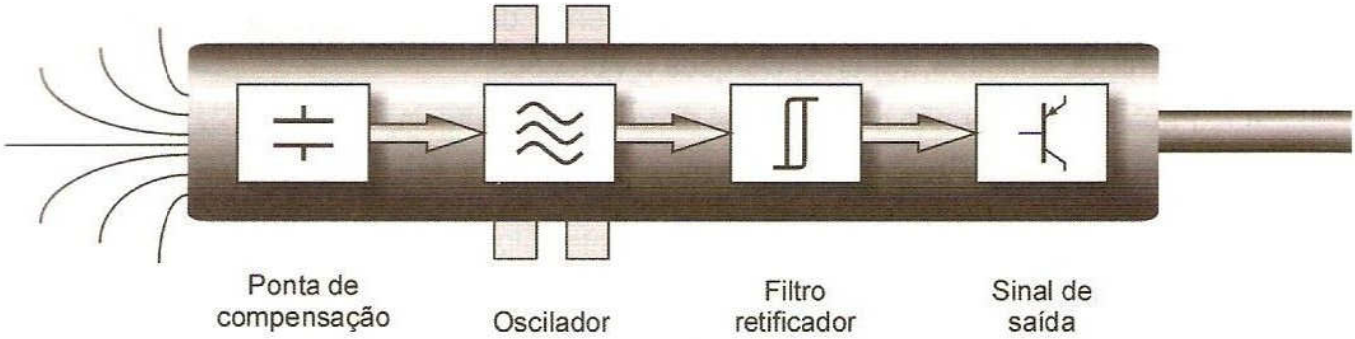


Figura 3.6 - Diagrama de blocos.

A capacitância do circuito com a ponta de compensação é determinada pelo tamanho do alvo, sua constante dielétrica e distância até a ponta. Quanto maior o tamanho e a constante dielétrica de um alvo mais ele aumenta a capacitância. Quanto menor a distância entre a ponta e o alvo maior a capacitância.

3.3. Alvo-padrão e aterramento para sensores de proximidade capacitivos

O alvo-padrão para sensores de proximidade capacitivos é o mesmo utilizado para sensores de proximidade indutivos. O alvo é aterrado de acordo com normas de teste IEC. Entretanto, um alvo numa aplicação típica não necessita estar aterrado para se ter uma detecção confiável.

3.4. Sensores capacitivos blindados *versus* não-blindados

Os sensores de proximidade capacitivos blindados são mais indicados para a detecção de materiais de constantes dielétricas baixas (difíceis de detectar), devido ao seu campo eletrostático altamente concentrado. Isso permite que eles notem alvos que sensores não-blindados ignoram. Entretanto, também torna-os mais suscetíveis à comutação falsa devido ao acúmulo de sujeira ou umidade na face ativa do sensor.

O campo eletrostático de um sensor não-blindado é menos concentrado do que o da versão blindada. Eles são mais indicados para detectar materiais de constantes dielétricas altas (fáceis de detectar) ou diferenciar entre materiais de constantes altas e baixas.

Para os alvos em material apropriado, os sensores em versão não-blindada apresentam alcance maior que aqueles em versão blindada.

As versões não-blindadas são equipadas com uma ponta de compensação que permite que o sensor ignore névoa úmida, poeira, pequenas quantidades de sujeira e pequenos

respingos de óleo ou água que se acumulem no sensor. A ponta de compensação também torna o sensor resistente a variações da umidade ambiente.

Versões não-blindadas são, portanto, melhor escolha para ambientes empoeirados e/ou úmidos. As versões não-blindadas são também mais adequadas que as blindadas para uso com suportes plásticos para sensores, um acessório projetado para aplicações em que se faz a detecção de nível de líquido.

O suporte é montado com um furo num tanque e o sensor é inserido no receptáculo do suporte. O sensor detecta o líquido no tanque através da parede do suporte, permitindo que o suporte sirva tanto para vedação do furo como para fixação do sensor.

3.5. Fatores de correção de alvo para sensores de proximidade capacitivos

Para um determinado tamanho do objeto-alvo, os fatores de correção para sensores capacitivos são determinados segundo a constante dielétrica do material do alvo. Materiais com constantes dielétricas altas são mais fáceis de detectar que aqueles com valores mais baixos. Observe uma lista parcial de constantes dielétricas para alguns materiais industriais típicos.

Tabela 6 - Constantes dielétricas de materiais industriais conhecidos.

Acetona 19,5	Dióxido de Carbono 1,000985	Petróleo 2,0-2,2	Resina de Melamina 4,7-10,2
Açúcar 3,0	Ebonita 2,7-2,9	Óleo de Transformador 2,2	Resina de Poliéster 2,8-8,1
Água 80	Etanol 24	Óleo de Turpentina 2,2	Shellac 2,5-4,7
Álcool 25,8	Etilenoglicol 38,7	Papel 1,6-2,6	Resina de Uréia 5-8
Amônia 15-25	Farinha 1,5-1,7	Papel Saturado de Óleo 4,0	Resina Epóxi 2,5-6
Anilina 6,9	Freon R22 e 502 (líquido) 6,11	Parafina 1,9-2,5	Sal 6,0
Ar 1,000264	Gasolina 2,2	Placa Prensada 2-5	Soluções Aquosas 50-80
Areia 3-5	Glicerina 47	Poliacetal 3,6-3,7	Sulfa 3,4
Baquelite 3,6	Leite em Pó 3,5-4	Poliamida 5,0	Teflon 2,0
Benzeno 2,3	Madeira Seca 2-7	Polietileno 2,3	Tetraclorido de Carbono 2,2
Borracha 2,5-35	Madeira Úmida 10-30	Polipropileno 2,0-2,3	Tolueno 2,3
Calcário de Concha 1,2	Mármore 8,0-8,5	Poliestireno 3,0	Vaselina 2,2-2,9
Celulóide 3,0	Mica 5,7-6,7	Porcelana 4,4-7	Verniz de Silicone 2,8-3,3
Cereal 3-5	Nitrobenzina 36	Resina Acrílica 2,7-4,5	Vidro 3,7-10
Cimento em Pó 4,0	Nylon 4-5	Resina de Clorido Polivinil 2,8-3,1	Vidro de Quartzo 3,7
Cinza Queimada 1,5-1,7	Óleo de Soja 2,9-3,5	Resina de Estireno 2,3-3,4	
Cloro Líquido 2,0	Perspex 3,2-3,5	Resina de Fenol 4-12	

3.5.1. Utilização

Os sensores de proximidade capacitivos são indicados para detectar materiais metálicos e não-metálicos, tais como: água, óleo, pós, grãos, madeira, papelão, vidro, PVC, cerâmica, etc.

3.5.2. Aplicações

Esse tipo de sensor pode ser utilizado para:

- Controle de nível em silos;
- Contagem de caixas em linha de produção;
- Conferir presença de líquidos em frascos.

3.6. Sensores de proximidade magnéticos

Eles se baseiam no uso de campos magnéticos e convertem esse campo em um sinal elétrico. Esses sensores podem ser: eletrônicos e a ampola *reed*.

Sensores de proximidade magnéticos são baseados no uso de um *Reed Switch* e um ímã permanente, como ilustra a figura 3.7, e podem ser facilmente fabricados. O ímã pode ser parte do objeto a ser detectado ou do dispositivo do sensor. O dispositivo é projetado de modo que a presença do objeto na região do sensor ative a chave, enviando um sinal para o controle.

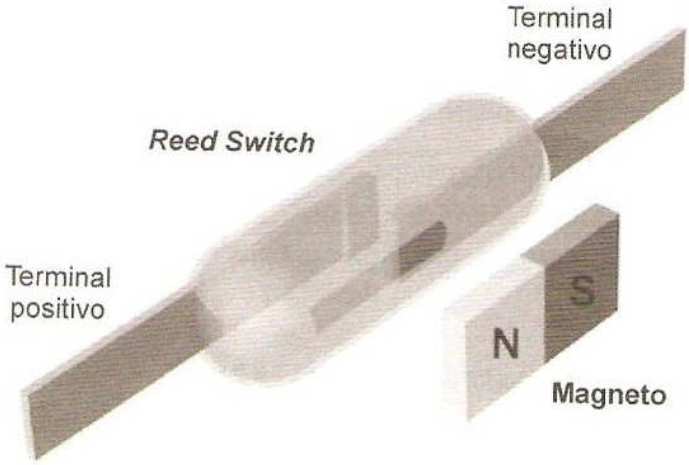


Figura 3.7 - Sensor de proximidade magnético.

Os sensores eletrônicos de proximidade magnéticos se baseiam no efeito *Hall*. Os sensores de *Hall* são dispositivos semicondutores cujo comportamento elétrico pode ser influenciado por um campo magnético.

Nos sensores de efeito *Hall* observa-se que, quando um condutor plano atravessado por uma corrente elétrica é colocado em um campo magnético cujas linhas de fluxo estão perpendiculares à superfície do condutor, os elétrons da corrente elétrica são deslocados lateralmente (Lei de Lorentz), formando um ângulo reto em relação à direção da corrente, como se observa na figura 3.8.

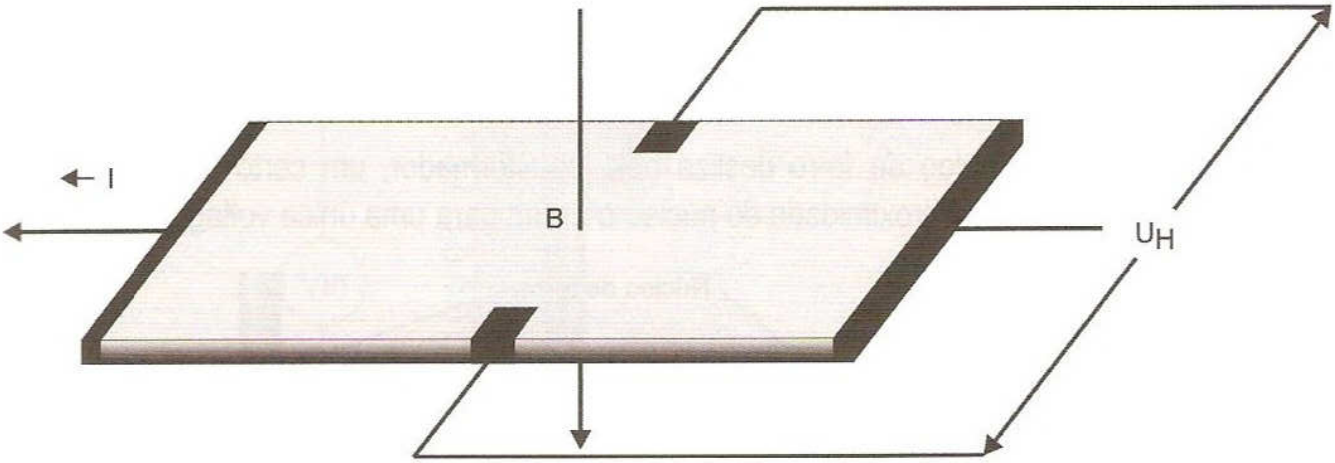


Figura 3.8 - Efeito *Hall*.

A diferença de potencial chamada de tensão de *Hall* (U_H) que esse efeito produz é diretamente proporcional à intensidade do campo *(B)*, à corrente elétrica *(I)* e à relação entre o coeficiente de *Hall* (R_H) e a espessura *(d)*. A tensão de *Hall* é dada por:

$$U_H = \left(\frac{R_H}{d}\right) \times I \times B$$

O coeficiente R_H depende do material utilizado para fabricação da placa condutora. Na prática se utiliza material semicondutor (Si) para ter maior sensibilidade.

3.7. LVDT

A construção física de um típico transformador linear diferencial variável (LVDT) consiste em um núcleo de material magnético móvel e três bobinas que compreendem o transformador estático. Uma dessas três bobinas é o enrolamento primário e as outras duas são as bobinas secundárias. A figura 3.9 mostra um LVDT e a figura 3.10 exibe diagramas elétricos de ligação e suas respectivas zonas de influências do núcleo.

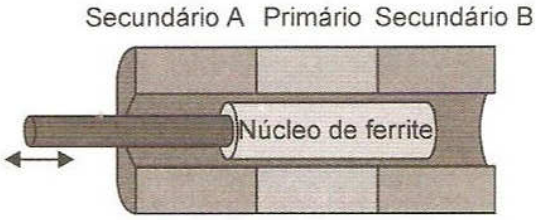


Figura 3.9 - Ilustração do LVDT.

A fórmula básica do transformador, cuja voltagem é proporcional ao número de espiras da bobina, é o fundamento do LVDT. Sua fórmula é:

$$\frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = \frac{N_{saída}}{N_{entrada}}$$

sendo:

→ ***N*** o número de voltas nas bobinas e *V* a voltagem de leitura.

Quando o núcleo de ferro desliza pelo transformador, um certo número de voltas da bobina é afetado pela proximidade do núcleo e assim gera uma única voltagem de saída.

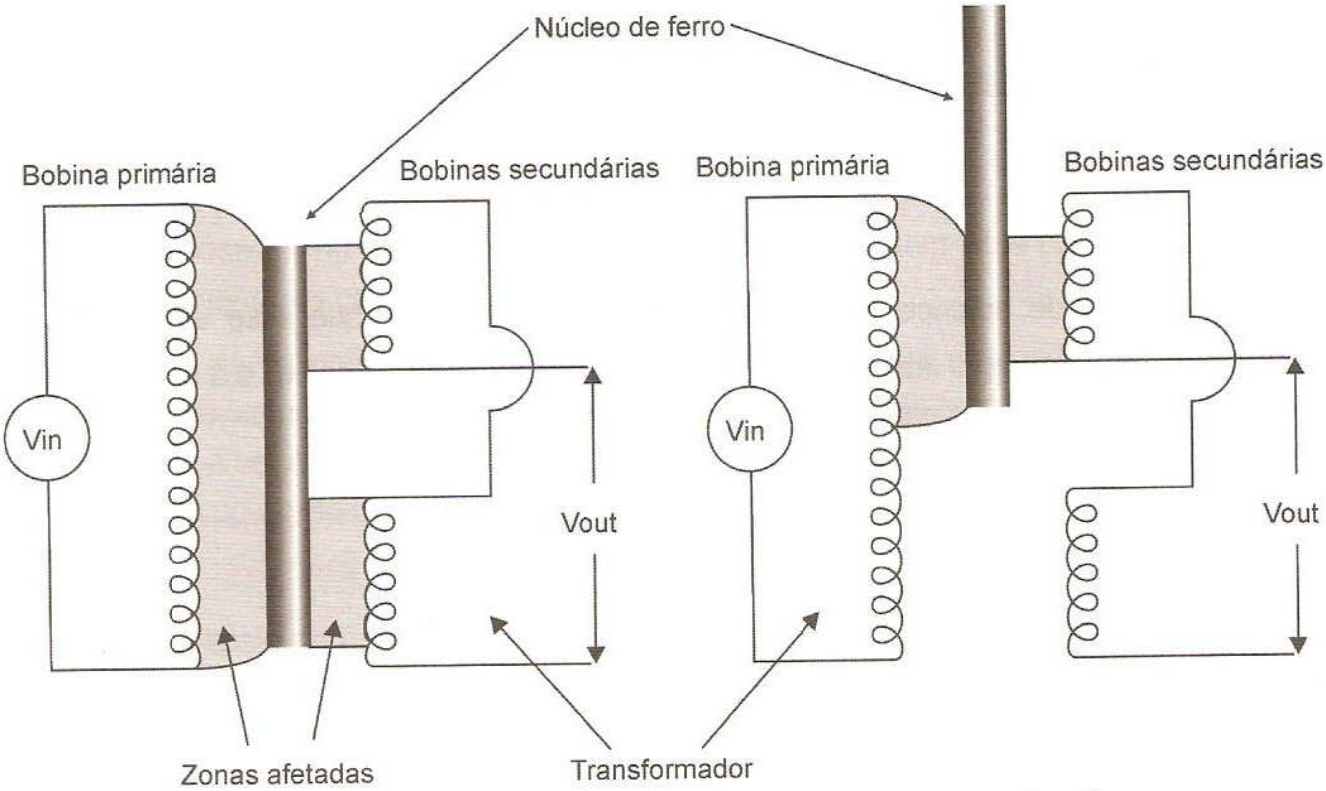


Figura 3.10 - Influência do núcleo no transformador do LVDT.

3.7.1. LVDT com enrolamento aberto

A maioria dos LVDT é enrolada, como indica a figura 3.10. Esse tipo é conhecido como enrolamento aberto. Desde que um certo número de voltas da bobina é uniformemente distribuído ao longo do transformador, a voltagem de saída é proporcional ao deslocamento do núcleo de ferro quando desliza pelo transformador. A relação é dada por:

$$D = M \times V_{saída}$$

sendo:

→ ***D*** o deslocamento do núcleo de ferro em relação ao transformador, *M* é a sensibilidade do transformador (inclinação da curva de deslocamento *versus* voltagem).

3.7.2. LVDT com enrolamento proporcional

Outro tipo comum de enrolamento do LVDT é conhecido como proporcional, apresentado na figura 3.11.

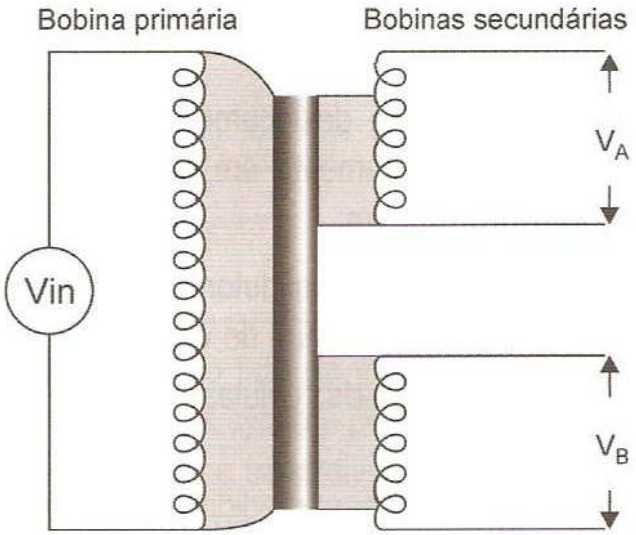


Figura 3.11 - LVDT com enrolamento proporcional.

3.7.3. Prós e contras do uso do LVDT

Prós:

1. Custo relativamente baixo devido à sua popularidade;
2. Sólido e robusto, capaz de ser utilizado em uma ampla variedade de ambientes;
3. Sem resistência por atrito, desde que o núcleo de ferro não entre em contato com o transformador, resultando uma vida de serviço praticamente infinita;
4. Alta razão entre sinal e ruído e baixa impedância de saída;
5. Histerese desprezível;
6. Teoricamente apresenta uma resolução infinitesimal. Na realidade, a resolução do deslocamento é limitada pela resolução dos amplificadores e medidores de voltagem utilizados para processar o sinal de saída;
7. Pequeno tempo de resposta, limitado apenas pela inércia do núcleo de ferro e pelo tempo de resposta dos amplificadores;
8. Sem dano permanente do LVDT se a medida exceder a faixa de trabalho determinada pelo equipamento.

Contras:

1. O núcleo deve estar em contato com a superfície que será medida, o que nem sempre é desejado. Contudo, uma interface fina sem contato pode ser feita através de um servo-pneumático para manter uma camada de ar entre a saída de ar e a peça a ser medida.
2. As medidas dinâmicas são limitadas para não mais de um décimo da freqüência de ressonância do LVDT, na maioria dos casos.

3.7.4. Aplicações

Embora o LVDT seja um sensor de deslocamento, muitas outras quantidades físicas podem ser medidas, convertendo deslocamento em outras grandezas através de relações matemáticas. Assim pode ser empregado em:

- **Deslocamento:** extensômetros, transdutores de temperatura (dilatação), controle de válvulas, sensoriamento de abertura de válvulas.
- **Deflexão de vigas, fios ou anéis:** células de carga, transdutores de força ou de pressão.
- **Variação de espessura em peças:** medidas de espessura e perfil, classificação de produtos por tamanho.
- **Nível de fluído:** medida de nível e fluxo de fluído, sensoriamento de posição em cilindros hidráulicos.
- **Velocidade e aceleração:** controle de suspensão automotiva.

3.8. Transformador Diferencial Rotacional Variável - RVDT

O RVDT é utilizado na medida de ângulos e opera com o mesmo princípio do sensor LVDT. Ele utiliza um núcleo de ferro e o RVDT usa um núcleo rotativo ferromagnético, conforme a figura 3.12.

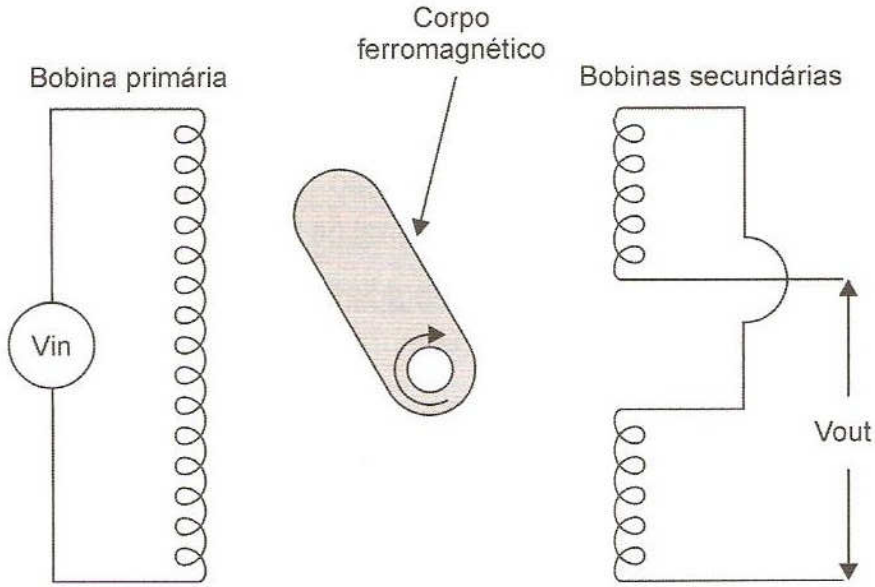


Figura 3.12 - Típico esquema de um RVDT.

3.8.1. Especificações

1. A potência de entrada é de 3 a 15 Vrms em onda senoidal com freqüência entre 60 e 20.000 Hz.

2. Capaz de medir rotação continuamente, porém a maioria dos RVDT tem eficiência acima de ±60°.

3. São altamente lineares: 0.25% @ ±30°, 0.50% @ ±40°, 1.50% @ ±60°.

3.9. Syncro

O termo syncro está associado ao fato de esses transdutores serem construtivamente semelhantes às máquinas síncronas. Os syncros pertencem a uma categoria de componentes eletromagnéticos, cujo objetivo principal é transmitir, receber ou converter dados angulares. O syncro comporta-se como um motor (ou gerador) síncrono, ou seja, um transformador rotativo, sendo o primário o rotor (dotado da bobina de excitação) e o secundário o estator (dotado de três bobinas interligadas em Y defasadas de 120 graus). A figura 3.13 exibe os componentes de um syncro.

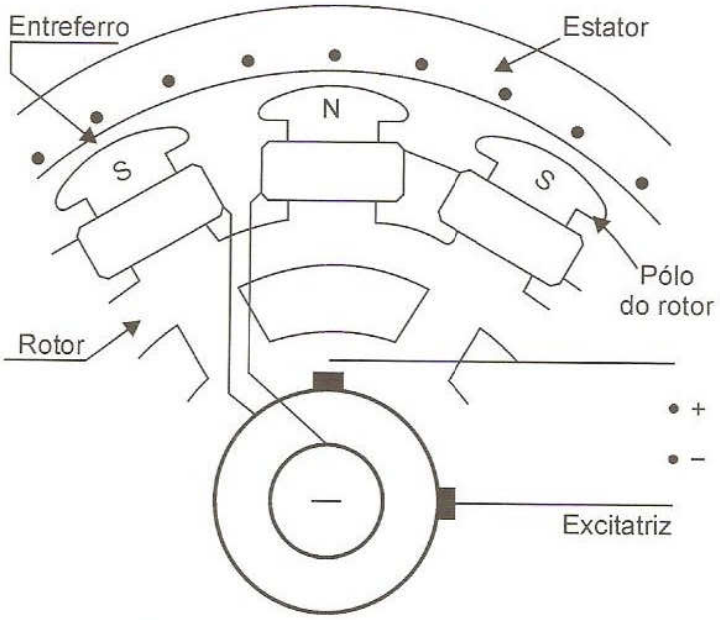


Figura 3.13 - Componentes de um motor síncrono.

Variando a posição angular do rotor em relação ao estator, varia o acoplamento magnético entre os enrolamentos do estator e do rotor, logo as tensões induzidas em cada fase variam juntas. Desta forma é transformada a variação de uma posição angular na variação de uma grandeza elétrica, ou seja, a tensão no secundário.

A aplicação mais comum para o syncro é o par transmissor/receptor apresentado na figura 3.14. Neste caso, o receptor terá seu secundário alimentado por uma das tensões induzidas no secundário do transmissor, com valores proporcionais à posição do rotor, logo a posição do receptor seguirá aquela determinada pelo transmissor. Esse tipo de aplicação é utilizado em indicadores de posição do vento e da pinça de guindastes portuários.

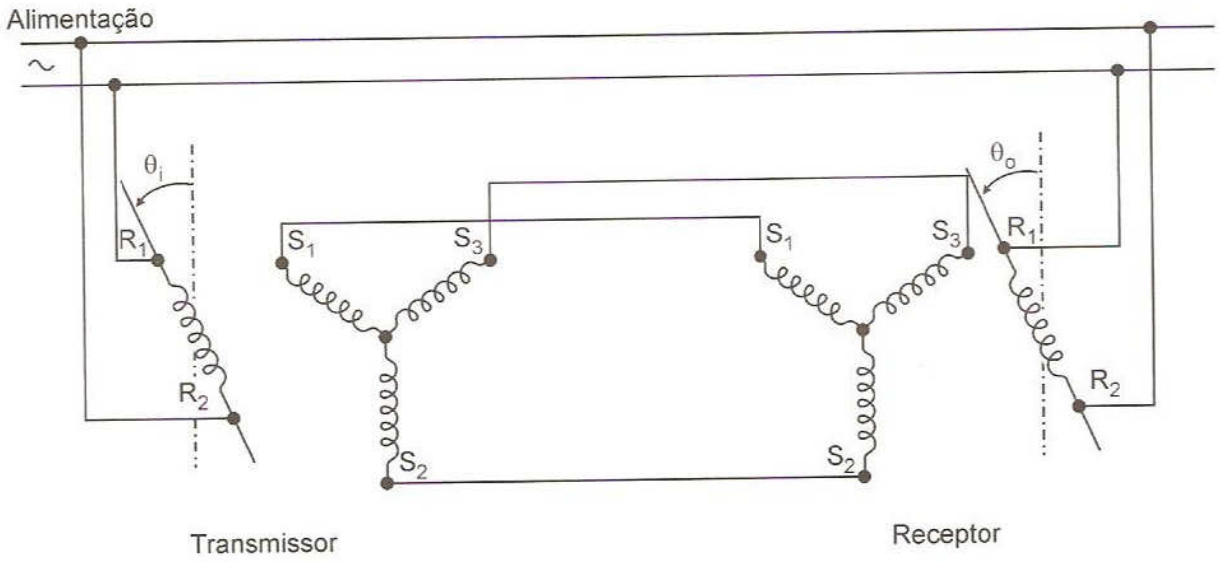


Figura 3.14 - Esquema de funcionamento de um par syncro.

3.10. Sensor potenciométrico

Potenciômetros lineares são sensores que produzem uma resistência proporcional ao deslocamento ou posição. O elemento de resistência é alimentado por uma voltagem DC ou AC e a voltagem de saída é idealmente uma função linear do deslocamento. Potenciômetros lineares são resistores essencialmente variáveis. Eles podem ser formados por fios enrolados ou plástico condutivo, no formato retangular ou cilíndrico.

São transdutores de contato comum na forma de resistores variáveis com três contatos. Dois contatos conectam aos fins do resistor, assim a resistência entre eles é fixa. O terceiro contado é conectado a um posicionador que é movido ao longo do resistor e a resistência entre ele e cada uma das outras duas conexões varia.

A especificação mais importante para potenciômetros lineares é o alcance de funcionamento ou distância de medida. Precisão e linearidade são avaliadas como uma porcentagem do fundo de escala. Também são importantes a resistência total, tolerância da resistência e expectativa de vida. Potenciômetros são tipicamente lineares e têm uma vida de milhões de mudanças.

Uma configuração de sonda é usada para descobrir a posição de um objeto sem ser anexada ao objeto. A sonda pode ser empurrada pelo objeto por uso de uma mola, motor ou força pneumática. Saídas elétricas para potenciômetros lineares podem incluir sinais analógicos ou digitais. Como características especiais, podem ser lacrados para evitar contaminação do ambiente e também podem ter uma indicação rotativa livre.

Esses dispositivos podem ser tão simples quanto o elemento sensível ou tão complicados quanto um instrumento com mostrador local, controles e saídas para um sistema supervisório.

Os sensores potenciômetros são constituídos de um elemento resistivo do qual se movimenta um cursor em que vem aplicada uma tensão de entrada *Vi;* a tensão de saída *Vu* é determinada pela distância do cursor à outra extremidade do cursor. Ao ser atravessado por uma corrente do circuito, implica uma queda de tensão dada pela fórmula:

$$Vu = r \times \frac{Vi}{R}$$

Se o potenciômetro for linear e r proporcional a R, então:

$$\left.\begin{array}{l} R = k \times L \\ r = k \times X \end{array}\right\} Vu = X \times \frac{Vi}{L}$$

Se o potenciômetro for do tipo angular, o ângulo θ corresponde à posição do cursor e o ângulo ϕ corresponde ao valor total do cursor, a queda de tensão é determinada pela fórmula:

$$\left.\begin{array}{l} r = K \times \theta \\ R = K \times \varphi \end{array}\right\} Vu = \theta \times \frac{Vi}{\varphi}$$

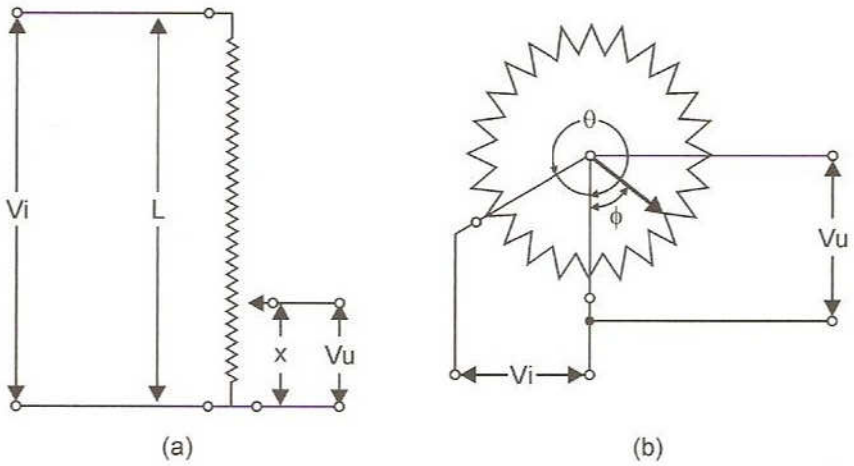


Figura 3.15 - Sensores potenciométricos (a) linear e (b) angular.

Transdutores angulares de uma única volta podem ser projetados para rotação contínua, reiniciando na posição zero grau após completar uma volta. A figura 3.15 mostra o esquema de sensores potenciométricos linear e angular, enquanto a figura 3.16 ilustra os detalhes construtivos de um potenciômetro angular.

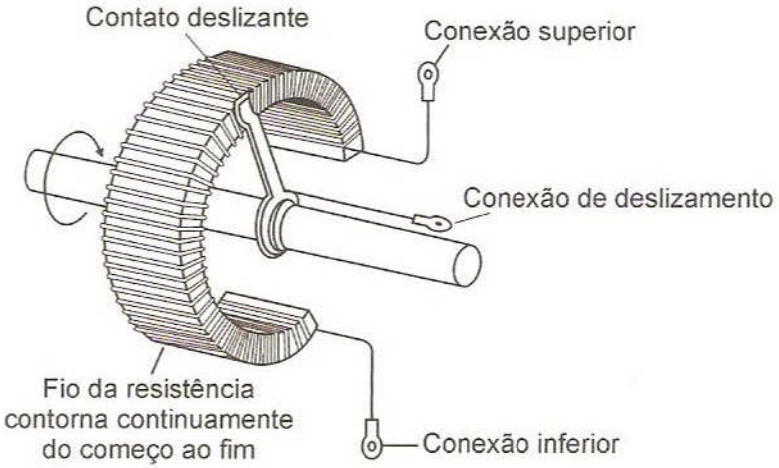


Figura 3.16 - Detalhes construtivos do sensor potenciométrico angular.

3.11. Encoders

O deslocamento é uma das poucas grandezas físicas que podem ser compreendidas como um valor digital sem o uso de um conversor analógico-digital. Encoders são dispositivos que convertem um deslocamento linear ou angular em um trem de pulsos, e ainda podem ser interpretados como um *byte*.

Há dois tipos de encoder: o incremental e o absoluto. Os encoders incrementais indicam o deslocamento somente em relação a um ponto inicial de referência. Já os encoders absolutos medem o deslocamento em relação a um ponto de referência interno do dispositivo. Esse tipo de sensor representa o deslocamento em incrementos codificados discretamente.

Há três tipos de sensores incrementais: de contato, ópticos e magnéticos, que podem ser lineares ou angulares.

3.12. Sensor incremental angular

Os encoders incrementais angulares podem ser fabricados com base em dois princípios diferentes: com condução elétrica ou por transmissão de luz.

Os encoders baseados na condução elétrica apresentam estrias condutoras depositadas sobre a superfície de um disco isolante acoplado ao equipamento que está sendo monitorado. As estrias são eletricamente conectadas no verso do disco, sobre o qual é mantido um potencial elétrico. O contato dos pinos nas estrias faz com que o circuito seja ligado, tornando a saída igual a 0 V e quando o pino está entre as estrias, a saída fica alta. As figuras 3.17 e 3.18 mostram detalhes do rotor de encoders incrementais típicos.

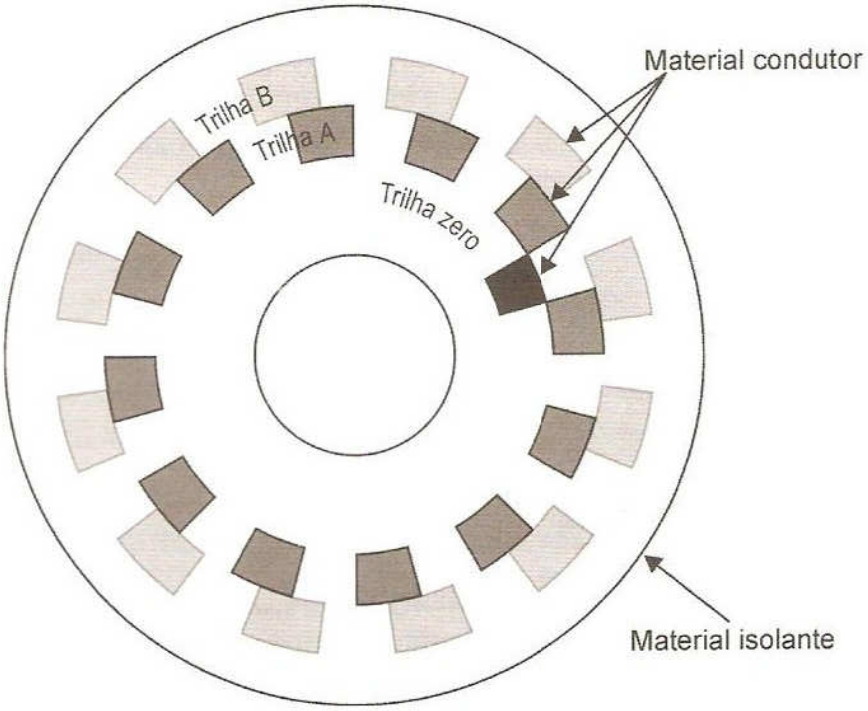


Figura 3.17 - Representação de uma típica estrutura de encoder de contato.

Os encoders baseados no princípio da transmissão de luz funcionam basicamente da mesma forma que os sensores de condução elétrica. Neste caso, furos no disco representam o elemento condutor. Quando o emissor e o receptor de luz se encontram alinhados com os furos do disco, há a mudança do estado do sinal elétrico na saída.

Figura 3.18 - Típico encoder angular incremental.

Para flexibilizar ao máximo o uso, os discos de encoders são construídos de tal forma que as saídas A e B estejam defasadas de 90°. A trilha zero gera um pulso por revolução do disco e tem o objetivo de sincronização, conforme mostra a figura 3.19.

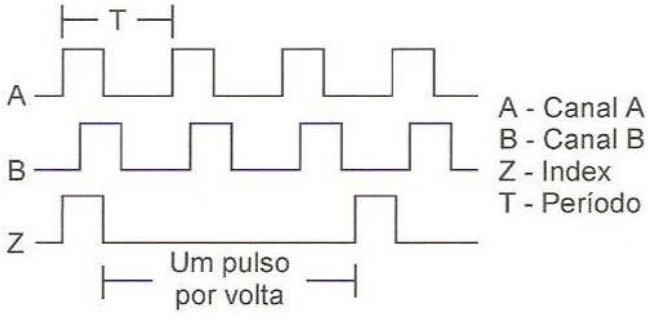


Figura 3.19 - Sinais gerados nas saídas dos encoders incrementais.

Se o disco tiver *N* estrias, uma revolução do disco produz *N* pulsos por todo ciclo de trabalho(*dc*), portanto:

$$dc = \frac{tw}{T}$$

em que:

→ ***tw*** representa a largura do pulso e *T* é o período do trem de pulsos.

Portanto, se a velocidade angular do disco é ω (rpm), a freqüência das saídas A ou B pode ser calculada por:

$$f = \frac{\omega \times N}{60}$$

O deslocamento (R) depende do número de pulsos por trilha (N). Portanto, se quisermos um deslocamento angular de 1°, são necessárias 360 estrias por trilha, ou seja:

$$R = \frac{360}{N}$$

A maior desvantagem do encoder incremental de contato elétrico é o desgaste mecânico dos contatos que limita o tempo de vida do encoder. Num encoder incremental óptico as aberturas ou furos no disco substituem as estrias e a unidade sensitiva consiste em um par LED/fototransistor.

OBSERVAÇÃO: Com um sensor óptico incremental de uma única pista de marca é impossível distinguir o sentido de rotação a partir dos pulsos fornecidos pelo sensor. Por não ter contato mecânico, o encoder óptico é mais confiável que o de contato. No entanto, um problema comum aos dois é que se a sua alimentação for interrompida, a informação é perdida.

3.12.1. Encoder incremental linear

Encoders lineares sentem e digitalizam mudança de posição linear para medida de posição e realimentação do sistema de controle. Tecnologias de encoder incluem encoders ópticos usados em escalas lineares, sensor de magnetoestrictivo, tecnologia indutiva que mede o campo de elementos ferromagnéticos como bolas de aço, e conversão de movimento linear, para movimento rotativo por coroa e pinhão, para encoders rotativos de vários tipos.

Encoders lineares absolutos criam um único sinal de posição que está disponível em qualquer lugar ao longo da peça. A posição exata será lida depois do ciclo de tarefas do controle. Encoders incrementais não geram um único sinal. O encoder é zerado depois do desligamento e confia em outro interruptor ou encoder para referência inicial.

Especificações de desempenho importantes para encoders lineares incluem alcance de medida linear, contas por distância e linhas por distância. O alcance de medida linear é simplesmente a distância de viagem que pode ser codificada. Contagem por distância determina o incremento mínimo da posição linear que pode ser determinado. Linhas por distância se referem às marcas atuais ou outros elementos físicos do elemento linear móvel que é codificado. Podem ser especificadas contas ou linhas, mas elas não são as mesmas. Por exemplo, em sistemas de quadratura, uma linha é associada com quatro contagens ou pulsações.

3.12.2. Sensor incremental linear magnético

Esse transdutor é o mais usado, constituído de um disco que apresenta dois segmentos de material magnético (ferrite de bário, etc.), dispostos radialmente, e um sensor (placa de leitura) afixado sobre um disco, como mostra a figura seguinte.

O sensor possui um núcleo toroidal de ferrite de estreito ciclo de histerese. Na "porta", dois enrolamentos, um dito de interrogação que é alimentado com uma tensão alternada bastante elevada (de 50 a 100 khz), e o outro é o enrolamento de saída.

Se sobre o núcleo não se apresenta um segmento magnético, ele funciona como um pequeno transformador e a tensão de interrogação se encontra sobre o enrolamento de saída. Se no núcleo for afixado um segmento magnético, há um elevado campo magnético que leva a porta de material magnético à saturação, cujo efeito é a tensão do enrolamento de saída descer a um valor desprezível, visto que não pode haver tensão sem variação do fluxo. A figura 3.20a apresenta detalhes construtivos de um encoder incremental magnético.

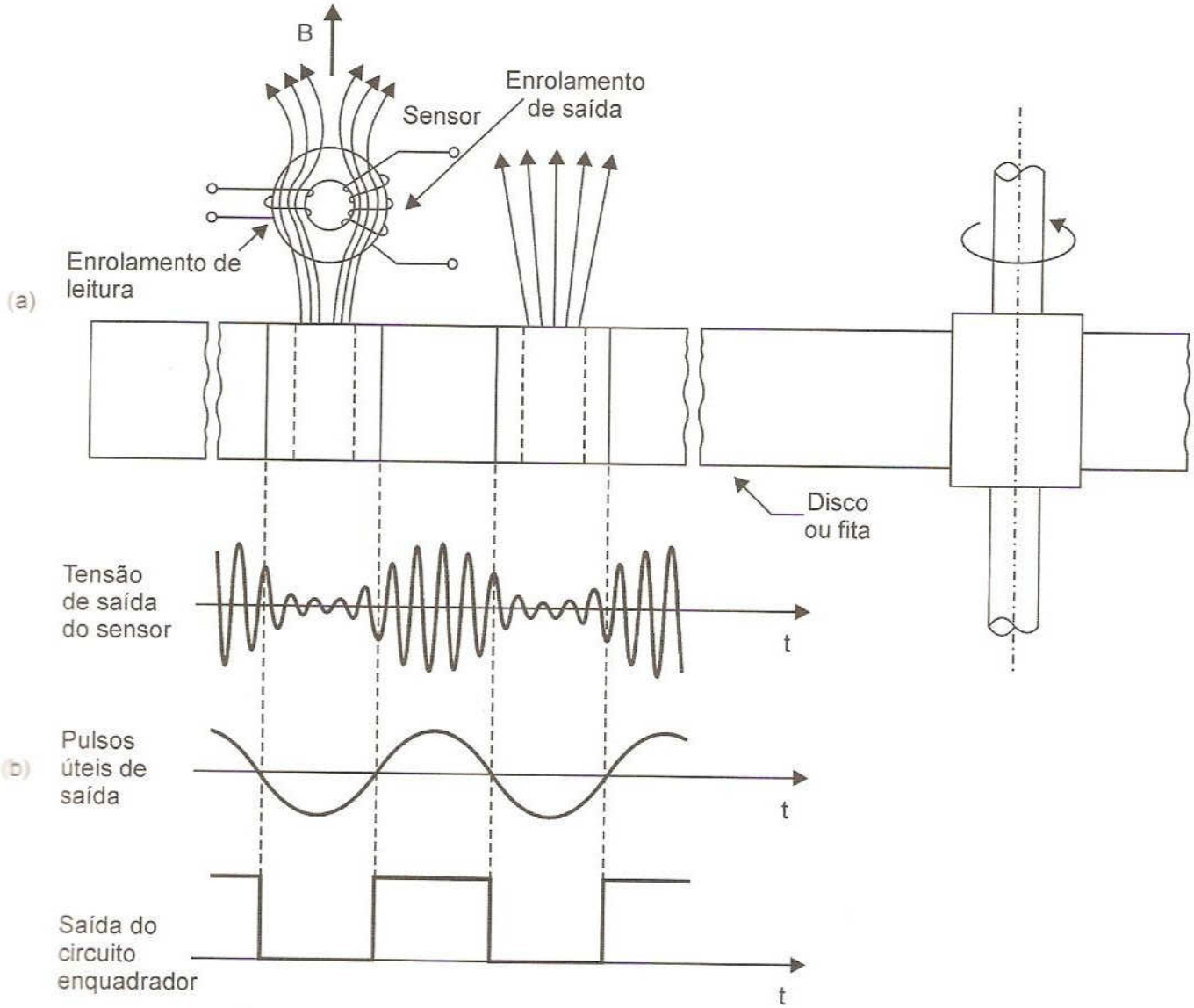


Figura 3.20 - (a) Transdutor incremental do tipo eletromagnético; (b) forma de onda de saída do elemento sensitivo e do circuito enquadrador.

A tensão de saída, representada na figura 3.20b, vem transformada em impulsos que correspondem à passagem sobre o núcleo de semelhante segmento magnético. Pode haver, normalmente, valores de velocidade de rotação de 10.000 com 200 a 500 impulsos por revolução.

Esse tipo de sensor, apesar de simples implementação, caiu em desuso devido à pequena vida útil das fitas e sensores de leitura (cabeçote).

3.12.3. Encoder absoluto

Um padrão de disco de encoder absoluto convencional consiste em uma série de trilhas com incrementos concêntricos com o número de ciclos por revolução que dobra em cada trilha de raio crescente. Cada trilha tem seu próprio fotodetector, e são organizadas de forma a ler todos os detectores, gerando um byte, normalmente no código Gray. Por exemplo, um encoder com 12 trilhas gera 4.096 bytes por revolução.

Com incrementais existem técnicas para aumentar a resolução além do número de trilhas, mas ainda são requeridas muitas trilhas para alta resolução de codificação. A figura 3.21 ilustra um encoder absoluto binário, enquanto a figura 3.22 mostra detalhes de rotores de encoders absolutos do tipo binário e código Gray.

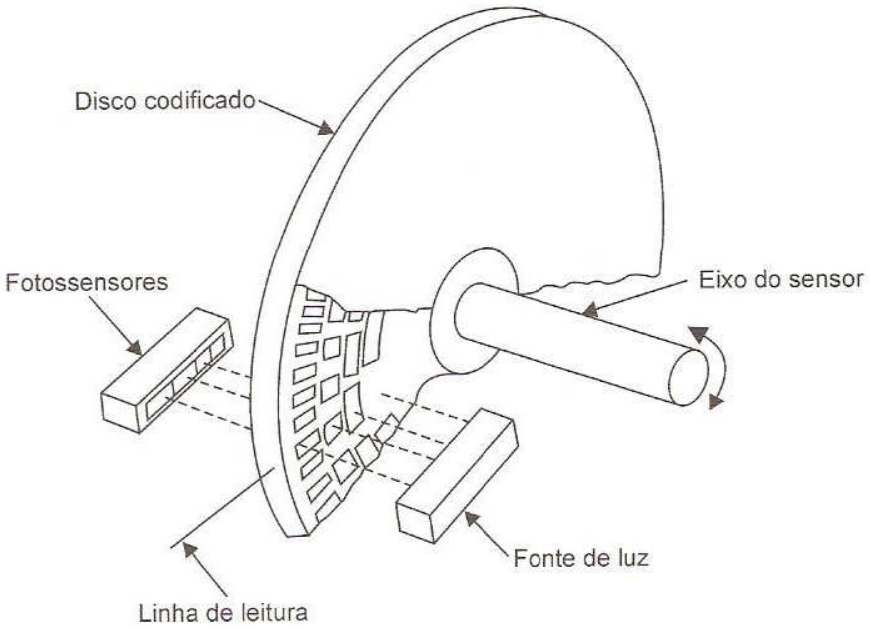


Figura 3.21 - Detalhe de um encoder óptico angular absoluto.

A detecção de uma trilha em um encoder absoluto é significativamente mais complexa e cara que um encoder incremental, e todos os canais da trilha devem funcionar em conjunto para evitar falsa informação da posição. Porém, tem a vantagem de fornecer a informação de posição imediatamente em início do processo, sem um procedimento de inicialização.

Esse tipo de encoder armazena seus dados de posição no disco com o padrão do código. É facilmente conectado aos controladores baseados em microprocessador e em displays, entretanto uma conversão Gray-binária é necessária em alguns sistemas de controle.

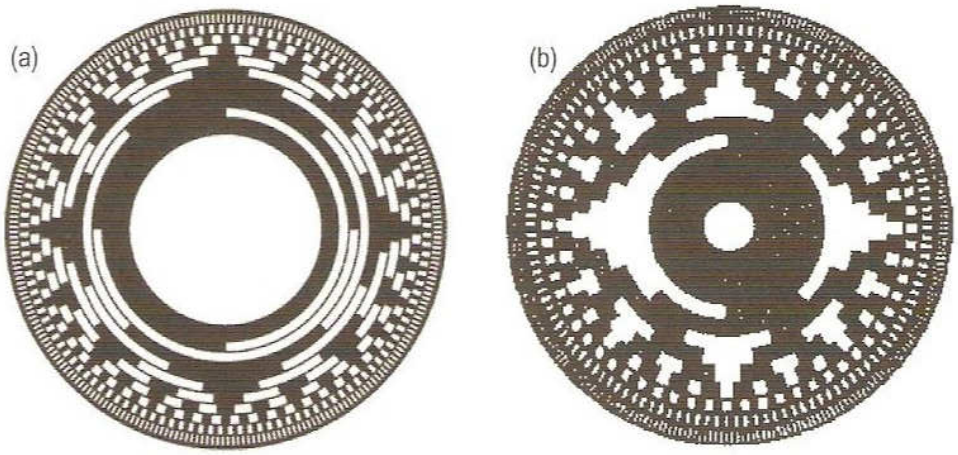


Figura 3.22 - Detalhe de um encoder óptico angular absoluto dos tipos (a) binário e (b) Gray.
Fonte: http://www.encoders.us/

3.12.4. Encoder absoluto multirrevolução

Os encoders multirrevolução não detectam somente a sua posição, mas também em que volta ele está. A posição dentro de uma revolução é obtida da mesma maneira que no encoder incremental. Para distinguir o número de revoluções, são colocados ímãs permanentes no disco que são detectados por um sensor *Hall*, conforme mostra a figura 3.23.

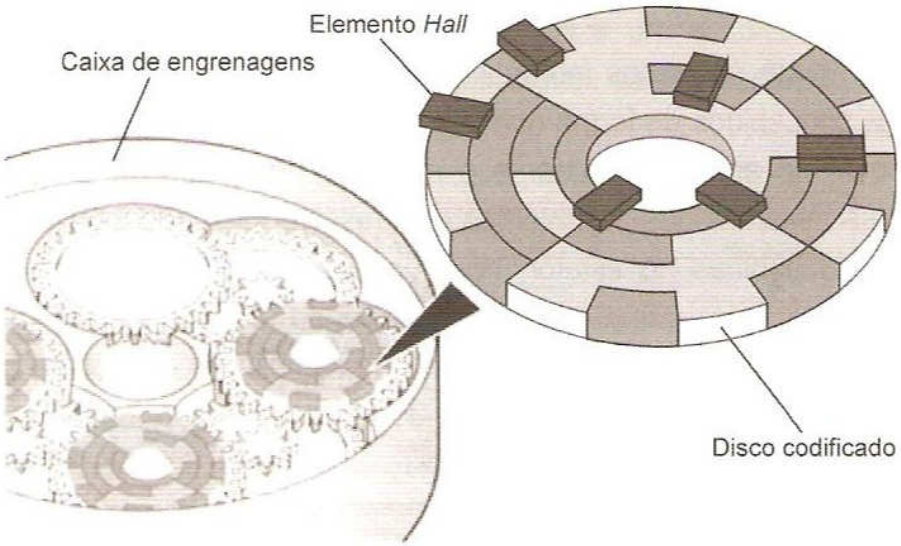


Figura 3.23 - Exemplo de um encoder absoluto multirrevolução utilizado pela IFM Electronics.
Fonte: Catálogo da IFM Electronics 99/00 - incremental and absolute encoders - Efector 400.

3.12.5. Aplicações

Os encoders têm uma linha de aplicações práticas: controle numérico de máquinas operatrizes, impressoras, plotters X-Y, controle de posições de disco de computador, servo-mecanismos, displays digitais, controle de posições remotas, controle de posições de radar, etc.

3.13. Ultra-sônico

O princípio de funcionamento baseia-se no envio e recepção de uma onda ultra-sônica. A principal aplicação é em objetos transparentes, nos quais não se utilizam sensores ópticos. A figura 3.4 mostra a aplicação industrial de sensores ultra-sônicos, em que os objetos a serem detectados poderiam ser, por exemplo, garrafas transparentes.

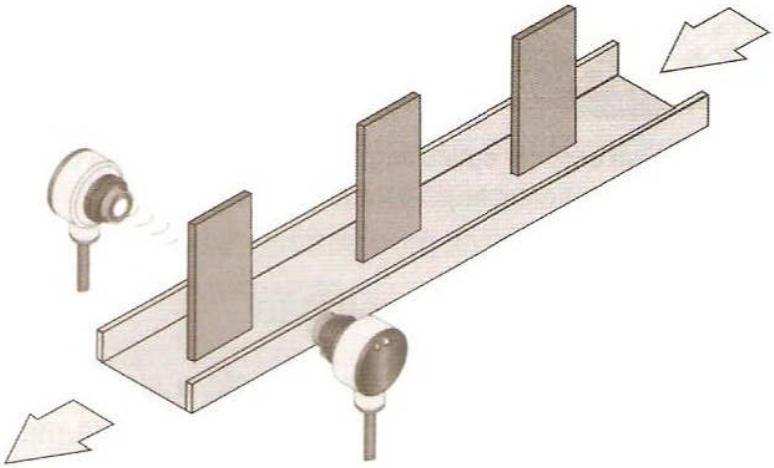


Figura 3.24 - Exemplo de aplicação de um sensor ultra-sônico.

3.14. Resolvers

Resolvers lembram pequenos motores (ver figura 3.25) e são essencialmente transformadores rotativos concebidos de forma que o coeficiente de acoplamento entre rotor e estator varie com o ângulo do eixo. O estator e o rotor são formados por bobinas inseridas em pacotes de ferro silício laminados. Normalmente os resolvers têm um par de bobinas no rotor e um segundo par de bobinas no estator, posicionados perpendicularmente uns aos outros. Quando uma bobina do rotor é excitada com um sinal de referência em corrente alternada, a bobina do estator produz uma tensão que varia em amplitude de acordo com o seno e o co-seno da posição do eixo. Uma das bobinas do rotor tem como função receber o sinal de referência por indução.

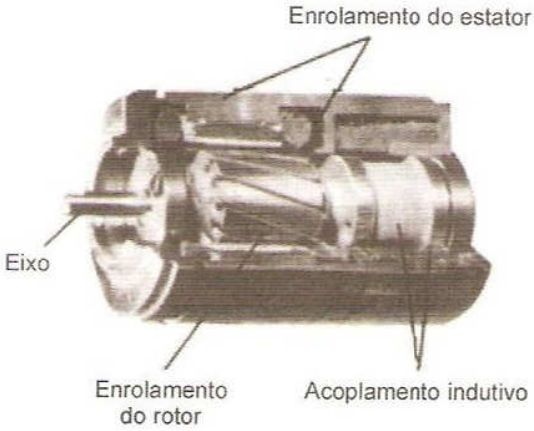


Figura 3.25 - Detalhes construtivos de um resolver.

A conexão ao rotor é feita pelas escovas e anéis coletores, ou acoplamento indutivos. Resolvers que utilizam o método indutivo são conhecidos como do tipo sem escovas (*brushless*), ver figura 3.26. Os resolvers indutivos (*brushless*) têm vida útil até 10 vezes maior que os de escova e são insensíveis a vibrações e sujeira, por isso são utilizados na maioria das aplicações industriais.

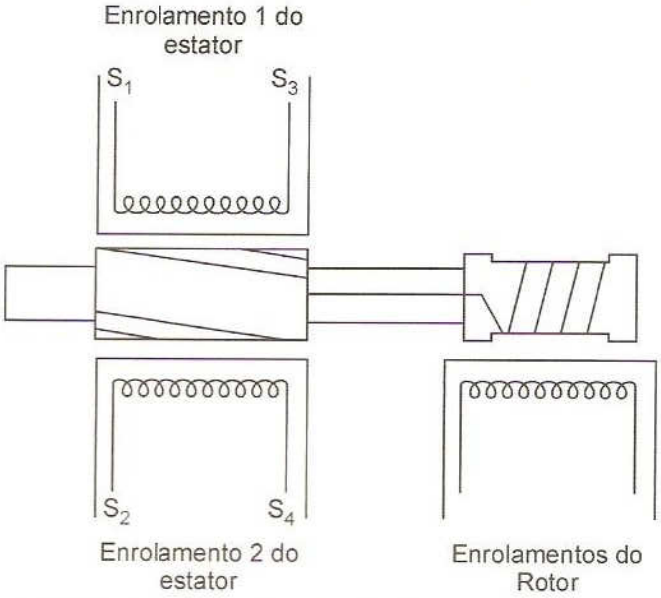
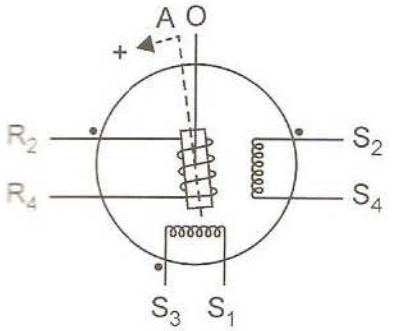


Figura 3.26 - Esquema de um resolver *brushless*.

O esquema de um resolver é ilustrado na figura 3.27. Por convenção, o sentido positivo (aumento do ângulo) do movimento dos rotores é anti-horário, quando um resolver é visto a partir do final do eixo. Os fabricantes de resolvers normalmente determinam o ângulo zero mecanicamente com uma identificação sobre o eixo, uma seta correspondente ou ponto sobre o encapsulamento. As equações típicas são mostradas na figura 3.27.

Os sinais do estator de um resolver são ligados a um circuito conversor analógico -digital especial, conhecido como conversor resolver digital, conforme mostra a figura 3.28.



$E\ (S_3 - S_1) = E\ (R_2 - R_4)\ SEN\ A$
$E\ (S_2 - S_4) = E\ (R_2 - R_4)\ COS\ A$

Figura 3.27 - Esquema e equações de um resolver (E - Força eletromotriz induzida).

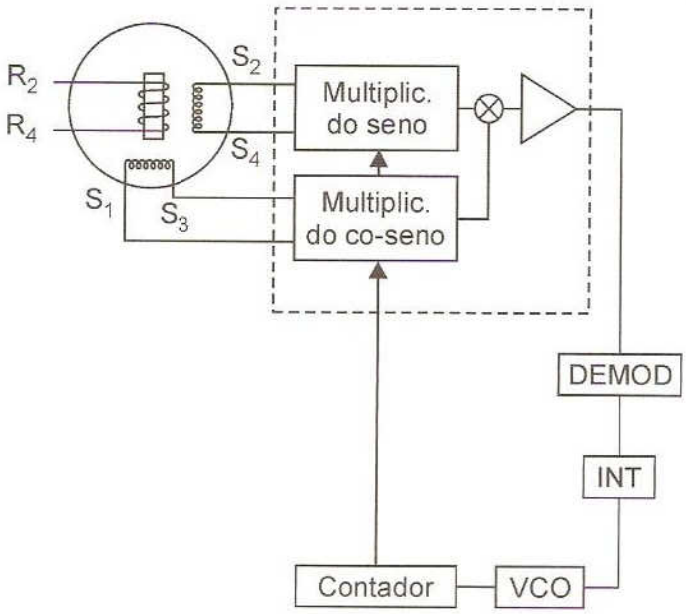


Figura 3.28 - Diagrama de blocos do circuito conversor.

Capítulo 4

Sensores Ópticos

Este capítulo explica o funcionamento, características e aplicações de alguns tipos de fototiristores, sensores CCD e CMOS, células fotovoltaicas e válvulas de ultravioleta.

4.1. Fotorresistores

4.1.1. LDR *(Light Dependent Resistor)*

Seu significado é Resistor Dependente de Luz ou simplesmente fotorresistor. É usado como sensor de luz numa infinidade de aplicações.

Quando a luz incide em determinadas substâncias cujas resistências são alteradas devido à quantidade de luz que recebem, ocorre a liberação de portadores de carga que ajudam a condução da corrente elétrica, conforme mostra a figura 4.1.

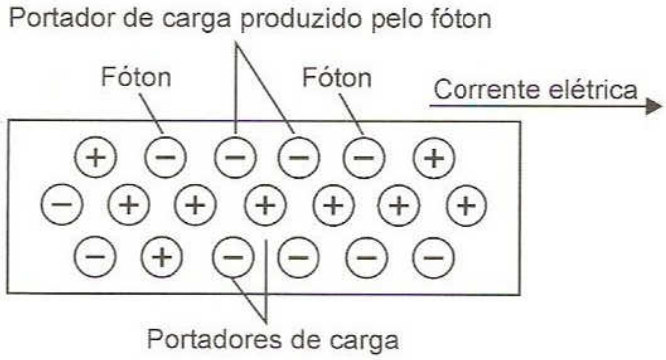


Figura 4.1 - A luz libera portadores de carga que reduzem a resistência elétrica de determinados materiais.

O sulfeto de cádmio, cuja fórmula química é CdS, é utilizado na construção dos LDRs. São chamados de fotocélulas de sulfeto de cádmio ou simplesmente células de CdS. Apresenta uma resistência extremamente elevada no escuro, da ordem de milhões de ohms. Essa resistência é diminuída para algumas centenas de milhares de ohms quando recebe iluminação direta, a luz forte, uma lâmpada próxima ou a luz direta do sol. A figura 4.2 ilustra a variação da resistência em função da incidência luminosa sobre o fotorresistor.

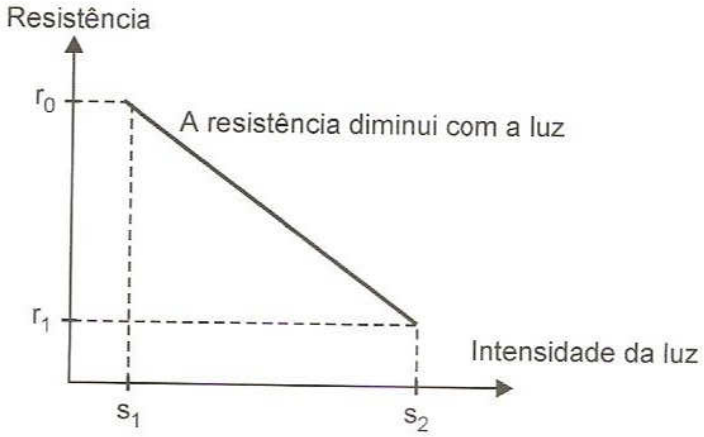


Figura 4.2 - A variação de resistência com a luz.

A superfície é composta de sulfato de cádmio. Pequenas trilhas do material condutor, eventualmente ouro, se entrelaçam com o material condutor de modo a aumentar a superfície de contato e assim serem conseguidas maior capacidade de corrente e maior sensibilidade.

A luz pode atingir essa superfície sensível por uma janela de plástico transparente no próprio invólucro. Dois terminais dão acesso ao sensor para sua ligação a um circuito externo. A figura 4.3 mostra um dos tipos de encapsulamento do fotorresistor e sua simbologia.

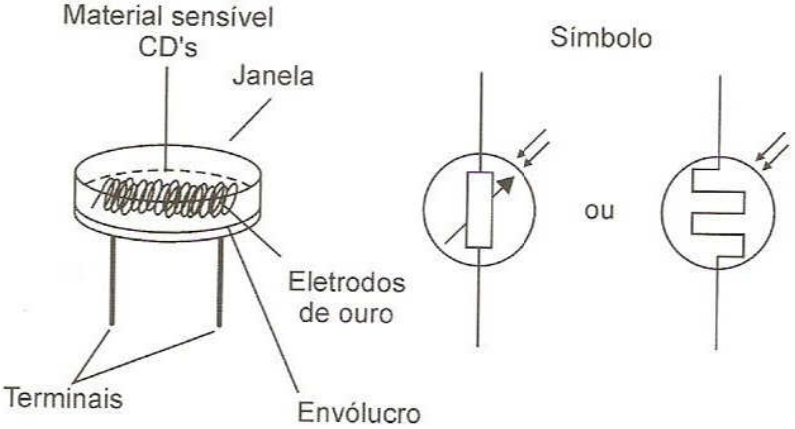


Figura 4.3 - LDR, aspecto e símbolo.

Os LDRs não são componentes polarizados, o que significa que a corrente pode circular nos dois sentidos. As variações da resistência com a luz são iguais em qualquer sentido.

A figura 4.4 mostra os LDRs mais comuns, os de 1 cm e 2,5 cm de diâmetro que se diferenciam pela capacidade da corrente.

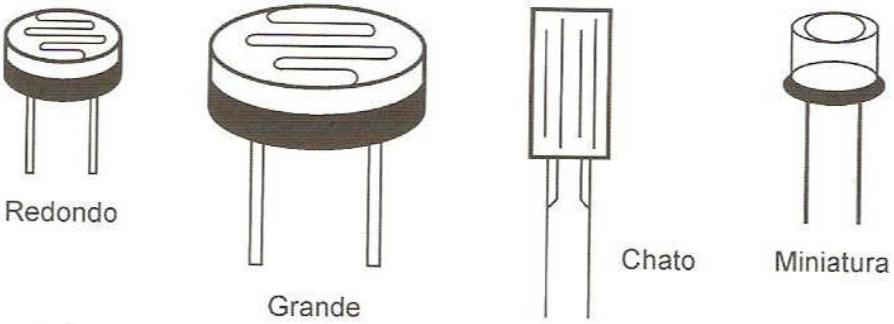


Figura 4.4 - Alguns tipos comuns de LDRs encontrados no comércio.

Com uma superfície maior, temos mais sensibilidade, como também uma capacidade maior de dissipar calor. O LDR consegue controlar as correntes mais intensas.

Um LDR do tipo grande (2,5 cm), por exemplo, consegue controlar diretamente alguns dispositivos como relés sensíveis e até mesmo lâmpadas de baixa potência.

Já os LDRs de pequenas dimensões devem trabalhar com correntes muito pequenas, os quais devem ser usados com circuitos amplificadores.

Por exemplo, um LDR típico de 1 cm. A resistência máxima, no escuro, desse componente deve ficar entre 1MΩ e 10 MΩ, dependendo do tipo, e a resistência com iluminação máxima (ambiente) deve ficar entre 75 e 500 ohms tipicamente.

Para a verificação destas características pode ser feito um teste utilizando um multímetro. Com o LDR iluminado temos a resistência mínima, e cobrindo o LDR de modo que nenhuma luz o atinja, temos a resistência máxima.

Os LDRs não apresentam a mesma sensibilidade para cores de luz idênticas, apresentando maior sensibilidade para um comportamento de onda de 6.800 angstrons. Essa freqüência corresponde a uma luz vermelha, tendendo um pouco para o laranja.

O LDR apresenta uma sensibilidade para o infravermelho próximo (entre 7.000 e 7.500 angstrons), faixa em que o olho não percebe absolutamente nada.

O tempo de resposta de um fotorresistor é representado como o tempo necessário para a condutância subir a 63% do valor de pico após a célula ter sido iluminada (tempo de subida), e o tempo necessário para a condutância descer a 37% do valor de pico após ter sido removida a luz (tempo de descida).

O tempo de resposta depende do nível de iluminação, da resistência de carga, da temperatura ambiente e das "condições pré-históricas". O tempo de subida diminui conforme a resistência de carga é aumentada, no entanto o tempo de descida aumenta.

Normalmente, quando um fotorresistor é mantido no escuro por certo período de tempo antes do uso, sua condutância será maior se for comparado com um fotorresistor mantido num certo nível de luz. Essa diferença é chamada de **"efeito pré-histórico"**. A extensão do efeito é maior para CdS do que para CdSe. Esse efeito não é significativo para aplicações gerais, entretanto, quando o fotorresistor é utilizado em aplicações em que a iluminação é menor do que um lux, o efeito deve ser levado em consideração.

O LDR é um dispositivo lento. Enquanto outros tipos de sensores como os fotodiodos e os fototransistores podem perceber variações muito rápidas de luz, em freqüências que chegam em dezenas ou mesmo centenas de megahertz, o LDR tem um "tempo de recuperação" muito longo. Estando totalmente iluminado e sendo a luz cortada, ocorre um determinado intervalo de tempo para que a resistência, inicialmente no valor mínimo, volte ao valor máximo, como indica a figura 4.5.

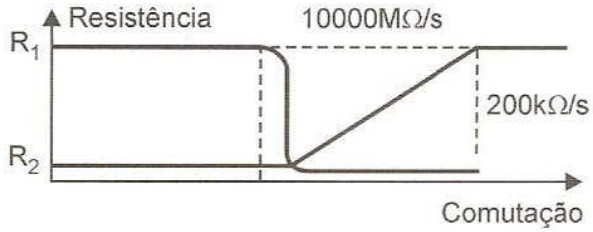


Figura 4.5 - Faixa de operação do LDR. R1 se refere à iluminação e R2 ao escurecimento sobre um LDR.

Para o sulfeto de cádmio essa recuperação tem uma taxa na ordem de 200 kΩ por segundo para os primeiros 20 segundos, partindo de uma luz de 1.000 lux.

Isso significa que, estando iluminado com uma resistência da ordem de 1.000Ω, e cortando a luz, o LDR demora aproximadamente cinco segundos para que sua resistência atinja 1 MΩ.

Para a variação inversa, ou seja, estando o LDR na máxima resistência (no escuro) e sendo iluminado, a taxa é muito maior, demorando aproximadamente dez milissegundos para cair de 1 MΩ para 1.000 ohms tipicamente.

A baixa taxa de comutação do LDR impede que ele seja usado em sensores do tipo leitor de cartões perfurados, códigos de barras ou sistemas de alarmes modulados. No entanto, em aplicações mais simples, cujos tempos necessários para a atuação sejam maiores, como alarmes, brinquedos, sensores de luz ambiente, detectores de níveis de iluminação, fotômetros, ele é muito útil.

A dissipação de um LDR de um cm é tipicamente de 100 mW e a tensão máxima que podemos aplicar entre seus terminais é tipicamente de 150 volts para um tipo de um cm.

4.2. Fotodiodo e fototransistor

O comportamento elétrico de diodos semicondutores e transistores é normalmente afetado quando luz incide na sua junção. Quando na região de polarização direta, o fotodiodo atua como um dispositivo fotovoltaico. A energia dos fótons incidentes na junção causa a formação de mais pares elétron-lacuna na junção, o que resulta uma diminuição da barreira de potencial através da junção. Os portadores minoritários do material são dispersos através da junção, causando a formação de corrente elétrica.

4.2.1. Fotodiodo

É um diodo semicondutor cuja junção está exposta à luz. A energia luminosa desloca elétrons para a banda de condução, reduzindo a barreira de potencial pelo aumento do número de elétrons, que podem circular se aplicada polarização reversa. A figura 4.6 mostra aspectos construtivos e princípio de funcionamento, enquanto que a figura 4.7 destaca a estrutura e a simbologia.

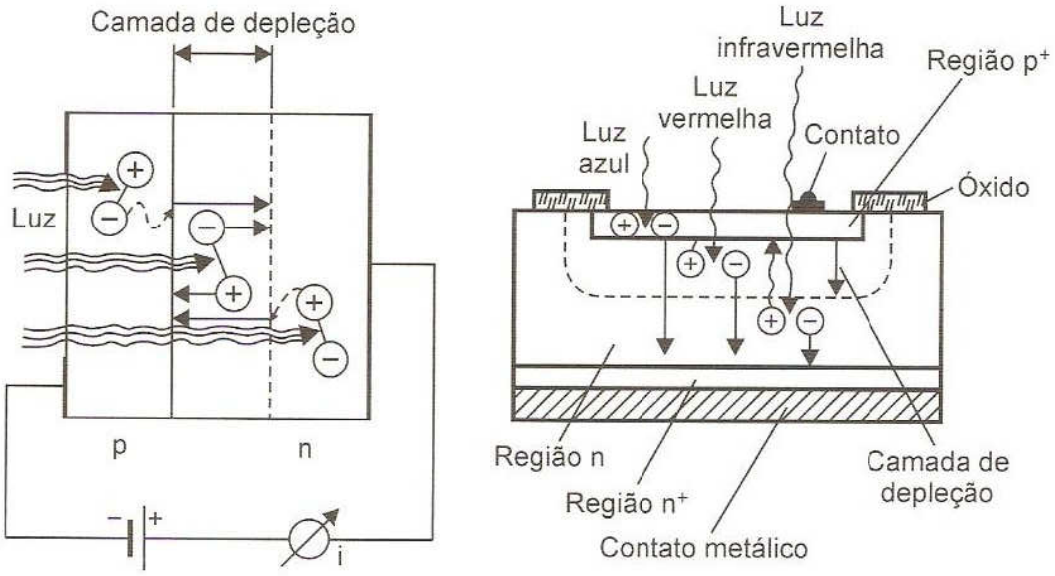


Figura 4.6 - Construção e princípio de funcionamento.

A corrente nos fotodiodos é da ordem de dezenas de mA com alta luminosidade e a resposta é rápida. Há fotodiodos para todas as faixas de comprimentos de onda, do infravermelho ao ultravioleta, dependendo do material que compõe a junção.

O fotodiodo é usado como sensor em controle remoto, em sistemas de fibra óptica, leitoras de código de barras, scanner (digitalizador de imagens para computador), canetas ópticas (que permitem escrever na tela do computador), toca-discos CD, fotômetros e como sensor indireto de posição e velocidade.

Os materiais usados na fabricação dos fotodiodos são semicondutores (pn), como o germânio e o silício. Sua sensibilidade luminosa se baseia no efeito fotoelétrico, no valor da resistência no sentido de bloqueio na camada semicondutora modificada pela incidência da luz. Para que o efeito fotoelétrico seja influenciado o menos possível por fontes externas de luz, o fotodiodo é encapsulado de maneira que a luz incida na área fotossensível apenas através de uma pequena abertura (de um mm de diâmetro). Quando uma junção é atingida pela energia luminosa, é produzida uma corrente chamada fotocorrente.

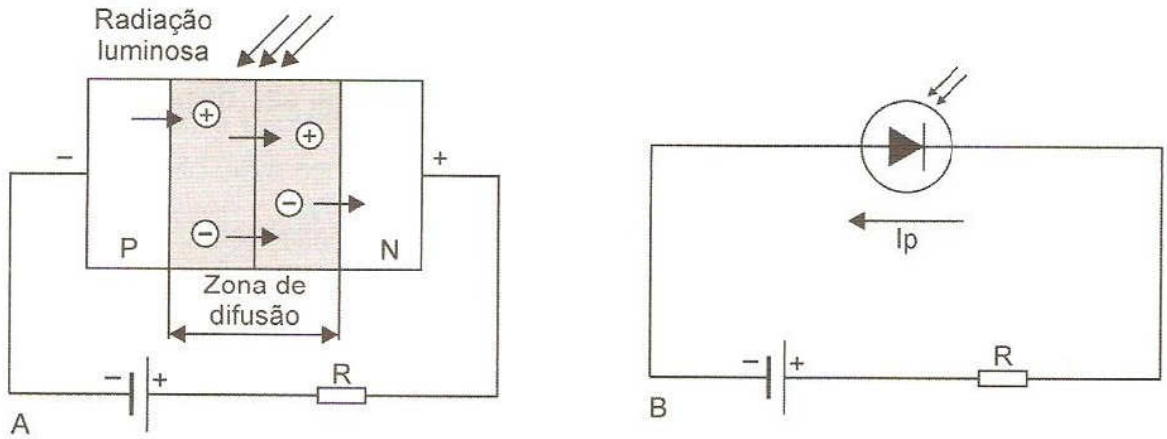


Figura 4.7 - a) Estrutura e b) simbologia do fotodiodo.

Estando o diodo polarizado inversamente, a zona de transição será maior, aumentando a fotocorrente, comportando-se como uma fonte de corrente dependente de intensidade luminosa.

A tabela seguinte mostra as diferentes características dos materiais semicondutores para a confecção dos fotodiodos.

Tabela 7 - Características dos semicondutores de fotodiodos.

Características	Germânio	Silício
Comprimento de onda de máxima sensibilidade	1500Å	900 Å
Sensibilidade	25 a 100 mA/lm	30 a 150 mA/lm
Tempo de resposta	2 a 6 μs	0,2 a 1 μs
Corrente inversa máxima	1 a 3 mA	3 a 18 mA
Potência dissipável	30 a 50 mW	0,1 a 2 mW
Corrente no escuro	0,1 a 1μA	15 a 50 nA

4.2.2. Fototransistor

É um transistor cuja junção coletor-base fica exposta à luz e atua como um fotodiodo. O transistor amplifica a corrente através do circuito eletrônico e fornece alguns mA com alta luminosidade. Sua taxa de comutação é menor que a do fotodiodo. A figura 4.8 mostra aspectos construtivos e princípio de funcionamento.

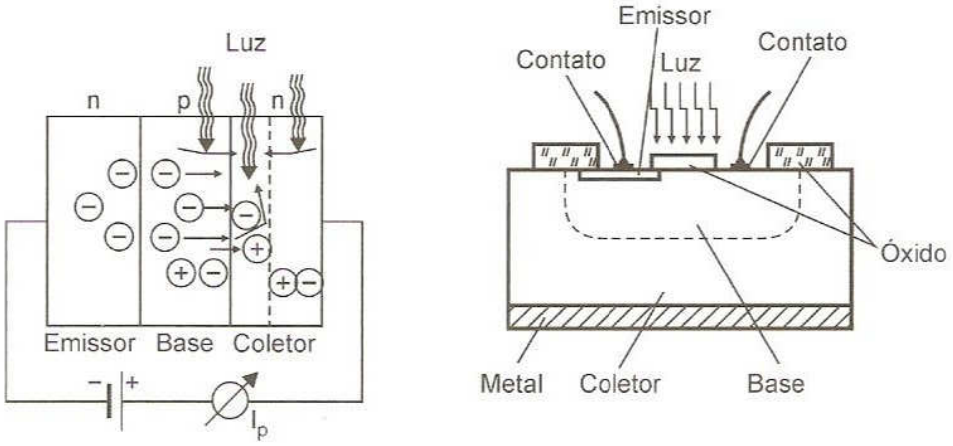


Figura 4.8 - Construção e princípio de funcionamento.

Esse dispositivo é um transistor sensível à radiação luminosa, como ilustra o gráfico da figura 4.9a. Seu esquema está na figura 4.9b. O terminal da base pode ou não estar presente no componente, depende do tipo de aplicação.

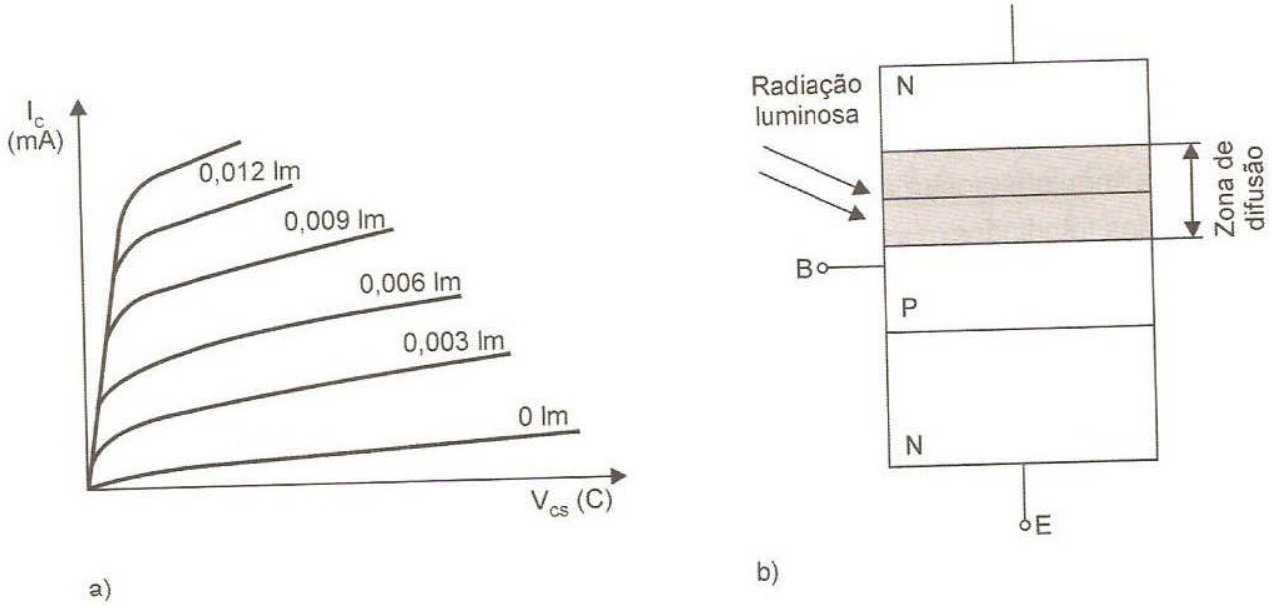


Figura 4.9 - a) Corrente em função da luminosidade e b) esquema do fototransistor.

Características:

- Máxima tensão coletor-emissor (BVCEO)
- Máxima tensão emissor-coletor (BVECO)
- Máxima dissipação
- Máxima faixa de temperatura de encapsulamento (CASE)
- Corrente de escuro (ID = DARK CURRENT) - corrente de coletor na condição de escuro
- Corrente de claro (IL = LIGHT CURRENT) - corrente de coletor na condição de claro

Suas aplicações são as mesmas do fotodiodo, exceto em sistemas de fibra óptica pela operação em alta freqüência, contudo encontramos muitas outras aplicações dos fototransistores nos mais diversos tipos de grandezas a serem medidas, tais como:

- Presença (barreira, reflexão difusa e retrorreflexão);
- Velocidade;
- Temperatura;
- Pressão;
- Vazão;
- Posição/deslocamento;
- Nível.

Além dos citados, estudados detalhadamente em capítulos específicos, temos:

- **Sensores de contraste:** atuam pelo princípio da reflexão difusa e podem distinguir até 15 tonalidades de cinza na escala de preto até branco. Essa propriedade é o requisito fundamental para efetuar a leitura de marcações de contraste.
- **Sensores de luminescência:** reagem aos materiais fosforescentes (que refletem luz), ativados por uma fonte luminosa ultravioleta do sensor. A luz refletida é recebida e avaliada pelo sensor.
- **Sensores de distância:** emitem a luz sobre um objeto ou um refletor, avaliando o feixe de luz refletido. Nessa operação eles transformam a distância medida em um sinal elétrico proporcional.
- **Sensores analisadores de cores:** os sensores analisadores de cores da série CS operam segundo o princípio tricromático. Emitem três cores básicas (vermelho, azul e verde) sobre os objetos a serem analisados e calculam a participação percentual de cada cor no raio refletido, comparando com os valores previamente memorizados.

4.3. CCD *(Charge Couple Devices)*

O dispositivo de acoplamento de carga, ou CCD, tem papel importante como sensor de imagem. Os portadores minoritários são dispostos em uma estrutura de semicondutores de óxido metálico (MOS) e armazenados num potencial localizado numa junção $Si\text{-}SiO_2$. Aplicando as voltagens apropriadas aos eletrodos de metal, é possível variar o potencial no semicondutor de tal modo que as cargas são trocadas de uma célula para a próxima. Um CCD é assim um notável registrador de deslocamento analógico que consiste numa fila de capacitores MOS.

Sua característica principal é o armazenamento e transporte executado por elementos separados sem uma camada de depleção. Num sensor de imagem CCD, os portadores minoritários são gerados pela luz absorvida durante o período de integração e avançados durante cada pulsação de estágio de leitura até que eles apareçam com um sinal de imagem ao diodo de produção na forma de uma pulsação atual.

Se forem aplicadas as três voltagens (que diferem no valor) aos contatos metálicos dispostos de acordo com a figura 4.10, então a carga é transportada à direita. Durante a transferência ocorrem perdas que dependem da freqüência de troca, da geometria e do número de células a serem processadas. As perdas podem também acontecer como resultado de estados de superfície ao longo da interface $SiO_2\text{-}Si$. Essas perdas podem ser evitadas através de uma camada de condutividade oposta e de uma espessura de aproximadamente 1 μm no substrato.

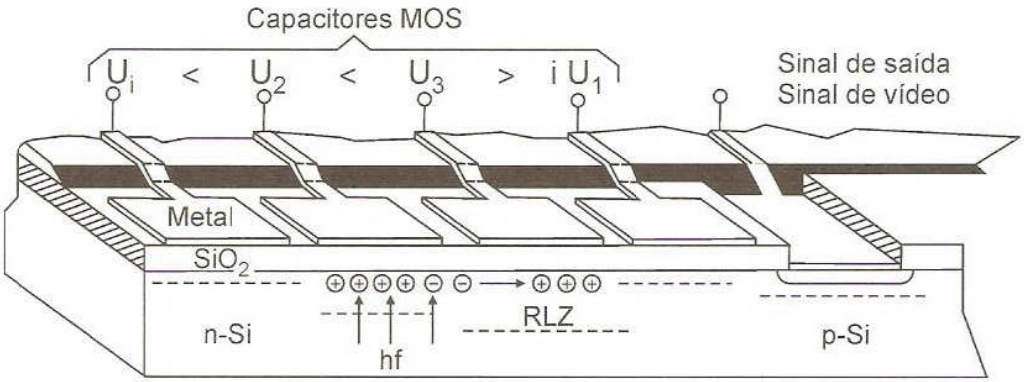


Figura 4.10 - Estrutura de um CCD.

Esse tipo de CCD é conhecido como *Buried Channel Charge-coupled Devices* (BCCD), sendo mais sensível que os *vidicons* de silicone. Os CCDs podem operar em uma configuração de três fases (três eletrodos com voltagens diferentes U1, U2, U3, como apresenta a figura, ou numa configuração de duas fases (U0 ± > U). Embora a segunda alternativa seja mais simples, requer uma assimetria embutida dos potenciais (aproximadamente 25 μm). A geração de luz é possível pelos portadores.

A produção elétrica simplesmente consiste na junção *pn* bloqueada que converte os pacotes de carga em pulsações. No caso de CCD linear, é um conversor paralelo consecutivo analógico com integração cronometrada de saída óptica.

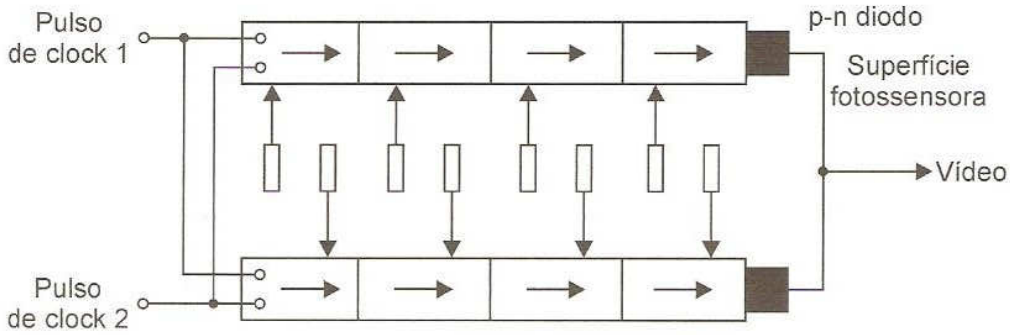


Figura 4.11 - Procedimento de leitura de saída de um CCD linear.

Uma matriz do CCD (configuração de superfície) é lida diretamente ou por uma memória separada do CCD. Inicialmente a imagem armazenada é transferida ao registro de saída horizontal por pulsação A. O registro de saída é apurado mais rapidamente usando o pulso B e supre exatamente uma linha de imagem antes da próxima linha horizontal armazenada representada pelo pulso A, conforme indicam as figuras 4.11 e 4.12.

No segundo caso, a imagem inteira registrada numa linha de memória é lida como uma variante por meio de uma linha numa memória do CCD não fotossensível. A vantagem da segunda é que a integração de imagem e os processos de estágio de leitura estão separados.

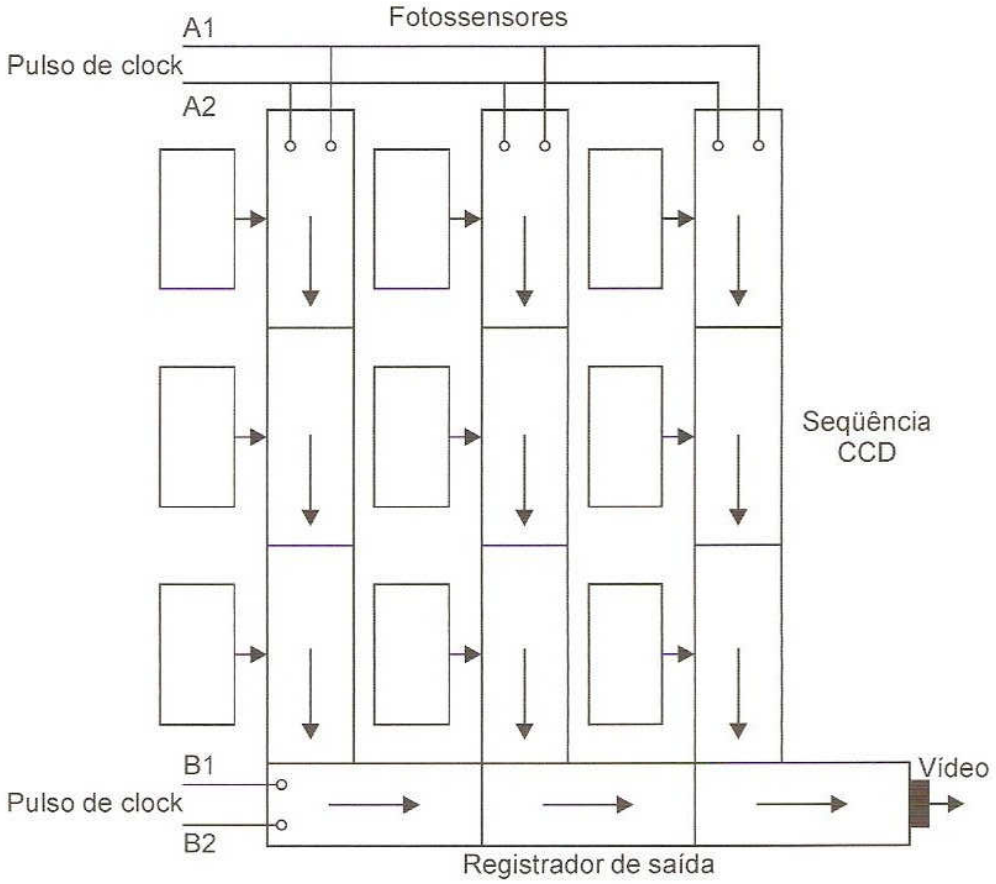


Figura 4.12 - Leitura direta linha por linha por um registrador de saída CCD.

4.4. CMOS *(Complementary Metal Oxide Semiconductor)*

Os sensores de imagens CMOS (figura 4.13) detectam a luz da mesma maneira que os sensores CCD, porém, pelo ponto de vista da detecção, estão muito mais avançados que os CCD. Os sensores CMOS permitem a integração de todo o circuito de controle e no próprio chip. O consumo é menor nos modos trabalho e espera. Utilizam baixa tensão de alimentação e seu custo é menor devido ao seu processo de fabricação.

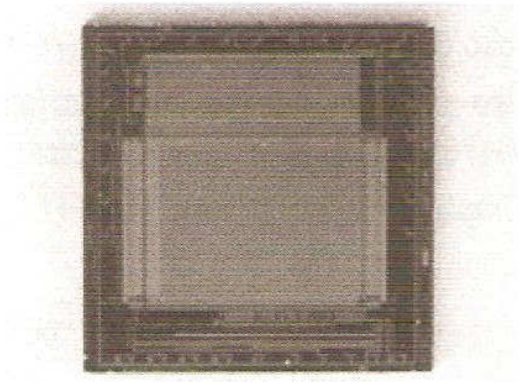


Figura 4.13 - Exemplo de um dispositivo CMOS.

4.4.1. Sensor ativo e passivo

Existem dois tipos básicos de sensores de imagens CMOS: passivo e ativo. Eles podem ser descritos como:

- **Passivo (*Passive-pixel sensors* - PPS):** foram os primeiros sensores de imagens utilizados na década de 60. Nesse tipo de sensor, um sítio converte um fóton em uma carga. Essa carga é carregada para fora do sensor e então amplificada. O problema desses sensores é o ruído que aparece como fundo de uma imagem. Para eliminar o ruído, normalmente são utilizados processos complementares de processamento.
- **Ativo (*Active-pixel sensors* - APS):** apresentam redução do ruído associado com o sensor passivo. O circuito eletrônico de cada pixel determina o nível de ruído associado e o cancela na sua saída. A performance dessa tecnologia é comparável com muitos dispositivos de acoplamento de carga (CCD), permitindo imagens e resoluções maiores.

4.4.2. Formato dos sensores de imagens

Os sensores de imagens podem ser classificados de acordo com o formato de saída da imagem, ou seja:

- SIF: 320 x 240 (76.800 pixels);
- QSIF: 160 x 120 (19.200 pixels);
- QQSIF: 80 x 60 (4.800 pixels);
- CIF (*Common Intermediate Format*): 352 x 288 (101.400 pixels);
- QCIF (*Quarter Common Intermediate Format*): 176 x 144 (25.300 pixels);
- QQCIF *(Quarter Quarter Common Intermediate Format)*: 88 x 72 (6.336 pixels);
- VGA *(Video Graphics Array)*: 640 x 480 (307.200 pixels);
- QVGA *(Quarter Video Graphics Array)*: 320 x 240 (76.800 pixels);
- SVGA *(Super Video Graphics Array)* tem vários formatos: 800 x 600 (480.000 pixels), 1.024 x 768 (786.400 pixels);
- XGA *(eXtended Graphics Array)*: 1.280 x 1.024 (1.3 megapixels), 1.600 x 1.200 (2 megapixels).

4.5. Fototiristores

Uma chave controladora de silício *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) ativada pela luz (LASCR) é um SCR cujo estado é comutado pela luz incidente sobre uma camada semicondutora de silício do dispositivo. Há também um terminal de porta para permitir o disparo do dispositivo usando os métodos típicos do SCR.

As áreas de aplicação do LASCR incluem controle óptico luminoso, relés, controle de fase, controle de motores e várias aplicações em computadores. As capacidades de corrente e potência máximas para os LASCRs disponíveis comercialmente são em torno de 3A e 0,1W.

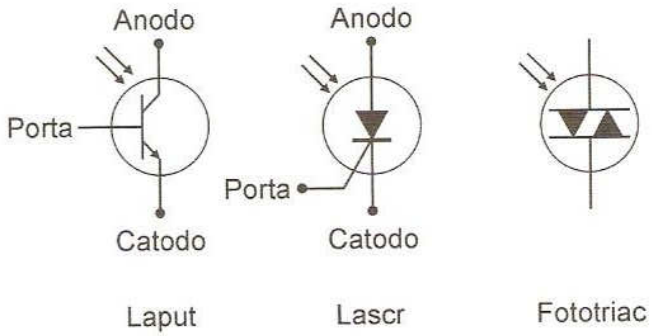


Figura 4.14 - Simbologia dos fototiristores.

Geralmente, um aumento na temperatura da junção resulta uma redução da energia luminosa necessária para ativar o dispositivo. Existem no mercado outros tipos de fototiristores: o LAPUT (Transistor de Unijunção Programável Ativada por Luz), o LASCS (Chave Controladora de Silício Ativada por Luz), etc. Na figura 4.14 pode-se observar os símbolos para fototiristores mais empregados.

4.6. Válvulas de ultravioleta - Detectoras de chamas

Dispositivos que indicam a presença de partículas sólidas, vapores e/ou gases que compõem a fumaça de chamas. São utilizados em ambientes em que a chama é o primeiro indício de fogo.

O sensor de chama é sensível aos raios ultravioleta que se fazem presentes sempre que existe fogo. Por suas características de projeto esse detector discrimina outras formas de raio, sendo imune à luz natural.

Características técnicas:

- **Ângulo de visão:** 90°
- **Tensão de operação:** 12 a 24 VDC
- **Corrente de operação:** 25 mA 24 VDC
- **Corrente de repouso:** 1 uA sob 24 VDC

- **Temperatura de operação:** –10°C a 70°C
- **Umidade relativa:** 95% máxima

A localização e o espaçamento dos detectores de chama devem resultar de uma análise do risco, considerando:

- tamanho da chama a ser detectada
- tipo principal de radiação gerada em função do combustível envolvido
- sensibilidade do detector
- campo de visão do detector
- distância entre detector e a provável chama
- presença de outras radiações
- propósito do sistema
- tempo de resposta desejado

Dispositivos para evitar acúmulo de pó ou sujeira na lente do detector devem ser previstos, de forma a não diminuir sua sensibilidade entre as manutenções preventivas. Recomenda-se que o detector de chama tenha um dispositivo que indique sujeira na lente, necessitando de manutenção.

4.6.1. Aplicações

Os detectores de chama são recomendados nas seguintes aplicações:

- Áreas abertas ou semi-abertas nas quais ventos podem dissipar a fumaça, impedindo a ação dos detectores de temperatura ou de fumaça.
- Áreas em que uma chama possa ocorrer rapidamente, tais como: hangares, áreas de produção petroquímica, áreas de armazenagem e transferência, instalações de gás natural, cabines de pintura, ou áreas de solventes.
- Áreas ou instalações com alto risco de incêndio, freqüentemente conjugadas com um sistema de extinção automático.

Os detectores de chama são classificados pelo tipo de radiação, tais como: ultravioleta, infravermelho de comprimento de onda simples, infravermelho de comprimento de onda múltiplo e combinação de ultravioleta e infravermelho. Cada uma dessas tecnologias possui tempos de resposta específicos. A faixa espectral para essas tecnologias é de 0,10 a 0,35 μm para ultravioleta e 0,76 a 4,70 μm para infravermelho.

4.7. Célula fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Albert Einstein em 1905. Ele afirmou que para um elétron escapar da superfície de um metal, é preciso fazer um trabalho contra as forças que o fixam, ou seja, os fotoelétrons devem adquirir energia suficiente para serem ejetados. Atualmente materiais semicondutores são utilizados na fabricação de dispositivos fotoelétricos. A figura 4.15 ilustra o funcionamento de uma célula fotovoltaica.

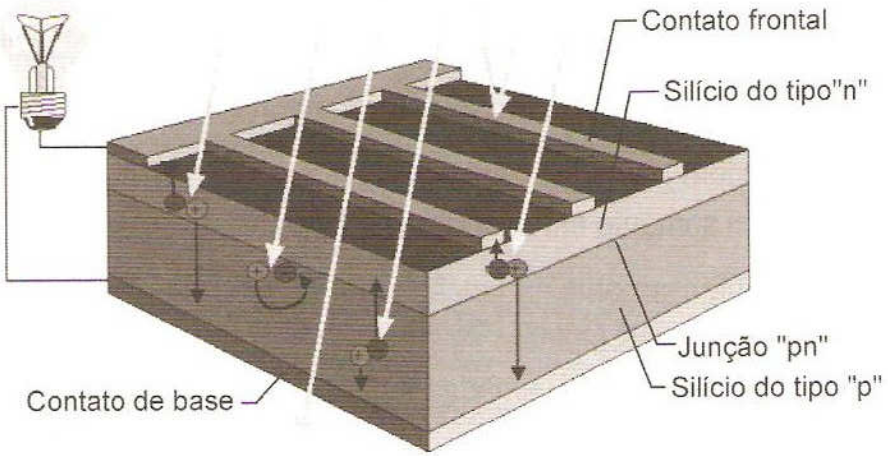


Figura 4.15 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama *junção pn*. Nessa junção os elétrons livres do lado n passam ao lado *p* onde encontram os buracos que os capturam. Isso faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado *p*, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado *n*, que o torna eletricamente positivo. Essas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado "*p*". Esse processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de impedir os elétrons livres remanescentes no lado *n*.

Se uma junção *pn* for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorre a geração de pares elétron-lacuna. Se isso acontecer na região em que o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando uma corrente através da junção. O deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial à qual chamamos de *efeito fotovoltaico*. Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas, como mostra a figura 4.16.

Desta forma pode-se dizer que são dispositivos que convertem energia luminosa em elétrica. Uma fina camada de material semicondutor é responsável pelo efeito fotoelétrico, tornando elétrons da camada de valência livres proporcionalmente à intensidade de luz incidente, e variando também com o comprimento de onda de radiação.

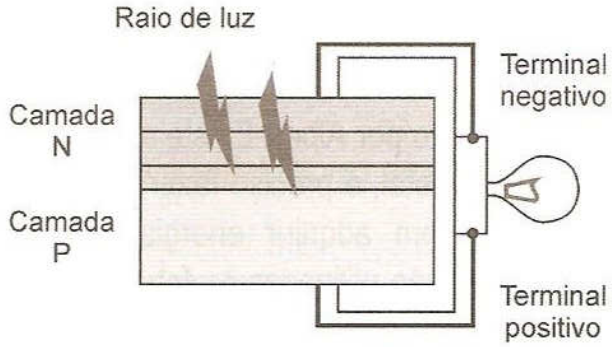


Figura 4.16 - Efeito fotovoltaico na junção pn.

Sua sensibilidade máxima ocorre em 550 *nm* e decai rapidamente em direção ao infravermelho, o mesmo não ocorrendo em relação ao ultravioleta.

A linearidade é comprometida nos extremos de intensidade de radiação e a resposta é lenta, tornando-a utilizável somente em casos particulares.

O diodo iluminado intensamente na junção pode reverter a barreira de potencial em fonte de elétrons, produzindo corrente elétrica. A eficiência do processo é baixa devido à pouca transparência da junção (somente as camadas superficiais são iluminadas). Seu uso principal está nos painéis solares.

O fotodiodo no funcionamento fotovoltaico vem conectado diretamente à carga, sem a necessidade de uma tensão de alimentação.

Outro dispositivo é a fotocélula de selênio de operação similar. Usa-se em medidores de luminosidade e aparelhos de análise química (como fotocolorímetros). Na figura 4.17 pode-se observar a simbologia para sensores fotovoltaicos.

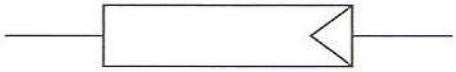


Figura 4.17 - Simbologia.

Capítulo 5

Sensores de Velocidade

Eles são utilizados em dispositivos como leitores de CD-ROM, DVD *players*, bombas centrífugas, transportadores, medidores de fluxo de líquidos, máquinas operatrizes, robótica, máquinas automáticas de soldagem, etc. São importantes para controle do processo produtivo e da segurança do trabalho.

5.1. Dínamo taquimétrico (tacogerador)

O dínamo taquimétrico é baseado no princípio do motor de corrente contínua com escovas que funcionam como gerador. O campo magnético é obtido por meio de um ímã permanente cujos pólos encontram-se dispostos nas faces.

Considere uma única espira girando a uma velocidade angular ω. Essa espira é influenciada por um fluxo variável de acordo com a relação:

$$\phi = \phi_0 \times cos(\omega t)$$

Logo, a tensão nos terminais da espira é:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = \phi_0 \, sen(\omega t)$$

Cujo valor máximo é proporcional à velocidade angular. O tacogerador é um estator constituído de um magneto permanente e de um rotor no qual são enroladas *N* espiras espaçadas entre elas de um ângulo de **2π/N**. As *N* espiras são conectadas a um coletor a lâminas (lâminas comutadoras) e através de duas escovas se tem disponível a tensão reduzida. A tensão de saída do dínamo depende da temperatura, pois ela é afetada pela resistência do induzido e o campo magnético produzido pelo ímã.

A constante taquimétrica *(kt)* também chamada de gradiente taquimétrico ou sensibilidade exprime a relação entre a tensão de saída nos seus terminais e a velocidade de rotação. O parâmetro fundamentalmente que caracteriza um tacogerador é expresso pela relação:

$$kt = \frac{E}{\omega}$$

Um valor típico para *kt* em dínamo taquimétrico comercial é de 0,06 V/RPM para uma corrente máxima de 250 mA e resistência de carga mínima de 500 Ω.

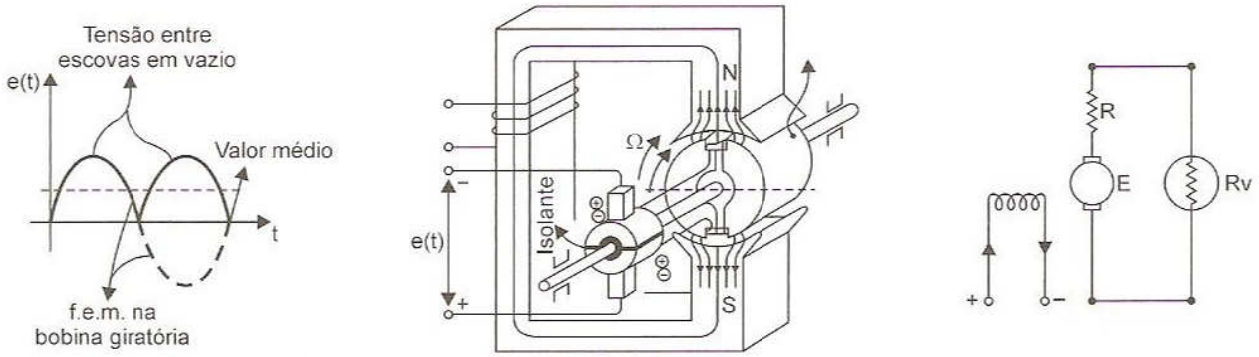
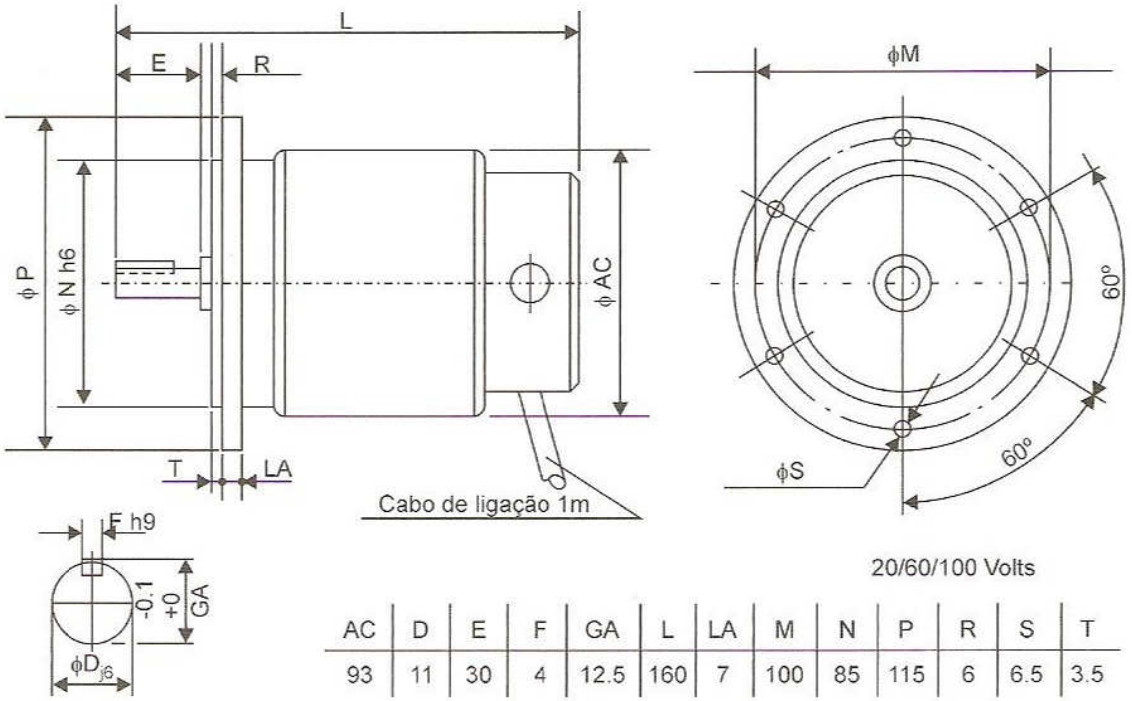


Figura 5.1 - Princípio de funcionamento de um dínamo.

Características

Chega-se a uma sensibilidade da ordem de 300 V/100 RPM com uma velocidade máxima de 5.000 RPM.

Devido às não-homogeneidades do campo magnético e aos fenômenos de comutação do coletor, a tensão de saída do dínamo taquimétrico não é perfeitamente contínua e impulsos de alta freqüência são sobrepostos à tensão induzida, devido à comutação.



AC	D	E	F	GA	L	LA	M	N	P	R	S	T
93	11	30	4	12.5	160	7	100	85	115	6	6.5	3.5

Figura 5.2 - Dínamo típico.

A presença das escovas (contatos deslizantes) limita fortemente a sua confiabilidade e aumenta a sua manutenção. Além destas características, os tacogeradores possuem uma baixa linearidade (> 2%), elevada inércia e atrito mecânico. A figura 5.1 mostra o esquema de um dínamo taquimétrico, em que é representado o princípio de funcionamento. A figura 5.2 mostra um dínamo taquimétrico comercial, além de detalhar suas medidas e algumas características.

Aplicações

Transdutor de medida de velocidade em elevadores prediais, elemento de compensação e estabilização em sistemas de regulação de posição, controle de máquinas operatrizes de controle numérico, em máquinas rotativas convencionais, bem como máquinas têxteis, e em várias outras aplicações que exigem um controle preciso de velocidade.

5.2. Alternador taquimétrico

A seguir serão apresentados os principais transdutores de velocidade com saída em corrente alternada (CA).

5.2.1. Bobina piloto

Consiste em um ímã permanente, acoplado diretamente ao eixo do motor do qual se quer medir a rotação, imerso em uma ou mais bobinas. A tensão na saída *Vo* tem sua amplitude e freqüência proporcionais à velocidade de rotação do eixo. A figura 5.3 apresenta o princípio de funcionamento de uma bobina piloto.

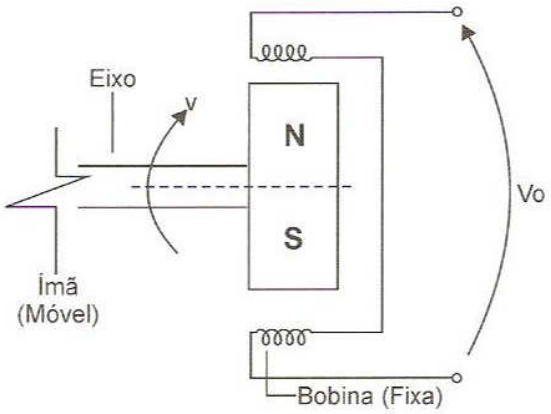


Figura 5.3 - Princípio de funcionamento de uma bobina piloto.

5.2.2. Tacômetro de indução

Nessa configuração (semelhante à de um motor de indução bifásico, figura 5.4) o estator apresenta dois enrolamentos cujos eixos são dispostos a 90° e o rotor é do tipo que está em curto-circuito. Um dos enrolamentos é alimentado por uma tensão alternada $V \times sen(\omega t)$. O sistema comporta-se como um transformador em curto-circuito quando o motor está parado devido ao eixo de enrolamento de saída que está a 90° em relação ao fluxo; logo, não é gerada tensão na saída.

Se o motor for colocado em rotação, será gerado nos terminais do enrolamento de saída um f.e.m. de mesma freqüência de tensão de alimentação e com amplitude que é função da velocidade de rotação do motor.

Características

Boa linearidade: **< 0,5%**;

Baixa inércia;

$k_t = 0{,}08$ **V/RPM**;

Resistência estatórica: **80 Ω;**

Velocidade de rotação: até **20000 RPM**.

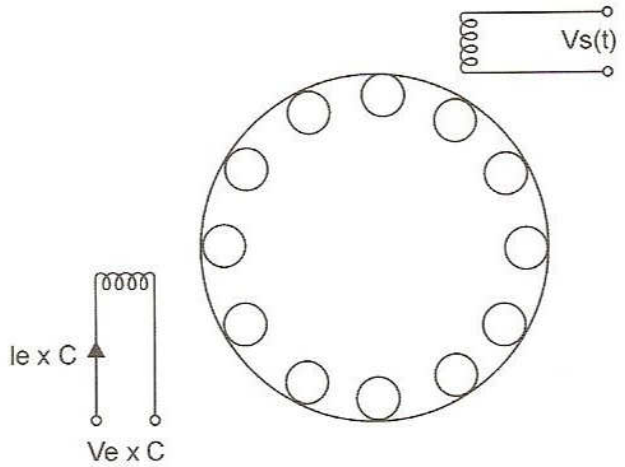


Figura 5.4 - Alternador taquimétrico de indução.

5.3. Reação da armadura

Se considerarmos a fórmula que fornece a velocidade de um motor CC (N) em função de tensão de armadura V_a, da corrente de armadura I_a, da resistência de armadura R_a e da constante magnética K:

$$N = \frac{E}{K_1} = \frac{(V_a - R_a \times I_a)}{K_1}$$

Como acontece nas aplicações de regulação de velocidade de motor CC, agindo somente sobre a tensão de armadura. Se K_1 for mantido constante, para determinar N, deve-se obter através de um circuito a termo R_a x I_a e subtrair da tensão de armadura V_a. Assim, a velocidade de rotação de um motor CC pode ser medida também sem uso de um transdutor específico. É bastante simples realizar um circuito que forneça essa informação, porém esses circuitos não são encontrados na prática devido às suas limitações.

5.4. Bobina *pick-up*

É um sensor de velocidade angular com saída em freqüência, constituído de um rotor dentado de material ferromagnético de um ímã permanente, o qual é envolvido por uma bobina. A figura 5.5 mostra detalhes construtivos de uma bobina *pick-up*.

Quando o dente do eixo rotor (de material ferromagnético) passa nas proximidades do magneto permanente, as linhas de fluxo desse magneto desviam, passando pelo enrolamento da bobina, induzindo uma força eletromotriz na bobina. Um pulso de saída é gerado uma vez por revolução do eixo. Com o aumento da velocidade o número de pulsos por unidade de tempo aumenta e pode ser convenientemente mostrado num freqüencímetro.

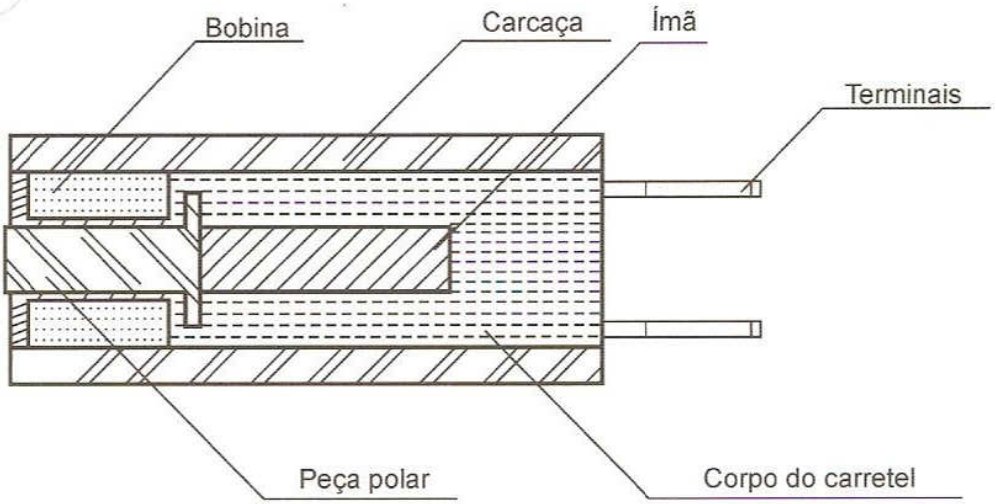
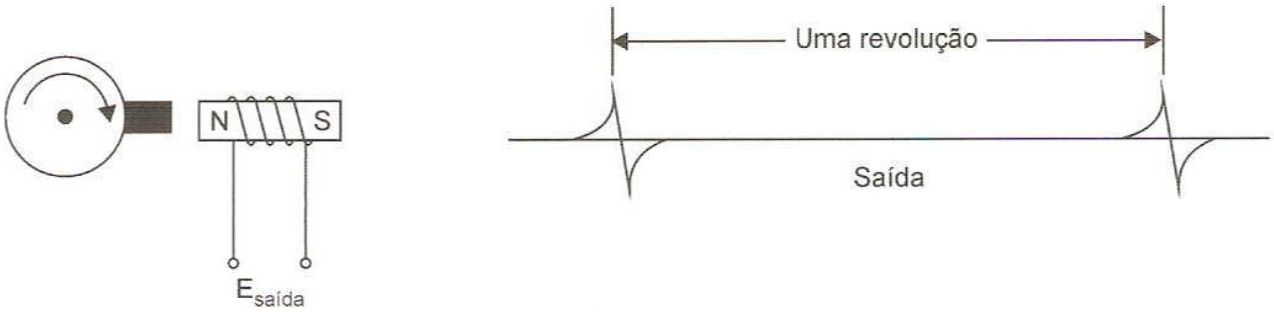


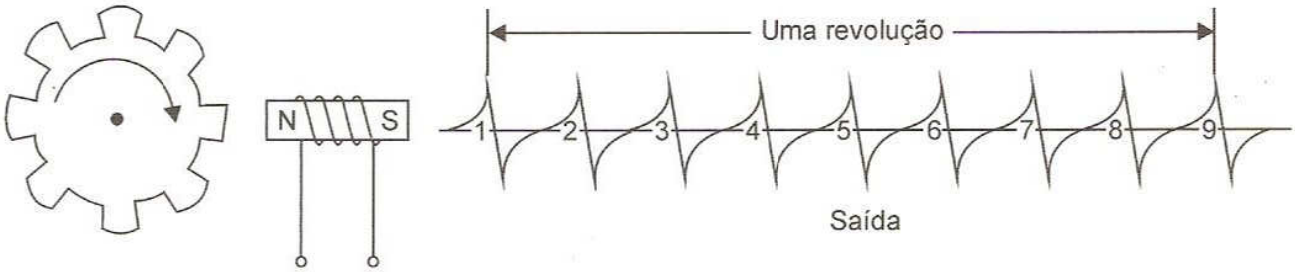
Figura 5.5 - Detalhes construtivos de uma bobina *pick-up*.

Se, por exemplo, o eixo girar a 600 RPM com o rotor de um só dente, dez pulsos serão gerados por segundo; e para um rotor de oito dentes serão gerados oitenta pulsos por segundo. Abaixo de um valor mínimo de rotação e acima de um valor máximo, a amplitude do sinal de saída cai demasiadamente, tornando o *pick-up* imprestável para a medida de velocidade angular. Os valores mínimos e máximos de rotação dependem de aspectos construtivos do rotor e do sensor indutivo.

A figura 5.6 apresenta o princípio de funcionamento de uma bobina pick-up e as formas de onda quando é utilizado um rotor de um dente e de oito dentes. A figura 5.7 exibe um detalhe de instalação típica.



a) Rotor de um só dente



b) Rotor de oito dentes

Figura 5.6 - Funcionamento de uma bobina *pick-up*.

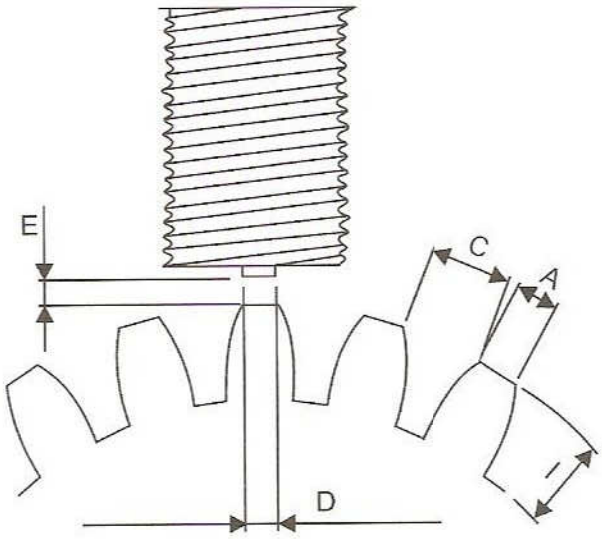


Figura 5.7 - Características de instalação típica.

O tempo entre pulsos de saída é inversamente proporcional à velocidade de rotação do eixo. Os valores máximos e mínimos de rotação se situam entre 100 e 4.000 RPM.

5.5. Acoplador óptico

Esse sensor é constituído basicamente de um disco com furos conectado ao eixo do motor e um par (transmissor e receptor) acoplado por meio de um feixe de luz. Muitas vezes é utilizado um fotoacoplador já integrado.

5.5.1. Fotoacoplador

É um dispositivo que permite que um objeto interrompa a transmissão de luz emitida por um LED.

O circuito típico do fotoacoplador é exibido na figura 5.8b, enquanto que seu aspecto construtivo é mostrado na figura 5.8a. Ele é basicamente formado por um diodo emissor de luz (LED) na entrada e um fotossensor na saída. Consiste em uma ligação óptica formada pelo LED (tipicamente, GaAs, o qual emite luz na região IR) e o fotossensor. O Schmitt Trigger mostrado na figura 5.8b é incluído por alguns fabricantes (por exemplo: o GP-1A01, produzido pela Sharp Eletronics).

A função do Schmitt Trigger é gerar uma onda regulada na saída tão precisa quanto for possível para se chegar a uma quadrada ideal. Outros fotoacopladores incluem uma saída SCR ou triac para aplicações de controle de força.

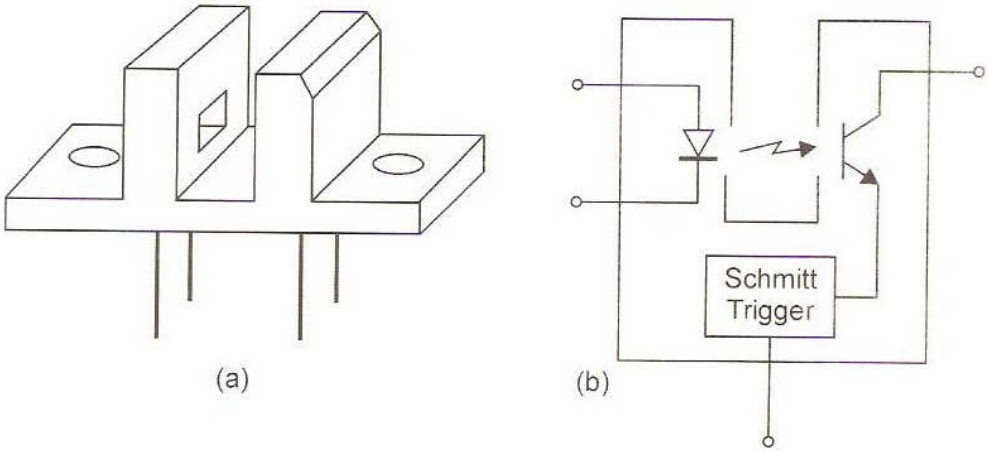


Figura 5.8 - Fotoacoplador.

Aplicação

Como sensor de velocidade, a figura 5.9 apresenta um exemplo do fotoacoplador como sensor de velocidade em que temos um disco que está conectado ao eixo de um motor que gira parcialmente dentro de uma cavidade do fotoacoplador. Essa configuração pode ser usada para gerar uma tensão de realimentação (que é proporcional à velocidade do motor) em um sistema de controle de velocidade de *loop* fechado, substituindo o tacogerador.

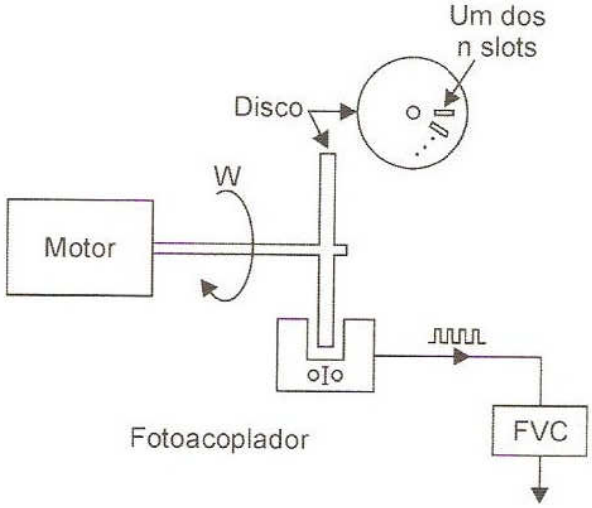


Figura 5.9 - Aplicação do fotoacoplador para medição de velocidade.

A construção do disco inclui ***n*** furos distribuídos regularmente em intervalos de forma angular na sua periferia. Quando o disco gira, a luz do LED passa pelos furos do disco e é interrompida pela parte sólida do disco. Por esta razão, o fotoacoplador gera um pulso na saída cujo período do ciclo depende do tamanho do espaçamento dos furos e cuja freqüência depende da velocidade do motor ω. Desde que o disco tenha ***n*** furos, o fotoacoplador deve gerar ***n*** pulsos para cada revolução do disco. Seja a velocidade do motor ω **rpm** ou **ω/60 rps**, a freqüência dos pulsos pode ser expressa por:

$$f = \frac{n \times \omega}{60} \quad (Hz)$$

Esse tipo de sensor faz parte dos denominados **transdutores digitais de velocidade** que fornecem uma saída em forma de pulsos, variável com a velocidade. Esses pulsos são normalmente enviados a instrumentos contadores ou aplicados a um conversor freqüência-para-tensão (*frequency-to-voltage* conversor - FVC), cuja saída será uma tensão **DC** proporcional à freqüência de pulsos.

Entre os transdutores digitais de velocidade mais populares temos os fotoelétricos, que podem ser de disco furado ou por reflexão, como ilustra a figura 5.10.

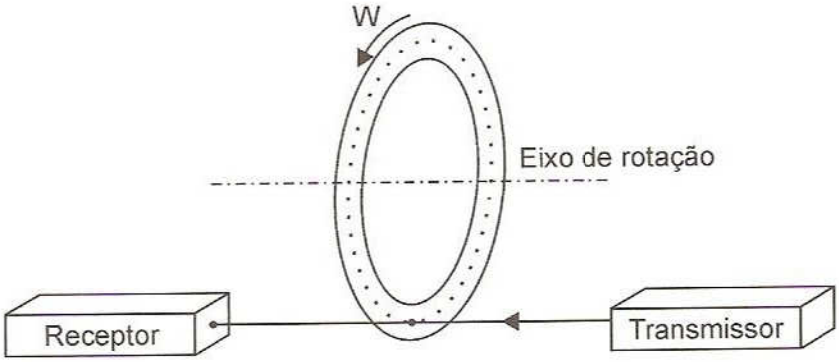


Figura 5.10 - Sensor óptico de velocidade.

Para aumentar a precisão do sistema, em especial em baixas rotações, é necessário incrementar o número de furos.

O transdutor fotoelétrico a reflexão, no lugar de usar um transmissor e um receptor separados (ou um fotoacoplador), usa um transmissor e um receptor em um único encapsulamento. No lugar do disco furado emprega-se um disco com traços que refletem e outros opacos. Encontrando uma superfície refletora, a luz transmitida é refletida no receptor.

A vantagem desse sistema está no fato de que não é necessário dispor de um disco especial, mas é suficiente aplicar a luz sobre a parte em movimento do tacorrefletor. O problema dos transdutores fotoelétricos consiste em fornecer um sinal diretamente utilizável nas regulações automáticas (por exemplo, em malha fechada) que normalmente (atualmente em grande maioria) são do tipo analógicas. Neste caso é necessário converter o sinal digital em analógico por meio de um conversor A/D ou freqüência/tensão.

Outro tipo de transdutor digital de velocidade é aquele que utiliza sensores indutivos de aproximação associados a discos metálicos os quais têm furos distribuídos por toda a sua periferia, ou discos não-metálicos com circunferências metálicas coladas às suas periferias.

Capítulo 6

Sensores de Aceleração

Os sensores de aceleração (acelerômetros e giroscópios) fornecem um sinal elétrico proporcional à aceleração do sistema. Esses componentes são do tipo inercial e dão indicação sobre o movimento do sistema com relação a uma prefixada variável do eixo inercial.

Um acelerômetro é uma configuração de diversos componentes que convertem aceleração em uma tensão elétrica analógica. De um ponto de vista geral, um acelerômetro pode ser considerado um transdutor que converte a energia mecânica associada ao movimento na forma elétrica.

Os acelerômetros podem ser usados como instrumentos para monitorar as mudanças na velocidade (isto é aceleração) devido ao choque, vibração ou impacto. Embora sejam usados principalmente em aplicações de medição de vibração, os acelerômetros podem também ser emcontrados para medir o ângulo da lança em guindastes, o ângulo de inclinação em maquinário de construção de estradas e em estudos de desvio de furos de sondagem. São empregados também, em grande escala, em sistemas de guia de navios, aviões, satélites, etc.

Na prática, a aceleração vem convertida em uma relação de massa vinculada a um meio viscoso e essa mistura vem em conjunto com um sensor de posição (transformador diferencial, potenciômetro ou do quartzo piezoelétrico).

6.1. Acelerômetros de deslocamento

Esse tipo de componente fornece uma tensão elétrica de saída proporcional à aceleração. Com uma integração da variável de saída teremos uma tensão proporcional à velocidade de deslocamento e com uma posterior integração teremos uma nova saída proporcional ao deslocamento.

O acelerômetro mecânico mede, na realidade, a força de inércia sobre uma massa. Como a aceleração é proporcional a essa força, o dispositivo pode ser calibrado em aceleração. O invólucro do instrumento é tornado fixo ao objeto cuja aceleração se quer medir, como ilustra a figura 6.3. A cápsula, pela sua base, é aplicada e presa a um corpo que se desloca segundo o eixo x (figura 6.1a). Admite-se que a massa da cápsula seja desprezível em face da massa do corpo vibrante. Internamente, a cápsula é composta de uma massa m, acoplada a um elemento elástico c (coeficiente de elasticidade k) e um elemento amortecedor com coeficiente de atrito viscoso r. Suponhamos que não haja componente de movimento da base da cápsula nem da massa m, segundo o eixo y. Em condições de velocidade uniforme (aceleração nula), a massa está na posição de repouso x_1; quando o instrumento é submetido

à aceleração ***a***, a massa ***m*** é submetida, pelo princípio de inércia, a uma força m $a' = -m\,a$, a que se opõe à força elástica de restauração da mola; a massa ***m*** adota, então, uma nova posição de equilíbrio x_2, em que a força de inércia $m\,a'$ é exatamente contrabalançada pela força de restauração da mola. Para evitar oscilações da massa ao redor da nova posição de equilíbrio, o sistema massa-mola é mergulhado num líquido de viscosidade tal que a massa alcance a posição de equilíbrio com movimento aperiódico crítico.

A coordenada x_1 mede o deslocamento imposto à base da cápsula pelo movimento cuja aceleração se deseja medir, e x_2 mede o deslocamento que resulta na massa m, em relação à mesma origem de x_1.

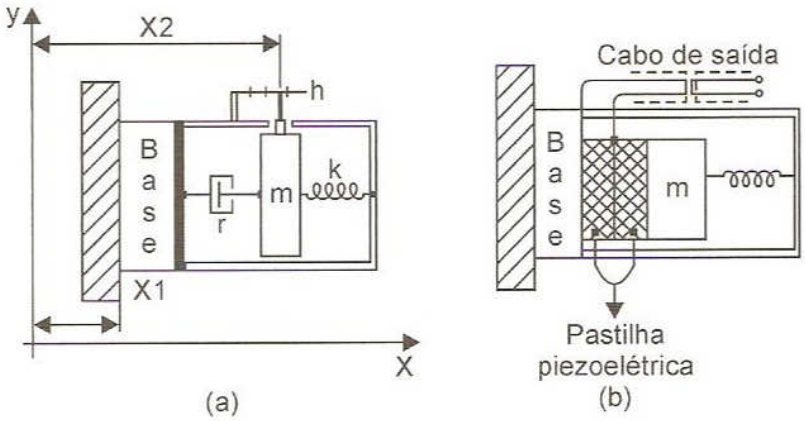


Figura 6.1 - Cortes longitudinais esquemáticos (a) de um acelerômetro mecânico de translação, (b) de um acelerômetro eletromecânico do tipo piezoelétrico.

No mesmo princípio se baseiam os acelerômetros nos quais a função da mola é executada por uma lâmina de quartzo piezoelétrico, na qual se apóia a massa *m*. As solicitações a que esta é submetida provocam deformações na lâmina, com conseqüente variação da polarização dielétrica, imediatamente registrável com oportunos dispositivos. Um índice diretamente ligado à massa m marca as várias posições de equilíbrio numa escala graduada, traçadas diretamente em unidades de aceleração.

O deslocamento (em cm) da massa é dado pela aceleração *a* (em cm/s^2) multiplicada pela relação entre a massa (em g) e a constante da mola *K* (em dynas/cm), logo:

$$x = a\frac{m}{K} \qquad \text{equação 6.1}$$

Um exemplo de acelerômetro de deslocamento é mostrado na figura 6.2. Este modelo com circuito eletrônico integrado é especificado para medidas de vibração da maioria das estruturas. Sua unidade é hermeticamente selada contra contaminação do ambiente, oferecendo sinal de saída altamente sensível com ampla largura de banda de medição.

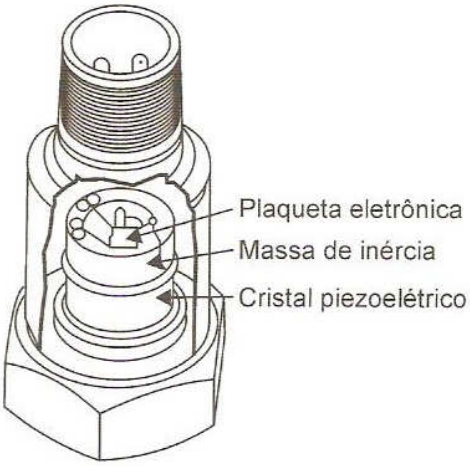


Figura 6.2 - Corte de um acelerômetro piezoelétrico com amplificador montado internamente.

Figura 6.3 - Acelerômetro piezoelétrico produzido pela Endevco modelo 7251A.

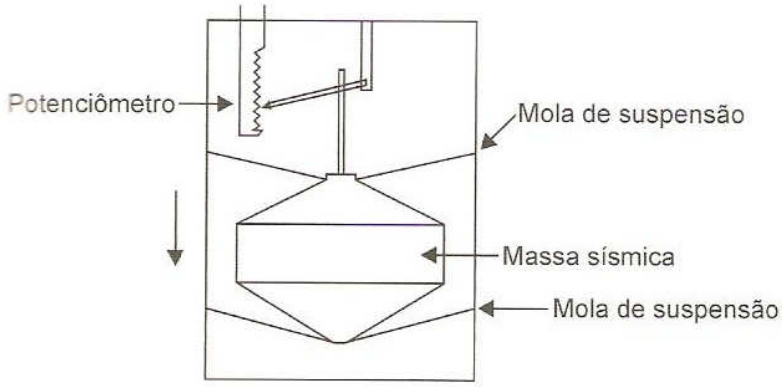


Figura 6.4 - Acelerômetro de deslocamento potenciométrico.

Para obter a medida completa de uma aceleração qualquer, é necessário dispor de três acelerômetros em direções mutuamente ortogonais, de modo a medir os três componentes da aceleração.

Na figura 6.4 a detecção do deslocamento é então fornecida por um potenciômetro resistivo, permitindo boa sensibilidade. Com tal tipo de sensor é possível medidas de aceleração de 10 a 100 m/s^2, isto é, de g a 10 g, sendo g a aceleração da gravidade ($g = 9{,}81$ m/s^2).

6.2. Acelerômetros de deformação

São transdutores que convertem a aceleração numa variação de resistência devido à deformação de um *strain-gage* num dos braços de uma ponte de Wheatstone.

Um exemplo desse tipo de sensor é mostrado na figura 6.5, em que são usados dois *strain-gages* não mostrados. A massa sísmica é suportada em ambos os lados pelas molas que também suportam os enrolamentos dos *strain-gages*. Quando a aceleração é de baixo para cima, a mola superior se move para cima, fazendo com que a tensão mecânica no *strain-gage* superior aumente e diminua no *strain-gage* inferior.

Tal sistema é sensível à componente absoluta da aceleração na direção do eixo de deslocamento. A fim de prover algum tipo de amortecimento no sistema, ele é imerso em algum tipo de fluído viscoso (por exemplo, óleo de silicone).

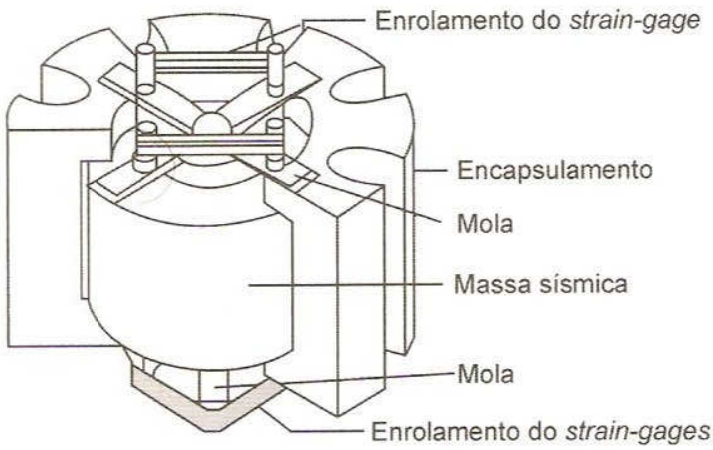


Figura 6.5 - Acelerômetro de deformação com *strain-gage*.

Quanto maior a massa sísmica tanto maior será a força exercida nos *strain-gages*, e assim, maior será a sensibilidade. Por outro lado, uma massa sísmica grande significa que a freqüência de ressonância será mais baixa e o carregamento imposto à plataforma, cuja aceleração está sendo medida, será maior.

Uma outra forma de acelerômetro, ainda mais simples, é mostrada na figura 6.6b, que consiste em um suporte chamado *"cantilever"* e uma massa sísmica conectada na sua extremidade. Se o cantilever for de silício, os strain-gages podem ser incorporados na própria estrutura do material; se for de metal, podem ser utilizados os *strain-gages* colados na sua estrutura externa. Um amortecimento apropriado pode ser obtido imergindo o sistema num óleo de viscosidade adequada.

Embora tais acelerômetros sejam menos sensíveis que os do parágrafo anterior, eles têm a grande vantagem de poderem ser fabricados em tamanho bastante reduzido e compacto.

Um acelerômetro pode ser configurado de diversas maneiras. Uma típica estrutura que usa um LVDT é mostrada na figura 6.6. Ela inclui um cantilever spring, fixado à extremidade de um suporte, uma carga presa à extremidade livre e um LVDT, cujo núcleo magnético é posicionado diretamente sob a extremidade livre da mola. O suporte do acelerômetro é preso ao membro mecânico sendo acelerado. A aceleração crescente, como mostrada, resulta na força de reação decrescente devido à massa W/g.

O *cantilever spring* que está sendo desviado na direção de cima para baixo a uma distância X (a magnitude do deslocamento sendo proporcional à constante da mola Ks) produz uma força de reação crescente igual a $Ks \times X$. Na ausência de outras forças externas, essas duas forças devem se balançar mutuamente, isto é,

$$\frac{W}{g} \times a = Ks \times X \qquad \text{equação 6.2}$$

e a aceleração, embora normalizada, para g pode ser expressa como:

$$an = \frac{a}{g} \times \frac{Ks \times X}{W} \qquad \text{equação 6.3}$$

visto que a saída elétrica da LVDT pode ser expressa como $KL \times X = V_0$ a equação anterior pode ser expressa em termos dos parâmetros LVDT como:

$$an = \frac{Ks \times V_0}{W \times KL} \qquad \text{equação 6.4}$$

A equação 6.4 mostra que a aceleração está linearmente relacionada à tensão de saída V_0. O coeficiente $Ks / W \times KL$ determina o ângulo de inclinação da reta que resulta quando *an* é plotada *versus* V_0.

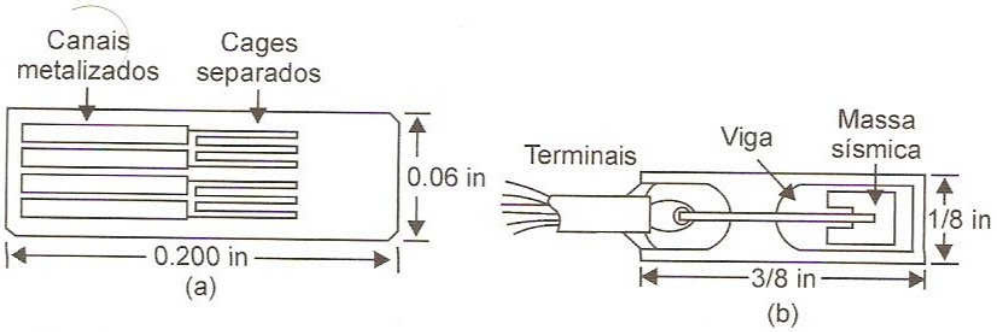


Figura 6.6 - Acelerômetro subminiatura estado-sólido: (a) suporte de silício monolítico com strain-gages piezorresistivos separados; (b) componentes do acelerômetro.

A figura 6.7b mostra uma outra aproximação para a configuração do acelerômetro. Essa estrutura usa quatro *strain-gages*; dois estão presos ao topo do suporte da mola e dois são presos na superfície inferior. Como a unidade da aceleração decrescente é conhecida, os *strain-gages* 2 e 3 no topo da superfície são sujeitos à tensão mecânica, assim como o suporte da mola é deslocado para baixo e suas resistências aumentam devido ao estiramento do fio elétrico do *gage*. Ao mesmo tempo, os *strain-gages* 1 e 4 são sujeitos à compressão, suas resistências diminuem porque a compressão faz com que o diâmetro do fio elétrico do *strain--gage* diminua.

Como indica a figura 6.7c, os quatro *strain-gages* são conectados na configuração ponte Wheatstone. Para conseguir a máxima saída da ponte, os braços opostos da ponte contêm *gages* que estão um ou outro na tensão ou na compressão. Se todos os *strain-gages* são idênticos (isto é, sua resistência nominal é R e sua variação de resistência é ΔR), então a tensão de saída da ponte é dada por:

$$V_0 = \frac{\Delta R}{R} = \in EG \qquad \text{equação 6.5}$$

sendo G o fator *gage* e $\in$ a deformação. A saída da ponte é, deste modo, proporcional à variação na resistência do *gage*, que é, em rotação, proporcional ao deslocamento da mola elástica que depende do valor da aceleração.

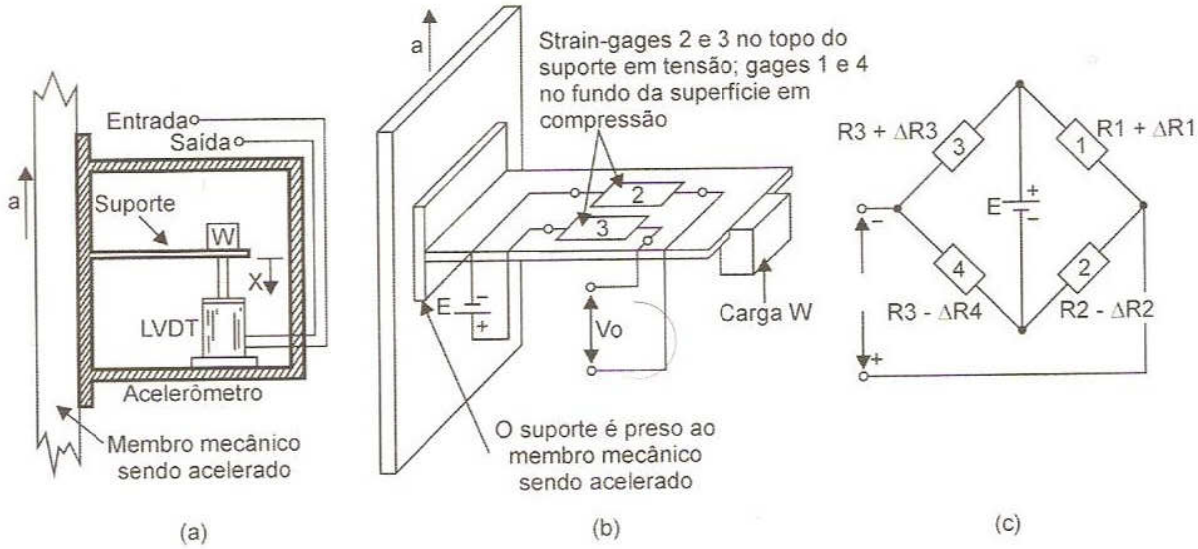


Figura 6.7 - Estrutura do acelerômetro (a) tipo LVDT, (b) tipo *strain-gage* e (c) arranjo ponte de Wheatstone dos quatro *strain-gages* quando são presos ao *cantilever spring* em parte.

6.3. Acelerômetros a balanço de força

Os acelerômetros a balanço de força apresentam um anel de reação de alto ganho que, por meio de um elemento atuador chamado força *F*, fará equilíbrio à força agente sobre a massa móvel. A figura 6.8 mostra o dispositivo; a corrente de saída do amplificador proporcional e relação da massa da sua posição de repouso, medido do transdutor diferencial *T*, alimenta a força *F* que tende a reconduzir a massa à condição inicial. A corrente, que fornece uma queda de tensão na resistência *R*, é proporcional à aceleração.

A força *F*, mostrada esquematicamente na figura 6.8, é um dispositivo eletromagnético apto a gerar uma força; o ímã permanente gera um campo magnético que se fecha através dos dois elementos metálicos entre os quais se progride a força. Quando a bobina é percorrida de uma corrente contínua, a interação do fluxo do magneto e do fluxo produzido da bobina gera uma força proporcional à corrente numa vasta faixa:

$$F = K \times I \qquad \text{equação 6.6}$$

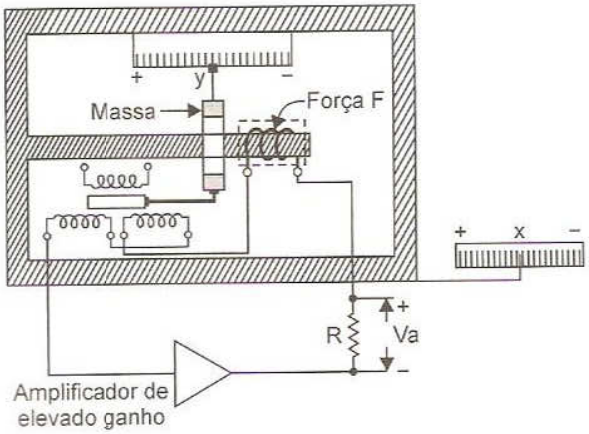


Figura 6.8 - Acelerômetro a balanço de força.

sendo a constante *K* chamada de sensibilidade da força *F*. A precisão do acelerômetro a balanço de força é confiado à propriedade da precisão e da linearidade da força *F*, pela presença do amplificador de alto ganho na linha direta do sistema.

Capítulo 7

Sensores de Temperatura

Os sensores apresentados neste capítulo são os mais utilizados em indústrias, veículos, eletrodomésticos e instalações prediais. Serão estudados os termistores, termopares, termorresistores, par bimetálico, sensores eletrônicos e pirômetros.

7.1. Termistores *(Thermally Sensitive Resistor)*

São resistores termicamente sensíveis. São semicondutores eletrônicos cuja resistência elétrica varia com a temperatura. Eles são úteis industrialmente para detecção automática, medição e controle de energia física. Os termistores são extremamente sensíveis a mudanças relativamente pequenas de temperatura.

Ou seja, termistores são resistores sensíveis à temperatura. Os elementos resistivos são óxidos de metais como manganês, níquel, cobalto, cobre, ferro, titânio. A Figura 7.1 ilustra alguns tipos utilizados na indústria.

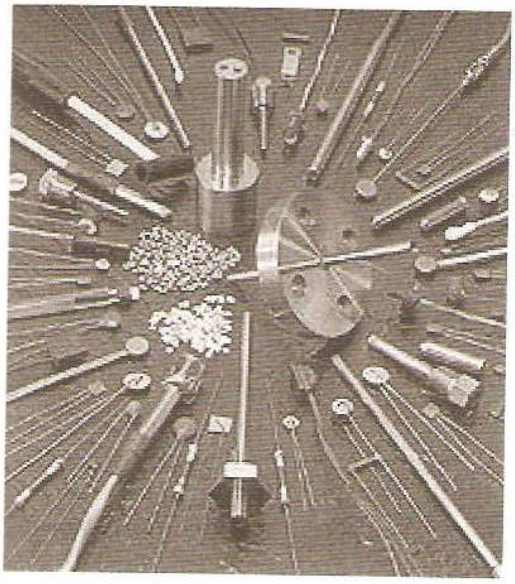


Figura 7.1 - Apresentação dos modelos de termistores fabricados pela Elscott Manufacturing.

Existem duas variedades básicas de termistores: os de coeficiente positivo de temperatura (PTC) e os de coeficiente negativo de temperatura (NTC). No primeiro a resistência aumenta com a temperatura e o contrário ocorre no segundo tipo.

O tipo NTC é mais usual na medição e controle de temperatura. Mas não são muito usados em processos industriais, provavelmente pela falta de padronização entre os fabricantes. O termistor NTC é um dos sensores de temperatura que fornecem a maior variação da saída por variação de temperatura, mas a relação não é linear.

A relação entre resistência e temperatura é dada pela equação de Steinhart & Hart, conforme equação 7.1.

$$T = \frac{1}{a + b \times ln + c \times ln R^3}$$ equação 7.1

Os valores de *a*, *b* e *c* são os coeficientes que depende do material usado, *R* é o valor da resistência e *T* a temperatura. A tabela a seguir mostra as principais características de um tipo comum de termistor, 44004, fabricado pela YSI.

Tabela 8 - Características do termistor 44004 fabricado pela YSI.

Resistência a 25°C	2252 ohms.
Faixa de medição	-80 a +120°C típico (250°C máx).
Tolerância	±0,1 ou ±0,2°C.
Estabilidade em 12 meses	< 0,02°C a 25°C e < 0,25°C a 100°C.
Constante de tempo	< 1,0 s em óleo e < 60 no ar calmo.
Auto-aquecimento	0,13 °C/mW em óleo e 1,0 °C/mW no ar.
Coeficientes	$a = 1{,}4733\ 10^{-3}$ $b = 2{,}372\ 10^{-3}$ $c = 1{,}074\ 10^{-7}$.
Dimensões	2,5 x 4 mm.

Fonte: Medidas de Temperatura I. http://www.mspc.eng.br/fldetc/tpr1.asp.

7.1.1. PTC *(Positive Temperature Coefficient)*

Os PTC's são resistores que apresentam um coeficiente térmico positivo, isto é, sua resistência aumenta com a temperatura. Diferem dos NTC's em dois aspectos fundamentais: o coeficiente de temperatura de um PTC é positivo apenas dentro de certa faixa de temperatura. Fora dessa limitação, o coeficiente é negativo ou nulo (figura 7.2). O valor absoluto do coeficiente térmico dos PTC's normalmente é bem maior que o dos NTC's. A figura 7.3 mostra a simbologia utilizada para representar um elemento PTC.

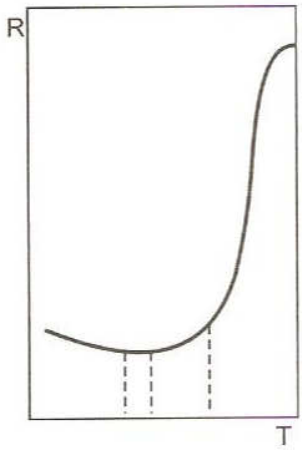


Figura 7.2 - Curva típica de um termistor do tipo PTC.

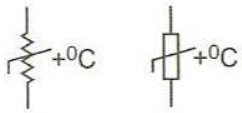


Figura 7.3 - Simbologia do termistor PTC.

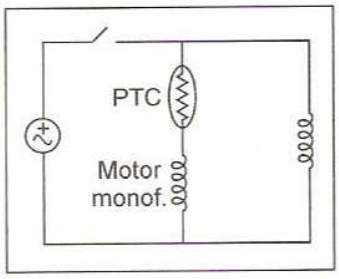


Figura 7.4 - Exemplo de aplicação.

A figura 7.4 mostra um circuito em que o PTC é utilizado na partida de motores monofásicos. Quando o circuito é energizado, o PTC está no seu estado de baixa resistência elétrica, permitindo que a corrente flua normalmente pela bobina de partida. Assim que o motor entra em movimento, o PTC aquece acima da sua temperatura de transição, passando para o seu estado de alta resistência elétrica, permitindo que apenas uma corrente residual passe pela bobina de partida.

7.1.2. NTC *(Negative Temperature Coefficient)*

Os NTC's são elementos cuja resistência decresce com o aumento da temperatura (figura 7.5), portanto seu coeficiente de temperatura é negativo. Alterações na temperatura do corpúsculo podem ser obtidas externamente pela variação da temperatura em sua proximidade; internamente pelo calor resultante da potencia dissipada, desenvolvida pela passagem de corrente através do corpúsculo, ou por uma combinação dessas duas. A figura 7.6 mostra a simbologia utilizada para representar um elemento NTC.

No circuito ilustrado na figura 7.7, a polarização da base está calculada para que o transistor esteja em corte em baixas temperaturas e em saturação em altas temperaturas.

Explicação: quando o sensor está sob temperaturas baixas, a resistência do NTC estará alta, com isso a tensão na base ficará muito pequena, levando o transistor para o corte. Quando a temperatura começa a subir, o potencial na base sobe proporcionalmente até que o resistor sature. Quando o transistor saturar, o relé é completamente energizado fechando seus contatos NA e abrindo os contatos NF. Esse circuito pode ser utilizado para acionar qualquer dispositivo que necessite de um controle de temperatura, como, por exemplo, estufas, proteção contra incêndio, etc.

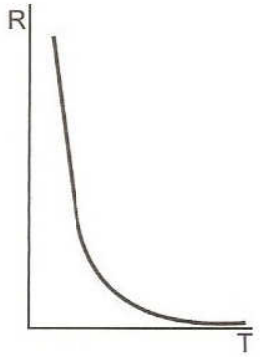


Figura 7.5 - Curva do termistor NTC.

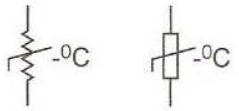


Figura 7.6 - Simbologia do termistor NTC.

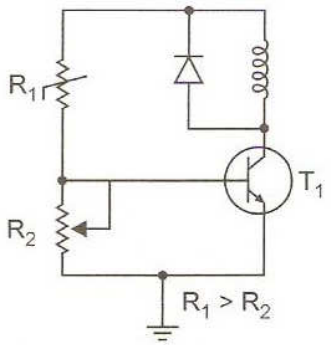


Figura 7.7 - Exemplo de aplicação do NTC.

A gama de utilização dos termistores é vasta, abrangendo desde aplicações de entretenimento até profissionais, como, por exemplo:

- **Química:** calorimetria, regulação de nível de líquidos e medição da condutividade térmica de gases.
- **Física:** medição de vácuo, medição de vazão de gases e líquidos e radiometria.
- **Medicina:** termômetros.

- **Regulação de temperaturas:** congelador, máquina de lavar, forno elétrico, sistema de aquecimento e sistema de ar-condicionado.
- **Veículos:** medição de temperatura de água e óleo e monitorização de gases de exaustão.
- **Projetos elétricos:** operação de atraso em relés, compensação de variação de temperatura e medição de potência e microondas.
- **Sistema de detecção e alarmes contra incêndio:** os sensores termovelocimétricos de alguns detectores de temperatura de sistemas de alarmes prediais utilizam os termistores como elemento sensitivo.

7.2. Termopares

Os princípios e a teoria associada a efeitos termoelétricos não foram estabelecidos por uma só pessoa num momento específico. O descobrimento do comportamento termoelétrico de certos materiais é geralmente atribuído a T.J. Seebeck.

Em 1821, Seebeck descobriu que em um circuito fechado, feito com fios de dois metais heterogêneos, uma corrente elétrica fluirá se a temperatura de uma junção T_1 estiver acima da temperatura da outra extremidade T_2, como ilustra a figura 7.8.

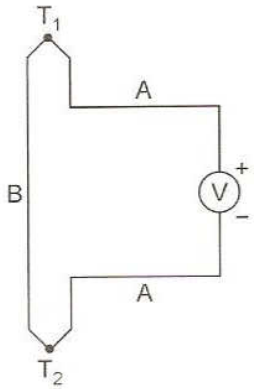


Figura 7.8 - Circuito utilizado por Seebeck.

A descoberta original de Seebeck usou um circuito de termopares compostos de antimônio e cobre. A FEM gerada está relacionada com o campo elétrico formado devido ao aquecimento que é função do gradiente de temperatura nesse ponto. Existem três efeitos que explicam a FEM gerada. São eles: Thomson - o efeito em que há criação de campo elétrico devido ao aquecimento de uma barra condutora; Seebeck - o fenômeno em que ocorre uma circulação de corrente em um circuito formado por dois metais de naturezas diferentes, quando há uma diferença de temperatura entre as duas junções; Peltier - o efeito em que ocorre a liberação ou absorção de calor em uma junção termoelétrica.

Considerando a teoria de Seebeck, a FEM é determinada pela seguinte expressão:

$$V = \int_{T1}^{T2} (S_B(T) - S_A(T))\, dT \qquad \text{equação 7.2}$$

sendo S_A e S_B os coeficientes de Seebeck dos metais envolvidos na junção e T_2 e T_1 as temperaturas das duas junções. Os coeficientes de Seebeck não são lineares e dependem da temperatura absoluta, dos materiais e da estrutura molecular dos condutores. Se os coeficientes de Seebeck são efetivamente constantes para a faixa de medição da temperatura, a equação 7.2 pode ser reescrita como:

$$V = (S_B - S_A) \times (T_2 - T_1) \qquad \text{equação 7.3}$$

Assim um termopar funciona medindo a diferença de potencial causada por fios diferentes. Isso por ser usado para medir diretamente a diferença de temperaturas ou para medir uma temperatura absoluta, colocando uma junção a temperatura conhecida. Quando vários termopares são ligados em série, o efeito é somado, e esses dispositivos são chamados de termopiles, que serão analisados posteriormente.

Com base na utilização e conhecimento mais comuns nos dias de hoje, existem oito tipos de termoelemento: S, R, B, J, K, N, T e E. Nos anos seguintes, após a descoberta do circuito termoelétrico, muitas combinações de elementos termoelétricos foram estudadas. Uma aplicação séria dos achados foi acelerada pela demanda originada pela Revolução Industrial.

Nos últimos vinte anos tem sido feito um esforço considerável para avançar a tecnologia da medição de temperaturas. Muitos materiais de termoelementos novos têm sido introduzidos para temperaturas mais altas.

Combinações de tungstênio, rênio e suas binárias são largamente usadas em temperaturas mais altas para atmosferas redutoras e inertes ou vácuo. Ainda não foram atribuídas letras para indicar essas combinações.

O avanço mais significativo recentemente na medição de temperatura foi a adoção da Escala Internacional de Temperaturas de 1990 (ITS-90). O trabalho de representantes internacionais foi adotado pela *Internacional Committee of Eights and Measures* em sua reunião de setembro de 1989, e é descrito na *"The International Temperature Scale of 1990"*, Metrologia 27, N. 1,3-10 (1990); Metrologia 27, 107 (1990).

Eles cobrem uma faixa bastante extensa de temperatura que vai de –200 a 2.300°C aproximadamente, com uma boa precisão e repetibilidade aceitável, tudo isso a um custo menor que o de outros tipos de sensores de temperatura. Nas figuras 7.9 e 7.10 mostram aspectos e detalhes construtivos de diferentes tipos de termopares.

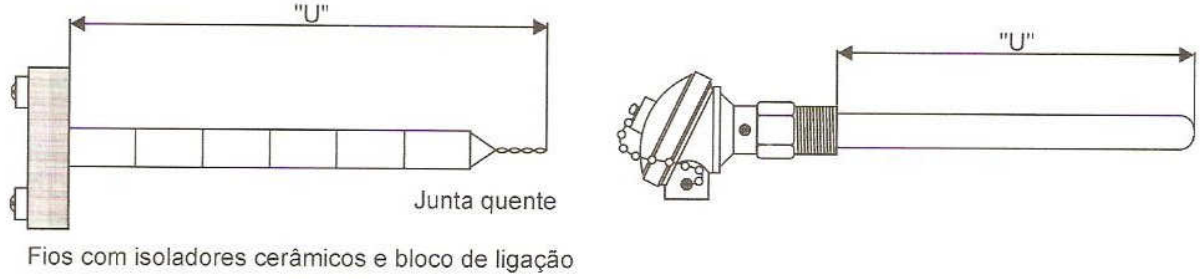


Figura 7.9 - Diferentes tipos de termopares.

Estas representações mostram um termopar sem proteção (utilizando somente isoladores de cerâmica) e outro com proteção metálica. O comprimento "U" depende da aplicação.

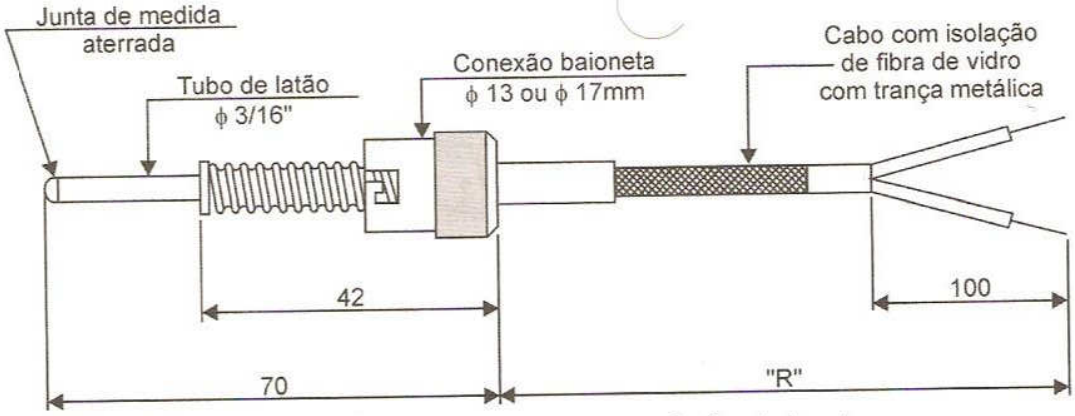


Figura 7.10 - Termopar com conexão do tipo baioneta.

7.2.1. Características dos termopares

Os tópicos seguintes relacionam os tipos de termopar, sua composição, sua faixa de temperatura de trabalho e suas características de utilização.

TERMOPARES T:

Composição: Cobre$_{(+)}$ / Cobre - Níquel$_{(-)}$

Faixa de utilização: –200 a 350°C

Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Adequados para medições abaixo de zero grau. Apresenta boa precisão na sua faixa de utilização.

TERMOPARES J:

Composição: Ferro$_{(+)}$ / Cobre - Níquel$_{(-)}$

Faixa de utilização: –40 a 750°C

Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Não devem ser usados em atmosferas sulfurosas e não se recomenda o uso em temperaturas abaixo de zero grau. Apresentam baixo custo.

TERMOPARES E:

Composição: Níquel - Cromo$_{(+)}$ / Cobre - Níquel $_{(-)}$

Faixa de utilização: –200 a 900°C

Utilizados em atmosferas oxidantes e inertes. Em ambientes redutores ou vácuo perdem suas características termoelétricas. Adequados para uso em temperaturas abaixo de zero grau.

TERMOPARES K:

Composição: Níquel - Cromo$_{(+)}$ / Níquel - Alumínio$_{(-)}$

Faixa de utilização: –200 a 900°C

Recomendáveis em atmosferas oxidantes ou inertes. Ocasionalmente podem ser usados abaixo de zero grau. Não devem ser utilizados em atmosferas redutoras ou sulfurosas. Seu uso no vácuo é por curto período de tempo.

TERMOPARES S - R:

Composição: **S** 90% Platina - 10% Ródio$_{(+)}$ / Platina$_{(-)}$

R 87% Platina - 13% Ródio$_{(+)}$ / Platina$_{(-)}$

Faixa de utilização: 0 a 1.600°C

Recomendáveis em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados abaixo de zero grau, no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Apresentam boa precisão em temperaturas elevadas.

TERMOPARES TIPO B:

Composição: 70% Platina - 30% Ródio$_{(+)}$

94% Platina - 06% Ródio$_{(-)}$

Faixa de utilização: 600 a 1.700°C

Recomendáveis em atmosferas oxidantes ou inertes. Não devem ser usados abaixo de zero grau, no vácuo, em atmosferas redutoras ou atmosferas com vapores metálicos. Mais adequados para altas temperaturas que os tipos S/R.

TERMOPARES N:

Composição: Níquel-Cromo-Silício$_{(+)}$ / Níquel-Silício$_{(-)}$

Faixa de utilização: –200 a 1.200°C

Excelente resistência à oxidação até 1.200°C. Curva F.E.M x Temp. similar ao tipo *K*, porém possuem menor potência termoelétrica. Apresentam maior estabilidade e menor drift x tempo.

7.2.2. Limites de erros dos termopares

Entende-se por erro de um termopar o máximo desvio que ele pode apresentar em relação a um padrão que é adotado como absoluto.

O erro pode ser expresso em graus Celsius ou em porcentagem da temperatura medida. Deve-se adotar sempre o maior.

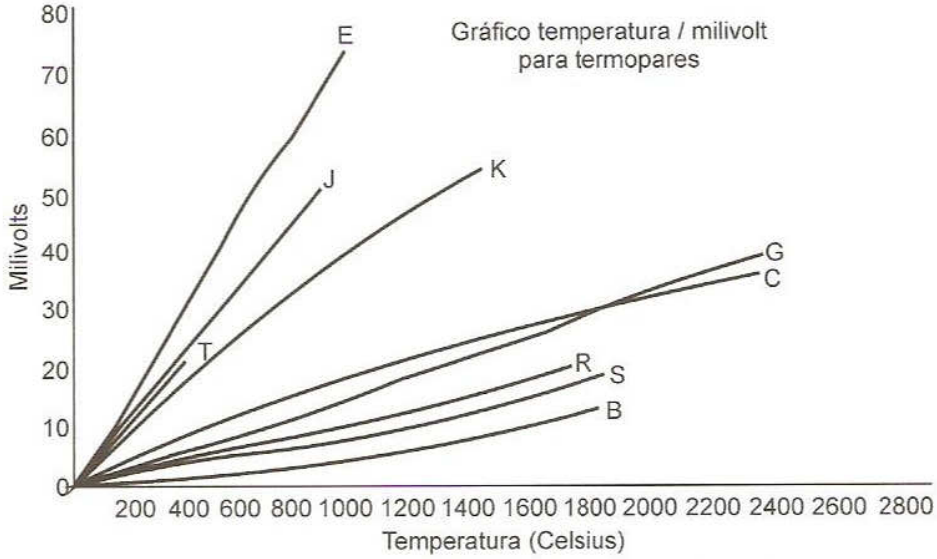


Figura 7.11 - Curvas de temperatura X milivoltagem.

A nomenclatura dos termopares segundo a IEC 584 - 2:

Tipo **T**: Cobre / Cobre - Níquel → *COBRE X CONSTANTAN*

Tipo **J**: Ferro / Cobre - Níquel → *FERRO X CONSTANTAN*

Tipo **E**: Níquel - Cromo / Cobre - Níquel → *CHROMEL X CONSTANTAN*

Tipo **K**: Níquel - Cromo / Níquel - Alumínio (alumel) → *CHROMEL X ALUMEL*

Tipo **S**: Platina - 10% Ródio / Platina

Tipo **R**: Platina - 13% Ródio / Platina

Tipo **B**: Platina - 30% Ródio / Platina - 6% Ródio

Tipo **N**: Níquel - Cromo - Silício / Níquel - Silício

Além dessas ligas existem outras cujas simbologias dependem do fabricante do termopar.

7.2.3. Relação temperatura x bitola do fio

Os termopares têm limites máximos e mínimos de aplicação que são funções das características físicas e termoelétricas dos fios.

Os limites mínimos segundo a ANSI MC 96.1 são –200°C para os tipos **T**, **E** e **K**, 0°C para os tipos **S** e **R** e 800°C para o tipo **B**.

Os limites superiores dependem do diâmetro do fio utilizado na construção dos termopares. Esses limites se aplicam para termopares convencionais em uso contínuo, com poços ou tubos de proteção com a extremidade fechada, portanto não sendo válida para os termopares com isolação mineral.

7.2.4. Termopar com isolação mineral

O termopar com isolação mineral é constituído de um ou dois pares de fios isolados da bainha metálica por um pó isolante de óxido de magnésio altamente compactado. Devido a essa construção, os termoelementos ficam totalmente isolados do meio, resultando maior estabilidade da Força Eletromotriz **FEM** e maior vida útil.

O pequeno volume e alta condutividade térmica do óxido de magnésio promovem uma rápida transferência de calor, superior aos termopares com montagem convencional.

Os termopares com isolação mineral são disponíveis com diversos tipos de capas metálicas, para garantir sua integridade em qualquer tipo de ambiente corrosivo, qualquer que seja o termopar.

A resistência de isolação entre condutores e bainha é sempre superior a 100 MΩ (a 20°C) qualquer que seja o diâmetro, em qualquer condição de umidade.

A bainha metálica devidamente aterrada oferece excelente blindagem contra interferência eletrostática (ruídos).

7.2.5. Tipos de junção

→ **Termopar com junção exposta:** nesse caso a junção quente fica exposta na ponta do sensor (ver figura 7.9), o que proporciona um tempo de resposta extremamente pequeno e uma grande sensibilidade a pequenas alterações de temperatura. Tem como desvantagem uma drástica redução da vida útil, especialmente em ambientes agressivos, pois não há nenhuma proteção para a junção. Na figura 7.12 são mostrados detalhes de montagem de um termopar tipo baioneta.

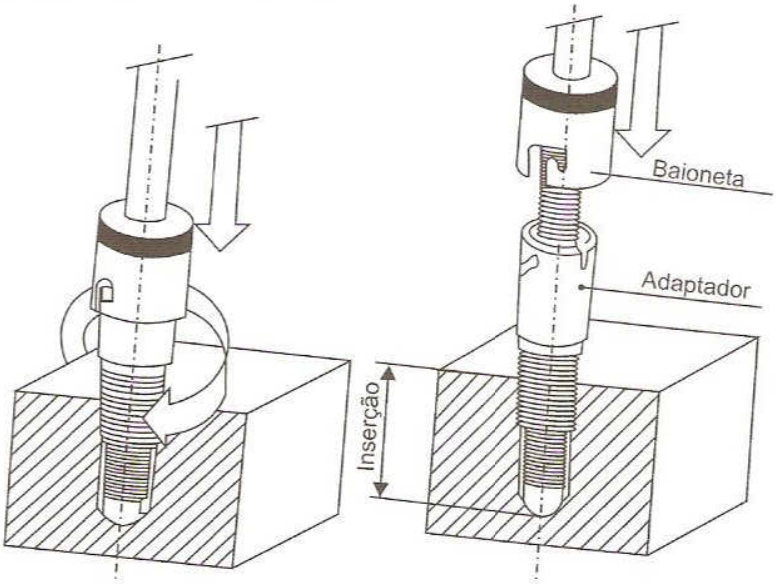


Figura 7.12 - Montagem típica.

- **Termopar com junção aterrada:** neste caso a junção é soldada junto com a bainha, o que proporciona um tempo de resposta intermediário entre a junção exposta e a isolada e fornece uma boa proteção para a junção. Como desvantagem, esse tipo é mais suscetível a ruídos.
- **Termopar com junção isolada:** neste caso a junção é isolada e interna, o que proporciona uma boa proteção e imunidade a ruídos, porém há um aumento no tempo de resposta.

7.2.6. Cabos de compensação

Na maioria das aplicações industriais de medição de temperatura por meio de termopares o elemento sensor não se encontra junto com o instrumento receptor. Nessas condições torna-se necessário que o instrumento seja ligado ao termopar por fios que possuam uma curva de força eletromotriz em função da temperatura similar à do termopar, a fim de que possa ter efetuada a correção da junta de referência.

- **Cabos e fios de extensão:** são condutores fabricados com as mesmas ligas de fios termopares, portanto apresentam a mesma curva de F.E.M. x temperatura. Os fios e cabos de extensão, apesar de possuírem a mesma liga dos termopares, apresentam um custo menor devido a limitações de temperatura às quais podem ser submetidos, pois sua composição química não é tão homogênea quanto a dos termopares.
- **Cabos e fios de compensação:** são condutores fabricados com ligas diferentes dos termopares a que se destinam, mas também apresentam mesma curva de F.E.M.x temperatura dos termopares. Os fios e cabos de compensação são usados principalmente com termopares do tipo nobre (a base de platina), S e R, mas podem também ser utilizados no termopar básico *K*.

Os fios e cabos de extensão e de temperatura são recomendados na maioria dos casos para utilização desde a temperatura ambiente até o limite de 200°C.

7.3. Termorresistência

As termorresistências são sensores de temperatura muito utilizados na indústria, pois além de ótima precisão, possuem uma larga faixa de trabalho e ainda permitem ligações a longa distância. O princípio é um filamento bastante delgado de um metal como platina ou níquel cuja resistência varia com a temperatura. As termorresistências mais utilizadas são Pt-100, Pt-1000, Ni-100 e Ni-1000. A que melhor representa a grande maioria das aplicações na indústria é sem dúvida a de platina (Pt-100).

7.3.1. Termorresistência de platina (Pt-100)

A termorresistência de platina é a mais usada industrialmente devido a sua grande estabilidade e precisão. Essa termorresistência tem sua curva padronizada conforme norma DIN - IEC 751 - 1985 e tem como características uma resistência de 100 Ω a 0°C.

Convencionou-se chamá-la de Pt-100, fios de platina com 100 Ω a 0°C. Sua faixa de trabalho vai de –200 a 650°C, porém a ITS - 90 padronizou seu uso até 962°C aproximadamente.

A resistência de isolação a temperatura ambiente entre cada terminal e a bainha deve ser de pelo menos 100 MΩ.

O auto-aquecimento é causado pela corrente que passa pela resistência, oriunda do instrumento de leitura, e pode levar a erros que comprometam a medição. Para isso deve-se limitar a corrente de excitação do sensor a valores da ordem de 1 a 2 mA.

A elevação da temperatura equivalente ao aumento da dissipação de calor na termorresistência não deve exceder 0,3°C.

7.3.2. Tipos de montagem

Na montagem convencional com bainha preenchida, tem-se o sensor montado em um tubo metálico com uma extremidade fechada e preenchidos todos os espaços com óxido de magnésio, permitindo uma boa troca térmica e protegendo o sensor de choques mecânicos. A ligação do bulbo é feita com fios de cobre, prata ou níquel isolados entre si. A extremidade é aberta, selada com resina epóxi, vedando o sensor do ambiente em que vai atuar.

Ainda assim, nesse tipo de montagem, a termorresistência não apresenta muita resistência mecânica e não dispõe de condições para efetuar curvas, bem como tem limitações relativas ao diâmetro externo e comprimento total. Nas figuras 7.13 e 7.14 são mostrados detalhes de fabricação de uma termorresistência.

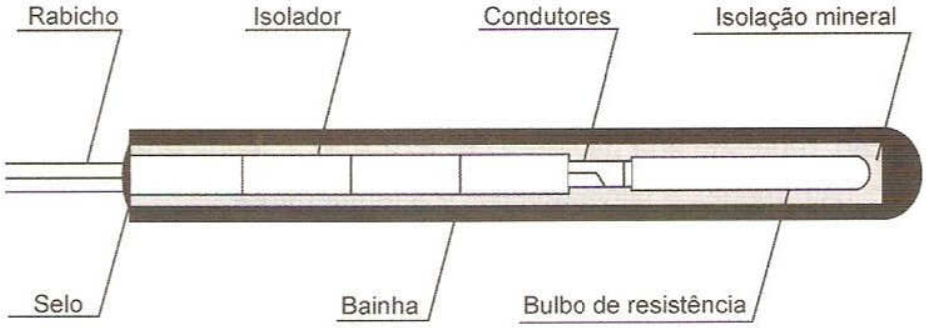


Figura 7.13 - Termorresistência convencional com bainha preenchida.

Para suprir este problema dimensional, foi desenvolvida a termorresistência isolação mineral, na qual o bulbo sensor é interligado a um cabo de isolação mineral com fios de cobre comuns. Esse tipo de montagem permite a redução do diâmetro, não limita o comprimento,

apresenta rápida velocidade de resposta e dá maior flexibilidade, permitindo dobras e curvas do cabo que antes eram impossíveis, podendo ser utilizada em locais de difícil acesso.

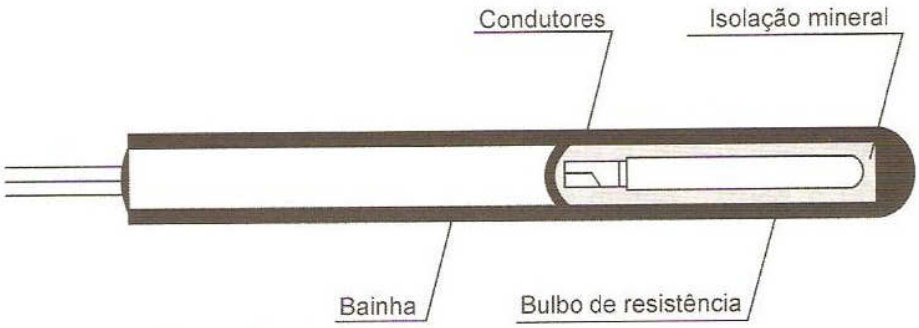


Figura 7.14 - Termorresistência isolação mineral.

7.4. Princípio de medição a 2, 3 e 4 fios

Existem normalmente dois instrumentos principais para determinar a resistência ôhmica das termorresistências, que são as pontes de medição (Ponte de Wheatstone) e os eletrônicos.

O circuito em ponte é bastante utilizado em laboratórios, devido a sua alta precisão e em alguns sistemas industriais.

A ponte de Wheatstone, quando apresenta uma relação de resistência $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$, encontra-se balanceada ou em equilíbrio e desta forma não circula corrente pelo galvanômetro, pois os potenciais nos pontos A e B são idênticos.

Conhecendo os valores de R_1 e R_2 e ajustando a resistência R_3 até que a ponte fique em equilíbrio, através de R_3 obtém-se o valor de R_4, portanto o valor ôhmico da termorresistência.

$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$

se $R_1 = R_2$ .....$\boldsymbol{R_3 = R_4}$

7.4.1. Ligação a 2 fios

R_4 é a termorresistência, R_3 é uma resistência variável para aferição do circuito. A resistência da fiação, representada na figura por *RL1* e *RL2*, tende a aumentar com a distância entre o sensor e o instrumento, a bitola dos fios e a temperatura.

Quando a ponte estiver balanceada (quando não circular corrente pelo galvanômetro), temos $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot (RL_1 + RL_2 + R_4)$, se $R_1 = R_2$, tem-se:

$$R_3 = RL_1 + RL_2 + R_4 \qquad \text{equação 7.4}$$

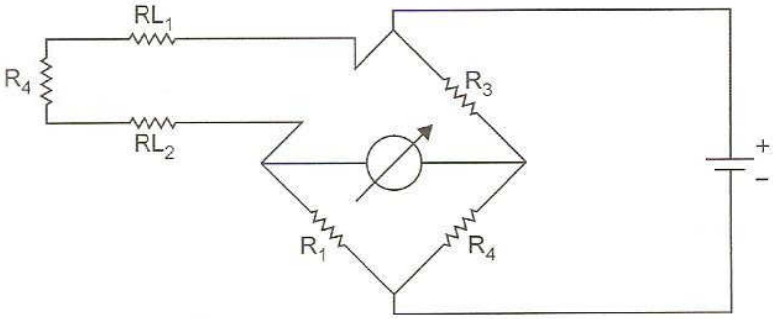


Figura 7.15 - Circuito de ligação a 2 fios.

Mesmo com a ponte balanceada, o valor da resistência R_3 é igual a R_4 mais as resistências de fiação RL_1 e RL_2 que, dependendo de seus valores, podem induzir erros graves na medição de temperatura com termorresistência (ver figura 7.15).

7.5. Ligação a 3 fios

Este é o método mais utilizado para as termorresistências na indústria. Nesse circuito, a configuração elétrica é um pouco diferente, aproximando a alimentação do sensor e permitindo que RL_1 passe para o outro braço da ponte, balanceando o circuito. Na ligação a 2 fios as resistências de linha estavam em série com o sensor, agora na ligação a 3 fios estão separadas, contribuindo para o equilíbrio do circuito (ver figura 7.16).

$$R_1 \cdot (R_3 + RL_1) = R_2 \cdot (R_4 + RL_2), \text{ como } R_1 = R_2$$

$$R_3 + RL_1 = R_4 + RL_2 \qquad \text{equação 7.5}$$

Se os fios de ligação forem do mesmo tipo, tiverem o mesmo comprimento, a mesma bitola e estiverem com mesma temperatura, pode-se considerar $(RL_1 = RL_2)$. Se, $RL_1 = RL_2$

$$R_3 = R_4 \qquad \text{equação 7.6}$$

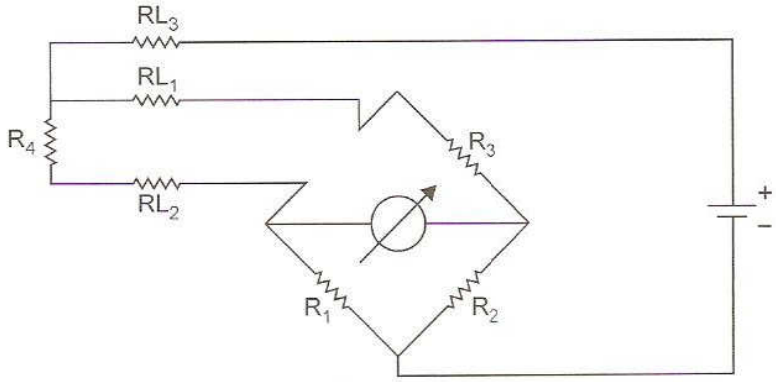


Figura 7.16 - Circuito de ligação a 3 fios.

Nota: O terceiro fio atua somente como condutor de compensação, não influenciando nos cálculos de medição de resistência. A integridade de medição de uma ligação a 3 fios pode ser mantida somente se a ponte for balanceada. Portanto, uma técnica mais precisa para medição de temperatura com termorresistência é a ligação a 4 fios.

7.6. Ligação a 4 fios

A fonte de corrente S alimenta a termorresistência, em que temos uma tensão medida por um voltímetro cuja impedância alta não interfere de forma significativa no comportamento do circuito, conforme é mostrado na figura 7.17. O fato de utilizar uma fonte de corrente minimiza o erro provocado pela resistência da fiação, pois ela tentará manter a corrente constante independente da variação do circuito. Esse tipo de medição a 4 fios é pouco usado na indústria, tendo sua maior aplicação em laboratórios e sendo usado em sensores-padrão.

Figura 7.17 - Circuito de ligação a 4 fios.

7.7. Termorresistência X termopar

Vantagens do Pt-100

- Possui maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipos de sensor.
- Tem características de estabilidade e repetibilidade melhores do que os termopares.
- Com ligação adequada, não existe limitação para distância de operação.
- Dispensa o uso de fios e cabos de extensão e compensação para ligação, sendo necessários somente fios de cobre comuns.
- Se adequadamente protegido, permite a utilização em qualquer ambiente.
- Curva de resistência x temperatura mais linear.
- Menos influenciado por ruídos elétricos.

Desvantagens do Pt-100

- É mais caro do que os sensores utilizados na mesma faixa.
- Range de temperatura menor do que dos termopares.
- Deteriora-se com mais facilidade, caso ultrapasse a temperatura máxima de utilização.
- É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura estabilizada para a correta indicação.
- Possui um tempo de resposta mais alto que dos termopares.
- Mais frágil mecanicamente.
- Ele se auto-aquece, exigindo instrumentação sofisticada.

7.8. Par bimetálico

É utilizado nos conhecidos termostatos. Trata-se de duas chapas metálicas de materiais com diferentes índices de dilatação que são montadas face a face. Com o aquecimento há uma deformação do conjunto das chapas, havendo a abertura ou fechamento de um contato. Na figuras 7.18 são mostrados detalhes de fabricação de um par bimetálico

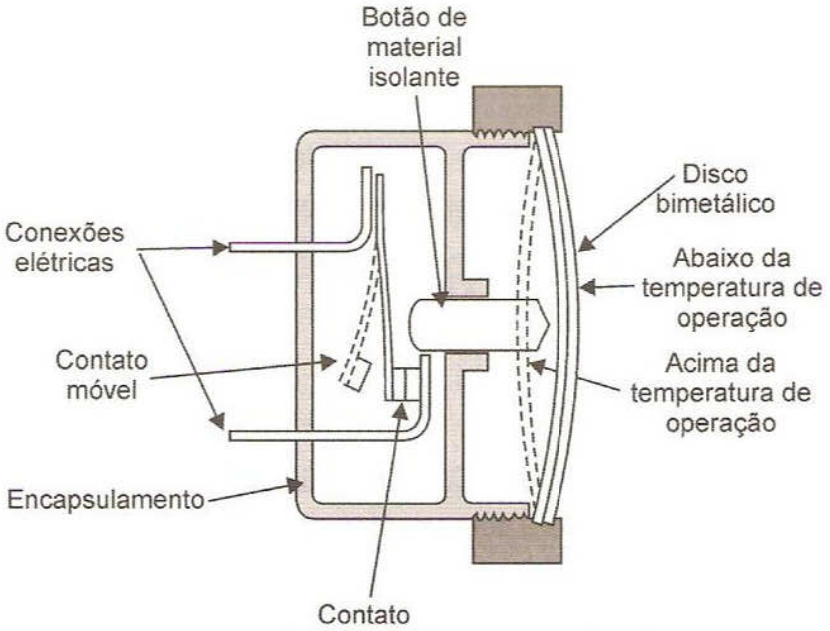


Figura 7.18 - Secção de um termostato com um disco de par bimetálico.

7.9. Sensores eletrônicos

Já existem diversos sensores térmicos eletrônicos de pequenas dimensões e várias funções projetados especialmente para montagem em placas de circuito impresso. Podemos dividi-los nos seguintes tipos:

7.9.1. Diodos

O diodo comum de silício, polarizado diretamente com corrente de 1 mA, tem queda de tensão próxima de 0,62 V a 25°C. Esta tensão cai aproximadamente 2 mV para cada °C de aumento na temperatura, e pode ser estimada pela equação:

$$V_d = A - Bt \qquad \text{equação 7.7}$$

Os coeficientes *A* e *B* variam um pouco conforme o diodo. Esta equação é de uma reta e vale até uns 125°C, limite para o silício. Os diodos de germânio possuem variações ainda maiores em função da temperatura.

O diodo é encontrado em controles e termômetros de baixo custo e razoável precisão, até uns 100°C.

7.9.2. Transistores

Podemos utilizar o princípio de que os parâmetros dos transistores variam com a temperatura, para usá-los como sensores. Um dos transistores de silício mais utilizados para este propósito é o 2N2222, pois suas curvas de funcionamento aliadas ao seu encapsulamento metálico facilitam o seu uso.

Se o coletor e base de um transistor é colocado no mesmo potencial, então a relação entre a tensão base-emissor (*Ube*) e a corrente de coletor é dada por:

$$Ube = \frac{kT}{e} \times ln \frac{Ic}{Is} \qquad \text{equação 7.8}$$

Neste caso a corrente de saturação (*Is*) depende da temperatura. Se a corrente de coletor for mantida constante e os componentes forem cuidadosamente selecionados, é possível obter uma relação linear para temperaturas entre –50°C e 150°C. O coeficiente de temperatura para transistores bipolares é 2 mV/K. Ver circuito de um transistor NPN ligado como diodo na figura 7.19.

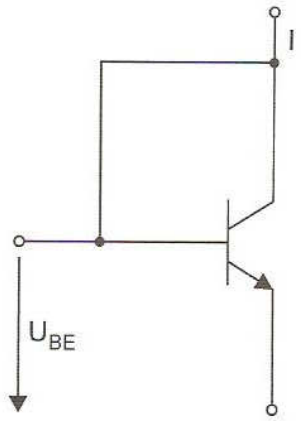


Figura 7.19 - Um transistor NPN ligado como diodo.

7.9.3. Circuitos integrados

Geralmente possuem algumas funções a mais, como: filtros, reguladores e proteções. Há circuitos integrados sensores de temperatura utilizando as características da dependência dos parâmetros do silício com a temperatura e outros que utilizam a tecnologia de *permalloy* sobre um substrato de silício, são os chamados (RTD) *Resistence Temperature Detector*. A *Micro Switch* e a Honeywell laçaram a série TD com vários tipos de encapsulamento. A Figura 7.20 ilustra alguns tipos utilizados na indústria.

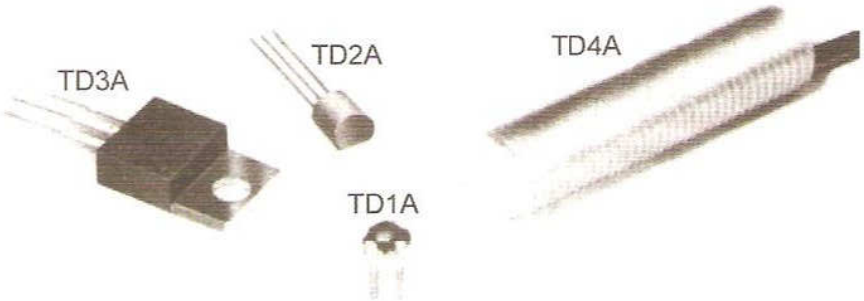


Figura 7.20 - Exemplo de alguns termossensores integrados em vários encapsulamentos produzidos pela *Honeywell*.

O termossensor TPM03 (da *Analog Devices*) tem em sua saída um sinal PWM de 35 Hz proporcional à temperatura. Já o AD592 (que trabalha a 2 terminais) é capaz de gerar uma variação de 1 μA/K. Esse sensor pode ser alimentado com uma tensão entre 4 e 30 V e comporta-se como uma fonte de corrente constante de alta impedância.

A *National Semiconductor* lançou a série LM34 e LM35 (equivalente ao da *Texas Instruments*, STP35A) que oferece alta precisão por conter circuitos linearizados. Operam de –55 a 150°C aproximadamente. Na figura 7.21 é mostrado o circuito típico para a aplicação de um LM34.

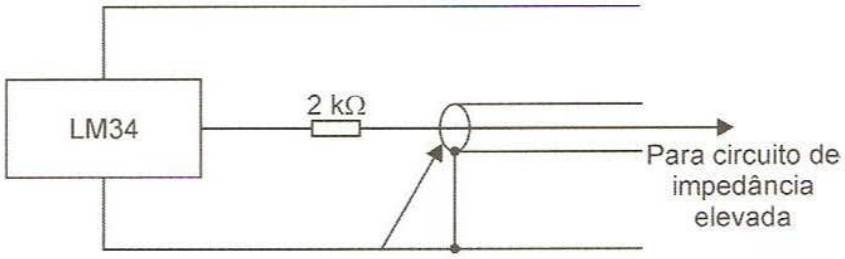


Figura 7.21 - Esquema de ligação do LM34.

O LM75 também da *National Semiconductor* se apresenta com encapsulamento de 8 pinos que pode medir de –55 até 125°C. Porém o grande diferencial é a interface de comunicação I^2C, onde o componente mestre do sistema pode requerer o valor da temperatura a qualquer instante.

7.9.4. Circuitos integrados inteligentes

Integrados com parâmetros programáveis. Esse tipo de sensor incorpora as características dos sensores integrados, além de funções programáveis que fazem com que esse tipo de dispositivo seja um verdadeiro transmissor inteligente de temperatura, podendo inclusive trabalhar em rede a 2 ou 3 fios. Um exemplo típico desse tipo de sensor é DS1820 da *Dallas Semiconductor.*

7.10. Pirômetros

Os pirômetros de radiação usam a radiação de um corpo para a medida da temperatura sem haver o contato entre o sensor e o corpo. Todos os corpos possuem radiações próprias e contínuas. Pelo aquecimento de um corpo através da condução de calor ou convecção, uma parte desse calor é transformada em radiação. Uma radiação incidente externa é em parte absorvida, refletida e transmitida pelo corpo. A soma dos coeficientes de absorção, reflexão e transmissão é igual a 1.

De acordo com Gustav Kirchhoff, em 1860, um corpo com coeficiente de absorção igual a 1 é denominado corpo negro. Ele sempre libera a maior radiação possível a qualquer temperatura. Para o corpo negro a energia total liberada é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta (Lei de Stefan-Boltzman).

Um corpo negro pode ser obtido quando um corpo oco esférico, com paredes à prova de radiações e uma pequena abertura, é aquecido uniformemente. A radiação que escapa pela abertura é negra, um furo cilíndrico com uma profundidade de 5 a 9 vezes o seu diâmetro.

Pela lei de Kirchhoff, a relação entre a emissão de um corpo não negro e a emissão de um corpo negro é a mesma dos seus coeficientes de absorção.

Essa relação é denominada coeficiente de emissão ou emissividade ε. A emissividade depende do comprimento de onda λ, da temperatura absoluta, do sentido da radiação e do tipo de superfície do radiador. Ela pode ser determinada empiricamente e já existe em forma de tabelas para vários materiais.

As condições de corpo negro não existem normalmente nas condições industriais. Em aplicações onde o objeto a ser medido está em local aberto, por exemplo, estes refletem parte da energia radiante e são conhecidos como corpos não negros. Na medição de temperatura de tais objetos por detecção de radiações, um fator de correção de emissividade deve ser adotado.

O fator de correção de emissividade é a relação entre a energia radiante emitida por um corpo não negro e a que emite um corpo negro á mesma temperatura. Um corpo negro tem um fator de emissividade igual a 1 ($\varepsilon = 1$). Um corpo não negro tem $\varepsilon < 1$. Se um objeto aquecido emite 80% da energia que emitiria um corpo negro, ele tem um $\varepsilon = 0{,}8$. Como a soma da emissividade + a refletividade é igual a um, deduz-se que 20% da energia aplicada é perdida por reflexão, isto é, devido às condições a composição da superfície do objeto ou sua medição em aberto. A figura 7.22 ilustra o esquema de funcionamento de um pirômetro.

Os valores teóricos da emissividade são conhecidos quando a muitos materiais, porem na pratica, deve-se geralmente proceder a uma determinação empírica do fator e; por exemplo, para o ferro gusa tem-se $\varepsilon = 0{,}41$ para o aço carbono $\varepsilon = 0{,}75$.

Este comportamento deve ser consideração na apreciação da eficiência de filtros óticos. A redução da intensidade captada em determinados comprimentos de onda, devido à utilização

de filtros óticos é também um fato a considerar. Uma certa distancia mínima entre a faixa de ondas de medição e uma radiação perturbadora é necessária para eliminar a influencia desta última.

A utilização de filtro ótico resulta num limite superior do campo de medição. Isto quer dizer que se pode medir uma temperatura mais baixa selecionando uma faixa de radiação para tal, que não sofra influencias de radiações externas, as quais interfiram na medição.

Portanto, a utilização dos pirômetros de radiação total, pode introduzir grandes erros de medição aparecem também, por exemplo, nas medições da radiação por causa da radiação térmica refletida e "captada junto". Estes erros de medição aparecem também, por exemplo, nas medições da radiação térmica em instalações ao ar livre e a participação da radiação solar provocada indicações de temperaturas superficiais mais altas. Utilizando um filtro ótico com uma sensibilidade espectral acima de λ = 7,7μm, a participação da radiação solar fica praticamente eliminada, assim como reduz a influência de outros radiadores infravermelho que possam haver.

Além disso, a faixa do espectro escolhida é feita de modo a cão sofrer influencias por perda de radiação para gases não comuns a atmosfera (vapor de água, CO_2, etc). Na figura 7.22 é mostrado o princípio de funcionamento.

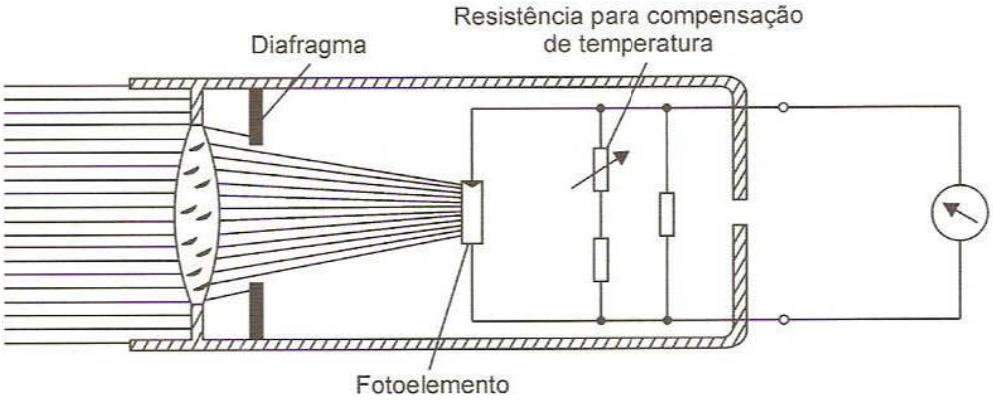


Figura 7.22 - Exemplo de um pirômetro (ardometer).

Max Planck sugeriu em 1900 uma equação para corrigir os desvios que apareciam nas equações para calcular o valor da temperatura em função da radiação emitida por uma superfície e os dados experimentais para altos valores de λ x T, obtendo a seguinte expressão matemática:

$$J_{b,\lambda} = \frac{c_1 \times \lambda^{-5}}{exp\left[\frac{c_2}{\lambda \times T}\right] - 1} \qquad \text{equação 7.9}$$

Para descrever a intensidade de radiação emitida por um corpo negro para qualquer comprimento de onda. Onde c_1 e c_2 são conhecidas como primeira e segunda constante de radiação, e são iguais a: $c_1 = 2\pi hC0^2 = 3{,}7413 \times 10^8 W.\mu m^4/m_2$ e $c_2 = \frac{hc}{k} = 1{,}43883 \times 10^4 \mu m.K$. (ver diagramas de radiação características na figura 7.23).

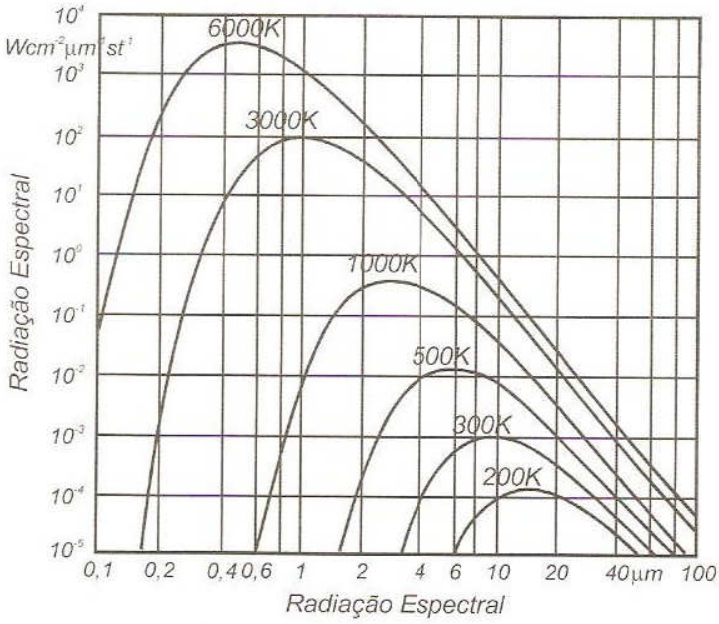


Figura 7.23 - Radiação característica de um corpo negro em relação à sua temperatura.

Para explicar o significado de (-1) no denominador, Planck desenvolveu a teoria quântica, a qual ele postula que: as ondas eletromagnéticas somente podem ser emitidas por um corpo na forma de certos pacotes discretos de energia ou "quanta". Subseqüentemente Planck recebeu o prêmio Nobel por este trabalho em 1918.

A equação 7.8 é conhecida como distribuição de Planck, a Figura 7.19 mostrou a distribuição de energia para um corpo negro para diferentes temperaturas. Algumas características importantes que devem ser notadas: A radiação eletromagnética emitida varia continuamente com o comprimento de onda; Para um determinado comprimento de onda a radiação eletromagnética emitida aumenta com o aumento de temperatura; A região do espectro na qual a radiação eletromagnética está concentrada depende da temperatura, comparativamente mais radiação eletromagnética é emitida para pequenos comprimentos de onda como para maiores temperaturas; Para temperaturas menores que 800 K, a radiação eletromagnética emitida é predominantemente na região do infravermelho no espectro e não é visível a olho nu.

Como os diferentes materiais possuem diferentes emissividades, em diferentes temperaturas, alguns valores de emissividade de várias superfícies são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Emissividade de superfícies.

Material	Temperatura	ε	Material	Temperatura	ε
Alumínio			**Chumbo**		
Polido	100	0,065	Não Oxidado	127 a 227	0,057 a 0,075
Comercial	100	0,09	Oxidado	200	0,63
Óxido	500 a 827	0,42 a 0,26			

Asfalto		0,90 a 0,98	**Inconel**		
Comum	Ambiente		Tipo X	-	0,55 a 0,76
Sobre metal			Tipo B	450 a 1620	0,35 a 0,55
Espessura de 0,001"	Ambiente	0,27			
Espessura de 0,002	Ambiente	0,46	**Magnésio**		
Espessura de 0,002	Ambiente	0,72	Óxido	227 a 826	0,55 a 0,20
				900 a 1704	0,20
Bronze			**Molibdênio**		
Polido	50	0,1	Polido	538	0,05
Concreto				1482	0,17
	0 a 100	0,94	Oxidado	538	0,82
Cobalto			Não Oxidado	1000	0,13
Não Oxidado	500	0,13		1500	0,19
	1000	0,23		2000	0,24
			Filamento	827 a 2593	0,096 a 0,202
Cobre			**Níquel**		
Comercial	20	0,07	Polido	20	0,12
Oxidado	25	0,78		1204	0,32
	50	0,6 a 0,70	Oxidado	200	0,37
	200	0,60		871	0,85
	500	0,88		1200	0,85
Polido	50 a 100	0,02 a 0,05			
Cerâmica					
Porcelana	20	0,92	Não Oxidado	25	0,045
Refratário Branco	93	0,94		100	0,06
Refratário Negro	93	0,90		500	0,12
				1000	0,19
Cromo					
Polido	50	0,10			
	500 a 1000	0,28 a 0,38	**Ouro**		
Oxidado	316	0,08	Puro Polido	100	0,02
	482	0,18		200 a 600	0,02 a 0,03
	650	0,27	Não Oxidado	100	0,02
	816	0,36		500	0,03
	982	0,66			
Carbono			**Pele Humana**		
Filamento	1000 a 1400	0,53		36,7 a 37,2	0,985
Grafite	0 a 3600	0,70 a 0,80			
			Platina		
			Polida	200 a 600	0,05 a 0,10
			Não Oxidada	25	0,037
				100	0,047
				500	0,096

7.10.1. Termopilhas *(Thermopile)*

A termopilha é formada por vários termopares conectados em série. Ela é composta pela junção de metais diferentes que produzem voltagem quando um lado da junção tem temperatura diferente do outro. A junção fria é mantida a temperatura ambiente em uma massa de temperatura estável. A junção quente é exposta à radiação incidente. Conectando vários termopares em série, é obtida uma tensão maior de saída.

Esses sensores permitem a leitura de temperatura a distância com baixo custo, não sendo necessário resfriamento, e podem ter uma acuracidade de ±1°C, dependendo da faixa de medida. Para faixas de temperaturas estreitas a medida de temperatura de um corpo pode ter a precisão de 0,1°C. A figura 7.24 mostra um tipo de termopilha com um termistor associado, enquanto que na figura 7.25 mostra detalhes construtivos.

Figura 7.24 - Dispositivos encapsulados de termopilhas produzidos pela *LG Corporate Institute of Technology*.

Os sensores de termopilhas diferem dos piroelétricos em várias maneiras:

- A saída da termopilha é proporcional à radiação incidente, enquanto nos piroelétricos a saída é proporcional à taxa de mudança da radiação incidente. Em outras palavras, a termopilha é um sensor DC enquanto o piroelétrico é AC.
- As termopilhas têm baixa impedância, enquanto os sensores piroelétricos têm alta impedância, necessitando de um conversor interno para ser utilizado. A vantagem da baixa impedância é que o circuito associado é menos suscetível a distúrbios inapropriados de radiação e ruídos elétricos.
- Algumas termopilhas têm um termistor associado que fornece a medida da temperatura ambiente, permitindo que a temperatura do alvo seja calculada.

A figura 7.25 ilustra os componentes internos de uma termopilha.

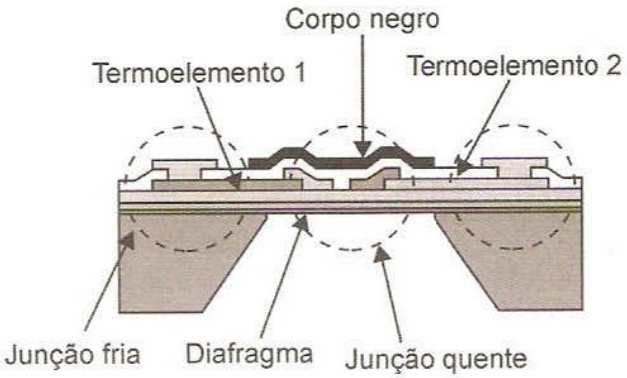


Figura 7.25 - Ilustração dos componentes internos de uma termopilha.

Capítulo 8

Sensores de Pressão

Este capítulo apresenta os sensores de pressão mais utilizados em aplicações industriais, tais como: células de carga, cristal piezelétrico, tubos de Bourdon, sensores eletrônicos integrados e capacitivos.

8.1. Células de carga

São estruturas mecânicas, planejadas para receber esforços e deformar-se dentro do regime elástico para que foram planejadas. Embora pequena, essa deformação é suficiente para gerar um sinal de saída linear e compatível com a carga aplicada.

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um extensômetro (*strain-gage*), quando submetido a uma deformação, ou seja, a célula de carga mede a deformação da peça a ser medida pela sua própria deformação e traduz em variação de resistência ôhmica. Essa variação decorre do estreitamento da seção transversal do extensômetro. A figura 8.1 mostra detalhes construtivos.

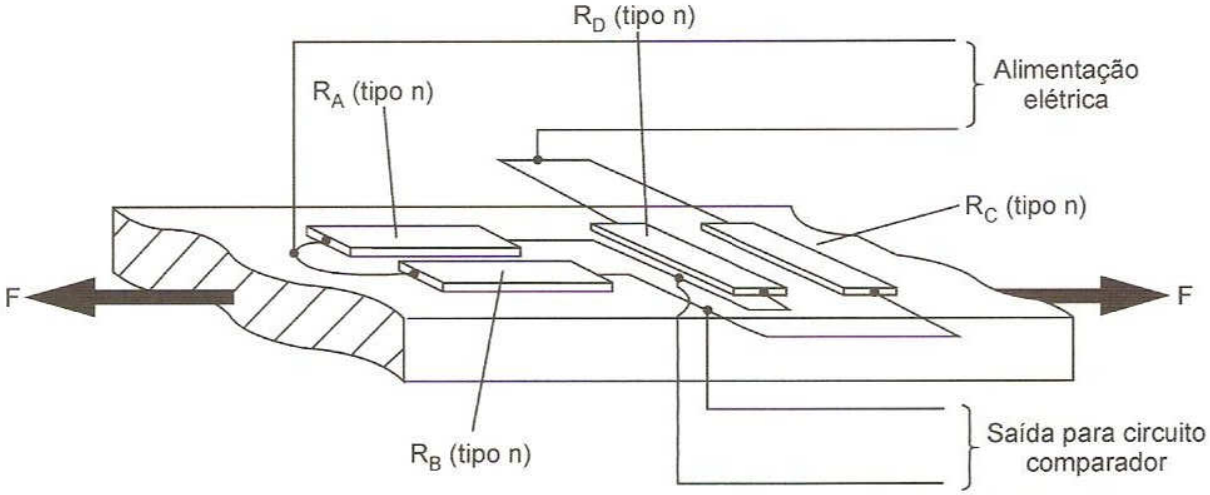


Figura 8.1 - Detalhes de construção.

8.1.1. Tipos e fabricação

O extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível que transforma pequenas variações de dimensões em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Sua utilização constitui um meio de medir e registrar o fenômeno da deformação como sendo uma grandeza elétrica.

O extensômetro elétrico é utilizado para medir deformações em diferentes estruturas, tais como: pontes, máquinas, locomotivas, navios e associado a instrumentos especiais (transdutores) possibilita a medição de pressão, tensão, força, aceleração e outros instrumentos de medida que são usados em campos que vão desde a análise experimental de tensão até a investigação e práticas médicas e cirúrgicas.

As características do extensômetro elétrico de resistência podem ser resumidas no seguinte:

- Alta precisão de medida;
- Baixo custo;
- Excelente resposta dinâmica;
- Excelente linearidade;
- Fácil de instalar;
- Pode ser utilizado imerso em água ou em atmosfera de gás corrosivo, desde que se faça o tratamento adequado;
- Possibilidade de efetuar medidas a distância.

Devido a todas estas vantagens, atualmente o extensômetro elétrico de resistência é indispensável a qualquer equipe que se dedique ao estudo experimental de medições.

Os extensômetros fabricados pelo processo de impressão consistem em uma camada muito fina de folha de metal (3 a 8 micrômetros de espessura), parte da qual é removida por corrosão química tal que somente o padrão do desenho em formato de grade é obtido. Essa grade metálica é fixada a um material isolante também muito fino que serve de suporte para o extensômetro.

Os metais utilizados para fabricação de *strain-gages* são ligas de resistividade elevada como Constantan (45% Ni, 55% Cu) ou Nicromo (80% Ni, 20% Cr), que permitem obter resistências padronizadas de 60, 120, 240, 350, 500 e 1 kΩ.

Existem dois padrões de *strain-gages* para essa tecnologia:

- **Normal** (figura 8.2a): mais longo no sentido do eixo para reduzir os efeitos da deformação transversal.
- **Alargado** (figura 8.2b): usado quando as deformações transversais são desprezíveis, permite maiores tensões de excitação, devido à sua largura maior.

Devido à versatilidade da técnica da impressão fotográfica, podem ser produzidos *strain-gages* de muitas outras formas para diversas aplicações (ver figura 8.2).

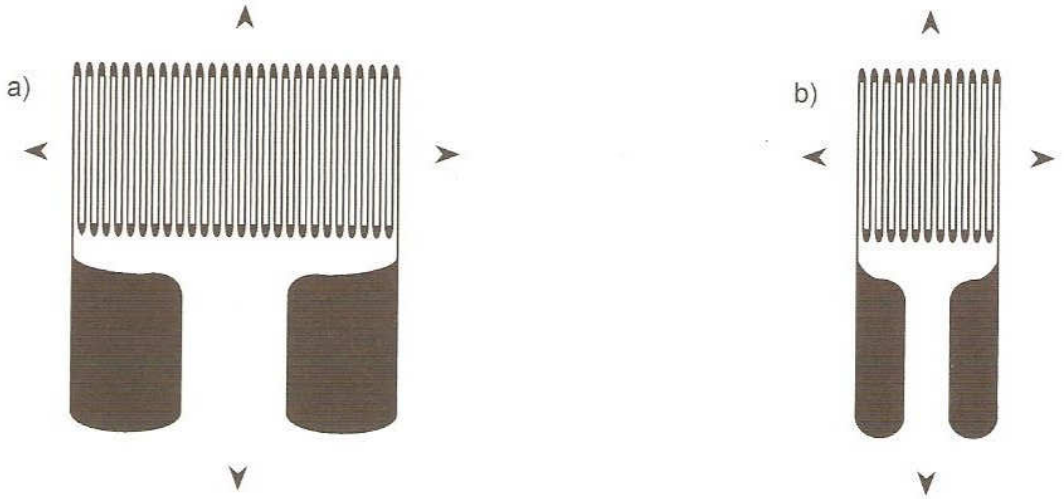


Figura 8.2 - Modelos de extensômetro.

8.1.2. Principais tipos de células de carga

De acordo com o tipo de deformação que se pretende medir, as células de carga dividem-se em:

- **Flexão (*bending*):** mede as deformações de tração ou compressão decorrentes do carregamento de viga em balanço. Normalmente utilizada em medições de 0,5 a 200 quilos.
- **Cisalhamento (*shear beam*):** mede as deformações geradas por tensões de cisalhamento atuantes. Normalmente utilizada de 200 quilos a 50 toneladas.
- **Compressão (*canister*):** mede as tensões de compressão geradas pela carga. Esse tipo de célula é utilizado normalmente para forças acima de 50 toneladas de intensidade.

8.1.3. Especificações/características

Os principais critérios que devem ser utilizados na medida de uma célula de carga são:

- **Capacidade nominal:** a força máxima que leva deve medir (os fatores de segurança - 50% de sobrecarga contra danos de funcionamento e 300% para a ruptura - são intrínsecos à própria célula).
- **Sensibilidade:** quando a célula de carga está carregada, este valor é dado em mV/V aplicado e, normalmente, entre 2 e 3 mV/V. Isso significa que uma célula de carga de 30 kgf de capacidade nominal e 2 mV/V de sensibilidade, com uma tensão de excitação na entrada de 10 V, quando sujeita a uma força de 30 kgf, apresenta na saída uma variação de tensão de 20 mV.
- **Precisão:** o erro máximo admissível relacionado em divisões da capacidade nominal.

As células de carga neste caso podem ser divididas em:

- **Baixa precisão:** até 1.000 divisões (ou 0,1% da capacidade nominal).
- **Média precisão:** de 3.000 a 5.000 divisões (ou 0,03 a 0,02% da capacidade nominal).
- **Alta precisão:** 10.000 divisões (ou 0,01% da capacidade nominal).
- **Formato:** de acordo com a aplicação, determinados formatos são requeridos, considerando se a carga é apoiada (células do tipo viga) ou se a carga é sustentada (célula do tipo Z), ou ainda se a carga introduz momentos tensores na célula (célula do tipo *single-point)*. Em suma, forma geométrica de conduzir a uma "linearidade" das medidas, seguindo as formas da peça.
- **Ambiente de trabalho:** ambientes úmidos ou quimicamente agressivos requerem células de carga herméticas, com grau de proteção IP67, que se consegue normalmente nas do tipo *shear-beam*. Deve ser evitado o uso de células de carga em ambiente sujeito à vibração intensa, apesar de o seu projeto incluir uma verificação de freqüência natural, no sentido de evitar o fenômeno de ressonância. O uso de células de carga em ambientes explosivos deve ser acompanhado por barreiras de segurança intrínsecas, que inserem resistências em série nos circuitos, o que poderia baixar as tensões de excitação. É recomendável o uso de indicadores que compensem essa diminuição por meio de ligações a 7 fios (tipo Kelvin).
- **Dispositivos de montagem:** devem ser escolhidos visando não transmitir à célula de carga nenhum outro esforço que não seja o da força a medir, visando assegurar para a carga todos os graus de liberdade de deslocamento possíveis, à exceção do relativo à direção da força de medir.
- **Tempo de pesagem:** muitas vezes, dispõe-se de um tempo limitado para efetuar a pesagem. Neste caso deve-se considerar um segundo como um tempo mínimo para estabilizar o valor medido.

8.1.4. Fatores que interferem na medição de pressão/deformação

Considerando que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que elas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser medida, há necessidade de "compensar" os efeitos de temperatura pela introdução no circuito de Wheatstone de resistências especiais que variem com o calor de forma inversa à dos extensímetros.

Um efeito normalmente presente no ciclo de pesagem e que deve ser controlado com a escolha conveniente da liga da matéria-prima da célula de carga é o da "histerese", decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam com as descargas respectivas.

Outro efeito que também deve ser controlado é a "repetibilidade", ou seja, indicação da mesma deformação decorrente da aplicação da mesma carga sucessivamente. Também deve ser verificada e controlada com o uso de materiais isotrópicos e da correta aplicação da força sobre a célula de carga.

Finalmente, deve-se considerar o fenômeno da "fluência" ou *creep*, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga. Esse efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresenta-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos nela.

8.1.5. Aplicações típicas e generalidades

A mais popular aplicação das células de carga é nas balanças comerciais eletrônicas. Elas utilizam uma célula única, especialmente desenvolvida para suportar, sem prejuízo de medição, um esforço de torção, decorrente da carga eventualmente colocada na extremidade do prato.

Outra aplicação freqüente é na pesagem de tanques e silos, que permite um controle muito preciso do material recebido, em estoque e descarregado pelo reservatório. Nesses casos especiais, cuidados devem ser tomado com as escadas, tubulações e eletrodutos: as primeiras não devem interconectar o reservatório ao solo e as duas últimas disporem de conexões flexíveis e, se possível, diante do deslocamento vertical do reservatório.

Sempre que for possível, deve-se utilizar três células de carga para uma distribuição mais uniforme da carga (o quarto apoio é geometricamente redundante) e, preferencialmente, elas devem estar situadas acima do centro de gravidade, de forma a tornar o sistema autocentrante. Finalmente, em muitos casos em que exista ação de ventos ou estruturas muito esbeltas ou a presença de agitadores, deve-se prever tirantes de segurança limitantes ao deslocamento.

Equipamentos de dosagem é outra aplicação importante para células de carga, em que uma determinada fórmula de mistura é estabelecida por *set-points* na instrumentação, que comandará abertura e fechamento de válvulas, cada vez que é retirada determinada quantidade de material de cada reservatório. Neste caso, o princípio da dosagem pode ser "contínuo" (com as células de carga instaladas em cada reservatório, subtraindo dele o valor descarregado), ou por "batelada" (em que as células de carga ficam instaladas em um reservatório auxiliar, no qual os tanques, de cada vez, descarregam o material adicionando valores de acordo com uma fórmula predefinida).

Na escolha do método de dosagem contínuo ou de batelada, deve-se levar em consideração a precisão necessária do sistema, que é definida como o erro admissível do componente de menor peso na fórmula. Obviamente que o processo por batelada conduz à maior precisão absoluta, dado que a capacidade nominal das células de carga que o suportam é menor do que as instaladas nos reservatórios. Por outro lado, o uso do sistema contínuo permite também o controle do nível dos reservatórios que o compõem.

A aplicação de células de carga em balanças rodoviárias, principalmente quando associadas a sistemas computadorizados, permite controle do fluxo de mercadorias a granel nos estabelecimentos industriais com a memorização do peso vazio dos veículos e a possibilidade de obtenção de até dez mil divisões da capacidade nominal da balança. Diversas soluções de dispositivos de montagem para células de carga de balanças de veículos já foram desenvolvidas, sendo a mais popular a que utiliza um par de elos, que permite cinco graus de liberdade de deslocamento para a plataforma, deixando a célula de carga inteiramente livre para receber unicamente a força vertical da carga aplicada.

Quando existe a necessidade de se utilizar mais de uma célula de carga em uma aplicação, a forma mais técnica e economicamente correta é a associação em paralelo, conforme podemos ver na figura 8.3.

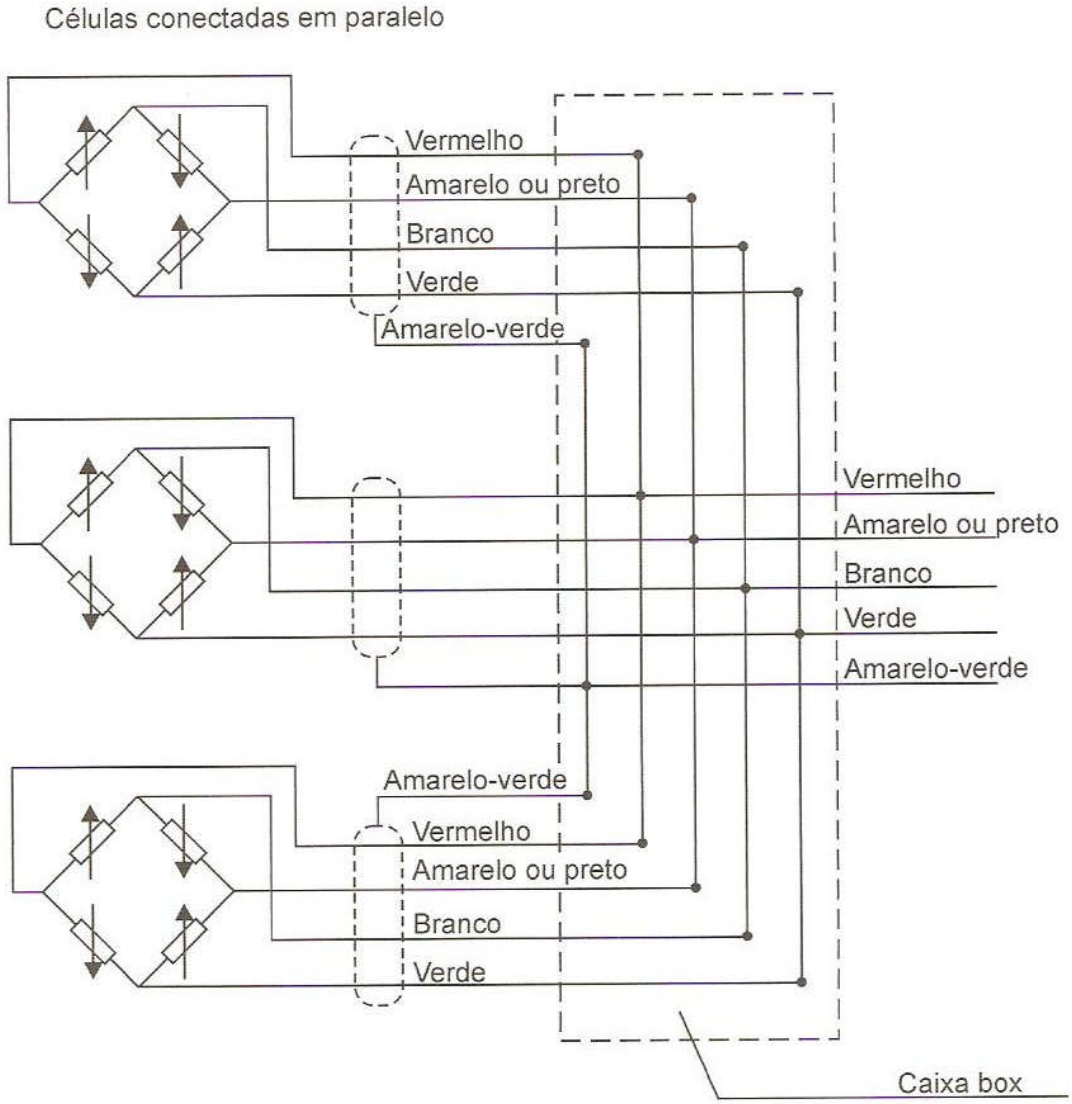
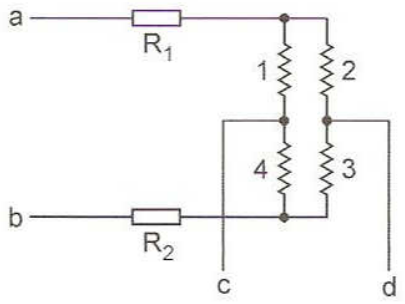


Figura 8.3 - Células de carga em paralelo.

Transdutores a extensômetro têm uma resposta em freqüência muito boa. Eles podem ser usados em medições estáticas ou dinâmicas e ser excitados tanto com corrente CC como CA. São também adaptáveis à conversão analógico-digital, de forma que as unidades de

pressão possam ser lidas em um mostrador de LEDs e em unidades de leitura numéricas ou alfabéticas.

Utilizam-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si, segundo a ponte de Wheatstone (inclusive para evitar efeitos de temperatura) e o desbalanceamento dela, em virtude da deformação dos extensômetro que é proporcional à força que a provoca. Pela medição desse desbalanceamento se obtém o valor da força aplicada (ver circuito na figura 8.4).



Ponte de Wheatstone

Células de carga em ponte:
1 e 3 - tração
2 e 4 - compressão

Tensões:
c-d: tensão de saída
a-b: tensão de excitação

Figura 8.4 - Esquema interno de um extensômetro.

8.2. Transdutor de pressão piezoelétrico

8.2.1. Princípio de funcionamento

Esses transdutores baseiam-se na propriedade piezoelétrica do cristal de quartzo que, quando deformado elasticamente, gera um potencial elétrico em seus terminais por meio de certo plano cristalográfico (ver figura 8.5).

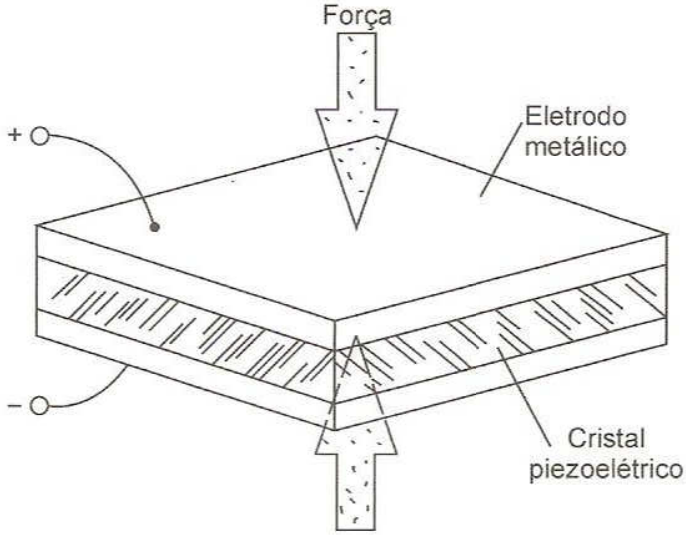


Figura 8.5 - Esquema de funcionamento de um sensor piezoelétrico.

Com esse dispositivo é possível operar num campo de freqüência (range) de solicitação de 100 kHz com linearidade que 1%, porém a tensão medida é muito pequena (por exemplo,

1 mV por kg/cm$^{2)}$, por isso o elemento piezoelétrico é sempre conectado a um amplificador eletrônico. O campo de pressão de trabalho é compreendido entre 0,1 e 5.000 kg/cm$^{3.}$

8.2.2. Características gerais

Esses transdutores baseiam-se na propriedade do cristal de quartzo, que se deforma elasticamente, produzindo um potencial elétrico em seus terminais através de certo plano cristalográfico.

Os transdutores de pressão piezoelétricos são duros, de estruturas elétricas que transformam a deflexão causada pela força em sinais elétricos que são mais convenientes para aparelhos registradores ou para o processamento.

A ação da pressão num diagrama de fluxo cria a força. O elemento sensitivo piezoelétrico gera sinais de carga, que são convertidos em tensões e amplificados pelo condicionador de sinais.

Os sensores de pressão piezoelétricos respondem à pressão pulsante e transitória. Eles medem pressão relativa a um nível inicial, média ou conhecido em algum ponto do processo. Eles não podem medir pressões estáticas por mais de alguns segundos, exceto sobre controle cuidadoso, temperaturas constantes e condições de laboratório. Na figura 8.6 são mostrados aspectos construtivos de um transmissor de pressão para aplicação industrial.

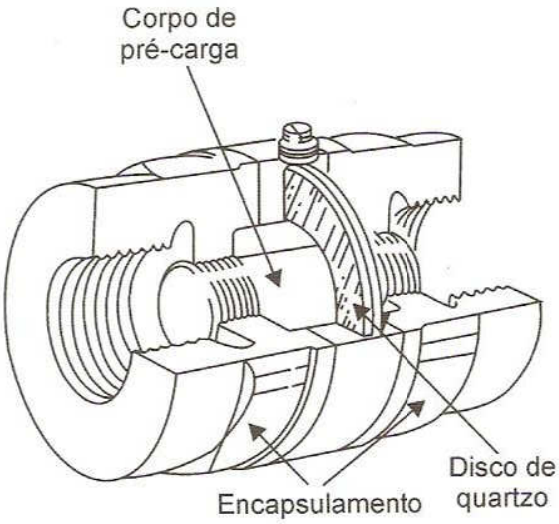


Figura 8.6 - Aspectos construtivos.

Alguns modelos que utilizam campo elétrico de freqüência mais alta, com cristal de quartzo ou turmalina, podem ser calibrados estaticamente pelos métodos convencionais rápidos. Operando sobre um campo de freqüência dinâmico mais extenso do que 10.000 para 1, o transdutor de pressão piezoelétrico abrange o equivalente a vários campos de freqüência ordinários. Por causa dos componentes que automaticamente eliminam sinais estáticos, os sensores piezoelétricos medem minúsculas variações na pressão em qualquer nível. Modelos sofisticados utilizam vários: de modificação do comportamento, isolando, equilibrando e filtrando para reduzir a sensibilidade a entradas ambientais.

Utilizando uma variedade de ambos cristais, naturais e feitos pelo homem, os transdutores de pressão piezoelétricos são utilizados em muitas formas e tamanhos. Muitos adaptadores padrão e especiais de montagem facilitam a instalação e isolam o elemento sensitivo do ambiente agressivo. A figura 8.7 mostra um transdutor submergível utilizado para medições de pressão em águas de efluentes ou esgotos, construído em titânio.

Figura 8.7 - Transmissor de pressão produzido pela DRUCK modelo PMP1290.

8.2.3. Especificações

A figura 8.8 mostra o transmissor de pressão modelo PA9027 fabricado pela IFM, com as seguintes especificações:

- Classe de precisão(%F.S.): ± 0,7%
- Campo de medição (BAR): 0 até 1
- Sobrecarga de pressão admissível: 10 BAR
- Pressão de ruptura: 30 BAR
- Tensão de alimentação (VDC): 16 a 30
- Sinal de saída analógica: 0 a 10 VDC
- Campo de trabalho: –20 a 80°C
- Tempo de resposta: 3 ms
- Tipo e grau de proteção: IP65, III

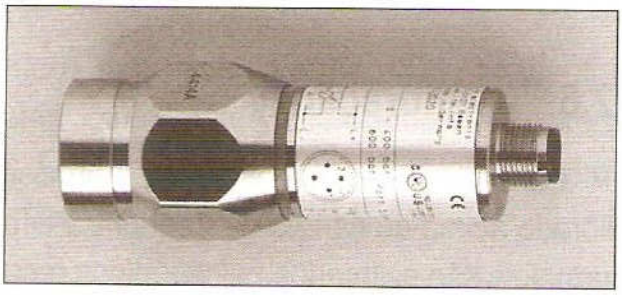


Figura 8.8 - Transmissor de pressão modelo PA9027 fabricado pela IFM Electronics.

A maioria dos sensores de pressão piezoelétricos utiliza elementos sensitivos de quartzo cristalino por causa da sensibilidade a baixas temperaturas e respostas estáticas em curto tempo. Alguns possuem uma camisa de parede fina que oprime os elementos de cristal de quartzo. Versáteis, os elementos de cerâmica feitos pelo homem rapidamente se adaptam a formas especiais e reduzem significativamente os custos em aplicações como microfones.

8.2.4. Comportamento

Sensores de pressão piezoelétricos geralmente superam em estabilidade, linearidade e amplos campos de freqüência de operação. A resposta de alta freqüência do sensor de pressão piezoelétrico é determinada pelo comportamento ressonântico da estrutura mecânica do sensor ou pelos filtros eletrônicos, localizados interna ou externamente. A resposta de alta freqüência de modelos básicos é bastante plana, inclusa nos 20% da primeira ressonância estrutural. Em alguns modelos, os filtros eletrônicos estendem esse plano campo de freqüência de operação, mas introduzem uma defasagem.

Descargas eletrônicas e circuitos de acoplamento, operando em série, controlam o comportamento da baixa freqüência dos sistemas piezoelétricos. Esses circuitos atenuam o comportamento de sinais de freqüência muito baixa, cujos cilindros desligados a baixa freqüência respondem e causam sinais transitórios para declinar exponencialmente.

8.2.5. Condicionador de sinais

Principalmente pela razão prática, método de tensão, quartzo, ICP (*Ingrated-Circuit--Piezoelectric* → circuito integrado piezoelétrico), sensores de pressão ou amplificadores e isolação microeletrônica embutidos são bastante populares hoje. Sistemas amplificadores para carga são extensivelmente usados em sistemas de alta temperatura e em aplicações balísticas de alta pressão, em que, no passado, a calibração estática era o único método viável.

8.2.6. Calibração

Para medir com a mais alta precisão, o transdutor de pressão piezoelétrico seria calibrado acima do campo de freqüência especificado. Modelos de modo de carga em quartzo e turmalina são calibrados pelos rápidos recursos estáticos convencionais.

Tipos de cerâmica e ICP requerem uma calibração dinâmica pelo pulso. Métodos de comparação geralmente utilizam quartzo de precisão calibrado estaticamente e sensores de turmalina como padrões de referência.

Geradores de pulso aplicam uma mudança de passo conhecido na pressão, com aproximadamente 1 ms de tempo de elevação. Os sensores de referência de turmalina agora oferecem uma alternativa para calibração de altas pressões.

8.2.7. Aplicações

As aplicações são muitas. Os sensores de pressão piezoelétricos ajudam a testar o comportamento e monitorar a sanidade de unidades acústicas, hidráulicas, pneumáticas, estruturas de fluidos e processos associados. Eles são envolvidos nos testes, modificação e controle do comportamento de máquinas, instrumentos, carros, aviões, navios, motores de

foguete, locomotivas, caldeiras, geradores, esterilizadores, prensas, injetoras de plástico, sistema de controle, aplicações sanitárias, fornos para tratamento térmico, sistemas de refrigeração, indústria alimentícia, válvulas, silenciadores, munições, armas de fogo, bombas (granada), explosivos, injetoras de aquecimento, acionadores, máquinas pneumáticas, compressores, medidores de fluxo e impressora jato de tinta.

Nestes casos, os transdutores piezoelétricos medem fenômenos dinâmicos, tais como: pulsos, pulsações, oscilações, variações, mudanças, ondas, colisões e explosões.

Os transmissores são utilizados em bombas, caldeiras, geradores, motores diesel, esterilizadores, prensas, injetoras de plástico, unidades hidráulicas, aplicações sanitárias, fornos para tratamento térmico, sistemas de refrigeração e indústria alimentícia.

8.3. Tubos de Bourdon

O tubo de Bourdon consiste em traduzir a pressão do fluído em um deslocamento a fim de fornecer um sinal elétrico proporcional à pressão. O tubo de Bourdon é formado por um tubo metálico de seção transversal elíptica, ou quase elíptica, tendo uma de suas extremidades em contato com a fonte de pressão.

Pela aplicação de pressão na parte interna, o tubo de Bourdon tende a tomar a forma de um tubo de seção circular, e então há uma distensão no sentido longitudinal. Um outro dispositivo sente a deformação e a transforma em um sinal elétrico.

Os dispositivos mais comuns utilizados, como o sensor de deformação de elemento de sensor primário, são os sensores resistivos (potenciômetros) de deslocamentos, o sensor condutivo do tipo transformador diferencial (LVDT). O sensor primário pode ser tanto o tubo de Bourdon como o diafragma ou fole. O tubo de Bourdon é o mais empregado de todos.

Ele pode ser utilizado para transformar pressão medida num movimento indicador. É necessário que a outra extremidade esteja fechada e ligada a uma haste que comunicará seu movimento a uma alavanca dentada que se move em torno de um ponto fixo, indicando no mostrador o valor da pressão.

O tubo de Bourdon é o mais empregado de todos e consiste, como se vê, na transformação de pressão medida num movimento indicador.

Os tubos de Bourdon industriais podem ter diversos tamanhos. Eles podem ser constituídos de uma simples forma da letra C, uma espiral ou ainda de uma helicóide, dependendo da pressão a ser medida. O tipo C é para uso geral até 1.000 kg/cm^2 de maneira geral.

As vantagens do tipo espiral e do tipo helicoidal são: obter movimento de maior amplitude, mais força, resposta mais rápida, isenção da faixa morta, portanto maior precisão.

Para a regulação pode-se aproveitar a força desenvolvida pelo movimento do tubo de Bourdon para acionar um dispositivo de transmissão pneumática. As diversas formas do tubo de Bourdon influem apenas na sensibilidade do instrumento.

Um fator bastante importante nesses aparelhos é a elasticidade do material de que é feito o tubo. Geralmente se empregam ligas de cobre e níquel por terem baixos coeficientes de dilatação pelo calor. O aço inoxidável também é utilizado, mas uma variação de temperatura de 50°C pode causar 2% de erro.

Devido à elasticidade do material não ser ilimitada, esses aparelhos devem ser usados sempre dentro dos limites de pressão para os quais foram construídos, mas também não se deve utilizá-los dentro de faixas muito menores do que as de suas limitações, pois acarreta perda de sensibilidade do tubo.

Um tubo de Bourdon, por exemplo, construído para ser usado numa faixa de 0 a 20 atmosferas, deve ser usado sempre dentro dessa limitação, jamais além dela, nem, ainda, numa faixa muito menor, como, por exemplo, de 0 a 2 atmosferas.

Deve-se ter em mente que ultrapassar o limite máximo superior significa arriscar-se a estragar o tubo de Bourdon, e permanecer muito além desse mesmo limite significa perder em sensibilidade.

A figura 8.9 mostra um transdutor de pressão com tubo de Bourdon em forma de "C" e um LVDT como sensor secundário.

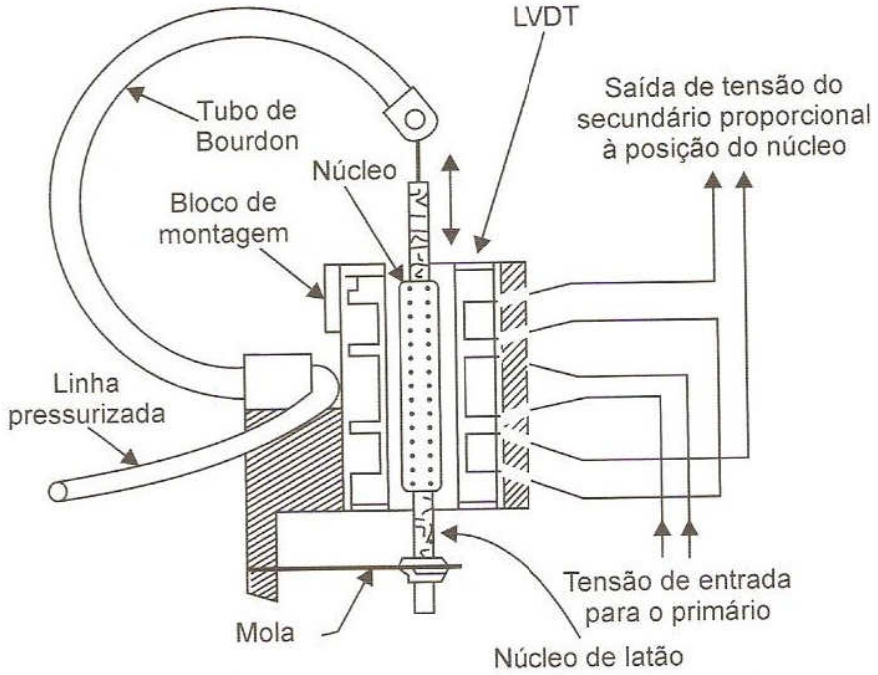


Figura 8.9 - Transdutor de pressão com tubo de Bourdon em forma de "C" e LVDT.

8.4. Sensores de pressão ópticos

É um circuito transmissor que opera por princípio óptico. É montado num manômetro de processo com elemento elástico estável e movimento de fácil calibração. Segundo este princípio, a aplicação da pressão no tubo de Bourdon desloca uma palheta, que interrompe proporcionalmente a incidência de um feixe de luz infravermelha emitido por um LED, sobre o primeiro de um "par casado" de fotodiodos (figura 8.10). O segundo fotodiodo recebe sempre uma mesma quantidade de luz desse feixe, gerando um sinal utilizado para compensar os efeitos produzidos pelo envelhecimento de componentes e variações de temperatura.

Esse instrumento é acondicionado em caixa hermeticamente selada de frente sólida com 4½" de diâmetro, acoplando internamente a um sistema de tubo Bourdon, um módulo eletrônico que converte o sinal da pressão em saída analógica de corrente. Na figura 8.11 é mostrado um sensor com o mesmo princípio de funcionamento, sendo que no lugar de um tubo de Bourdon é utilizado um diafragma.

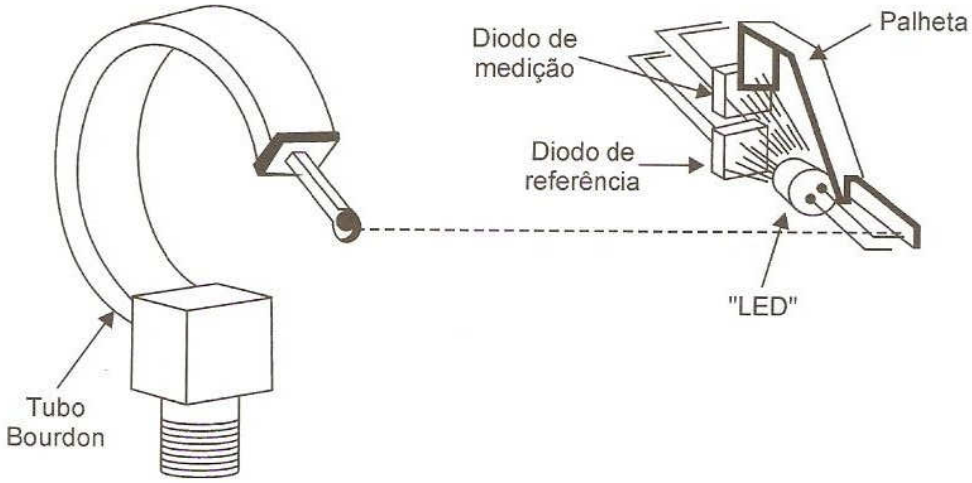


Figura 8.10 - Sensor de nível óptico a tubo de Bourdon.

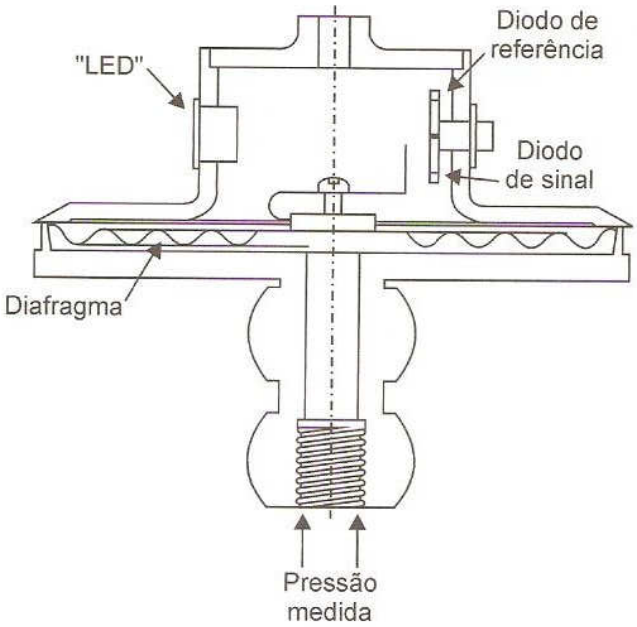


Figura 8.11 - Sensor de nível óptico a diafragma.

8.5. Sensor de pressão integrado

Atualmente, a metade da produção mundial de sensores de pressão é fabricada com a tecnologia microeletrônica do silício ou *micromachining*. O funcionamento de todos os sensores é na grande maioria das vezes baseado em dois princípios de tradução clássicos, isto é, o piezorresistivo e o capacitivo.

O primeiro desfruta das características particulares dos resistores (piezorresistores), formado sobre uma lâmina sutil de silício (diafragma). Esses resistores sofrem a ação de deformação mecânica, mudando o valor das suas resistências. Ver detalhes construtivos na figura 8.12 e na figura 8.15.

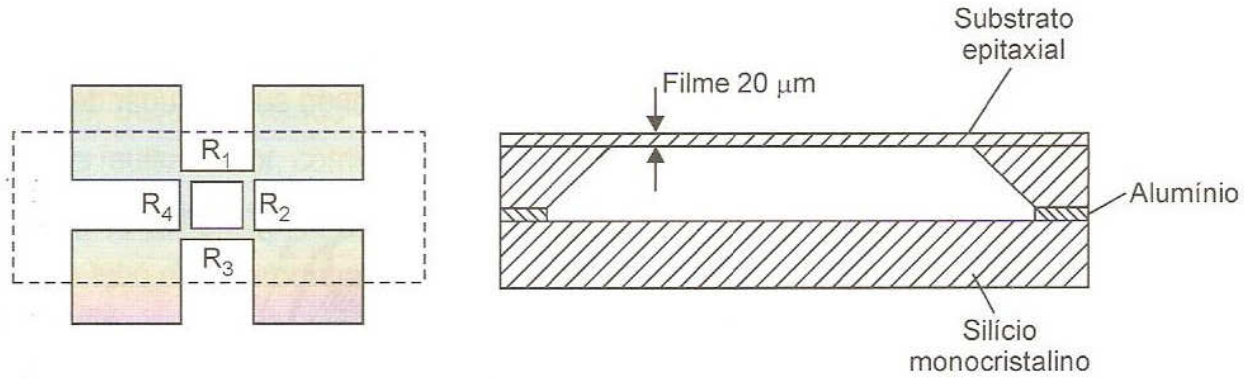


Figura 8.12 - Estrutura de sensor de pressão.
Os quatro piezorresistores se localizam no centro das membranas.

O diafragma é obtido cavando com reagente químico um pequeno bloco de silício (tipo n), formando uma cavidade em que o diafragma será o fundo. Os piezorresistores são do tipo "p" e formados na parte interna da membrana pelo processo de difusão ou outro semelhante.

A maioria dos sensores de pressão se baseia no efeito prezorresistivo e utiliza quatro resistores ligados em ponte. Sob a ação de uma pressão, os quatro resistores se deformam, mas uma pressão em particular cujo eixo foi montado na membrana faz com que dois fiquem em pressão e dois em compressão, produzindo um desbalanceamento da ponte e, conseqüentemente, uma tensão de saída, diretamente proporcional à pressão a que está sujeito.

O sistema de transdução pressão/tensão realizado por um só resistor é utilizado somente pela *Freescale Semiconductor*. O piezorresistor vem colocado, neste caso, transversalmente com um ângulo de 45° sobre uma das bordas da membrana. Na figura 8.13 são mostrados a simbologia e aspecto construtivo, enquanto que na figura 8.14 é mostrado um circuito típico de aplicação.

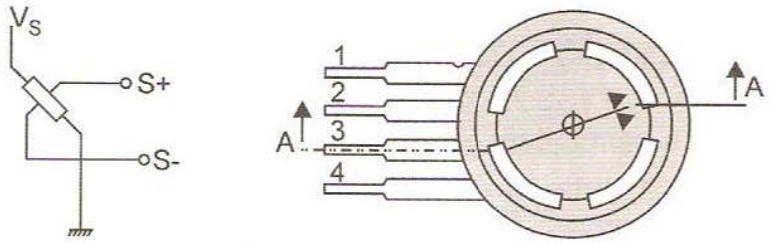


Figura 8.13 - Símbolo e aspecto físico real.

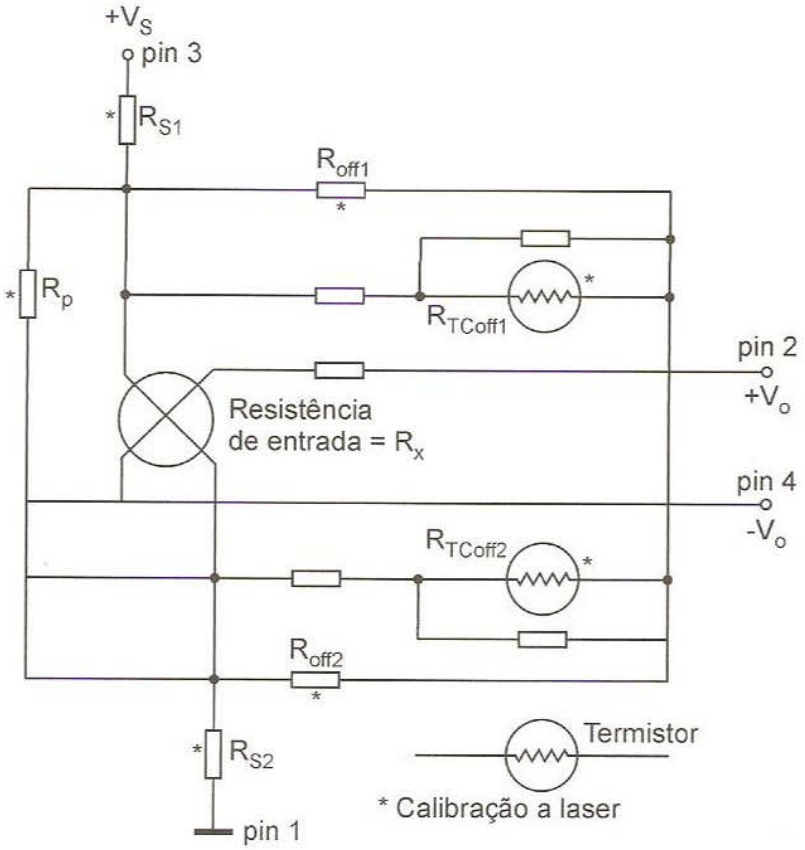


Figura 8.14 - Esquema completo do transdutor da *Freescale Semiconductor* da série MPX.

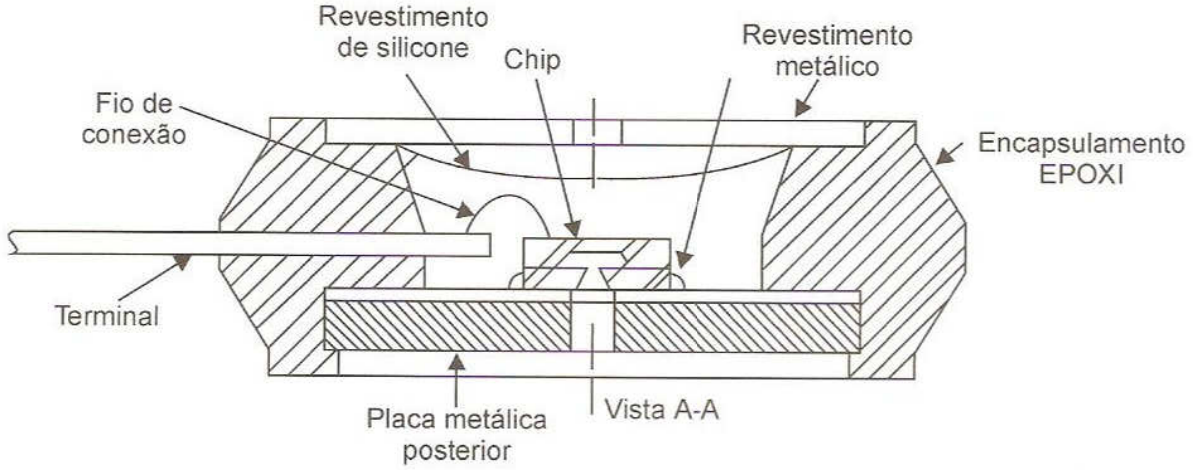


Figura 8.15 - Seção de um CHIP sensor de pressão MPX12 da *Freescale Semiconductor* dentro de seu encapsulamento. Um gel de silicone isola a superfície do CHIP e os fios contra agentes líquidos ou gasosos. Fonte: Freescale Semiconductor Inc.

8.6. Sensor de pressão capacitivo

O sistema capacitivo é bem menos utilizado. É composto por uma base e um diafragma. Submetendo o sensor a uma certa pressão, o diafragma se contrai e aproxima-se da base, variando a distância entre ambos e, conseqüentemente, a capacitância, ou seja, os dois funcionam como as armaduras de um capacitor variável. A partir dessa variação, é possível medir a pressão submetida quando estabelecido um referencial. A construção com certos materiais, como cerâmica, pode proporcionar características mecânicas desejáveis como elasticidade, estabilidade térmica e alta resistência, deixando-o mais estável e aumentando a vida útil do sensor (ver figura 8.16).

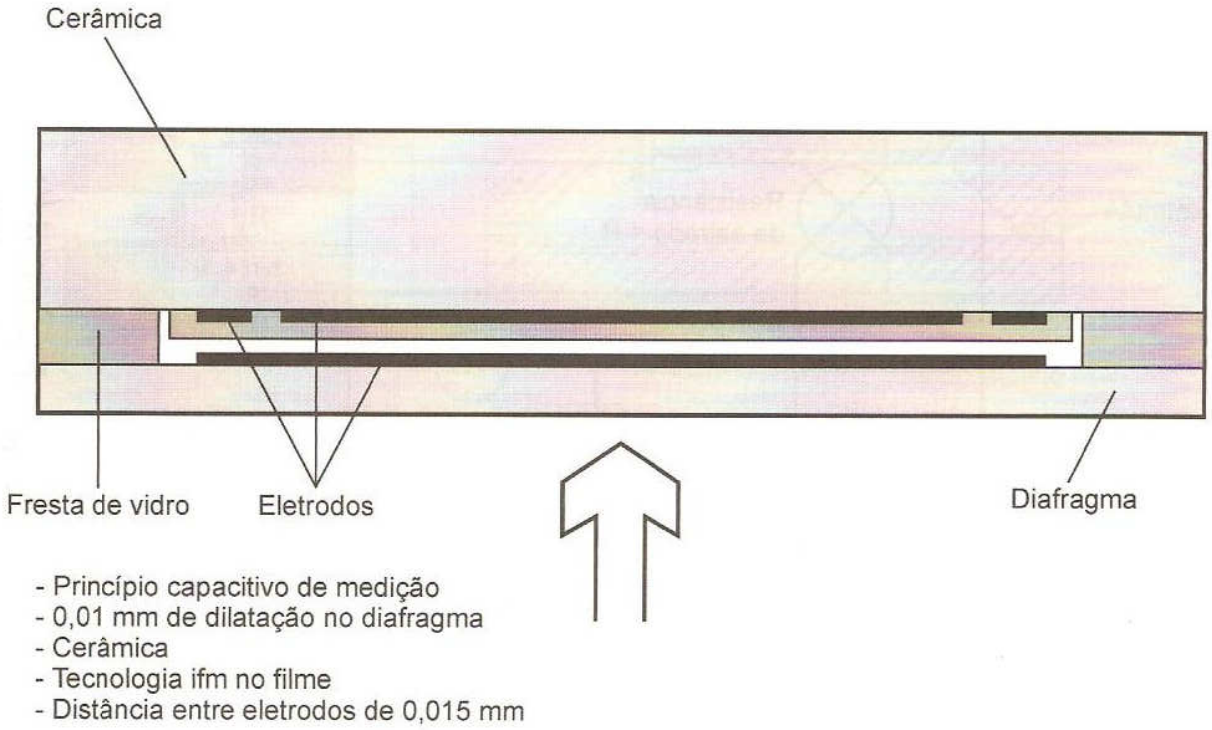


Figura 8.16 - Aspecto de um sensor de pressão capacitivo.

Capítulo 9

Sensores de Nível

Este capítulo estuda os sensores de nível mais utilizados em aplicações industriais e não-industriais, tais como: flutuador, eletrodo metálico, pressão hidrostática, capacitivo, vibratório, laser, radar, radioativo, ultra-sônico, fotoelétrico, pá rotativa e diafragma.

9.1. Introdução

Os sensores de nível são utilizados para o controle de líquidos ou grãos sólidos, contidos em reservatórios, silos, tanques abertos, tanques pressurizados na indústria. São úteis na detecção de um nível fixo (chave de nível - alarma ou sinaliza, quando atinge um determinado ponto) e na medição contínua.

Além do princípio de funcionamento dos sensores de nível, são apresentadas suas características, vantagens, desvantagens e aplicações.

9.2. Flutuadores

Os sensores de nível, baseados nos princípios da flutuação do filósofo Arquimedes, embora de tecnologia remota, permanecem como dispositivos de escolha para muitas aplicações.

O flutuador sobe à medida que o nível do fluido sobe. O movimento do flutuador, que varia para cada fabricante, é traduzido para uma ação de controle. Em algumas aplicações são usadas conexões mecânicas que convertem o movimento de subida e descida do flutuador numa abertura/fechamento de um contato. No caso de se requerer o isolamento do fluido (se estiver armazenado em alta pressão), esse isolamento é permitido graças a um acionamento por um acoplamento magnético. No caso de tanques abertos, a bóia (instrumento de flutuação) é o sistema mais comum, contudo também pode servir para tanques pressurizados com um acoplamento especial. A bóia fica sobre o líquido e conectada ao exterior do reservatório, indicando diretamente o nível. A conexão pode ser **direta**, **magnética** ou **hidráulica**.

São usados deslocadores (mais pesados que o líquido) que se movem para cima e para baixo atuando em uma chave. Os deslocadores são conectados a uma mola por meio de um cabo e sobem quando há uma força proporcional ao volume deslocado do líquido. É possível utilizar o acionamento magnético de uma chave, que permite que o líquido controlado seja isolado de contatos elétricos.

9.2.1. Flutuador por acionamento de mercúrio

Um interruptor de mercúrio protegido contra choques é suspenso pelo seu próprio cabo elétrico ou numa haste metálica.

No caso do **cabo elétrico**, quando o nível do líquido sobe e toca na parte inferior (abaloada) da bóia, ele inclina e neste momento o interruptor de mercúrio abre um contato ou fecha, dependendo do modelo, permitindo ou impedindo a passagem elétrica, desligando ou ligando bombas ou alarmes sonoros e visuais (ver figura 9.1).

No caso da **haste metálica**, a chave compõe-se de uma haste rígida com uma bóia na extremidade inferior e um núcleo de acionamento na parte superior. Quando o nível do tanque sobe, a bóia se desloca acompanhando o nível, empurrando a haste com o núcleo, o qual aciona uma ampola de mercúrio, um *reed switch* ou um micro *switch*.

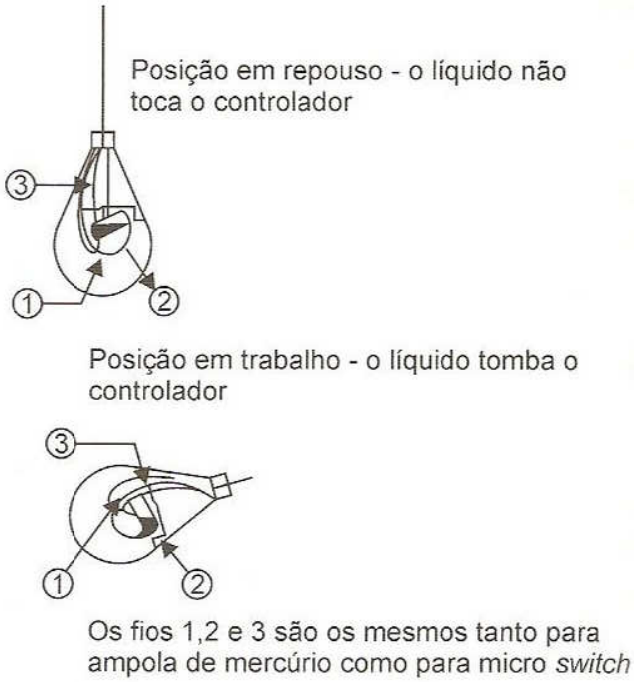


Figura 9.1 - Flutuadores a contato de mercúrio.

9.2.2. Flutuador com acionamento magnético *reed switch*

O *reed switch* é uma chave, formada por duas ou mais lâminas de metal encapsuladas numa ampola de vidro. Aproximando um campo magnético externo, ele atua sobre as lâminas de modo que se magnetizam por indução e com isso se flexionam para fechar o circuito, encostando uma na outra, ou então fazer uma comutação num sistema de três lâminas, utilizando uma pastilha de quartzo para aumentar a tensão de ruptura entre os contatos NA e NF.

Um ímã aproxima-se perpendicularmente da ampola, cujos pólos devem ficar orientados segundo uma paralela ao componente. Assim o campo magnético criado fecha o circuito magnético, passando pelas lâminas que se atraem, estabelecendo o contato. Na figura 9.2 são mostrados aspectos construtivos e princípio de funcionamento de uma ampola *reed*, enquanto na figura 9.3 é mostrado uma chave de nível comercial.

Caso seja requerido um controle de vários níveis pela aplicação, existem várias faixas de liga/ desliga num mesmo vaso. Eles não perdem o prumo com ondas ou variações repentinas, pois os deslocadores são mais pesados que os líquidos controlados. Os instrumentos com deslocadores podem fornecer transmissão contínua de nível. Os instrumentos baseados em flutuação podem ser utilizados em aplicações de até 340 kgf/cm^2 e 530°C.

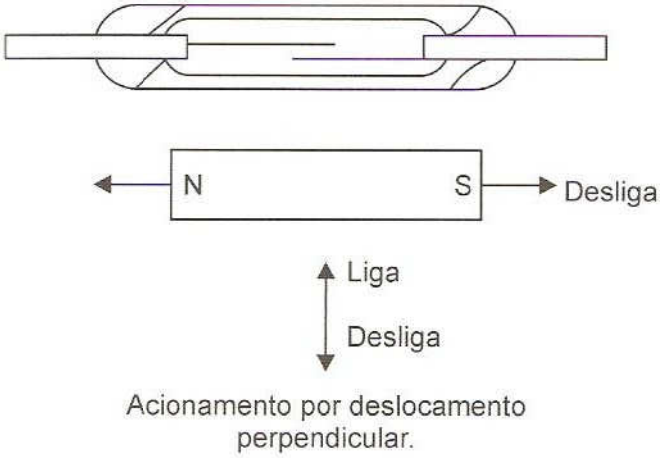


Figura 9.2 - Princípio de funcionamento de um *reed switch*.

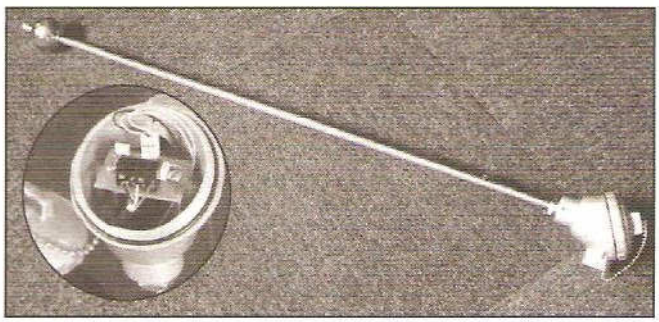


Figura 9.3 - Sensor flutuador do tipo *reed switch* de medição contínua produzido pela Deeter modelo LVCS Series 316L.

Impedem seu funcionamento a agregação e depósitos de substâncias estranhas. A precisão é limitada em torno de 5 mm (não é adequado a aplicações que requerem um controle mais preciso). Funcionam somente com líquidos de baixa viscosidade. Líquidos com potencial de agregação ou com sólidos em suspensão podem aderir às partes móveis do sensor.

Aplicações

Os flutuadores do tipo *reed switch* e mercúrio são usados na ativação e desativação de bombas hidráulicas, para controle de nível de uma caixa-d'água, ativação e desativação de alarmes sonoros e visuais.

9.2.3. Flutuador com acionamento por potenciômetro

Um potenciômetro é ligado na extremidade do flutuador, no qual a tensão de saída varia proporcionalmente ao nível do líquido (ver figura 9.4).

A calibração não é requerida para flutuadores, e os deslocadores podem ser calibrados sem movimento do nível. O ponto de ajuste (***set point***) dos flutuadores é preciso e repetitivo.

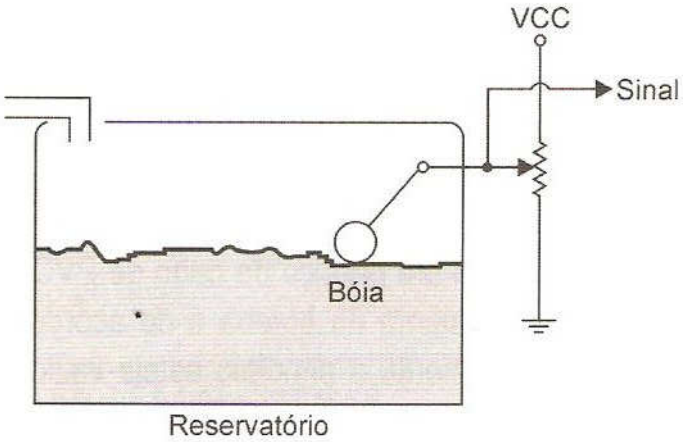


Figura 9.4 - Sensor flutuador potenciométrico.

Os **flutuadores potenciométricos** são utilizados para medição de nível em tanques de combustível automotivos e grupo geradores.

9.2.4. Chave de nível bóia

As características mais importantes desse dispositivo são seu pequeno tamanho, confiabilidade e alta capacidade de comutação obtida com a utilização de uma microchave (*microswitch*) com característica elétrica de 15 A a 250 VAC. A figura 9.5 mostra a instalação de um sensor de nível bóia.

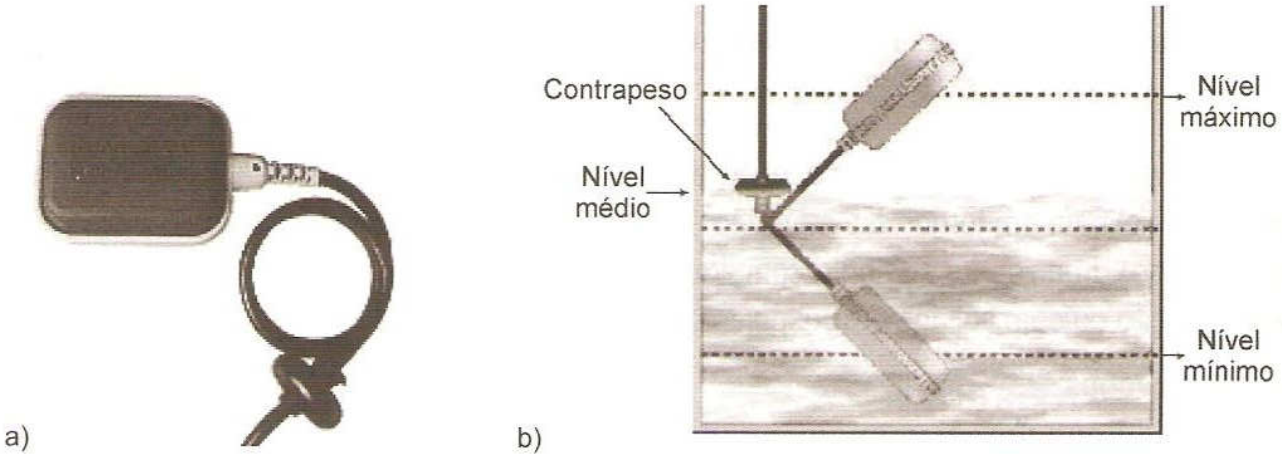


Figura 9.5 - a) Sensor de nível bóia e b) sua instalação típica. Dispositivo fabricado pela MarGirius Electric.

A figura 9.5 mostra uma chave do tipo bóia fabricada pela MarGirius Electric modelo CB2000. Esse tipo de dispositivo pode ser acionado quanto atinge o nível máximo e/ou nível mínimo. Neste caso o dispositivo é isento de mercúrio, atendendo a normal IEC 60730-2-16, que estipula os requisitos particulares para controladores elétricos automáticos de nível de água do tipo flutuante para aplicações domésticas e análogas.

9.3. Eletrodos metálicos - condutivo

A seguir são apresentados sensores de nível condutivos utilizando eletrodos.

9.3.1. Utilizando um eletrodo de referência

O sensor ilustrado na figura 9.6 pode ser feito facilmente, pois o material a ser utilizado na sua produção é bem simples. Basta um pedaço de cano de PVC, epóxi, arruela de latão e cabo flexível. A condição de funcionamento da bomba é de acordo com o nível da água no reservatório. Considerando que o recipiente a princípio esteja vazio, o motor é acionado. No momento em que a água atinge o nível máximo Z1 (eletrodo) o motor é desligado, quando o nível cai abaixo do nível mínimo Z2, o motor é ligado novamente.

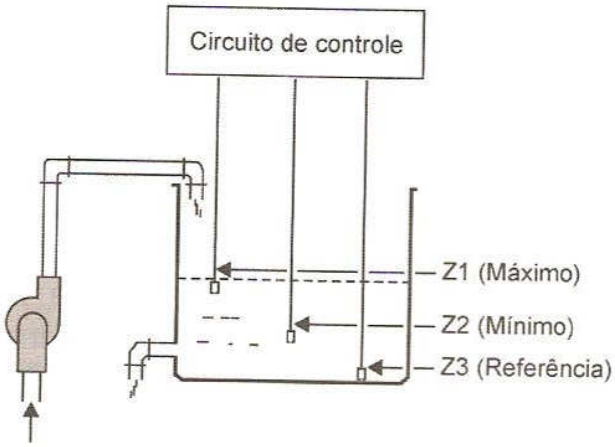


Figura 9.6 - Esquema de ligação dos eletrodos metálicos.

9.3.2. Eletrodos metálicos para verificação de uma única cota

No momento em que o líquido atinge o outro eletrodo (o de nível máximo), a resistência formada pelo líquido entre os eletrodos fecha o circuito, enviando um sinal para o circuito de controle (ver figura 9.7).

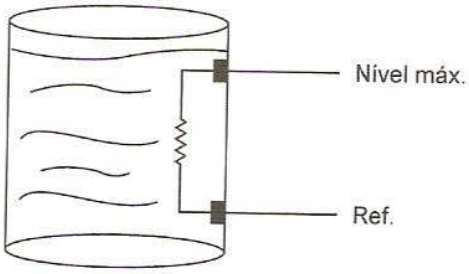


Figura 9.7 - Eletrodos metálicos para uma cota.

Aplicação

São usados em trasbordamento de tanques, proteções contra funcionamento de bombas a seco, controle de nível máximo e mínimo, etc. Se o reservatório for de material não-condutivo, uma referência deve ser instalada.

9.4. Medição por meio da pressão hidrostática no fundo do tanque

A seguir são apresentados sensores de nível que utilizam sensores de pressão para determinar a variação da pressão hidrostática. O item 9.10 também apresenta células de carga como solução para medição de nível.

9.4.1. Medição de nível hidrostática

Os sensores de nível por pressão hidrostática são do tipo submersível ou para instalação direta ao processo e operam de acordo com os seguintes princípios:

- capacitivo (capacitor montado atrás do diafragma);
- piezorresistivo (*strain gauge*);
- piezoelétrico.

Em todos os sensores que utilizam os princípios descritos anteriormente, a pressão hidrostática P do líquido é medida pelo sensor de pressão, sendo indicada como nível. As pressões são transmitidas então à célula por intermédio de um líquido de isolamento, normalmente óleo de silicone. A figura 9.8 mostra um sensor de medição de nível hidrostático por submersão.

Figura 9.8 - Sensor de medição de nível hidrostático por submersão produzido pela Bringer.

É de boa precisão e repetibilidade e de fácil instalação, contendo um diafragma com proteção de sobrecarga. não é necessário nenhum líquido de transmissão.

Se houver mudanças de densidade, pode influenciar nos resultados das medições.

Vantagens

- Boa precisão e repetibilidade;
- Fácil instalação;
- Diafragma com proteção de sobrecarga;
- Nenhum líquido de transmissão.

Características gerais

- Movimento livre de atrito;
- Boa repetibilidade dos resultados de medição;
- Boa resistência mecânica;
- Longa vida;
- Sobrecarga de 15 vezes o range de medição.

9.4.2. Por meio de medição de empuxo

Composto de um flutuador comprido colocado dentro do líquido e acoplado a um tubo de torção. O flutuador é imóvel. Em função do nível, o empuxo que o líquido exerce sobre o flutuador acoplado a um tubo de torção é transformado em movimento rotativo. Esse movimento pode ser empregado para indicar, regular ou transmitir a posição do nível.

Tem uma precisão ± 0,5% quando o flutuador é menor que ± 80 cm. Esse sistema presta-se à medição de nível em tanques pressurizados e é adequado para controle local em indústrias químicas. Não é adequado para líquidos de densidade variável. À medida que aumenta o comprimento do flutuador (se for de 6m,por exemplo) o sistema perde sua precisão, porque é muito sensível ao prumo.

9.5. Medição de nível capacitiva

Esses medidores podem ser do tipo **"ON-OFF"** ou **lineares** (proporcionais).

O princípio usa a mudança da capacitância, que é causada pela variação do nível do material entre a sonda de medição e a parede do reservatório. Se mergulharmos num recipiente uma barra condutora isolada, formar-se-á uma capacitância entre ela e o recipiente. Essa capacitância é uma função do nível da substância medida.

O uso de medição por capacitância torna todo o vaso um capacitor gigante. Como no caso de um capacitor, os parâmetros importantes são as áreas das placas condutoras A, a distância entre elas d e a constante elétrica do material armazenado ε. A capacitância C de um capacitor de placas paralelas é, portanto:

$$C = \varepsilon A / d \qquad \text{equação 9.1}$$

Nas aplicações industriais, toda a parede do tanque torna-se a placa negativa ou terra do capacitor. O sensor ou sonda serve como placa positiva. O material entre a parede do tanque e o sensor, isto é, armazenado no tanque, torna-se o material dielétrico. Quando o tanque está vazio, o material dielétrico é o ar, com constante dielétrica igual a 1. Devido às outras substâncias possuírem constantes dielétricas maiores que 1, a capacitância aumenta à medida que o tanque é cheio. A figura 9.9 mostra uma aplicação desse tipo de instalação.

Essa mudança de capacitância corresponde à subida ou descida do produto armazenado, podendo ser medida por um sensor intrusivo conectado a um circuito eletrônico de medição de capacitância. As alterações no nível podem ser indicadas por uma chave para controle pontual liga/desliga ou transmitidas por um sinal de saída contínuo de 4 - 20 mA.

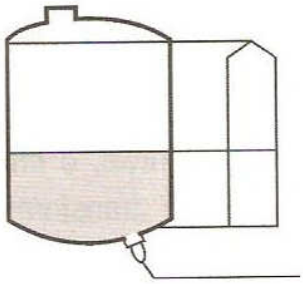


Figura 9.9 - Ilustração de um sensor de nível capacitivo em um tanque.

O método capacitivo de detecção de nível requer um enfoque quando o produto armazenado é condutivo e outro quando não é. No caso não-condutivo ou isolante, uma haste metálica pode ser usada como a placa positiva. Como informado anteriormente, o material entre a haste e a parede do tanque é dielétrico. No caso de produto condutivo, o efeito gerado será igual a conectar a parede do tanque com a haste sensora, portanto é requerido o uso de uma haste isolada. A isolação torna-se o material dielétrico, enquanto o fluido e a parede do tanque funcionarem em conjunto com a placa aterrada. Portanto, o "capacitor" é restabelecido. Caso haja dúvida na utilização ou não de uma sonda isolada, a prática sugere a utilização isolada.

Vantagens

- Virtualmente imune a temperatura, vácuo e pressão;
- Fácil instalação;
- Construção robusta e livre de manutenção;
- Baixo custo;
- Medições feitas em baixos níveis de energia.

Aplicação

O princípio de medição capacitiva é adequado para a detecção ou indicação contínua de nível. O campo de aplicação é bastante abrangente para líquidos condutivos, mas é especialmente adequado para água, solventes, óleo, combustível, amônia, plásticos líquidos, plásticos granulados, cimentos, alimentos, etc. Instrumentos para áreas perigosas também são fornecidos.

Limitações

Para uma condução contínua o método capacitivo é limitado a aplicações cuja constante dielétrica do material não é influenciada por mudanças na mistura, densidade ou temperatura. Entretanto, isso não se aplica à detecção de nível capacitiva. A medição será problemática para sólidos muito leves, como, por exemplo, palletes ou flocos de poliestireno.

O sistema de medição capacitiva por eletrodos é virtualmente imune a temperatura, vácuo e pressão. De fácil instalação, construção robusta e livre de manutenção, baixo custo e as medições são feitas em baixos níveis de energia.

O sistema de medição de nível capacitivo consiste em: um eletrodo com eletrônica *plug-in* para medição, um instrumento de avaliação que converte o resultado da medição em detecção de nível ou indicação contínua por meio de um sinal elétrico. As unidades compactadas incluem ambos os componentes em um único instrumento.

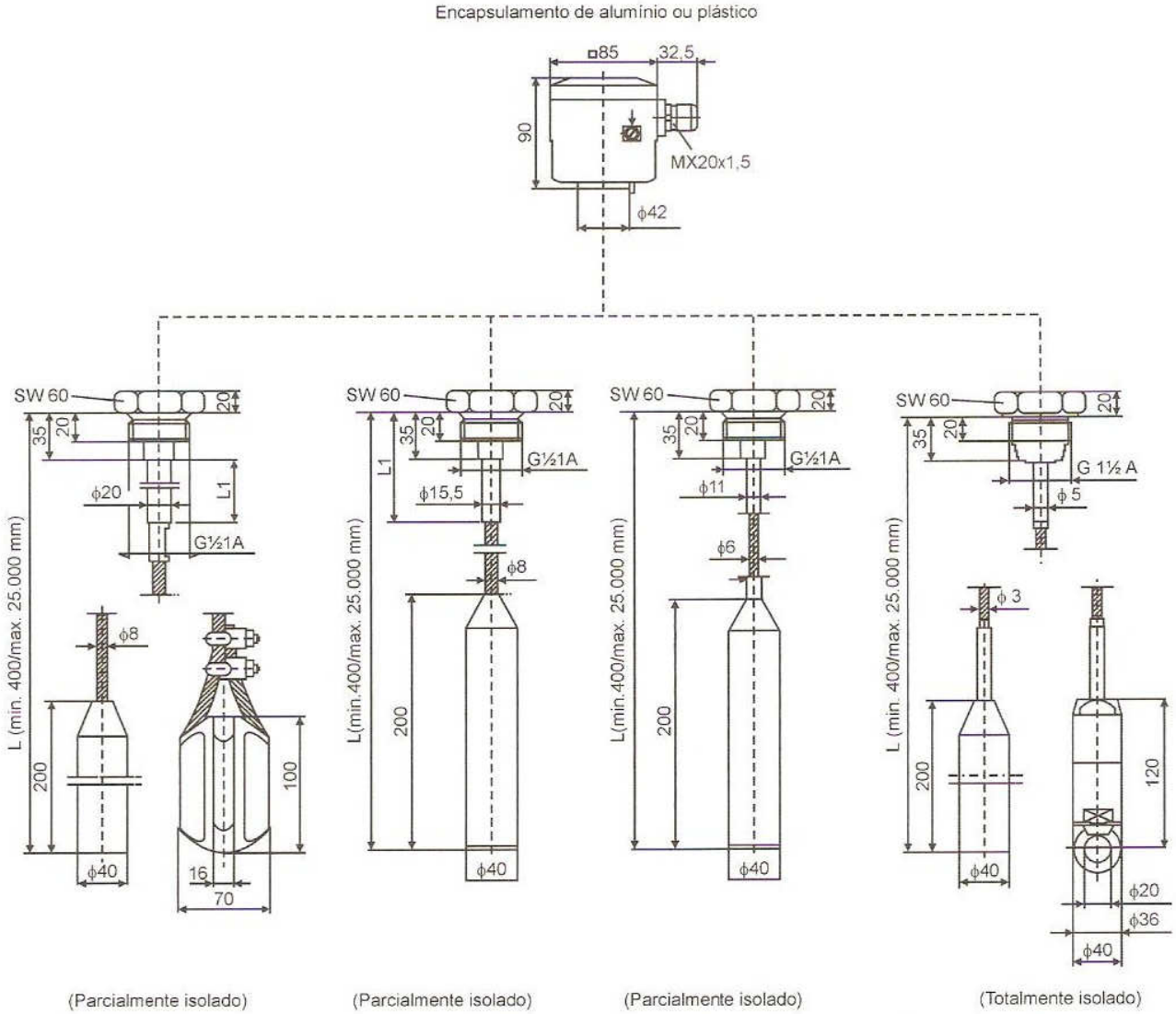


Figura 9.10 - Modelos de sondas capacitivas produzidas pela Vega.

9.6. Detecção de nível vibratório (piezoelétrico)

O sensor é composto por uma haste piezoelétrica que vibra. Assim que o produto entra em contato com a haste vibratória, a vibração é amortecida e aciona um relé de saída.

Vantagem

Pode ser usada com produtos de baixa densidade, não sendo necessário ajustá-la.

Aplicação

Para a detecção de líquidos em áreas perigosas. As chaves são utilizadas para pós e granulados quando outros métodos falham devido à aderência ou ao baixo peso (por exemplo: gesso, cal, plástico em pó, açúcar, farinha, etc.).

Limitações

Sólidos grossos que possam causar danos mecânicos; em silos com muitas vibrações.

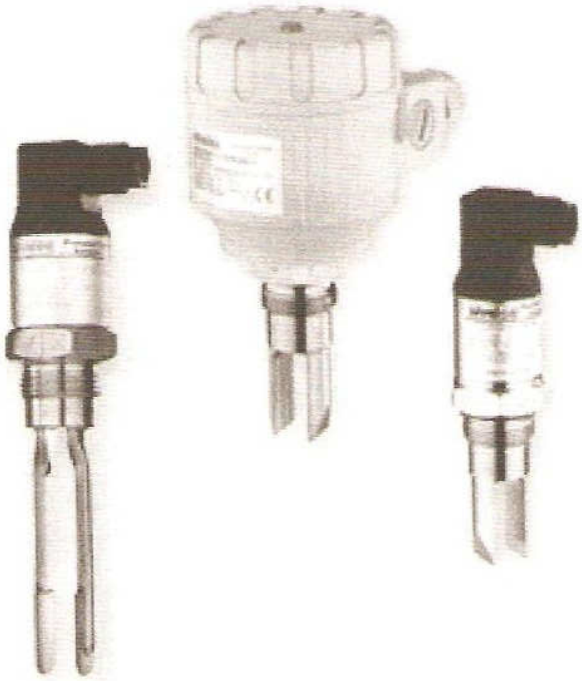


Figura 9.11 - Sensores vibratórios fabricados pela Nivel modelo NIVOSWITCH.

9.7. Medição de nível laser

Coloca-se um emissor laser num dos lados do recipiente de modo que o raio atinja a superfície do líquido em ângulo, sendo então refletido para um detector. Variações na posição do nível modificam a direção do raio refletido e alteram o ponto que atinge o sensor, correspondendo a nova posição a um sinal de nível, obtido pelos circuitos eletrônicos de detecção. É um medidor de nível contínuo sem contato. Todos os produtos (leite, cerveja, tintas, ácidos, granulados, etc.) podem ser medidos com superfície reflexiva. Não é influenciado por condições do processo (temperatura, interferências acústicas, pressão). É indicado para ranges de medição de 1 a 20 metros.

Vantagens

A medição é sensível a centésimos de milímetros em faixas de vários centímetros. Realizam a medida de nível sem entrar em contato com o fluido do processo.

9.8. Radar

Alguns fabricantes produzem dispositivos do tipo **radar** que utilizam as propriedades físicas das propagações de ondas, gerando sinais de radar polarizados, sendo transmitidos em uma direção e recebidos em outra. Em função disso, sempre que o sinal emitido colide com algum objeto, o instrumento introduz uma polarização de 90° no sinal. Assim, o instrumento só receberá ecos que foram refletidos uma única vez, ignorando as colisões indiretas e reduzindo sobremaneira as interferências ocasionadas pelos ruídos.

O medidor de nível do tipo TDR (reflectometria no domínio do tempo), também conhecido como radar guiado ou radar com onda guiada, é um outro dispositivo do tipo **radar,** que utiliza onda eletromagnética guiada através de hastes ou cabos em lugar de uma antena. O medidor do tipo TDR, localizado no topo do tanque, envia pulsos de sinal eletromagnético guiado através de dois condutores (haste ou cabo), que é refletido ao incidir sobre a superfície de um líquido ou sólido com constante dielétrica (ϵ_r) diferente do ar existente acima do produto. Esse medidor opera com base no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO) e tem a precisão de medição equivalente à do medidor do tipo **radar**, que opera com base no tempo decorrido entre a emissão e a recepção da onda refletida (ECO), não sendo também utilizado para operações de venda/ transferência de produtos.

Aplicações

Os dispositivos do tipo **radar** podem ser utilizados para medição de nível de líquidos (hidrocarbonetos, asfalto, GLP, produtos químicos, lama, etc.) e de alguns tipos de sólidos (minério em grãos e carvão). Podem ser utilizados na medição de nível em tanques de teto fixo e teto flutuante, cilindros, esferas de GLP e silos de minério ou carvão, com pressões de até 25 bar e temperatura de até 250°C.

No caso de utilização em tanques de teto flutuante, ou tanque de teto fixo com selo flutuante, o medidor de nível é instalado com um tubo guia de ondas (com diâmetro variando entre 0,1 e 0,2 metros). Em aplicações de medição de nível em esferas ou cilindros, também são utilizados tubos guia de onda. Alguns modelos de medidor de nível do tipo **radar** permitem testar-se, automaticamente, a precisão do instrumento, instalando-se um pino de referência internamente ao tubo guia de ondas, que será visível ao transmissor apenas durante o procedimento de verificação do instrumento.

Vantagens

- Ampla faixa de aplicação;
- Imunidade a extremos ambientais;
- Baixa manutenção;
- Fácil acesso;
- Fácil calibração.

9.9. Radioativos

Compostos de uma fonte de material radioativo (césio ou cobalto) e um detector de radiação, que são instalados diametralmente opostos na parede do silo ou tanque. As partículas emitidas pela fonte radioativa atravessam as paredes do silo, o material contido nele e sensibilizam o detector. Com a subida do nível o material se coloca entre a fonte e o detector, interferindo na trajetória das partículas. O material do silo absorve então parte da energia, fazendo com que a intensidade da radiação percebida pelo detector diminua proporcionalmente às variações do nível.

Aplicações

Medições de nível de produtos corrosivos, abrasivos, tóxicos ou de qualquer forma perigosos. Podem ser utilizados na indústria alimentícia, pois a radiação não contamina os alimentos. Não possui contato direto.

Desvantagem

São normalmente mais dispendiosos que outros dispositivos eletrônicos e exigem cuidados especiais na sua utilização no que diz respeito à segurança pessoal.

Vantagens

Podem ser montados externamente, sem que haja contato com o processo.

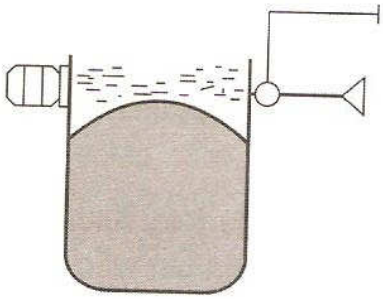


Figura 9.12 - Sensor de nível radioativo.

Medição sem contato, adequado para aplicações em processos com altas temperaturas e pressões.

Limitações

O produto não pode ser radioativo.

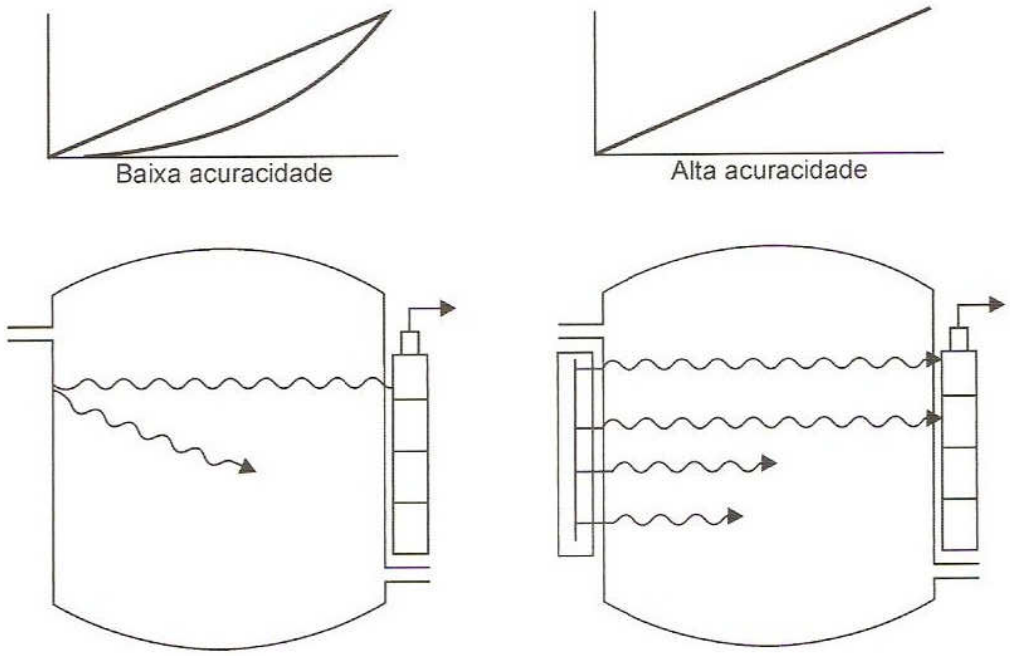


Figura 9.13 - Sensor radioativo.

9.10. *Strain-Gages* - célula de carga

Strain-gage é um transdutor que utiliza as variações resistivas dos resistores submetidos à carga. Quando uma carga é aplicada na coluna suporte, a coluna é comprimida, sofrendo um aumento da área da seção transversal e uma diminuição no seu comprimento, diminuindo o valor da resistência. O suporte de *strain-gage* é projetado de tal forma que os resistores devem tornar nulos os efeitos das variações da temperatura. O desbalanceamento da ponte elétrica formada pelos quatro elementos é proporcional às forças aplicadas sobre as células de carga. A saída varia linearmente com as variações das cargas sobre as células. Os componentes da ponte são projetados para que pequenos sinais de saída sejam obtidos para corresponder às variações de cargas.

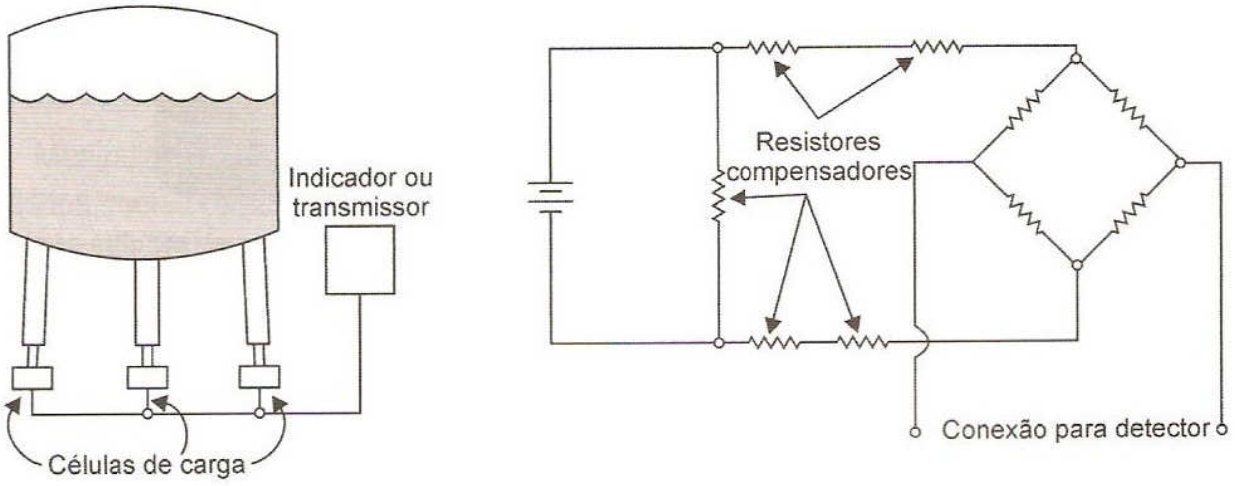


Figura 9.14 - Instalação de células de carga na base de um tanque e seu circuito equivalente.

9.11. Ultra-Sônico

Baseado no princípio da reflexão das ondas sonoras. Quando uma onda sonora atravessa um meio capaz de absorver som e incide em outro meio como uma barreira, somente uma pequena porção é absorvida e a maior parte da onda é refletida pela barreira. A reflexão das ondas é um eco. As superfícies refletoras das ondas sonoras são chamadas de "MEIO VIVO" e as que não podem refletir as ondas, de "MEIO MORTO". O tempo decorrido entre o instante em que o sinal é emitido e o instante em que o sinal refletido é recebido é uma referência para a posição do nível.

Características

- Freqüência da onda gerada: 1 a 20 KHz;
- Faixa de medição: alguns centímetros até 30 metros ou mais;
- Precisão: 1 a 5%;
- Temperatura ambiente.

Aplicações

Utilizado quando a medição precisa ser efetuada sem que haja contato entre o elemento de medição e o líquido do processo.

Vantagens

- Sem partes móveis sujeitas a desgaste;
- Instalação simples e total ausência de manutenção;
- Instalação em qualquer posição e para vários níveis;
- Não sofre interferência de turbulências, vibrações ou trepidações;
- Mais econômico.

Figura 9.15 - Transmissor ultra-sônico do tipo linear fabricado pela Hitech Tecnologies Inc. modelo Super-mini.

Desvantagem

É necessária a utilização de dispositivos automáticos de compensação de temperatura, quando está sujeito a variações acentuadas.

9.12. Alfassônico

Os sensores que utilizam freqüências audíveis (chamados por alguns fabricantes de alfassônicos) têm o mesmo princípio de funcionamento dos sensores ultra-sônicos, cuja freqüência de operação é abaixo de 10 kHz. Outra característica desse sensor é que ele precisa de um guia de onda (um tubo de PVC ou outro acoplado ao sensor e imerso no meio a ser medido). Além do preço, outra vantagem sobre o ultra-sônico é que ele possui uma área de medição morta pequena, e a principal desvantagem é o seu *range* de medição que é menor.

Outras desvantagens:

- Intrusivo;
- Sensibilidade a ruídos do meio.

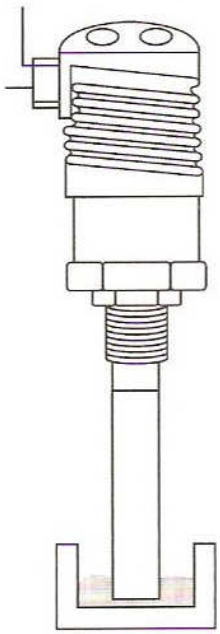


Figura 9.16 - Transmissor alfassônico da FLOWLINE.

9.13. Fotoelétricos

Os elementos fundamentais são: uma fonte de luz, um prisma e uma célula fotoelétrica. Na ausência do líquido o raio de luz é refletido no prisma para célula fotoelétrica, enquanto na presença do líquido o raio de luz é refratado e a célula fotoelétrica não é mais iluminada. Evidentemente, trata-se de um transdutor de nível para medida do tipo discreto *(on-off)* e poderia ser utilizado um sensor óptico do tipo barreira.

Existem tipos que detectam presença/ausência de objetos opacos em uma fração de polegadas a muitas centenas de 'pés', sem entrarem em contato com esses objetos. Uma extrema versatilidade caminha para uma ampla variedade de sensores de precisão.

Manipulação de material, distribuição de embalagens, distribuição de materiais em depósitos, monitoramento de esteiras rolantes, inclusive detecção de obstruções, contagem de peças e posicionamento são algumas das aplicações típicas desse sensor.

9.14. Pás rotativas

Antigas e de baixa confiabilidade, o princípio de funcionamento das PÁS ROTATIVAS é bem simples: um conjunto de pás é montado, acionado por um eixo ligado a um motor que fica montado sobre uma placa ligada à base do instrumento por um sistema de mola e um eixo de torção. Se as pás giram livremente, o sistema de torção não é acionado. Se as pás encontram

obstáculos, então o conjunto em que é montado o motor, ao tentar girar as pás, causa o torque suficiente para vencer a força da mola e girando toda a base (apenas o suficiente para atuar uma microchave ou outra forma de sinalização).

A chave de nível funciona com êxito até em aplicações com grande concentração de pó. Com tecnologia avançada, é imune a travamento do eixo por agregamento ou penetração de pequenas partículas do processo. Entre o eixo e a conexão existe um selo de óleo especialmente projetado para essa finalidade. O motor é comandado por micro *switches* que têm a função de ligar quando não existe produto ao redor das pás e desligar quando o produto estiver em contato, evitando que o motor trabalhe continuamente. De fácil manutenção, tanto o motor como partes internas podem ser sacados sem a necessidade de retirar a chave do processo. Sua sensibilidade pode ser facilmente ajustada para qualquer tipo de pós ou granulados.

Ao longo dos tempos as chaves de nível do tipo PÁS ROTATIVAS vêm sendo substituídas, em algumas aplicações, por chaves de nível capacitivas, ultra-sônicas e por princípio de vibração, pelo fato de serem mais confiáveis e de baixo custo.

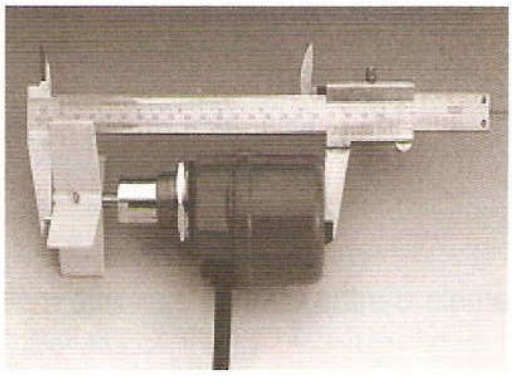


Figura 9.17 - Chave de nível pás rotativas fabricada pela INCONTROL modelo RP80 mini.

9.15. Chaves de nível diafragma

São projetadas para detecção de nível de produtos sólidos, sendo instaladas externamente ao silo. São indicadas em aplicações cujo espaço é limitado no interior do reservatório, ou não é permitido nenhum objeto no seu interior. O diafragma é o único objeto em contato com o material. Ele tem um baixo custo e pode operar em uma larga faixa de temperaturas.

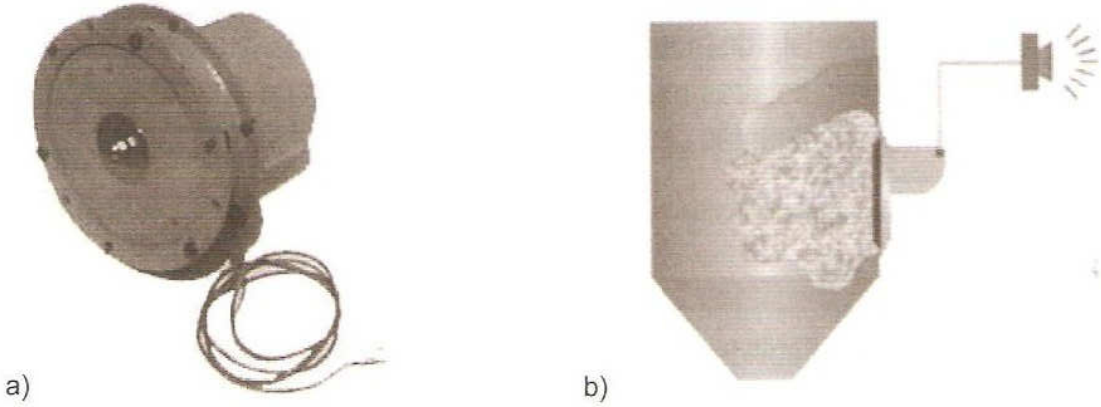


Figura 9.18 - a) Chave de nível de diafragma fabricada pela Eletrosil Indústria Metalúrgica modelo CL-400 e b) típica instalação.

9.16. Medidor de nível por borbulhamento

O sensor de medida do nível de superfície de água por borbulhamento é muito preciso. A medida é proporcionada por meio de um minicompressor (ou outra fonte de gás, nitrogênio, por exemplo) que injeta o ar através de um tubo pneumático introduzido na água, ficando a sua extremidade localizada na parte mais profunda do corpo de água a ser medido.

Quando o ar iniciar o borbulhamento na ponta da tubulação, a pressão resultante corresponde precisamente à pressão hidrostática acima da extremidade do tubo, sendo diretamente proporcional ao nível da água.

O compressor é acionado a intervalos ajustáveis de tempo, sendo as medidas da pressão realizadas pelo microcontrolador através da leitura do transmissor de pressão que possui uma saída analógica de 4 a 20 mA e uma escala de medida compatível com o nível máximo a ser medido. O sensor de pressão é instalado próximo ao compressor a jusante de uma válvula solenóide.

A válvula solenóide é instalada entre a saída do compressor e o sensor de pressão. A função da válvula é possibilitar a realização de um teste do sensor de pressão. Uma vez ao dia, em horário predefinido, a válvula é acionada pelo microcontrolador, fazendo com que a pressão dentro da tubulação seja igualada à pressão atmosférica e a leitura da pressão seja correspondente a 4 mA. Caso a medida do teste não seja a esperada, uma mensagem de alarme é enviada à central de comunicação do operador do sistema.

A medida de pressão é realizada após o desligamento do compressor, obtendo-se assim uma leitura estável.

Uma característica importante do sistema se deve ao fato de a eletrônica do sensor de pressão não ser submersa, necessitando somente que o tubo de pressão seja fixado abaixo do nível mínimo a ser medido. O transdutor de pressão utilizado freqüentemente para medida de nível de água, ao contrário, tem sua eletrônica submersa e fixada na parte mais profunda do corpo de água a ser medido, fazendo com que ele seja submetido a altas pressões, ocasionando desgastes por oxidação e, em alguns casos, infiltração de umidade, danificando o equipamento. Esse sistema é muito vantajoso em aplicações com líquidos corrosivos ou com material em suspensão (o fluido não penetra a tubulação).

O sensor de nível por borbulhamento é de fácil instalação e não requer serviços de manutenção freqüentes. Como o compressor só necessita ser acionado pelo microcontrolador periodicamente e por um pequeno intervalo de tempo, o consumo de energia e o desgaste do compressor é bastante pequeno, conseqüentemente é apropriado para aplicações em locais remotos. Na figura 9.19 é mostrado o diagrama de ligação do sistema medidor de nível por borbulhamento, enquanto a figura 9.20, exibe uma foto de um protótipo do quadro do sistema medidor de nível por borbulhamento desenvolvido pela TSN.

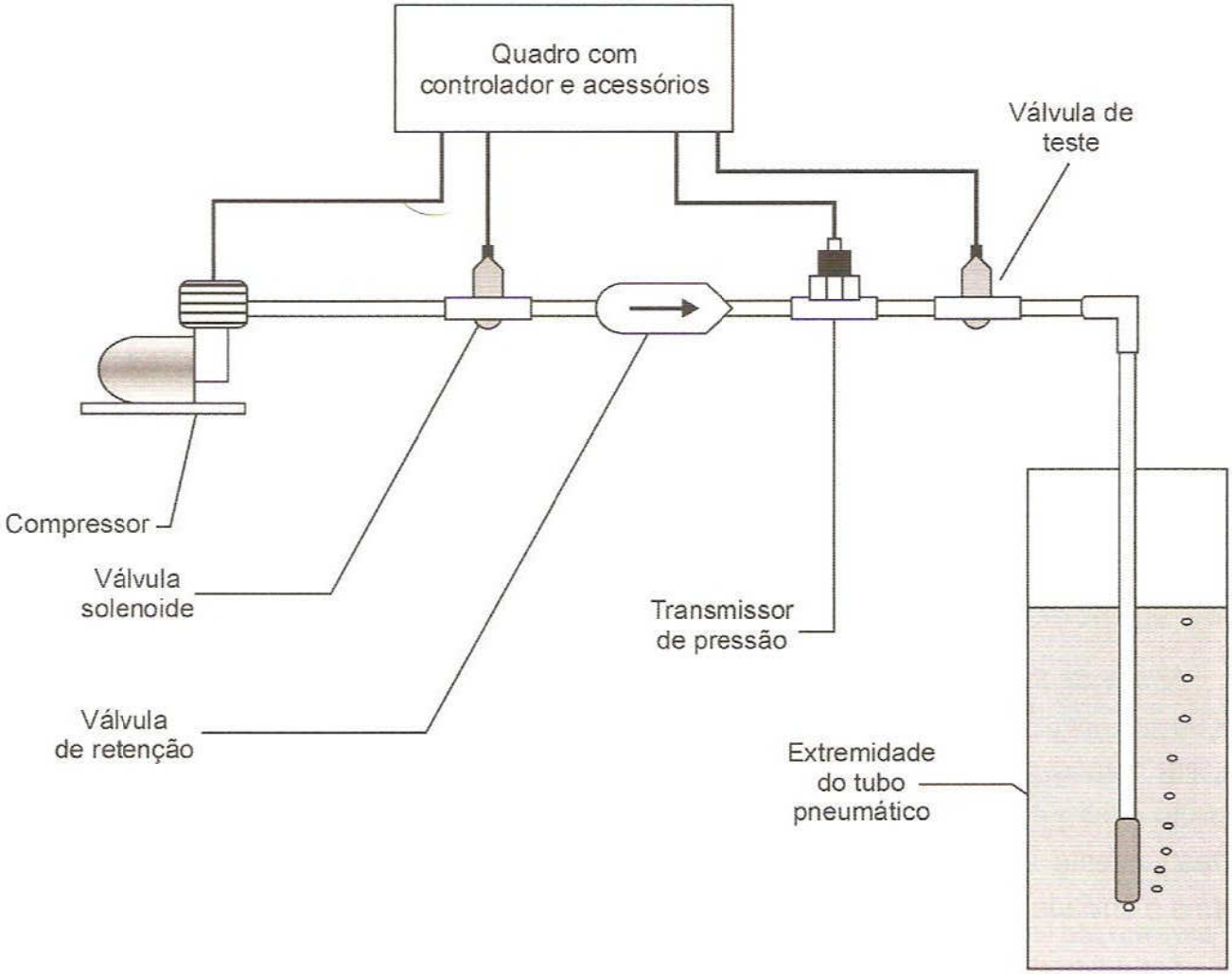


Figura 9.19 - Diagrama esquemático do sistema medidor de nível por borbulhamento.

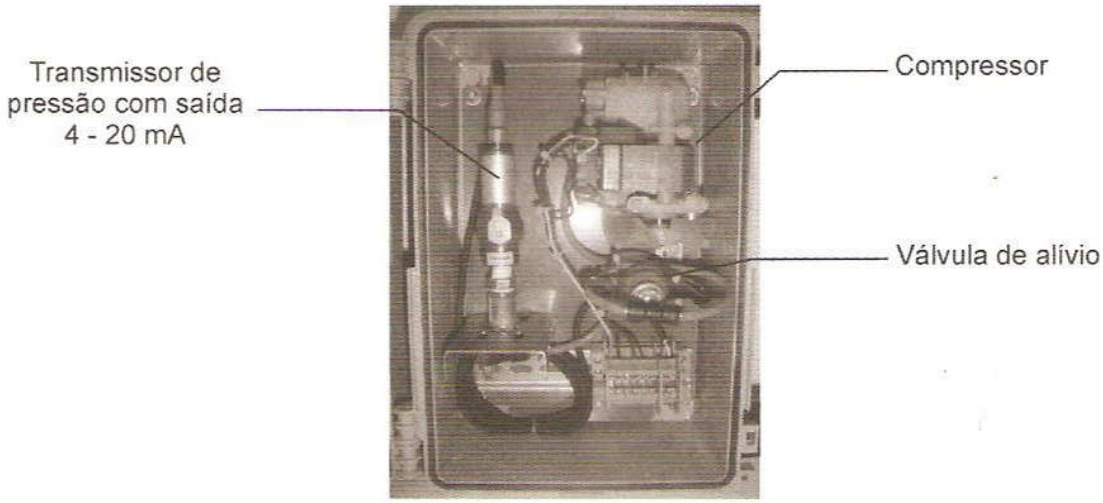
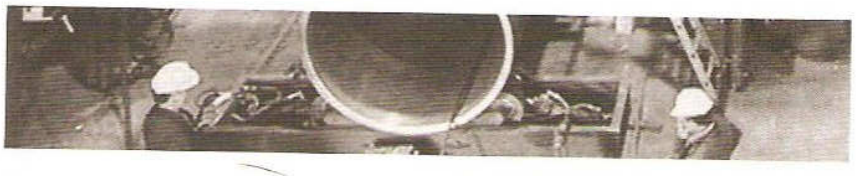


Figura 9.20 - Foto do quadro do sistema medidor de nível por borbulhamento - TSN.



Capítulo 10

Sensores de Vazão

Vazão representa a quantidade de líquidos, gases ou vapores, que passa em um determinado ponto, durante um certo período de tempo. Pode ser medida sob a forma de vazão volumétrica (m^3/h, litro/min) ou vazão de massa (t/h, kg/h, Nm^3/h).

A medição de vazão visa de um modo geral:

- Acompanhar e controlar a proporção dos materiais introduzidos em determinado processo industrial.
- Determinar e controlar a quantidade de produtos elaborados no processo, quer em suas fases intermediárias, quer em sua fase final.
- Determinar e controlar quantidades por razões de ordem econômica, seja referente a serviços, utilidades, ou compra e vendas de produtos.

Os medidores de vazão são na realidade indiretos, pois medem outro tipo de grandeza que é transformada por um transdutor, em vazão.

Entre as variáveis medidas com freqüência na indústria e em laboratório, a vazão é a que mais interage com o fluido e a geometria do duto.

Com relação ao fluido, as variáveis de influência são: pressão, temperatura, densidade, viscosidade, umidade, possibilidade de mudança de fase e as impurezas.

Com relação à geometria do duto, as variáveis de influencia são: diâmetro ou secção reta, rugosidade, trecho reto e a direção (no caso de um tubo vertical).

Não existe um só princípio de medição que possa atender a todas as condições. Alguns são limitados pelo diâmetro, outros pela temperatura, outros exigem longo trecho reto, etc. A escolha de um medidor para a aplicação certa requer muita experiência em certos casos, pois além de ser adequado, de acordo com os primeiros critérios citados, há necessidade de verificar a precisão, a faixa de trabalho, a velocidade de resposta e finalmente o preço, que não é o menos importante, mas deve ser deixado como último critério.

10.1. Pressão diferencial

Os medidores de vazão por pressão diferencial são os sensores mais amplamente usados, devido à sua simplicidade, seu custo e sua facilidade de manutenção.

Definição: um obstáculo, denominado elemento primário, introduzido em uma tubulação na qual escoa um fluido, causa uma queda de pressão que varia com a vazão, a densidade e a viscosidade. Mantendo os dois últimos fatores constantes, é possível calcular a vazão. Esses

elementos são baseados no princípio fundamental da hidrodinâmica, o **Teorema de Bernoulli**. Em geral pode-se calcular a vazão (Q) pelo diferencial da pressão com a expressão:

$$\boxed{Q = k\sqrt{\Delta p}} \qquad \text{equação 10.1}$$

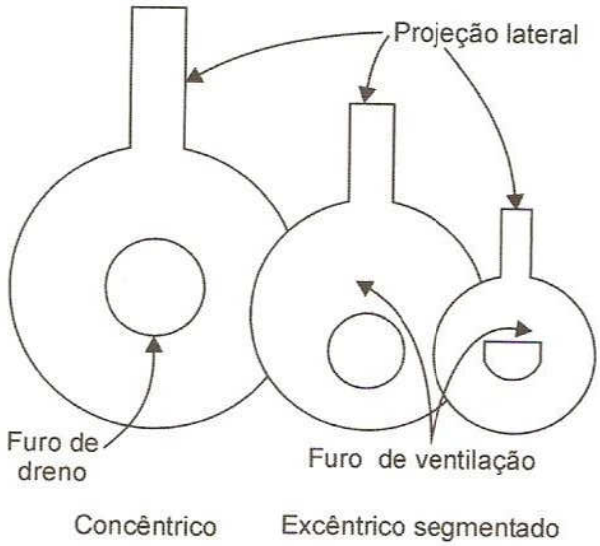
Sendo k uma constante que depende do instrumento usado e das dimensões da tubulação, e Δp a variação da pressão devido ao instrumento de medição, o valor de k pode ser obtido empiricamente.

Os tipos de elementos primários (dispositivos que permitem a medição de vazão) mais utilizados são:

- Placa de orifício;
- Tubo Venturi;
- Bocal;
- Tubo de Pitot.

10.1.1. Placa de orifício

Consiste em um disco fino, como ilustrado na figura 10.1, de material resistente (aço inoxidável), que apresenta um orifício cuja posição e dimensões variam com as condições de trabalho. A placa causa uma queda de pressão da montante (entrada) à jusante (saída), conforme mostra a figura 10.1 e figura 10.2. Essa pressão atinge o mínimo, que é chamado "*vena contracta*" (veia contraída) e tende a recuperar a pressão anterior exceto pela *"Perda de Carga Permanente*". Essa perda de carga permanente é a característica de maior desvantagem das placas de orifício, visto que devido ao seu alto valor, em alguns casos, pode se tornar impraticável a sua utilização.



Os orifícios são fabricados em três tipos de padrão

Figura 10.1 - A fabricação dos orifícios desses discos obedece a três tipos de padrão.
Fonte: http://www.emersonprocess.com/brooks/sp210/technology-coriolis.html.

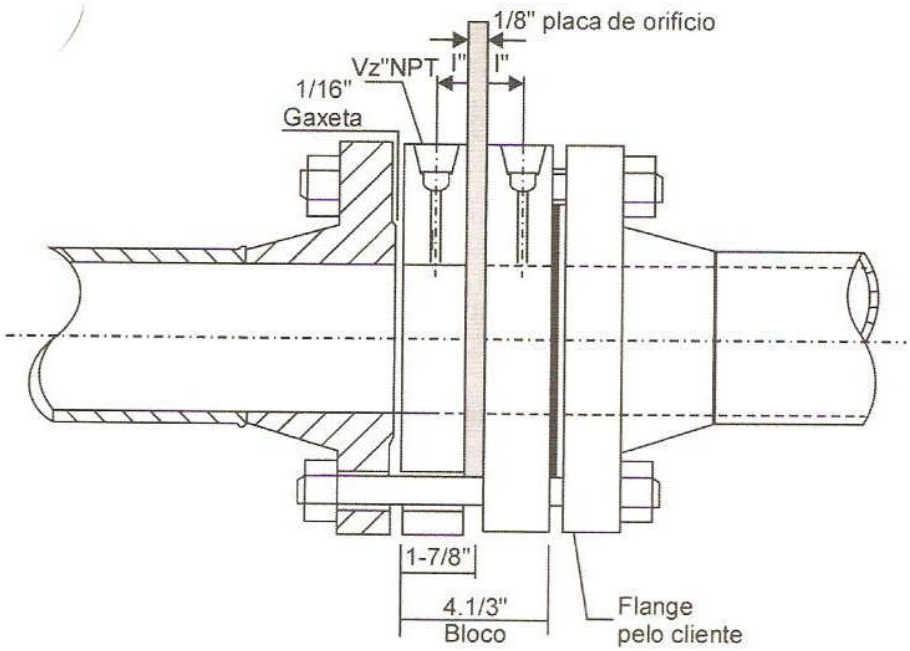


Figura 10.2 - a) e b) Detalhe construtivo e c) gráfico da variação da pressão estática em relação à variação entre as seções P_1 e P_2. Fonte: Austrália, Y. Coriolis Principle. http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter_artc/flowmeter_artc_02020102.html, FLOWMETER DIRECTORY, 2005.

As tomadas de pressão podem ser feitas de três formas:

- **Tomadas no flange:** localizadas nos próprios flanges em que está inserida a placa de orifício, essas tomadas devem situar-se a 1 polegada a montante e à jusante das faces da placa de orifício. Esse tipo de tomada tem a vantagem de permitir uma fácil substituição dos elementos sensores já que se encontram formando conjunto com a placa.
- **Tomadas na *vena contracta*:** a tomada de alta pressão deve localizar-se a um diâmetro da tubulação da montante e a um valor proporcional ao orifício da jusante.
- **Tomadas na tubulação:** localizadas a uma distância de duas vezes e meia o diâmetro da tubulação a montante e oito vezes a jusante. Os furos devem ser feitos sem causar saliências nem perturbações. Essa forma de tomada é muito apropriada a medições com diâmetro acima de 6 polegadas.

As principais vantagens da placa de orifício são a facilidade de uso, instalação e substituição, assim como o seu baixo custo.

10.1.2. Tubo de Venturi

Como se baseia no mesmo princípio das placas de orifício, sua forma de trabalho é semelhante. A perda de carga permanente é bem menor que nas placas de orifício, chegando aos 10%. Sua aplicação é recomendada para fluidos que contenham sólidos em suspensão, viscosos ou grandes vazões, sendo suas maiores dificuldades de implementação o preço elevado, o tamanho excessivo e a impossibilidade de permutas (ver figura 10.3 e figura 10.4).

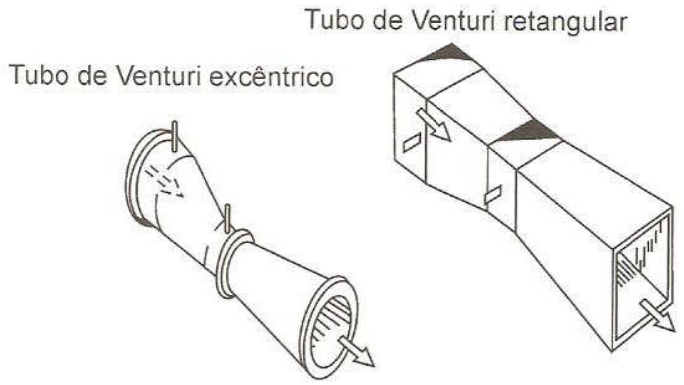
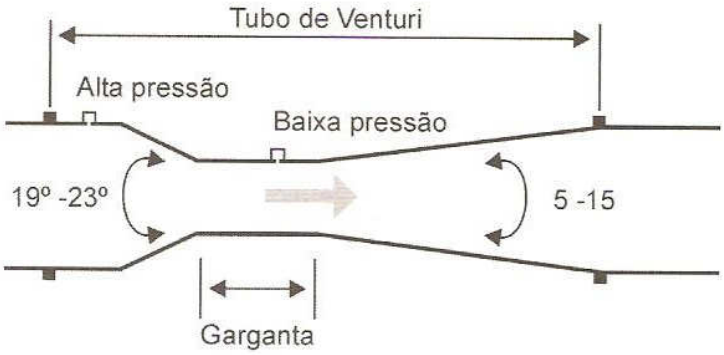


Figura 10.3 - Tipos de Tubo de Venturi.

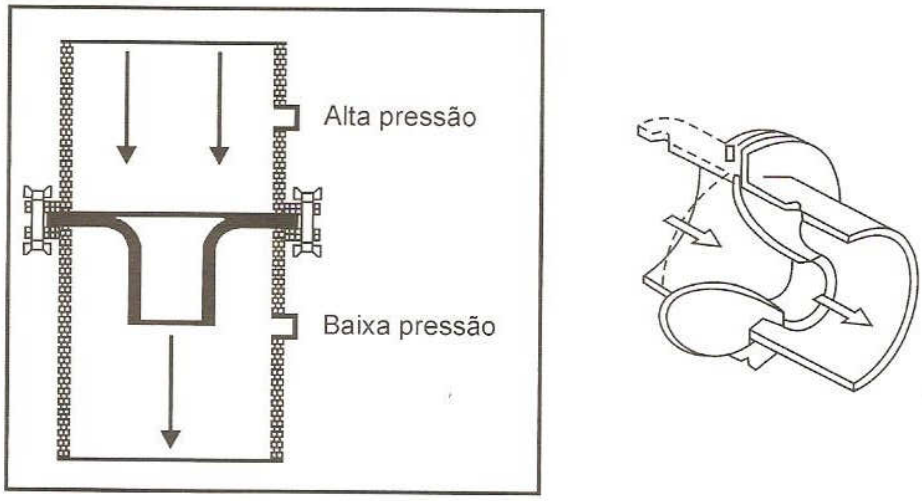


Dimensões críticas de um tubo de Venturi

Figura 10.4 - Dimensões críticas de um Tubo de Venturi.

10.1.3. Bocal

Com perda de carga permanente quase nula e tamanho menor que os tubos Venturi, os bocais são bastante utilizados para determinar a vazão de vapor ou fluídos contendo sólido em suspensão. Eles têm a mesma aparência de um Tubo de Venturi sem o cone de saída, como ilustra a figura 10.5. O bocal deve ser usado em tubos verticais com a direção do fluxo para baixo.



Bocal

Figura 10.5 - a) Vista em corte e b) em perspectiva de um bocal.

10.1.4. Tubo de Pitot

Esse dispositivo possibilita medição direta da diferença entre pressão dinâmica e estática, bem como velocidade de fluxo e, conseqüentemente, vazão. A precisão do tubo de Pitot depende da forma como ele próprio interage com o sistema, causando perturbações (figura 10.6). Com um tubo de Pitot ideal e usando uma coluna de mercúrio para medir a diferencial das pressões, temos:

$$h = \frac{V^2}{2g} \qquad \text{equação 10.2}$$

$$Q = VA \qquad \text{equação 10.3}$$

Sendo:

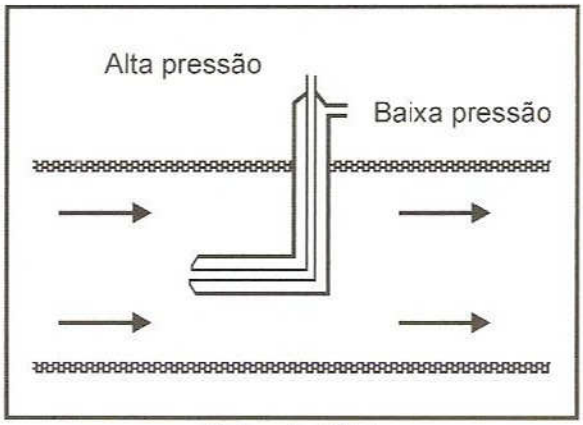
h = Altura

V = Velocidade do fluxo

A = Área da secção transversal do tubo

g = Aceleração da gravidade (9,8 m/s^2)

Q = Vazão (m^3/s)

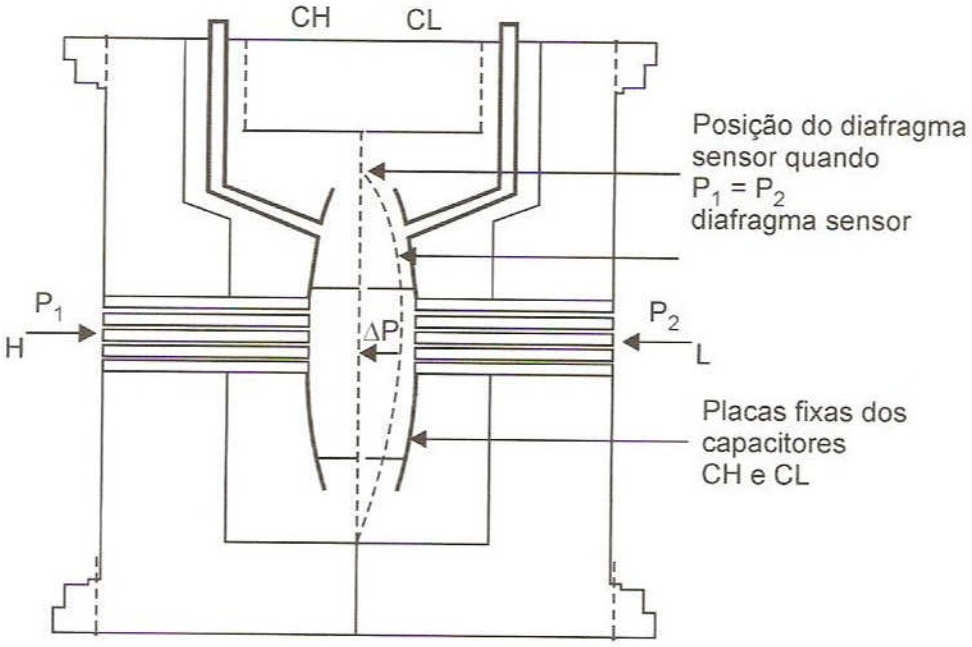


Tubo de Pitot

Figura 10.6 - Ilustração de um tubo de Pitot.

10.1.5. Descrição funcional de um sensor de pressão diferencial capacitivo

A maioria dos sensores de pressão utilizada pelos transmissores de vazão é do tipo capacitivo (célula capacitiva), mostrado esquematicamente na figura 10.7.



(CL - CH) / (CL + CH) = 2 Δd/d

Figura 10.7 - Princípio de funcionamento de uma célula capacitiva.

Em que:

- **P1** e **P2** são pressões aplicadas nas câmaras H e L
- **CH** = capacitância medida entre a placa fixa do lado de P1 e o diafragma sensor
- **CL** = capacitância medida entre a placa fixa do lado de P2 e o diafragma sensor
- **d** = distância entre as placas fixas de CH e CL
- **Δd** = deflexão sofrida pelo diafragma sensor devido à aplicação da pressão diferencial **(ΔP = P1 - P2)**

Sabe-se que a capacitância de um capacitor de placas planas e paralelas pode ser expressa em função da área (A) das placas e da distância (d) que as separa, como:

$$C = \in A/d \qquad \text{equação 10.4}$$

Sendo:

ε = constante dielétrica do meio existente entre as placas do capacitor.

Se considerar **CH** e **CL** como capacitâncias de placas planas de mesma área e paralelas, quando P1 > P2, têm-se:

$$CH = \varepsilon \frac{A}{d/2 + \Delta d}, \text{ e} \qquad \text{equação 10.5}$$

$$CL = \varepsilon \frac{A}{d/2 - \Delta d} \qquad \text{equação 10.6}$$

Por outro lado, se a pressão diferencial **(ΔP)** aplicada à célula capacitiva não defletir o diafragma sensor além de d/4, pode ser admitido que ΔP é proporcional a Δd, ou seja:

$$\Delta P \, \alpha \, \Delta d$$

Resolvendo a expressão (*CL-CH*)/(*CL+CH*), tem-se que:

$$\frac{CL - CH}{CL + CH} = 2\frac{\Delta d}{d} \qquad \text{equação 10.6}$$

Como a distância (*d*) entre as placas fixas de *CH* e *CL* é constante, percebe-se que a expressão (*CL-CH*) / (*CL+CH*) é proporcional a Δd e, portanto, a pressão diferencial que se quer medir.

Assim é possível dizer que a célula capacitiva é um sensor de pressão constituído por dois capacitores de capacitâncias variáveis, conforme a pressão diferencial aplicada.

10.2. Rotâmetros

Os rotâmetros são constituídos de uma seção de tubo colocado verticalmente na tubulação, cuja extremidade maior é dirigida para cima, e de um corpo flutuador (bóia), também chamado peão, que se move verticalmente no tubo cônico. O flutuador pode ter o perfil de vários modos e tem um diâmetro um pouco menor que o diâmetro mínimo do tubo.

O fluido passa através do tubo de base para o topo. Quando não há vazão, o flutuador permanece na base do tubo e seu diâmetro maior é usualmente selecionado de tal maneira que bloqueie a pequena extremidade do tubo, quase que completamente. Quando a vazão começa e o fluido atinge o flutuador, o empuxo torna o flutuador mais leve, porém como o flutuador tem uma densidade maior que a do fluido, o empuxo não é suficiente para levantar o flutuador. A área de passagem oferece resistência à vazão e a queda de pressão do fluido começa a aumentar. Quando a pressão diferencial somada ao efeito de empuxo do líquido excede a pressão devido ao peso do flutuador, então o flutuador sobe e flutua na corrente fluida.

Com o movimento ascendente do flutuador em direção à parte mais larga do tubo, a área anelar, entre a parede do tubo e a periferia do flutuador, aumenta. Como a área aumenta, o diferencial de pressão devido ao flutuador decrescerá.

O flutuador ficará em equilíbrio dinâmico quando a pressão diferencial através do flutuador somada ao efeito do empuxo contrabalançar o peso do flutuador.

Qualquer aumento na vazão movimenta o flutuador para a parte superior do tubo e uma diminuição causa uma queda a um nível mais baixo. Cada posição do flutuador corresponde a um valor determinado de vazão e somente um. Apenas é necessário colocar uma escala calibrada na parte externa do tubo e a vazão poderá ser determinada pela observação direta da posição do flutuador.

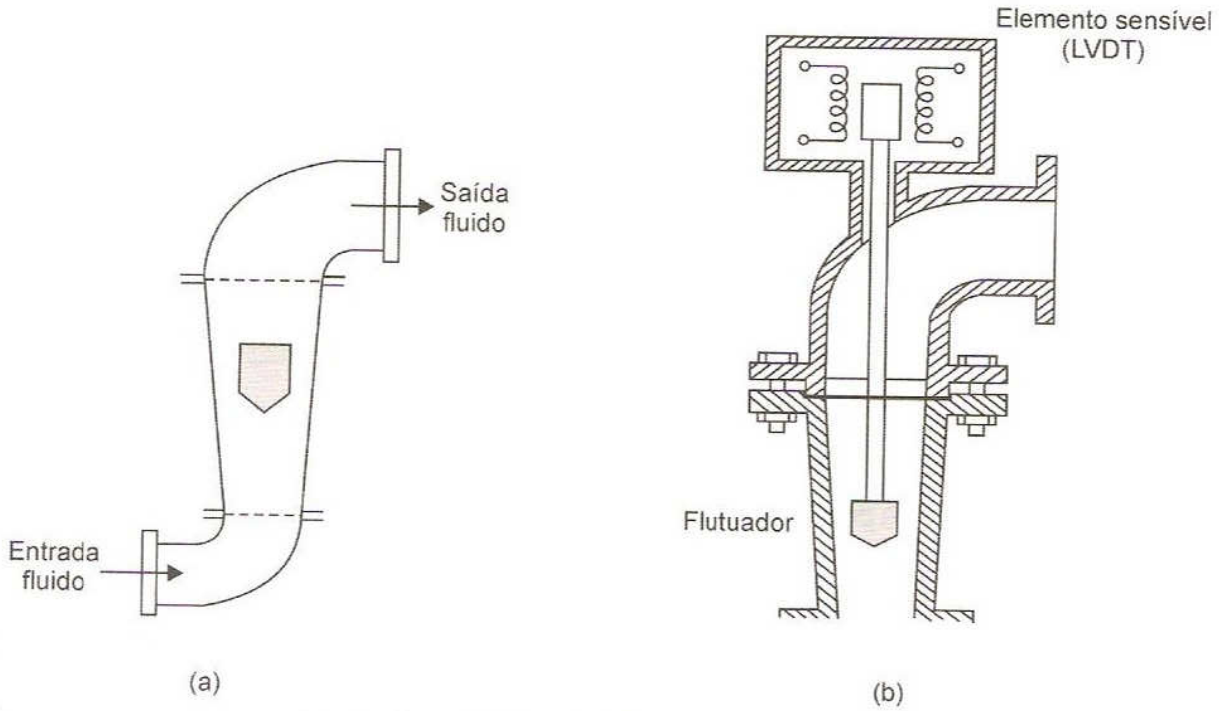


Figura 10.8 - Detalhe construtivo de um rotâmetro.

O material freqüentemente utilizado para o tubo é o vidro ou acrílico (para baixas pressões). Tubos de metal são usados em aplicações em que o vidro não é satisfatório. Neste caso a posição do flutuador deve ser detectada magneticamente ou eletricamente. O uso de detectores magnéticos de posição do flutuador torna possível a operação de funções diferentes da indicação. Neste caso os rotâmetros podem ser usados então para transmitir sinais eletrônicos.

Em outras palavras, introduzindo o líquido no tubo, como mostra a figura 10.8(a), o flutuador coloca-se ao longo do eixo do tubo e para uma certa altura temos uma vazão indicada correspondente. Na figura 10.8(b) o flutuador é ligado rigidamente a um transformador diferencial que dá um sinal elétrico de saída proporcional à vazão.

10.3. Turbina

Os transdutores de vazão do tipo turbina são usados somente nos casos em que o fluído seja um líquido. Eles são constituídos de um gerador a ímã permanente colocado em rotação pelo líquido, que atua sobre as paletas. O rotor induz uma tensão alternada com freqüência variável nos terminais de uma bobina colocada externamente ao invólucro da tubulação, que é de material magnético. A freqüência é proporcional à velocidade média do líquido e, conseqüentemente, proporcional à vazão. A figura 10.9 exibe um transdutor de vazão à turbina.

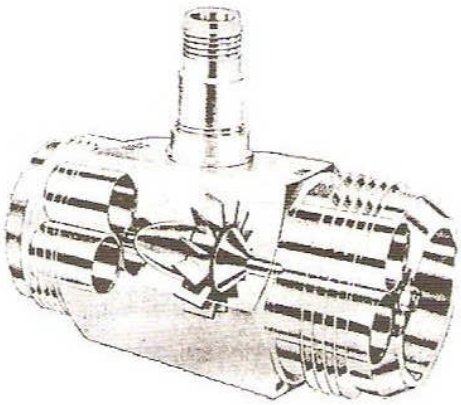


Figura 10.9 - Transdutor do tipo turbina.
Fonte: Catálogo KROHNE/CONAUT.

10.4. Sensor óptico

Trata-se de um transmissor (*LED* infravermelho) que emite um feixe de luz que é refletida pelas paletas da turbina (figura 10.10). O número de pulsos recebidos pelo fototransmissor é proporcional à velocidade da turbina, que é proporcional à vazão. Esses sensores são normalmente utilizados na indústria automotiva, para medição da vazão de combustível nos veículos.

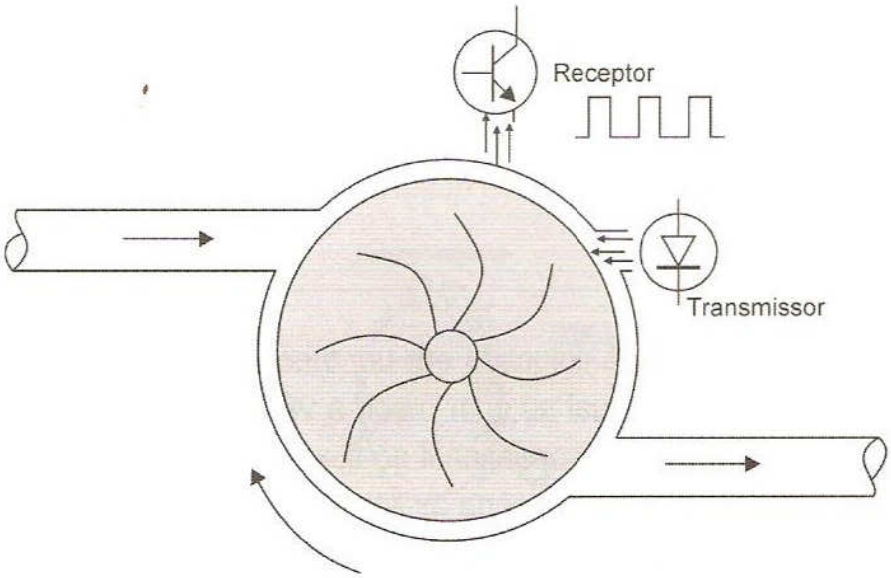


Figura 10.10 - Princípio de funcionamento de um sensor óptico.

10.5. Magnético

10.5.1. Sensor de vazão magnético indutivo

Esse tipo de transdutor é usado com fluidos condutores, como o caso de eletrólitos. Ele é constituído de uma seção de tubo de material não magnético e não condutor, no qual são colocadas duas bobinas e um anel de ferro laminado. O campo magnético (*B*) gerado pela bobina, alimentada por corrente alternada, induz, pelo efeito velocidade (*v*) do fluxo condutor, uma tensão que vem dessa fonte conectada a dois eletrodos colocados sobre um eixo ortogonal ao campo magnético e da velocidade, como indica a figura 10.11, da tensão que é:

$$E = K\,d\,B\,v \qquad \text{equação 10.7}$$

em que d é o comprimento do condutor e *K* uma constante de proporcionalidade.

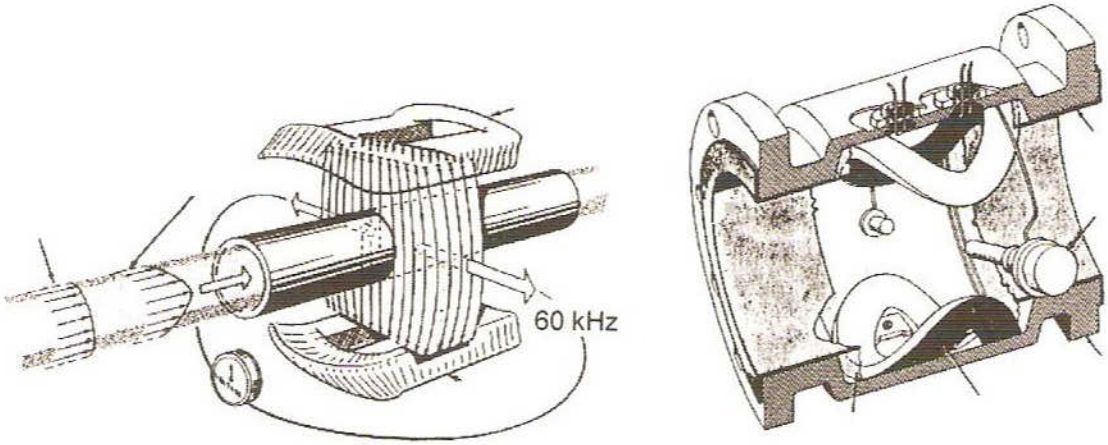


Figura 10.11 - Típico transdutor com os enrolamentos fixados internamente.
Fonte: Catálogo KROHNE/CONAUT.

10.5.2. Bobina de *pick-up*

Uma bobina do tipo *pick-up* é colocada em um tubo de latão, aço inox ou plástico que está dentro de uma tubulação da qual se quer medir a vazão. Na extremidade do tubo existe um rotor que gira a uma velocidade proporcional ao fluxo do líquido. Devido à proximidade do rotor com a bobina, cada vez que o rotor corta as linhas de fluxo magnético do ímã do *pick-up*, haverá indução de um pulso de tensão na bobina, devido à variação do fluxo (veja o item 5.2.4). Na figura 10.12 são mostrados aspectos construtivos e de funcionamento.

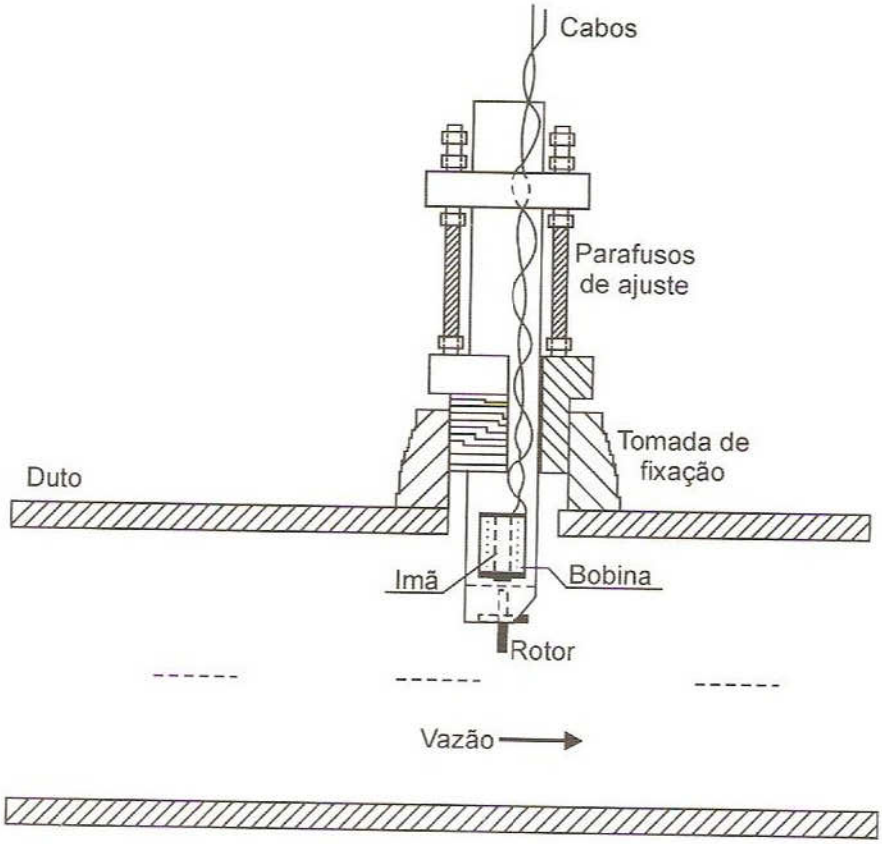


Figura 10.12 - Princípio de funcionamento.

O rotor (turbina do tipo "roda d'água") pode ser de plástico, e em cada pá é introduzido um ímã permanente, neste caso, no lugar de uma bobina *pick up* é utilizado um sensor de efeito HALL. Outra maneira de implementar esse tipo de sensor é utilizar um sensor de posição de aproximação indutivo no lugar da bobina *pick up.*

10.5.3. Acoplamento magnético

Esse tipo de sensor utiliza o ponteiro ou outra engrenagem do relógio de um hidrômetro multijato ou WOLTMANN para se adaptar um pequeno ímã permanente. O ímã passa próximo a uma ampola *reed* (por exemplo) que fecha o contato, mandando um pulso para o circuito de controle. O número de pulso é proporcional à vazão. Na figura 10.13 é mostrado o princípio de funcionamento, enquanto na figura 10.4 é mostrado um medidor com sensor magnético comercial.

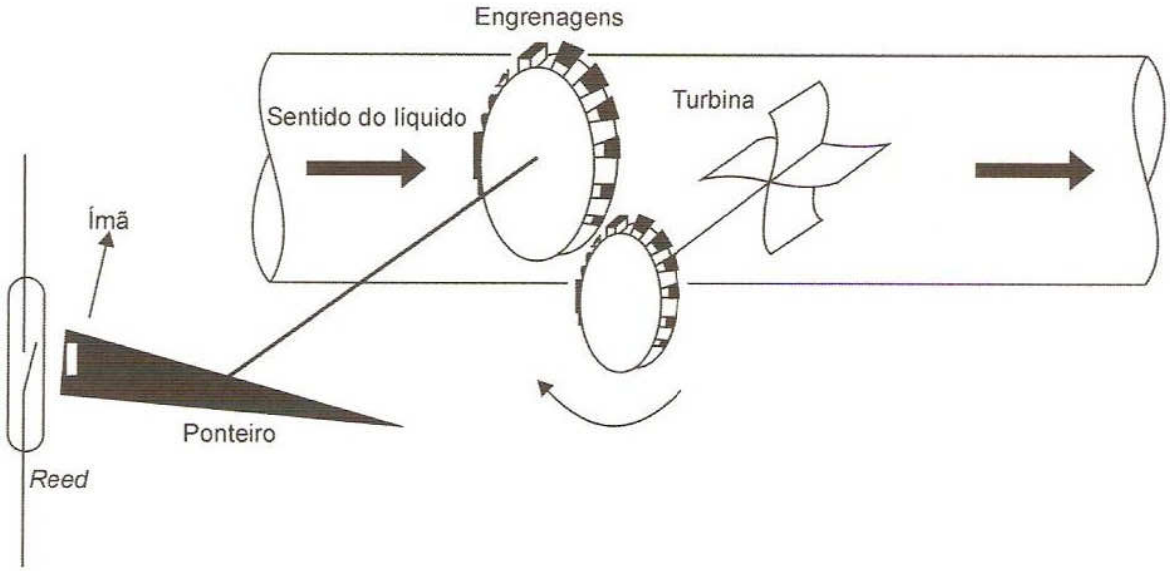


Figura 10.13 - Princípio de funcionamento do sensor.

Figura 10.14 - Exemplo de um sensor de vazão produzido pela LAO Indústria.

10.5.4. Rotor de vazão magnético-eletrônico

Possui paletas que giram de acordo com o fluxo, permitindo que a taxa de vazão seja monitorada e controlada.

- Sensor isolado do fluxo;
- Alta confiabilidade;
- Robusto e resistente;
- Nível de fluxo ajustável;
- Suporta pressões de 60 bars.

Para detectar fluxos de gases e líquidos em tubulações. O nível de fluxo a ser detectado pode ser ajustado de 10% a 100% da área de passagem interna. O sinal de saída é um contato NA, acionado quando o nível de fluxo atinge o limite determinado no ajuste.

O movimento preciso do êmbolo faz com que o sensor tenha boa repetitividade. Seu funcionamento não se prejudica por eventuais retornos de fluxo.

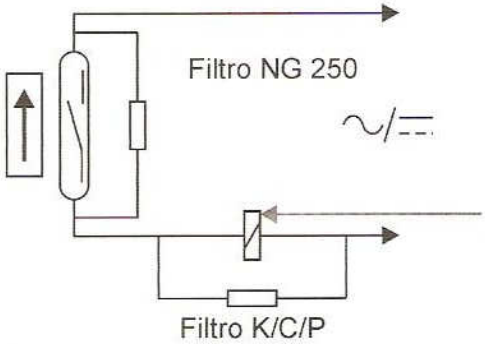


Figura 10.15 - Sensor de fluxo para líquidos e gases modelo FC34B02 fabricado pela ICOS.

Características Técnicas	
Vazão recomendada	50 L/min
Área de passagem	266 mm²
Pressão máxima de trabalho contínuo	10 bars
Pressão de pico	60 bars @ 5s
Sinal de saída	contato REED N.A. 220 V - 20 VA - W
Construção	Corpo injetado em poliacetal com insertos de latão na rosca de conexão, mola interna de inox 304
Peso	450 g
Resistência a produtos químicos	Água, cloro, óleo, hidrocarbonetos alifáticos, éteres, ésteres e aldeídos

IMPORTANTE: Nunca acoplar diretamente uma carga elétrica no contato do sensor. Usar sempre um relé ou um contator auxiliar, sempre com filtro supressor na bobina.

10.6. Ultra-Sônicos

Os medidores de vazão ultra-sônicos são instrumentos que operam a partir de transdutores colocados externamente à tubulação, não sendo necessária a introdução de nenhum sensor em contato com o fluxo e dispensando o seccionamento e parada das linhas. Possuem um princípio de medição extremamente interessante, que resultou em duas formas de aplicação dos ultra-sons: o efeito Doppler para fluidos com sólidos e o do tempo de trânsito para fluidos limpos (baixo índice de resíduos e hidrocarbonetos), podendo ser utilizados em praticamente todos os líquidos industriais nas mais diversas condições. Na figura 10.16a são ilustrados detalhes de instalação.

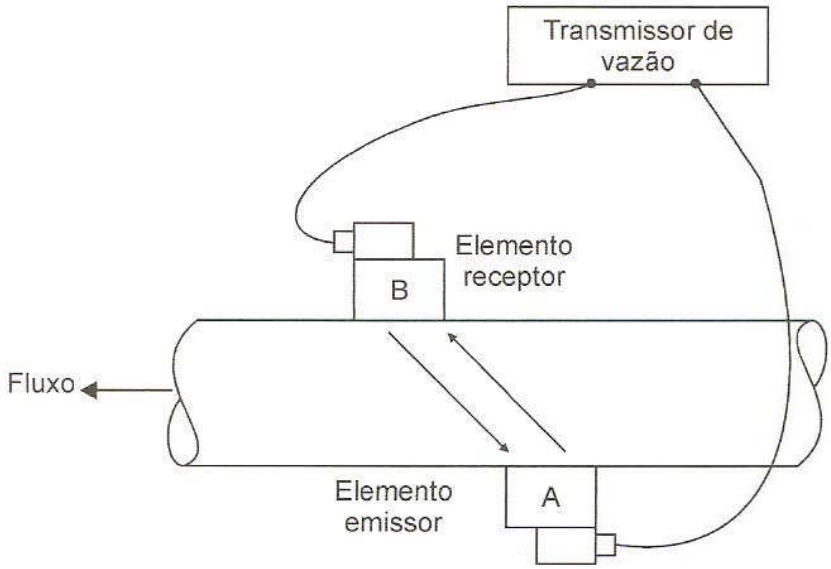


Figura 10.16a - Detalhe de instalação de um sensor ultra-sônico.

As equações para medição de vazão pelo tempo de trânsito são mostradas a seguir:

$$Q = S \times V \qquad \text{equação 10.8}$$

$$V = c^2 * \Delta T / 2 * d \qquad \text{equação 10.9}$$

Em que:

- **S** é a área da seção do tubo
- **H** é a altura da coluna d'água
- **d** é a distância entre os transdutores

$\Delta T = (T_{A \Rightarrow B} - T_{B \Rightarrow A})$ é a diferença entre o tempo gasto para o som sair do transdutor 1 e chegar ao transdutor e vice-versa.

Os medidores ultra-sônicos por efeito Doppler só devem ser usados com fluidos que tenham partículas em suspensão. O transmissor emite pulsos de ultra-som de freqüência conhecida e as partículas em suspensão no fluido refletem parte das ondas emitidas para o receptor (ver figura 10.16b). Como as partículas estão em movimento, as ondas são captadas

pelo receptor em freqüência diferente da transmitida, e a diferença será tanto maior quanto maior a velocidade (maior vazão).

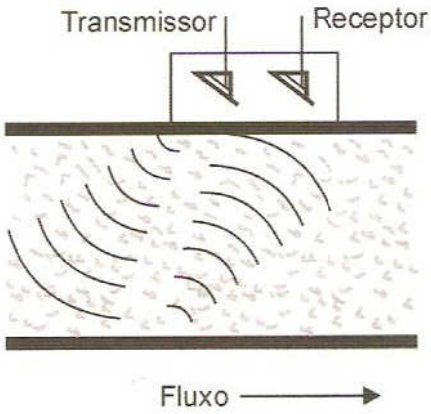


Figura 10.16b - Ultra-sônicos por efeito Doppler.

10.6.1. Efeito de Coriolis

O princípio de operação do medidor Coriolis é composto por dois tubos (sensor) em forma de U, posto a vibrar em sentido ortogonal ao escoamento. Quando o fluido passa pelos tubos, a combinação das velocidades angular e linear dá origem à aceleração de Coriolis, a força gerada produz uma torção no tubo que é proporcional à vazão mássica em escoamento. A figura 10.17 ilustra o funcionamento deste princípio.

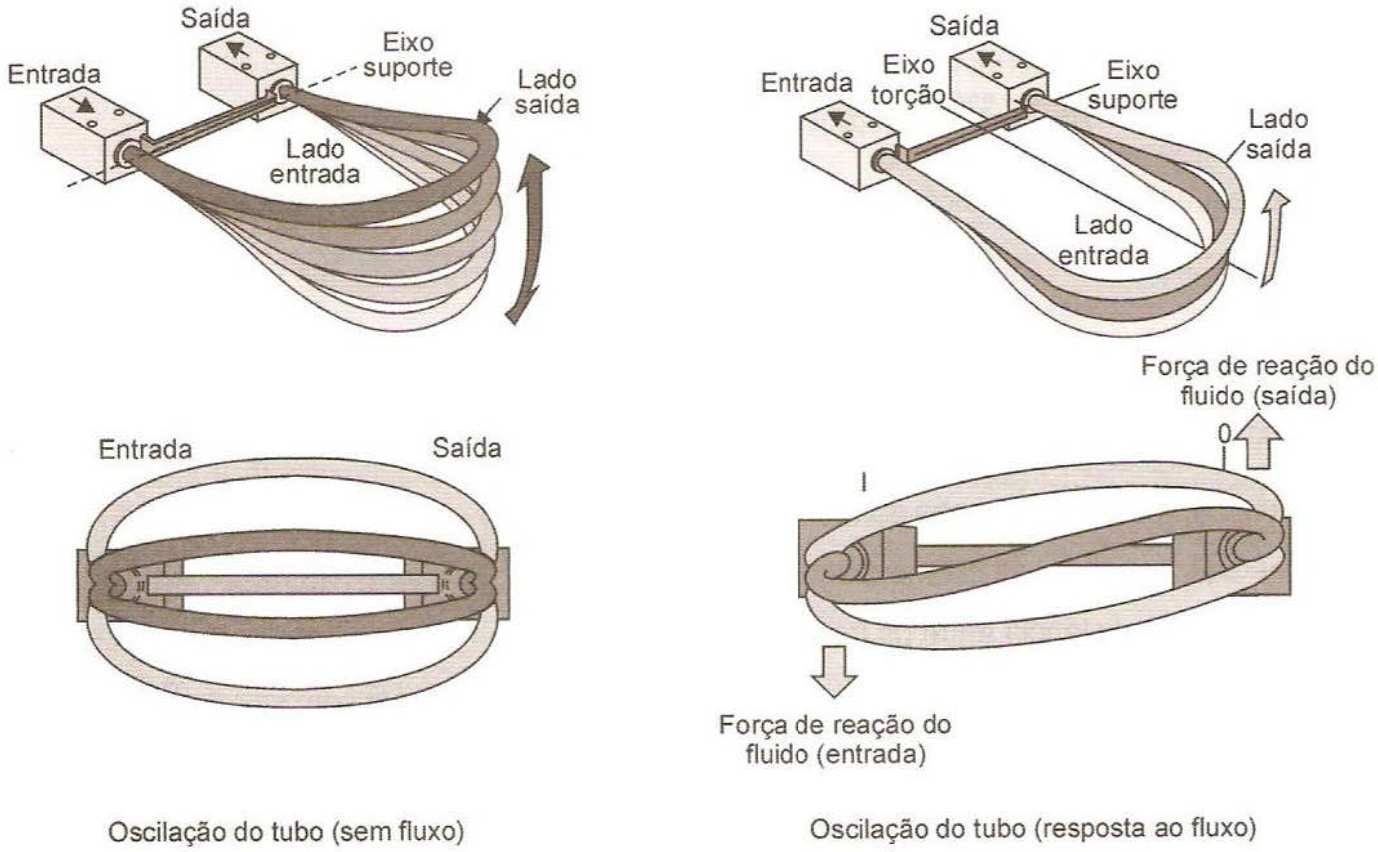


Figura 10.17 - Princípio de funcionamento do sensor Coriolis.

A massa específica do fluido é determinada utilizando um princípio diferente. É induzida uma vibração no tubo que tem freqüência natural de oscilação dependente da massa total (fluido + paredes). Num período muito curto de tempo, o tubo pode ser considerado em movimento de rotação. Considera-se um elemento de fluxo de massa numa das partes retas do U. Quando o elemento se afasta do centro de rotação, na parte inicial do seu percurso no tubo, a força de Coriolis ocorre em direção contrária à do movimento angular. O fluido acaba por adquirir a velocidade angular imposta pela oscilação do tubo, percorrendo a curva do U com esta velocidade.

Quando inicia a segunda parte do U, essa velocidade angular produz uma força em sentido contrário à primeira. Em se tratando de um escoamento contínuo, a cada elemento de fluido que se desloca na primeira parte do U corresponde simetricamente a um outro que se desloca na outra. Assim, as forças atuam de forma conjugada, provocando uma torção no tubo em U (ver figuras 10.17 e figura 10.18).

Unindo dois tubos com as mesmas especificações de diâmetro e material de fabricação pode ser determinada essa oscilação.

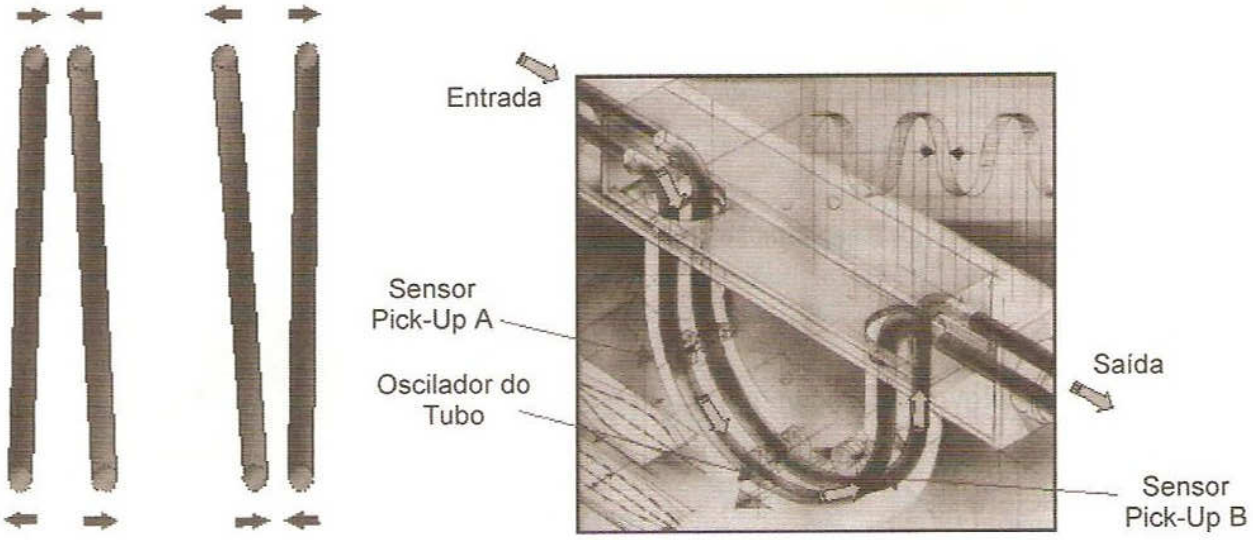


Figura 10.18 - Princípio de funcionamento interno do sensor Coriolis.

De acordo com o princípio de operação do medidor, pode-se inferir que ele só funciona adequadamente com fluidos homogêneos. Isso porque é necessária uma simetria de massas nos tubos, para haver uma correspondente de torção nos tubos. Por este motivo, o medidor suporta apenas quantidades pequenas de gás, em que o escoamento apresenta uma distribuição espacial de fases homogêneas, como no caso de escoamento em bolhas.

Na prática, observa-se que, em algumas condições, a fração de gás pode atingir até 20%. Neste caso, nota-se a perda de exatidão sem perder a precisão. Isso se deve ao fato de a densidade da mistura óleo+água+gás ser menor do que a densidade da mistura óleo+água, com o mesmo *water cut*, acarretando uma subavaliação no *water cut*.

O *water cut* é determinado correlacionando as massas específicas da mistura (medida com o medidor), do óleo e da água.

As limitações são o tamanho máximo, que é limitado a tubulações de 6", o custo elevado, os limites de pressão e temperatura e, eventualmente, a alta perda de carga.

10.7. Medidor de vazão Vortex

Quando há uma passagem de fluidos através de um obstáculo, tal como um cilindro, turbilhões são criados em ambos os lados do obstáculo, e fluem percorrendo o tubo. Eles são chamados de "Turbilhões de Von Karman". A Figura 10.19 ilustra o funcionamento interno de um sensor de vazão Vortex.

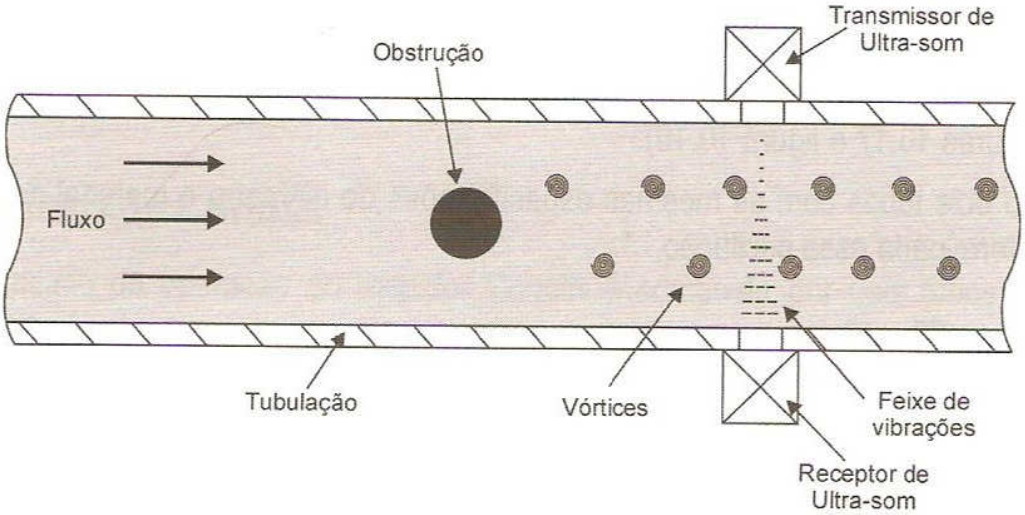


Figura 10.19 - Funcionamento de sensor de vazão Vortex com sensor ultra-sônico.

Se o número de Reynolds[1] for aproximadamente 10.000, o número de turbilhões que passam em uma determinada secção, e em um intervalo de tempo definido, é proporcional à velocidade do fluido.

Esses redemoinhos podem ser detectados pelos sensores ultra-sônicos instalados no tubo. Na figura 10.20 é mostrado um detalhe de um sensor de vazão Vortex comercial com sensor ultra-sônico.

Figura 10.20 - Sensor de vazão Vortex com sensor ultra-sônico modelo PhD fabricado pela EMCO[2].

---

[1] O número de Reynolds é dado por: $Rd = VD\rho/\mu$, sendo V = Velocidade, D = Diâmetro do objeto, ρ = Densidade, μ = Viscosidade.

[2] A EMCO Vortex PhD é fabricado pela EMCO Flow Systems, uma divisão da Spirax Sarco, Inc. www.emcoflow.com.

10.8. Sensor térmico

Muitas versões dos sensores de vazão pelo efeito térmico (por dispersão térmica) foram feitas desde o início do século. Hoje são industrializados dois tipos de sensores, os de alimentação constante e os de temperatura constante. No primeiro a alimentação do elemento aquecedor é mantida constante, e a vazão é medida pela diferença de temperatura entre este e o líquido. No segundo tipo é mantida uma temperatura constante entre o elemento aquecedor e o fluido. A variável medida neste caso é a diferença na alimentação do aquecedor, que é proporcional à vazão. A figura 10.21 ilustra a configuração básica do circuito comparador e a forma de instalação do sensor.

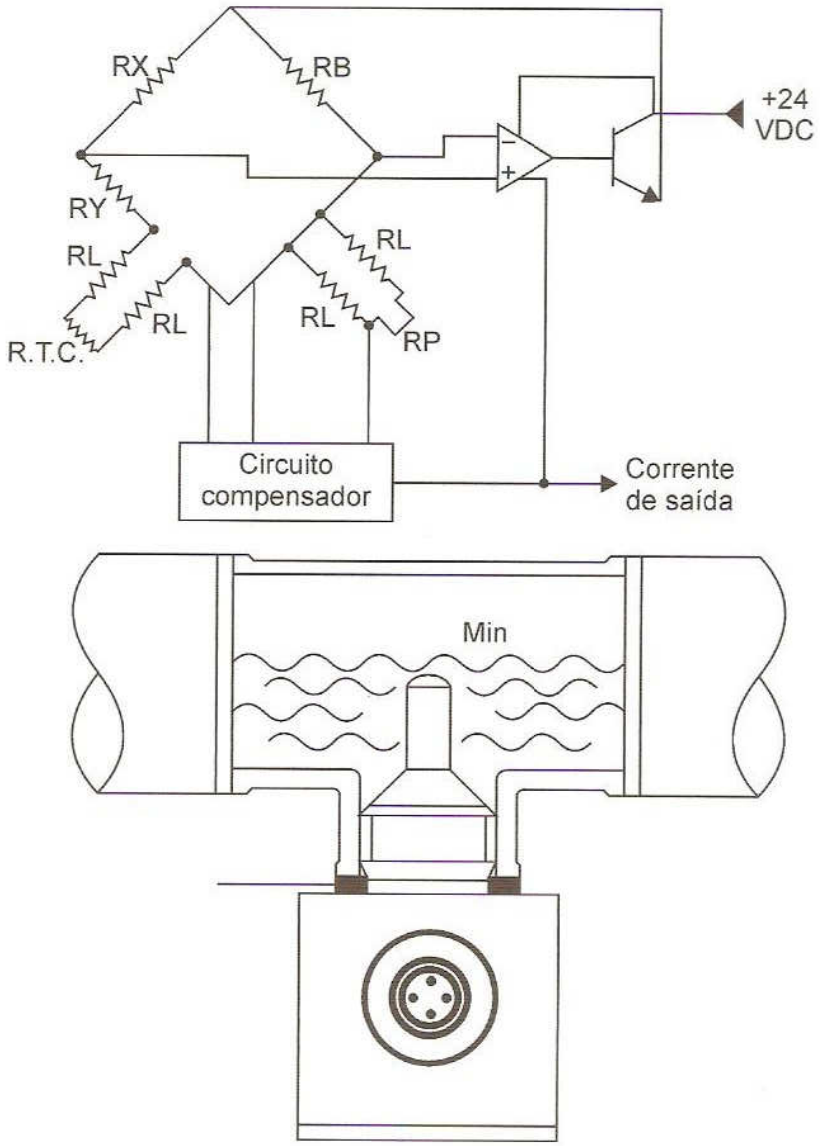


Figura 10.21 - Circuito básico e forma de instalação.

Observe na figura 10.22 o exemplo de um sensor a partir de uma resistência e dois sensores PTC´s. Com um mínimo de fluxo a temperatura da resistência cai, o circuito toma a temperatura do fluido como referência e a partir da diferença de temperatura entre os dois PTC´s, decorrente do fluxo, pode-se estabelecer uma curva característica e medir a vazão. Na figura 10.23 é mostrado um detalhe de fabricação de um sensor comercial.

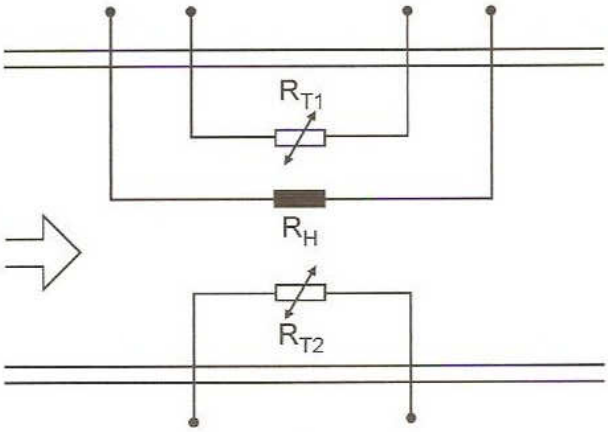


Figura 10.22 - Diagrama de um sensor de vazão térmico.

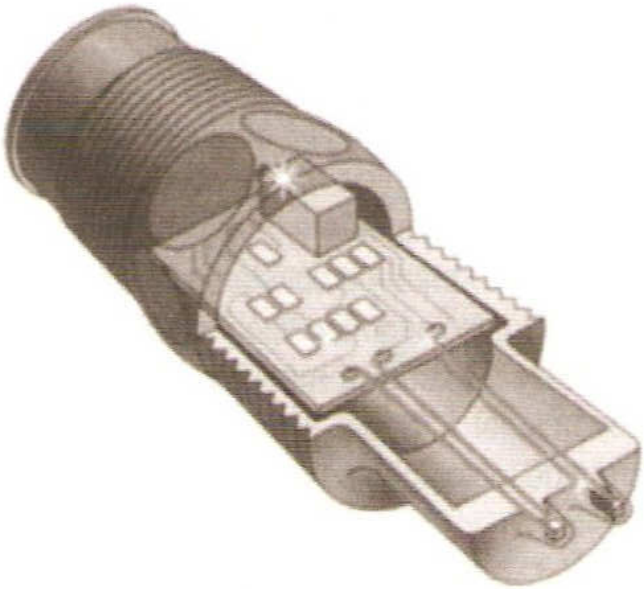


Figura 10.23 - Detalhes de fabricação do detector de fluxo modelo FT10 SERIES produzido pela FLOWLINE.

10.9. Engrenagens ovais

O medidor de vazão do tipo "engrenagens ovais" também é chamado de medidor de vazão de deslocamento positivo, pois as engrenagens ovais são deslocadas positivamente de acordo com a velocidade de escoamento do fluido. Na verdade, é o único medidor de vazão direta existente no mercado, uma vez que não depende de outros fatores para medir a vazão, por outro lado independe da condutividade do líquido a ser medido ou outras características do líquido, tais como: densidade, pH, etc.

Suas engrenagens ovais são equipamentos tipicamente utilizados para operações com líquidos viscosos, em que é freqüente a dificuldade de aplicar outros tipos de medidores.

Entre os medidores volumétricos, ele se destaca em virtude de sua concepção robusta e suas engrenagens ovais, assim como por ser um medidor de construção e princípio de funcionamento muito simples. Na figura 10.24 é mostrado um detalhe de fabricação de um sensor comercial.

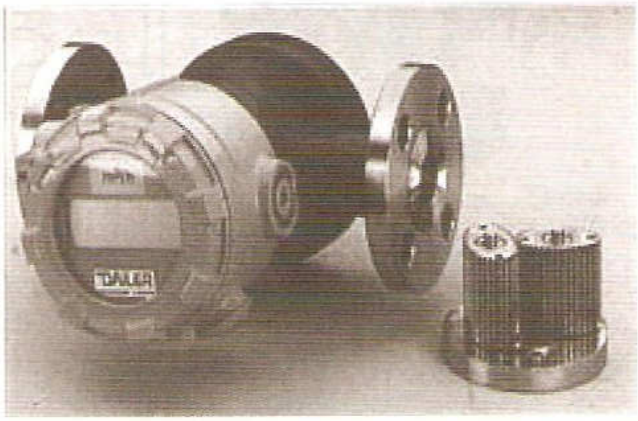


Figura 10.24 - Sensor de engrenagens modelo DP fabricado pela NYKON DWYLER.

10.9.1. Movimento das engrenagens

O elemento de medição é formado pelo par de engrenagens ovais que são movimentadas pelo fluido a ser medido. Ou seja, o diferencial de pressão através do medidor de vazão provoca forças em um par de engrenagens ovais, forçando-as a girar. O princípio de funcionamento é mostrado na figura 10.25

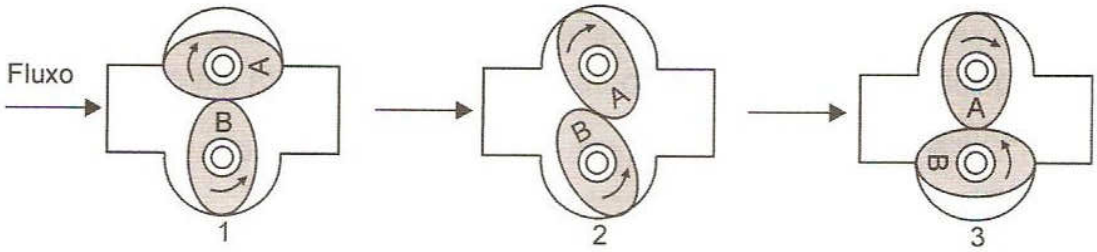


Figura 10.25 - Diagrama de funcionamento de um medidor de vazão por deslocamento positivo por engrenagens ovais.

Na **posição 1**, forças uniformes são exercidas em cada face do rotor B. Mesmo que fossem diferentes, o rotor B, que está hidraulicamente balanceado, não giraria. O rotor A é submetido a uma força uniforme na face superior, na qual possui quantidade conhecida de fluido entre o próprio rotor e o corpo do medidor, porém na outra extremidade não existe a ação dessa força. Como a pressão a montante é maior que a pressão a jusante, o rotor A gira no sentido horário e o rotor B gira no sentido inverso.

Na **posição 2**, enquanto existe o escoamento do fluido da câmara superior, a movimentação do rotor B permite o preenchimento da câmara inferior. O contínuo diferencial de pressão, existente entre a montante e a jusante, resulta no movimento contínuo das engrenagens.

Na **posição 3**, uma mesma quantidade do fluido está retida entre o rotor B e o corpo do medidor. Enquanto houver vazão, as engrenagens vão se movimentar de forma proporcional à velocidade do fluxo. Sendo assim, cada rotação do par de engrenagem desloca um volume exato e predeterminado de líquido dentro da câmara de medição do medidor. Com isso o número de rotação das engrenagens ovais é diretamente proporcional ao volume medido.

Na construção das engrenagens, pastilhas magnéticas são alojadas em seus corpos de forma que, a cada revolução, atuem sensores na face externa do corpo do medidor.

Características

- Alta precisão: +/-0,2% do valor medido;
- Alta "repetibilidade": +/-0,05%;
- Amplo *range* de medição aplicado p/ viscosidade de até 100.00 cP.

De acordo com a unidade de indicação, o medidor pode possuir um transmissor de sinal para indicação da vazão a distância e, nesses casos, utiliza-se de sinais de saída dos mais diversos, tais como pulsos; corrente 4 - 20 mA, 0 - 20 mA; tensão 0 - 5 V, 1 - 5 V, 0 - 10 V, etc.

Em muitos casos, o medidor pode ser também cego, ou seja, sem nenhuma indicação no campo, sendo então um medidor com indicação direta no sistema supervisório de controle. Essa indicação será realizada através do transmissor de sinal do medidor direto para o hardware do sistema, seja ele um CLP (Controlador Lógico Programável), um SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído), um controlador *multi-loop*, etc.

Desta maneira, conclui-se que esses medidores podem ter seu sistema de indicação ou de transmissão separados, ou ainda os dois sistemas em um só (indicador/transmissor). Pode também ser equipado com a transmissão de sinal, sinal a relé para alarme ou mesmo para o *start* de uma bomba.

Vantagens

- Alta confiabilidade;
- Longa vida útil de trabalho;
- Fácil manutenção;
- Suporta alta temperatura de trabalho até 290ºC;
- Trabalha sem restrições em alta pressão;
- Gera baixa perda de carga.

Os medidores de engrenagens ovais têm a capacidade de trabalhar de uma maneira simples somente com indicação local, mas poderão inclusive compor o mais complexo sistema de controle com a mesma eficácia e versatilidade.

Essa versatilidade aplica-se igualmente ao fato de poderem ser aplicados em variados tipos de líquido e em qualquer condição de operação, mesmo em situações em que o líquido possua sólidos em suspensão. Nesses casos, o medidor deve utilizar engrenagens ovais com perfil especial e sistema de filtragem na entrada do medidor, o qual deve ser especificado conforme o fluido e demais condições de operações pelo próprio fabricante do medidor.

Aplicações

Podem ser aplicados em inúmeras medições de vazão, desde as mais comuns até as mais complexas, inclusive em casos em que outros medidores de vazão já foram testados sem sucesso, ele pode ser aplicado sem nenhuma restrição e funcionar de acordo com suas características de precisão, repetibilidade, longevidade, confiabilidade, etc.

Esse medidor pode ser usado em qualquer tipo de indústria, principalmente nas áreas petrolífera, petroquímica, química, alimentícia, farmacêutica, tintas e vernizes, celulose e papel, cimento e derivados, siderúrgica, metalúrgica, geração de energia, em casos de empresas de armazenamento e distribuição de produtos químicos e petroquímicos, em carregamento de caminhões-tanque, carregamento de navios, abastecimento de veículos, etc.

O medidor de câmara simples pode ser empregado, dependendo das condições de operação de processo, para medição de líquidos, tais como: GLP, ácidos, bases, álcool, solventes, dispersões, polímeros, aditivos, resinas, tintas, colas, asfaltos, etc.

Já nos processos cujas condições são mais severas (petróleo bruto, líquidos brutos, petróleo intermediário, petróleo refinado, GLP, querosene, óleos combustíveis, enxofre líquido, etc.), a utilização desses medidores deve ser com câmara dupla, visto que os de câmara simples não têm capacidade de suprir as necessidades diante de processos em condições severas. Os medidores de câmara dupla também são utilizados em estações de medição de empresas produtoras e distribuidoras de álcool e derivados de petróleo, bem como eletrodutos e processos de transferência entre empresas para efeitos contábeis.

10.10. Tabela comparativa dos sensores de vazão

A tabela seguinte mostra algumas informações comparativas da utilização em líquidos de alguns dos medidores estudados anteriormente. Não deve ser considerada uma referência absoluta. São apenas informações obtidas de fabricantes.

Tabela 10

Princípio	Aplicação	Perda de pressão	Precisão aproximada %	Comprimento prévio nº de diâmetro	Sensibilidade à viscosidade	Custo relativo
Bocal	Líquidos comuns.	Média	±1/±2 da escala	10 a 30	Alta	Médio
Coriolis	Líquidos comuns, viscosos, alguma suspensão.	Baixa	±0,4 da proporção	Não há	Não há	Alto
Engrenagens ovais	Líquidos viscosos sem suspensões.	Alta	±0,5 da proporção	Não há	Baixa	Médio
Eletromagnético	Líquidos condutivos com suspensões.	Não há	±0,5 da proporção	5	Não há	Alto
Placa de orifício	Líquidos comuns. Alguma suspensão.	Média	±2/±4 da escala	10 a 30	Alta	Baixo
Rotâmetro	Líquidos comuns.	Média	±1/±10 da escala	Nenhum	Média	Baixo
Tubo de Pitot	Líquidos sem impurezas.	Muito baixa	±3/±5 da escala	20 a 30	Baixa	Baixo
Tubo de Venturi	Líquidos comuns. Alguma suspensão.	Baixa	±1 da escala	5 a 20	Alta	Médio
Turbina	Líquidos comuns. Pouca suspensão.	Alta	±0,25 da proporção	5 a 10	Alta	Alto
Ultra-sônico (Doppler)	Líquidos viscosos com suspensões.	Não há	±5 da escala	5 a 30	Não há	Alto

10.11. Medidor de vazão em válvulas

Uma aplicação particular dos medidores de vazão por pressão diferencial é o medidor de vazão em válvulas, que se baseia nas perdas de pressão singulares provocadas por esses equipamentos. Essa solução é muito econômica quando se tem uma válvula qualquer instalada em um sistema hidráulico. O princípio de funcionamento consiste em medir a pressão diferencial sobre a válvula e relacionar com sua abertura. Na figura 10.26 são mostrados os dispositivos que fazem parte da solução da medição de vazão em válvulas. Os dispositivos utilizados são: dois transmissores de pressão (ou um transmissor de pressão diferencial) e um sensor de posição.

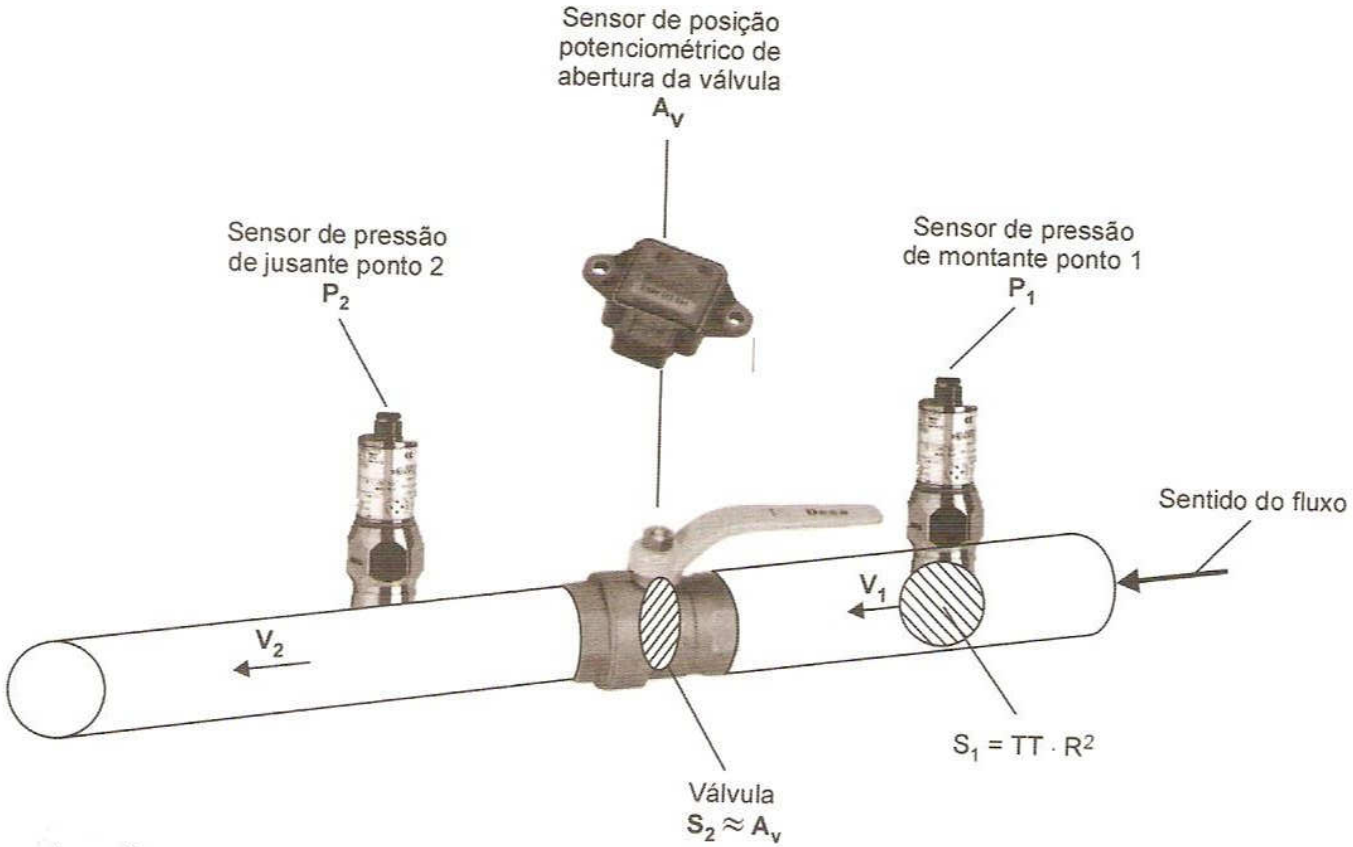


Figura 10.26 - Dispositivos que fazem parte da solução da medição de vazão em válvulas.

Uma válvula é um dispositivo que serve para controlar fluxo em uma tubulação fechada. Esta é uma grande variedade construtiva em função do tipo de fluido e do dispositivo de vedação (válvula globo, borboleta, comporta, etc.). Para fluidos incompressíveis pelas válvulas de controle, as leis de conservação de massa e energia são aplicadas.

Aplicando Bernoulli entre o ponto 1 e o ponto 2, temos:

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\rho \cdot g} \qquad \text{equação 10.8}$$

Sendo:

- P2 = Pressão a jusante (ponto 2);
- P1 = Pressão a montante (ponto 1);
- v_1 = Velocidade do líquido a montante;
- v_2 = Velocidade do líquido a jusante;
- ρ = Densidade do fluido em Kg/m^3;
- g = Aceleração de gravidade.

Ordenando os términos, temos:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} \qquad \text{equação 10.9}$$

Aplicando a equação de continuidade:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} = \left(\frac{Q^2}{S_2^2} - \frac{Q^2}{S_1^2} \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \qquad \text{equação 10.10}$$

De onde obtemos a vazão teórica como:

$$Q_{teórico} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho} \cdot \frac{1}{\frac{1}{S_2^2 - S_1^2}}} \qquad \text{equação 10.11}$$

Em que: $\Delta P = P_1 - P_2$, mostrado na figura 10.27.

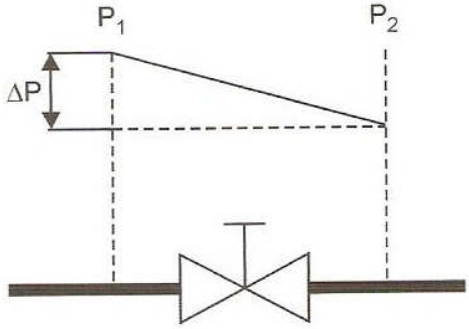


Figura 10.27 - Perda de pressão provocada pela válvula.

E como o ρ da água é igual a 1, tem-se que:

$$Q_{teórico} = \sqrt{2.\Delta P} \cdot \sqrt{(S_2^2 - S_1^2)} \qquad \text{equação 10.12}$$

O coeficiente de descarga é definido pela relação $C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}}$, ou seja:

$$Q_{real} = C_d \cdot Q_{teórico} \qquad \text{equação 10.13}$$

$$C_{real} = C_d \left(\sqrt{2 \cdot \Delta P}\right) \cdot \left(\sqrt{(S_2^2 - S_1^2)}\right) \qquad \text{equação 10.14}$$

O termo S_2 equivale à área de abertura da válvula e S_1 é a área transversal da tubulação.

Para efeito de calibração do sistema de medidor e regulador de vazão proposto, podemos considerar S_2 como:

$$S_2 = A_v^a \qquad \text{equação 10.15}$$

Em que A_V é a abertura da válvula em % enquanto C_d e a são os coeficientes de calibração a serem obtidos através da ferramenta Solver do Excel®.

Neste caso a equação a ser calibrada seria:

$$Q_{real} = C_d \left(\sqrt{2 \cdot \Delta P}\right) \cdot \left(\sqrt{(A_v^a)^2 - S_1^2}\right) \qquad \text{equação 10.16}$$

10.11.1. Medição de vazão com o uso do Cv

Podemos também estimar a vazão em válvulas pela utilização do C_v, que é o coeficiente de vazão da válvula. Os fabricantes normalmente informam o C_v em seus catálogos técnicos, o qual é usado nos cálculos de dimensionamento ou de verificação. Esse coeficiente foi definido com base na vazão de água. Assim, C_v é o número que exprime a vazão, em galões norte-americanos por minuto GPM, (1 GPM = 3,7854 litros/min), de água na temperatura de 70° F (21,1°C), fluindo através de uma válvula com perda de pressão de 1 psi.

As fórmulas recomendadas pelo *Fluid Controls Institute* para os cálculos das vazões de líquidos são:

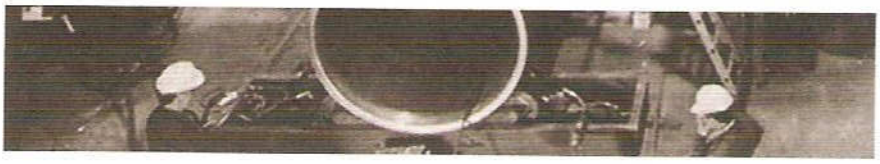
$$Q_G = C_v \left(\Delta P / D\right)^{1/2} \qquad \text{equação 10.17}$$

Sendo:

- Q_G = vazão em GPM
- C_v = coeficiente de vazão (informado pelo fabricante)
- ΔP = perda de pressão entre a entrada e a saída da válvula (psi)
- D = densidade da água a 70°F (21,1°C)

No caso da especificação de válvulas para controle de fluxo, a observação do coeficiente de vazão é muito mais crítica. Se esse coeficiente fosse muito maior do que o necessário, a regulagem seria difícil, pois uma pequena abertura da válvula já permitiria a passagem do fluxo desejado, dificultando a sensibilidade da regulagem. Caso o "C_v" da válvula seja inferior ao valor mínimo necessário, não é possível atingir a vazão desejada nas condições estipuladas, mesmo com a válvula totalmente aberta. A situação ideal seria aquela em que o "C_v" da válvula exigisse sua abertura total na condição de fluxo máximo. Como esta situação ideal é muito difícil de ser encontrada, na prática costuma-se escolher uma válvula cujo "C_v" esteja um pouco acima da necessidade, sendo a vazão máxima seria obtida quando a abertura da válvula estiver na faixa de 80 a 100%.

Por esta razão, freqüentemente as válvulas de controle apresentam um diâmetro nominal inferior ao diâmetro da tubulação na qual estão instaladas ou, então, possuem um orifício de passagem reduzido.



Capítulo 11

Sensores de Tensão, Corrente e Potência

Este capítulo trata dos sensores utilizados para medir grandezas elétricas para aplicações industriais e prediais. Atualmente existe uma tendência muito forte de utilizar equipamentos microprocessados de multigrandezas elétricas, pois facilitam as instalações e disponibilizam uma gama de diversos parâmetros elétricos por uma porta de comunicação serial (RS 485).

11.1. Corrente CC

Normalmente não se encontram com facilidade no mercado sensores lineares para medição de corrente contínua (CC) de valores elevados, contudo existem soluções atuais que permitem uma boa precisão com um custo razoável.

11.1.1. Resistor *Shunt*

Consiste em uma resistência de baixo valor colocada em paralelo com o circuito do qual se pretende medir a corrente (ver figura 11.1). Mede-se então a queda de tensão entre os terminais do dispositivo e amplifica-se o sinal. Pode-se utilizar tanto em circuitos com tensões contínuas como com alternadas.

$$I_{Shunt} = \frac{I_M \cdot R_{comp}}{R_{Shunt}}$$

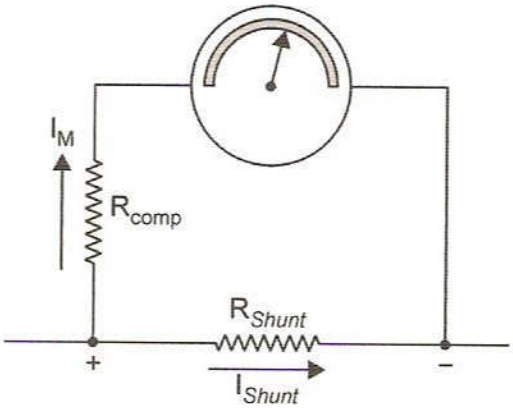


Figura 11.1 - Esquema de ligação de uma resistência *Shunt* para sensor de corrente.

11.1.2. Sensor de efeito *HALL*

O efeito *Hall* foi descoberto em 1879 por Edward E. Hall. Os sensores de *Hall* são constituídos de dispositivos semicondutores que sofrem influência de campo magnético. Por uma placa condutora passa a corrente do circuito e perpendicularmente tem-se um campo magnético, que faz gerar nas laterais da placa condutora uma diferença de potencial (Lei de Lorentz) o qual se conecta a um circuito de medição. Essa diferença de potencial chama-se Tensão de *Hall*.

Apesar de o efeito *Hall* existir em qualquer material condutor, ele é mais intenso em materiais semicondutores. Entretanto, os semicondutores apresentam variações de lote para lote, necessitando de um circuito eletrônico auxiliar para ajustar o sinal do efeito *Hall* para um valor calibrado do campo magnético. A grande vantagem do sensor *Hall* como elemento de medida do campo magnético é a capacidade de medir tanto campos contínuos como alternados em um único instrumento.

11.1.2.1. Teoria

O efeito *Hall* caracteriza-se basicamente pelo aparecimento de um campo elétrico transversal em um condutor percorrido por uma corrente elétrica, quando ele se encontra mergulhado em um campo magnético.

Considere a figura seguinte em que um filme de material semicondutor é percorrido por uma corrente elétrica constante. A distribuição de corrente nele é uniforme, e não existe diferença de potencial na saída (ver figura 11.2).

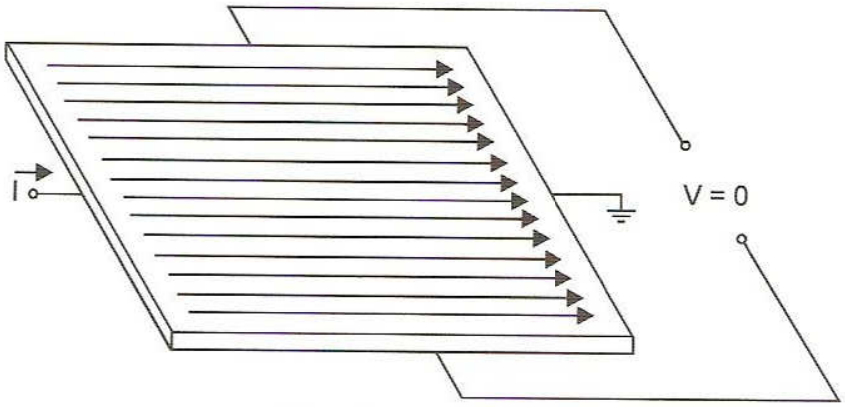


Figura 11.2 - Corrente em um condutor sem um campo magnético presente.

Na presença de um campo magnético perpendicular, o fluxo de corrente é distorcido. A distribuição resultante provoca o aparecimento de uma diferença de potencial (ddp) entre os terminais de saída. Essa ddp chama-se tensão *Hall* (ver figura 11.3).

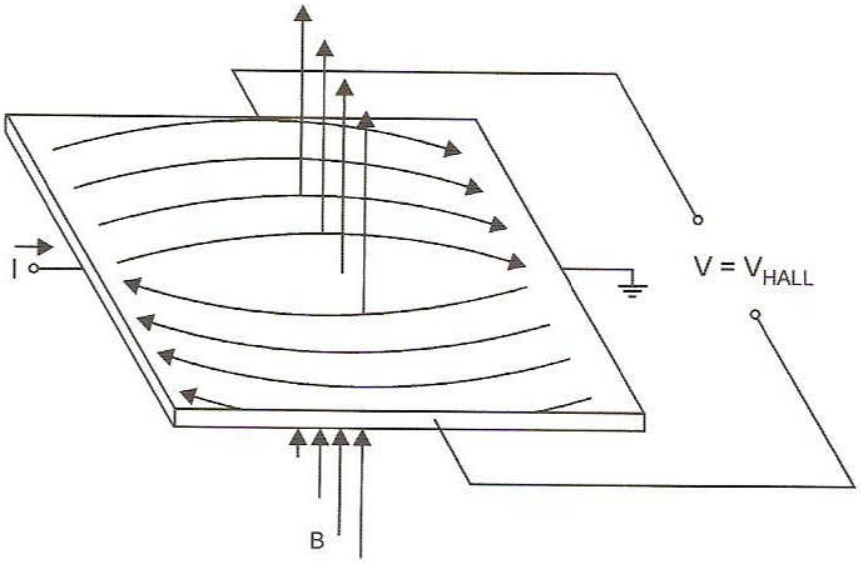


Figura 11.3 - Corrente em um condutor com a presença de um campo magnético perpendicular.

Uma equação que descreve superficialmente a interação entre campo magnético, corrente e tensão Hall é:

$$V_{HALL}=k \times I \times B \times sen\Theta \qquad \text{equação 11.1}$$

Sendo k uma constante, definida pela geometria do elemento *Hall* e pela temperatura ambiente, I a corrente que flui através do elemento e $B \times sen\Theta$ o componente do campo magnético perpendicular ao condutor.

11.1.3. Transformador CC

O transformador CC é um núcleo de ferro-silício do tipo toroidal, no qual são bobinados três enrolamentos secundários, dos quais dois com o mesmo número de espiras. Os três são ligados em série e aqueles com o mesmo número de espiras são ligados em oposição de fase. No primário é aplicada uma tensão pulsante e o condutor do qual se quer medir a corrente CC é instalado por meio do núcleo. A tensão de saída (V_0) sofre uma variação proporcional à corrente I, pois quanto maior I maior o campo ao redor do condutor que se soma ao campo no núcleo ou se subtrai (ver figura 11.4).

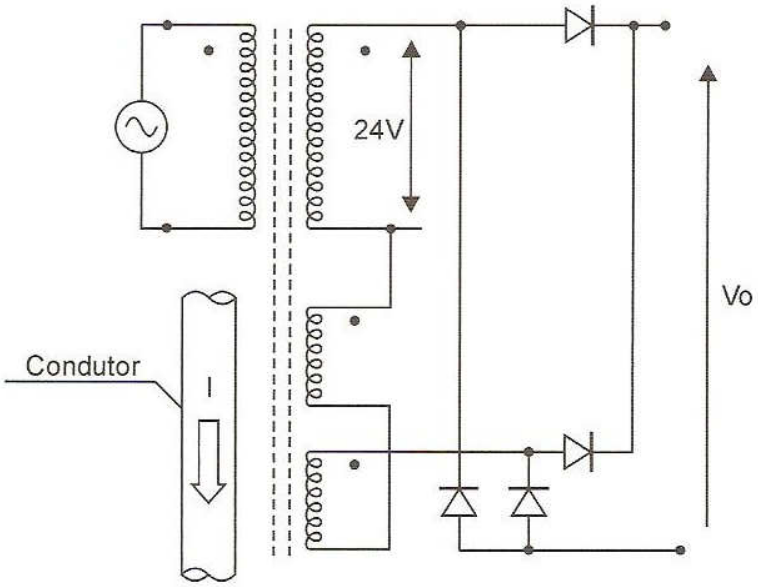


Figura 11.4 - Transformador CC.

11.1.4. Relé térmico - relé de sobrecarga de corrente

Dispositivo de proteção para motores de corrente alternada, e eventualmente para aplicações em corrente contínua, cuja operação é produzida pelo movimento relativo de elementos mecânicos sob a ação de determinados valores de corrente nos circuitos de entrada. A figura 11.5 mostra aspectos construtivos de um relé térmico.

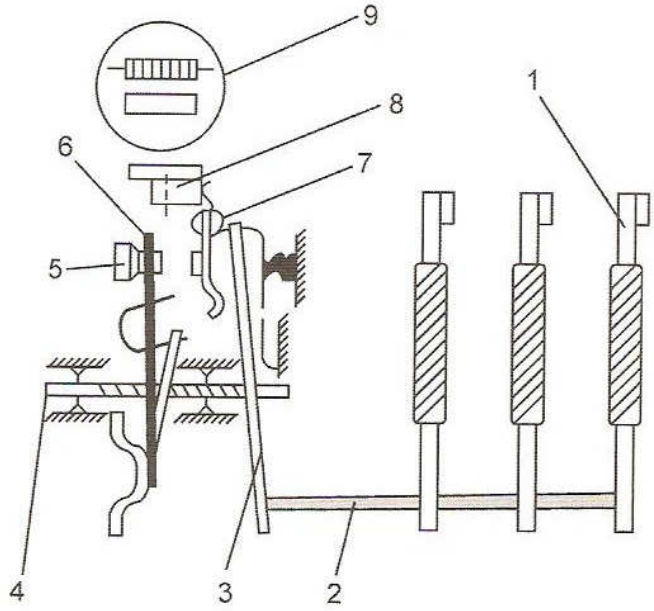


Figura 11.5 - Constituição de um relé térmico.

1. Lâmina bimetálica com resistência de aquecimento
2. Plaqueta de alavanca de desarme
3. Bimetal de compensação de temperatura
4. Alavanca de desarme
5. Contato fixo NF
6. Contato móvel (do tipo reversor)
7. Contato fixo NA
8. Botão de regulagem
9. Escala de faixa de corrente

Na figura anterior está representado esquematicamente um relé térmico de sobrecarga, que pode ser dividido em duas partes:

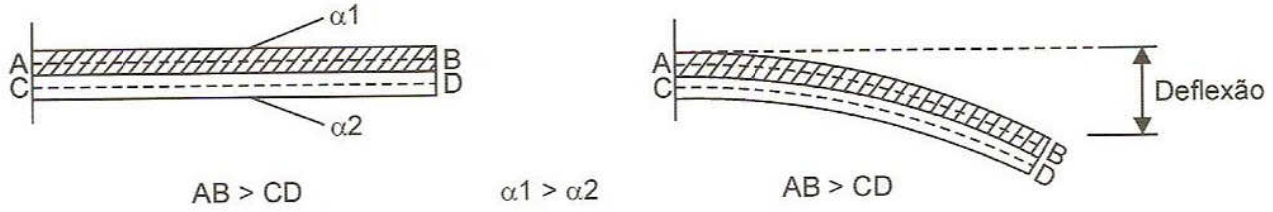
- Circuito principal ou de potência;
- Circuito auxiliar ou de comando.

O circuito principal é composto por uma carcaça de material isolante (chamada carcaça térmica), três bimetais de aquecimento (parte 1 da figura), alavanca de desarme (parte 2 da figura), terminais de entrada (1,3,5) e terminais de saída (2,4,6).

O circuito auxiliar consiste basicamente em contatos auxiliares (do tipo reversor, parte 6 da figura) pelos quais circula a corrente de comando, botão de regulagem (parte 7 da figura) em que é feito o ajuste da corrente, botão de rearme (pode ser acionado tanto manual como automaticamente) e bimetal de compensação da temperatura (oferece condições ao relé de

operar na faixa de –20°C a 60°C sem modificação da curva de desarme, (parte 3 da figura), que se encontram na carcaça de ligação.

Com a circulação da corrente acima da nominal do motor (para a qual o relé está regulado), os bimetais curvam-se porque o bimetal é composto de dois materiais com coeficientes de dilatação diferentes: a curvatura do bimetal se dá para o lado do material de menor coeficiente, como mostra a figura 11.6.



α = Coeficiente de dilatação linear

Figura 11.6 - Princípio do bimetal.

Quando a corrente que está circulando é a nominal de motor, a curvatura dos bimetais ocorre, mas não é suficiente para o desarme do relé.

No caso de uma sobrecarga, os bimetais apresentam uma curvatura maior. Com isso ocorre o deslocamento da alavanca de desarme. Esse deslocamento é transferido ao circuito auxiliar, provocando, mecanicamente, o seu desarme.

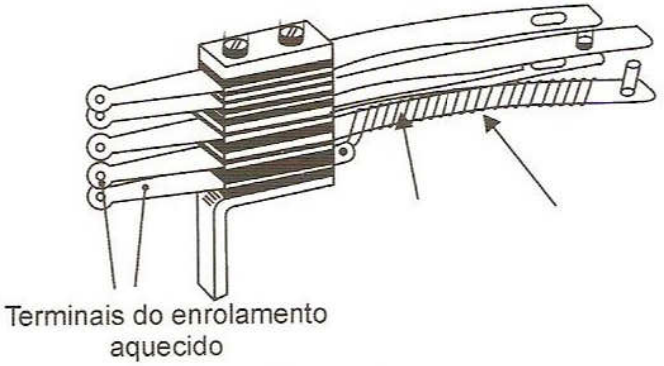


Figura 11.7 - Relé térmico.

Aquecendo a mola bimetálica com um enrolamento de resistência de níquel-cromo, os dois metais, tendo os coeficientes de dilatação muito diferentes, dilatam-se desuniformemente e durante um certo tempo (da ordem de alguns segundos), há o encurvamento da mola bimetálica, levando ao acionamento dos contatos. Na figura 11.7 é mostrado um relé térmico com enrolamento de níquel-cromo.

A figura 11.8 apresenta um relé térmico no qual o tempo (em função da temperatura) de funcionamento pode ser variado entre certos limites agindo sobre uma mola de regulação.

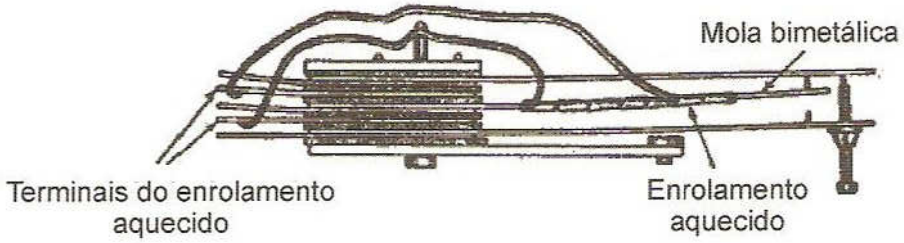


Figura 11.8 - Relé térmico com parafuso de regulação.

Os relés térmicos são usados naqueles casos em que os intervalos de tempo entre duas sucessivas excitações são relativamente longos, porque a lâmina bimetálica requer um certo tempo de resfriamento para retornar para a posição de repouso, que pode alcançar também um minuto. A figura 11.9 mostra relés térmicos comerciais.

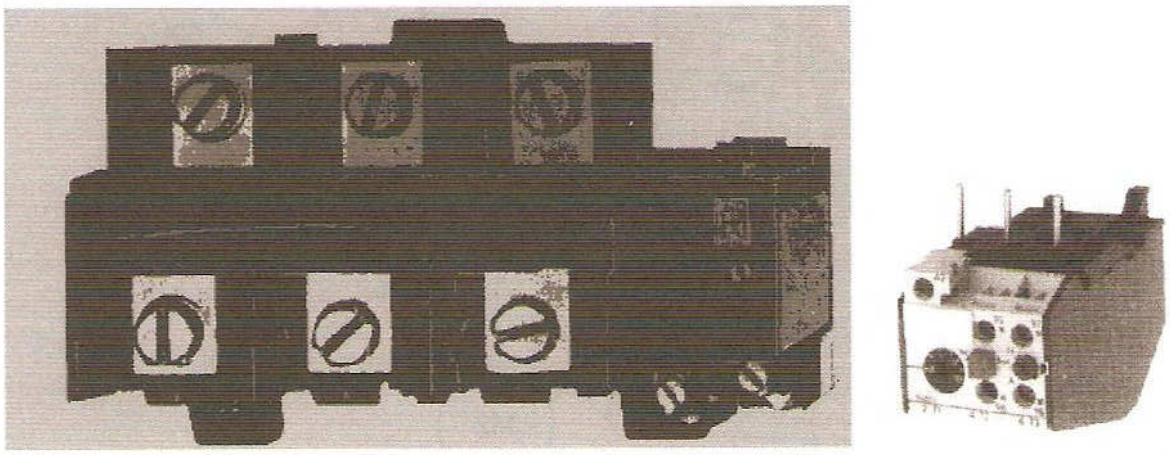


Figura 11.9 - Relé térmico usado no campo de proteção de motores produzido pela Siemens.

O inconveniente dos relés é que são sensíveis à temperatura do ambiente, que pode ser evitada por um parafuso de regulação ou por meio de uma segunda lâmina bimetálica compensatória, não aquecida, que vem disposta no lado inverso daquela que determina o funcionamento do relé.

O princípio de funcionamento dos relés térmicos resume-se à flexão de uma lâmina bimetálica, tendo poucos contatos (1NA e 1NF) e geralmente um só contato reversível.

Os relés térmicos possuem largo emprego em função da extrema facilidade de utilização e a segurança de funcionamento, no campo de proteção de motores. A figura 11.5 mostra um relé térmico fazendo parte de uma série de faixas para correntes nominais compreendidas entre 0,13 A e 630 A. Até uma corrente nominal de 110 A o relé é inserido diretamente, e para correntes superiores a inserção é feita por meio de um redutor de corrente incorporado.

11.2. Corrente CA

Assim como em CC, para sensor de correntes alternadas são utilizados os resistores "Shunt" e relé térmico, porém o dispositivo mais utilizado é o transformador de corrente - TC.

Os TC's são transformadores com corrente de saída padronizada entre 0 e 5 A (ou 0 e 1 A). Existem modelos para uma grande gama de corrente no primário (50 A, 100 A, 500 A, etc.) e especialmente projetados para utilização em sistemas de controle, em que a saída de 0 a 5 A foi integrada a um transdutor (A/mA), disponibilizando a saída em 4 a 2 0mA. A figura 11.9 apresenta circuitos de ligação de transdutores de grandezas elétricas.

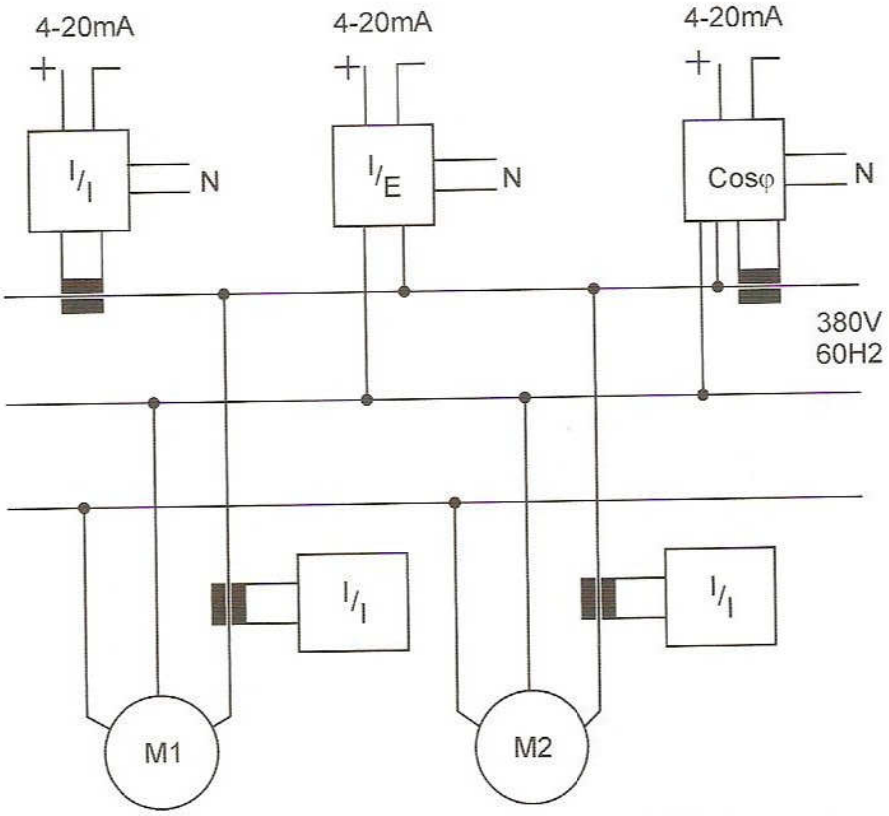


Figura 11.10 - Exemplo de transdutores de grandezas elétricas com saída em corrente.

Quando o primário de um TC está alimentado, o seu secundário nunca deve ficar aberto. No caso de precisar retirar o instrumento do secundário do TC, esse enrolamento deve ser curto-circuitado por meio de um fio condutor de baixa impedância, um fio de cobre, por exemplo. Vejamos as razões dessa precaução: como já foi dito, a corrente *I1* é fixada pela carga ligada ao circuito externo: se *I2* = 0, isto é, secundário aberto, não haverá o efeito desmagnetizante dessa corrente e a corrente de excitação *Io* passa a ser a própria corrente *I1*, originando, em conseqüência, um fluxo "ϕ" muito elevado no núcleo. Conseqüência dessa imprecaução:

- Aquecimento excessivo causando a destruição do isolamento, podendo provocar contato do circuito primário com o secundário e com o terra.
- Uma FEM induzida E2 de valor elevado, com iminente perigo para o operador.

Mesmo que o TC não se danifique, a esse fluxo "ϕ" elevado corresponde uma magnetização forte no núcleo, o que altera as suas características de funcionamento e precisão.

Por este motivo nunca se usa fusível no secundário dos TC's.

11.2.1. Tipos de TC

Conforme a disposição dos enrolamentos e do núcleo, os TC's podem ser classificados nos seguintes tipos:

1. **TC enrolado:** cujo enrolamento primário, constituído de uma ou mais espiras, envolve mecanicamente o núcleo do transformador (figura 11.11).

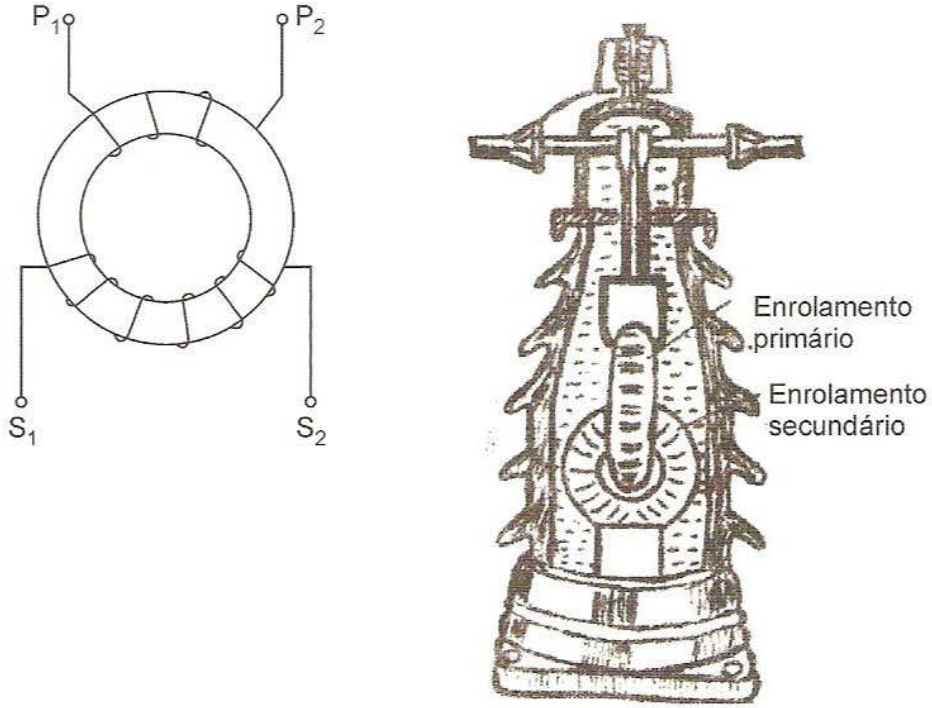


Figura 11.11 - TC enrolado.

2. **TC barra:** seu primário é constituído por uma barra, montada permanentemente pelo núcleo do transformador (figura 11.12).

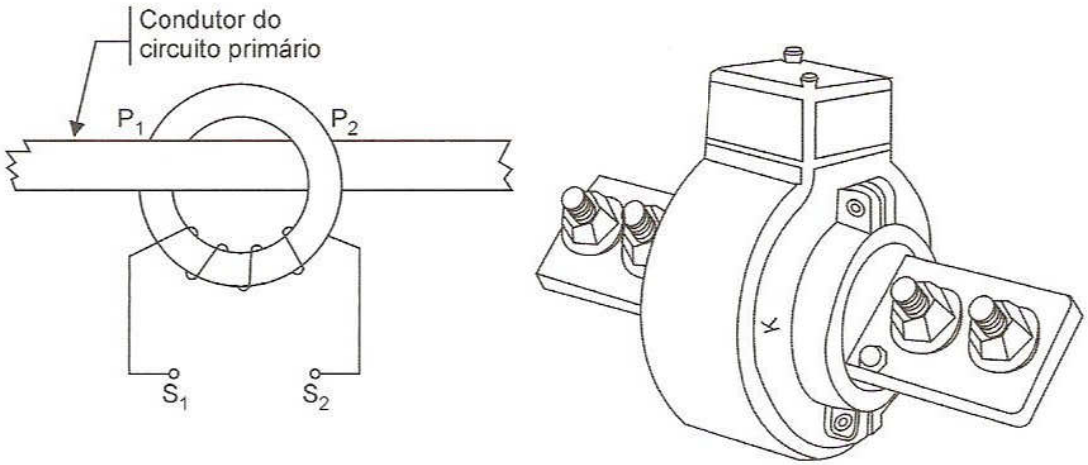


Figura 11.12 - TC barra.

3. **TC janela:** sem primário próprio, construído com uma abertura no núcleo, por onde passa um condutor do circuito primário, formando uma ou mais espiras (figura 11.13).

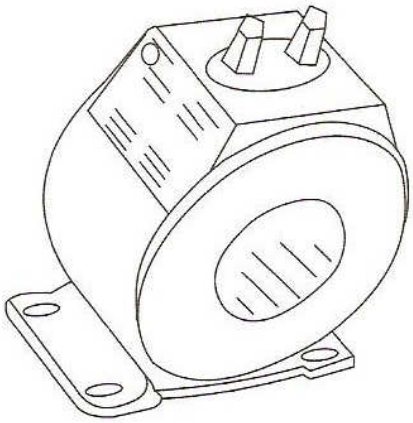


Figura 11.13 - TC janela.

4. **TC bucha:** tipo especial de TC, projetado para ser instalado sobre uma bucha de um equipamento elétrico, sendo parte integrante dele (figura 11.14).

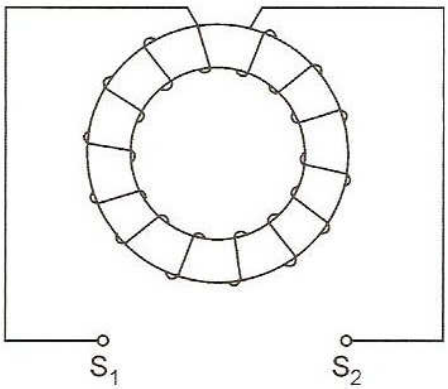


Figura 11.14 - TC bucha.

5. **TC de núcleo dividido:** tipo especial, em que parte do núcleo é separável ou basculante, para facilitar o enlaçamento do condutor primário. O amperímetro "alicate" nada mais é do que um TC de núcleo dividido, o qual possibilita medir a corrente sem a necessidade de abrir o circuito para colocá-lo em série (figura 11.15).

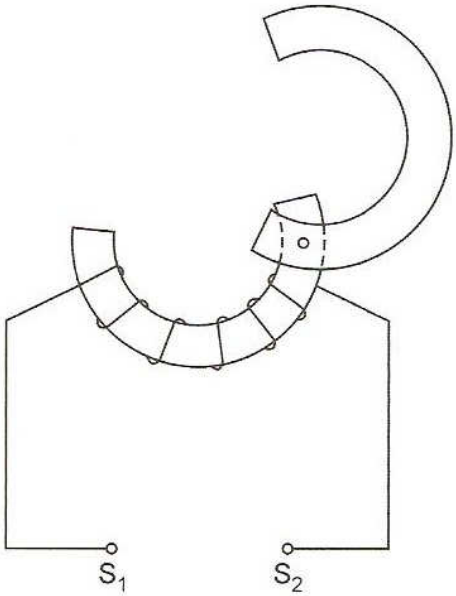


Figura 11.15 - TC de núcleo dividido.

Conforme a finalidade de aplicação, os TC's podem ser classificados nos dois tipos seguintes:

1. TC para medição (classe de exatidão 0,3%);
2. TC para proteção (classe de exatidão 0,6% ou 1,2%).

11.3. Tensão CC

Para medição de tensões CC o método mais utilizado é um divisor de tensão resistivo. A tensão a ser medida é aplicada nos terminais de dois resistores ligados em série e a amostragem é tomada nos terminais de um dos resistores. A proporcionalidade dessa amostragem é função da razão entre os resistores.

11.4. Tensão CA

Além dos divisores de tensão resistivos e eventualmente capacitivos (figura 11.16), para medição de tensão alternada o método mais utilizado é o transformador de potencial.

O TP consiste em um transformador cuja tensão de saída possui um valor padronizado em 115 V. Existem diversos modelos de potência e tensão do primário disponíveis, contudo quando se trata de uma aplicação em baixa tensão, utilizam-se pequenos transformadores de baixa potência de uso genérico (comercial) para coletar uma baixa tensão no secundário (0 a 12 V - por exemplo) proporcional à tensão a ser monitorada/controlada e então conectar ao circuito de controle.

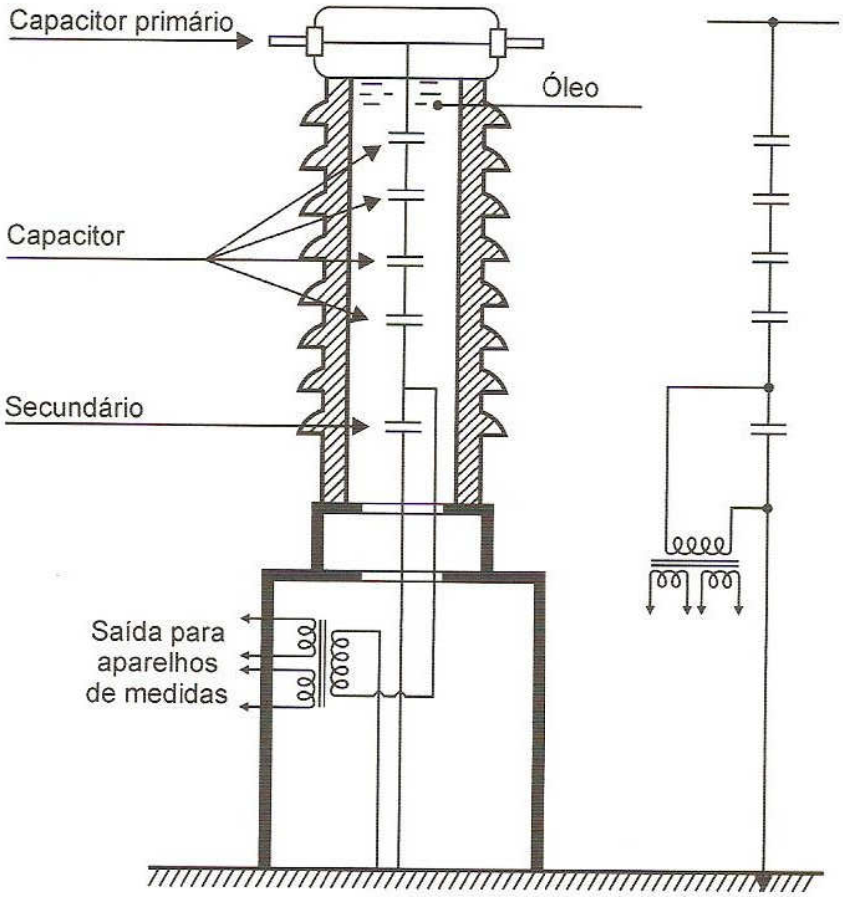


Figura 11.16 - Divisor de tensão capacitivo.

11.5. Transdutores de potência C.A.

Os transdutores de potência ativa (Watt) e reativa (VAr) convertem a potência C.A. em uma saída proporcional C.C. para serem usados com equipamentos de indicação, registradores, em controle de processos, etc.

São construídos com componentes de alta exatidão, conservando a precisão de 0,25% da leitura, incluindo variações de tensão, corrente, fator de potência e carga dentro dos campos especificados.

- Entrada e saída isoladas galvanicamente.
- Atendem a rigorosos testes contra surtos.

Os modelos combinados Watt/VAr indicam ambas as medições em um único aparelho, com saídas independentes, reduzindo espaços de utilização em painéis e principalmente custos.

Aplicação

Os transdutores cada vez mais adquirem importante papel no campo da medição e controle. Usadas em conjunto com instrumentos convencionais de bobina móvel ou registradores, essas unidades são convenientes para a indicação local ou remota, possibilitando reduções de custo nas instalações primárias e de operação. As modernas técnicas que empregam controle central com base em microprocessadores e funções de indicação dependem amplamente do uso de transdutores adequados.

Ligações

Os transdutores são ligados ao circuito a ser controlado por meio de transformadores de medição ou diretamente, dependendo da amplitude da grandeza a ser monitorada. Os transdutores fornecem um sinal analógico de corrente ou tensão contínua proporcional à função de entrada que está sendo medida, e devem ser instalados, sempre que possível, próximo à fonte a medir, sendo o sinal enviado ao ponto remoto para fins de indicação ou de processamento. A figura 11.7 exibe um esquema de ligação para compartilhamento do transdutor de corrente entre o indicador de corrente e o medidor de potência.

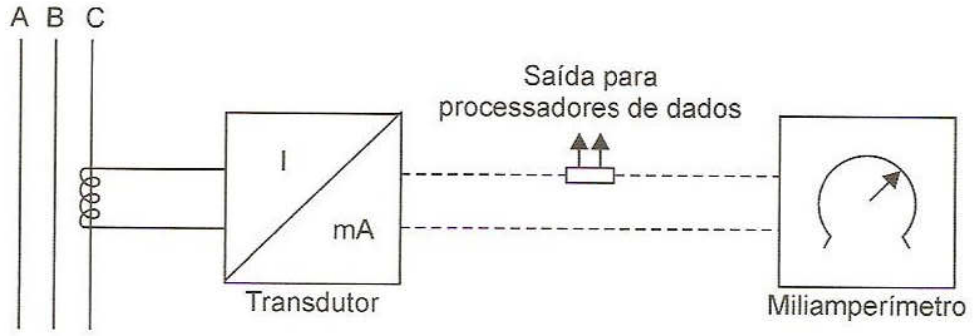


Figura 11.17 - Esquema de ligação para compartilhamento do transdutor de corrente entre o indicador de corrente e o medidor de potência.

Capítulo 12

Sensores de Umidade, Gases e pH

Este capítulo aborda os sensores utilizados para medição de umidade, gases, detectores de incêndio e pH.

12.1. Sensor de umidade

A umidade é o estado atmosférico determinado pelo conteúdo de vapor de água no ar. A atmosfera é constituída por vários gases diferentes, dos quais o vapor de água talvez seja o mais importante. A água pode existir como vapor, como líquido ou como sólido. A água em forma de vapor é umidade. **Umidade absoluta** é a quantidade real de água que o ar contém. É expressa em **gramas por metro cúbico de ar**. A umidade absoluta muda com a temperatura do ar.

O conteúdo de umidade do ar é expresso, geralmente, não em umidade absoluta e sim em **umidade relativa**. A umidade relativa é o quociente entre a quantidade de umidade presente a uma determinada temperatura e a máxima quantidade de vapor de água que o ar pode conter nessa temperatura.

O grau de umidade do ar depende de certas condições atmosféricas. A mais importante é a temperatura do ar. Quanto mais quente for o ar mais umidade pode absorver.

Quando a atmosfera contém todo o vapor de água que pode absorver a determinada temperatura, diz-se que o ar está **saturado**. Esse ponto de saturação é chamado **ponto de orvalho**. A quantidade de vapor de água que se encontra no ponto de orvalho está relacionada na tabela seguinte:

Temperatura	Concentração de vapor de água em gramas por metros cúbicos de ar
0°C	4,8
10°C	9,3
20°C	17,7
25°C	22,8
30°C	30,0
35°C	39,2

A umidade relativa é obtida por meio desta tabela e uma medição simples da quantidade de vapor de água existente no ar. Isso se faz esfriando água em um copo, com gelo. Quando a água

que o ar contém começa a condensar-se em fina camada na parte exterior do copo, significa que a água que se encontra dentro do copo alcançou uma temperatura para a qual o ar está saturado com a concentração do vapor de água que possui. Pode-se, então, lendo a temperatura da água do copo com um termômetro, obter da tabela anterior a concentração de vapor no ar.

Assim como a temperatura, pressão, vazão e nível, a umidade é uma das variáveis fundamentais nos processos industriais. A manutenção dos níveis de umidade, na maioria desses processos, pode significar um aumento na qualidade do produto, maior produtividade e menores custos de produção.

Em qualquer situação em que o excesso de umidade pode induzir ou influenciar química, física ou biologicamente nos processos, é muito importante assegurar uma contínua e precisa monitoração e controle da umidade relativa do ar. Para isso se utilizam os chamados sensores de umidade, os quais serão detalhados a seguir.

A utilização dos sensores de umidade ocorre nos seguintes setores:

- Indústria de papel e celulose;
- Químico/petroquímico;
- Alimentício;
- Têxtil;
- Materiais de construção;
- Indústria de fumo;
- Processos fotográficos;
- Produtos farmacêuticos;
- Secagem e armazenagem de grãos;
- Laboratórios em geral;
- Instrumentos meteorológicos;
- Artes gráficas;
- Museus;
- Tintas;
- Indústria eletroeletrônica;
- Salas de computação;
- Refrigeração e ar condicionado;
- Agricultura;
- Indústrias cerâmicas;
- Salas limpas;
- Confecção de cosméticos;
- Controle de poluição;
- Pesquisa e desenvolvimento;
- Conforto pessoal.

12.1.1. A escolha dos sensores de umidade

Ao escolher um sensor de umidade, deve-se usar uma faixa de medição na qual o sensor terá de funcionar a maior parte do tempo. Na prática, a maior parte dos problemas de medição de umidade industriais não envolve grandes faixas. Assim sendo, as primeiras perguntas a serem feitas são: o sensor deve funcionar a altos níveis de umidade, isto é, próximos à saturação, como seria o caso em um forno ou equipamento condicionador que manuseasse um produto úmido? Ou deve funcionar a níveis de umidade razoavelmente moderados, como seria o caso em um sistema condicionador de ar ou num ambiente com ar-condicionado? Ou deve ser aplicado a umidades muito baixas, como em linhas de ar de instrumentos ou gases de purga? As respostas a estas perguntas são os principais fatores na escolha de sensores.

O parâmetro de umidade pode ser expresso numa variedade de termos, tais como: umidade relativa, ponto de orvalho, partes por milhão (ppm), bulbo seco/úmido, gramas por metro cúbico, etc. Mas, independente do parâmetro que se queira medir, a primeira tarefa consiste em determinar os níveis de umidade que o sensor terá de manusear em sua aplicação normal.

Tabela 11 - Métodos para medição de umidade.

Parâmetro	Descrição	Medição	Aplicações típicas
Temperatura de bulbo úmido	Temperatura mínima alcançada por um termômetro umedecido em um fluxo de ar.	°C	Secadores de alta temperatura, condicionamento de ar, meteorologia, câmaras de ensaio.
Umidade relativa (UR)	A relação da pressão do vapor de água efetivo para a pressão do vapor de saturação, à temperatura do bulbo seco.	0-100%	Supervisão de salas de condicionamento, câmaras de ensaio, embalagem de produtos farmacêuticos e gêneros alimentícios.
Ponto de orvalho / congelamento	Ponto de orvalho é a temperatura à qual o ar deve ser resfriado para alcançar a saturação. Quando a temperatura é inferior a 0°C, chama-se ponto de congelamento.	°C	Tratamento térmico, atmosferas de recozimento, controle de secadores, controle de ar de instrumentos, medições meteorológicas/ ambientais.
Relação de volume ou massa	Partes por milhão (ppm) por volume é a relação da pressão parcial do vapor de água para a pressão parcial do gás portador quando seco. O ppm por peso é idêntico ao ppm por volume, mas a relação muda de acordo com o peso molecular do gás portador.	ppmp ppmv	Usado principalmente para garantir a baixa umidade de gases de processamento industrial, tais como: ar, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, etc.
Gramas por quilograma	Peso de água em gramas por quilograma de ar.	g /kg	Este parâmetro é muitas vezes usado em combinação com o ensaio de motores, túnel aerodinâmico, câmaras de vapor, etc.

Em muitas aplicações, os sensores de umidade funcionam 90% do tempo em uma faixa ou região muito estreita, e 10% do tempo em uma região bem distante da faixa normal. Raramente será possível usar um único sensor que apresente um desempenho adequado nas duas condições. É preferível usar dois sensores, cada um funcionando na região à qual melhor se aplica.

Não se deve esquecer que a temperaturas superiores a 100°C e à pressão atmosférica, o ponto de orvalho não pode exceder os 100°C. De um modo geral, são poucos os sensores de umidade que funcionarão acima de 95°C. Portanto, é preciso decidir se uma amostra do gás a ser medido poderá cair a uma temperatura menor antes de passar pelo sensor, sem provocar condensação de vapor d'água nas linhas de amostragem. Sempre que for possível, deve-se reduzir a temperatura do gás a uma faixa entre 5°C e 50°C. Isso permite maior flexibilidade na escolha dos sensores de umidade e é menos dispendioso do que usar um sensor de umidade destinado a funcionar a altas temperaturas.

12.1.2. Contaminantes (químicos e partículas)

Todos os sensores de umidade são suscetíveis à contaminação, cujos níveis variam muito com a aplicação. Isso diminui a precisão, aumenta o tempo de resposta e encurta a presumível durabilidade. Certos sensores são definitivamente danificados pela contaminação. Outros podem ser limpos ou reativados. Mas todos são afetados, em maior ou menor grau, pela constante presença de contaminantes nos processos industriais.

12.1.3. Precisão

Os engenheiros de instrumentação costumam procurar o instrumento mais preciso existente para a medição. Na instrumentação de umidade, a superespecificação da precisão pode constituir erro dispendioso. Nas aplicações industriais, as medições da umidade geralmente se limitam a uma precisão de +3%, e as medições de temperatura do ponto de orvalho a +0,5°C. Estas limitações aplicam-se a ambientes limpos. A contaminação pode reduzir estes valores para +5% para a umidade relativa e +1°C para o ponto de orvalho. Não se deve contar com precisões superiores a estes limites, a não ser em ambientes muito limpos. Muitas vezes, +5% de UR ou +2,5°C são absolutamente aceitáveis.

12.1.4. Manutenção

Os sensores de umidade requerem manutenção rotineira. Sua freqüência e grau são determinados pelo tipo de sensor e pelo nível de contaminação. Um simples psicrômetro de bulbo seco/úmido, funcionado no ambiente de um almoxarifado, talvez só requeira uma troca de pavio e inspeção do sistema de suprimento d'água semestral. Por outro lado, um higrômetro óptico de ponto de orvalho, controlando as atmosferas de carburização em um forno de

tratamento de calor, pode exigir que seu espelho seja limpo várias vezes ao dia, além de uma limpeza semanal completa das linhas de amostragem.

Certos elementos, tais como sensores de óxido de alumínio (troca de dispositivos de capacitância) e células Pope e Dunmore (troca de dispositivos de resistência), quando contaminados, perdem sua calibragem. Portanto, devem ser calibrados periodicamente. Outros, tais como as células de ponto de orvalho de cloreto de lítio e as células eletrolíticas de pentóxido de fósforo (P_2O_5), são dispositivos de medição primários, que não perdem facilmente sua calibragem. Quando contaminados, porém, devem ser limpos e reativados na oficina, o que requer um sensor de reserva para dar continuidade ao funcionamento.

Os sensores do tipo de condensação óptica são menos suscetíveis à perda de calibração, podendo ser reparados no próprio local, limpando a superfície sensora entretanto seu custo inicial é mais elevado.

Uma vez fortemente contaminadas, as células Pope e Dunmore (sensores de UR) e os sensores de ponto de orvalho de óxido de alumínio podem necessitar de substituição. Em tais aplicações, apesar de seu custo mais elevado, muitas vezes um sensor de ponto de orvalho do tipo condensação é a melhor escolha, pois não requer calibração depois da limpeza. Se as exigências de faixa e de tempo de resposta não forem demasiado rigorosas, um sensor de ponto de orvalho do tipo cloreto de lítio pode constituir um meio-termo conveniente.

Os níveis de contaminação determinam a freqüência de manutenção, entretanto não existem sensores de umidade que dispensem a manutenção completamente. Quando os níveis de contaminação são altos, deve-se usar um sensor que possa ser limpo fácil e rapidamente no próprio local, e que não exija calibração após a limpeza.

12.1.5. Exigências de durabilidade

As exigências de durabilidade variam de alguns meses (certas experiências científicas) até 20 anos (usinas de energia nuclear). Para uma durabilidade presumivelmente curta, devem ser considerados primeiro os sensores mais econômicos (células de ponto de orvalho, elementos de UR, óxido de alumínio, etc.). Para vida longa, geralmente a melhor escolha são os sensores do tipo condensação (devido a sua construção inerte).

12.1.6. Sistemas de amostragem

A maioria dos sensores de ponto de orvalho e de UR podem ser localizados diretamente no fluxo de gás ou operados por um sistema de amostragem. Entretanto, uma célula eletrolítica do tipo P_2O_5 precisa ser operada sempre com um sistema de amostragem e uma vazão constante, por exemplo de 100 cm^3/min. Quando as temperaturas do gás estão além da característica do sensor, ou quando a manutenção do sensor constitui problema, também é necessário usar um sistema de amostragem adequado.

Na presença de pontos de orvalho muito baixos (–50°C a –75°C), o modelo apropriado do sistema de amostragem é fundamental. Linhas de amostragem de aço inoxidável com todas as conexões isentas de vazamentos são indispensáveis. O custo das tubulações, guarnições e redutores de pressão do gás em aço inoxidável, necessários para a amostragem, muitas vezes excederá o de um higrômetro. Um exemplo de um sistema típico de amostragem é apresentado na figura 12.1.

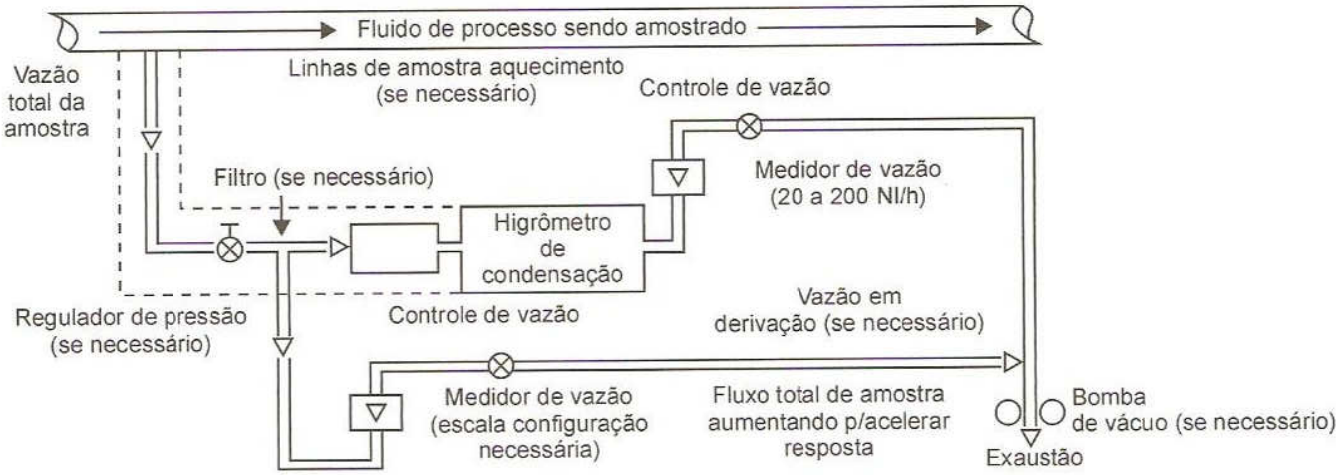


Figura 12.1 - Sistema de amostragem que permite obter vazão controlável, necessária a vários tipos de sensores.

12.1.7. Tempo de resposta

A maioria dos processos requer um tempo de resposta rápido (segundos), o que deve ser levado em consideração na escolha do sensor. Os sensores de condensação óptica, de célula Pope e célula Dunmore para a UR e os sensores de óxido de alumínio são de resposta rápida. Para respostas mais lentas (minutos), servem os sensores de ponto de orvalho de cloreto de lítio, com um tempo de resposta de três a cinco minutos.

12.1.8. Pressão

Certos sensores só podem ser usados a pressão ambiente. Outros podem ser usados a pressões que vão do vácuo até 20 kgf/mm² ou mais. Com pressões superiores a 20 kgf/mm², geralmente é mais econômico usar um sistema de amostragem com redutor de pressão. Outro fator a ser levado em consideração é que as medições do ponto de orvalho dependem da pressão, motivo pelo qual requerem que se conheça a pressão.

12.1.9. Custo

É preciso dispensar muita atenção ao custo inicial e ao custo a longo prazo (isto é, incluindo um estudo da substituição do sensor, assistência técnica, manutenção, etc.) A tabela 12 apresenta os custos relativos para instrumentos de umidade industrial.

Tipo de sensor	Custos relativos
Psicrômetro de bulbo úmido/bulbo seco	1 a 3
Higrômetros de ponto de orvalho de sal saturado	1,5 a 3,5
Sensores e indicadores de UR elétricos	2 a 5
Ponto de orvalho ou UR de óxido de alumínio (sensores de umidade elétricos)	2 a 7
Higrômetros eletrolíticos	3 a 8
Higrômetros de condensação óptica	3,5 a 14

Tabela 12 - Tipos de sensores e custos relativos.

12.1.10. Medição de conteúdo de umidade pela medição de umidade de equilíbrio

Com as curvas de sorção isotérmicas do material, podemos medir o conteúdo de água do material, medindo apenas a umidade relativa do ar (isso após o material estar em equilíbrio com o ar ambiente). Não é aplicável para medição de materiais não higroscópios como a areia por exemplo.

12.1.11. Conteúdo de água

O fenômeno que materiais sólidos são capazes de absorver e de reter água do ambiente é chamado de sorção.

Há distinção entre absorção e desorção. Para cada umidade relativa dada, há um conteúdo de água específico que é característica do material. Em relação à massa total de material úmido temos:

$$\text{Umidade } \Psi = 100.mw / (mtr + mw) \ (\%)$$

sendo: mw = massa de água

mtr = massa de substância seca

Em alguns tipos de indústria, como a madeireira, por exemplo, indica-se sempre em relação à substância seca.

$$\text{Umidade } \Psi tr = 100.mw/mtr \ (\%)$$

Para o mesmo conteúdo de água o valor Ψtr é maior que Ψ.

Exemplo: madeira com 1.000 g de substância seca absorvendo 200 g de água, o conteúdo de água Ψtr = 20% enquanto Ψ = 16,2%.

A relação entre umidade relativa e conteúdo de água do material é chamada de sorção isotérmica (isotérmica = temperatura constante). Com a variação da temperatura a curva de sorção isotérmica se desloca.

Exemplo: para madeira com umidade relativa do ar constante em 40% UR e temperatura variável teremos o conteúdo de água (% em peso) diferente (ver figura 12.2).

$$t = 20°C \rightarrow \Psi tr = 7\%$$

$$t = 80°C \rightarrow \Psi tr = 5\%$$

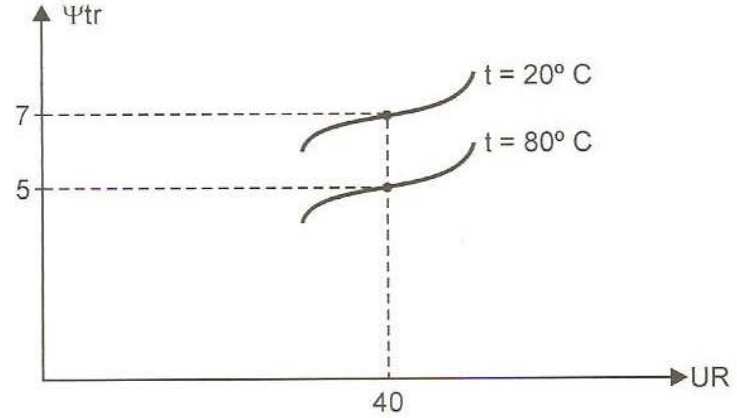


Figura 12.2 - Temperatura em função da umidade relativa.

12.1.12. Saturação

Exposições do sensor a umidades superiores a 90% por um período maior que 30 minutos podem levar a um fenômeno chamado absorção secundária, o que causa uma leitura maior que a real (aproximadamente 6%).

Essa histerese pode ser removida pela exposição do sensor ao ambiente normal, isto é, aproximadamente 50% UR por 24 horas. O sensor então retorna a suas características originais.

12.1.13. Princípios de medição

O princípio de medição da umidade relativa baseia-se em um sensor que opera de acordo com o princípio capacitivo de um filme fino composto de uma lâmina de tântalo e outra de cromo, tendo como dielétrico um polímero. A capacidade varia de acordo com a umidade relativa do ambiente. Da variação o instrumento faz a conversão eletronicamente, indicando a umidade relativa no display de cristal líquido.

Para umidade de equilíbrio de materiais usa-se um sensor do tipo lâmina ou do tipo penetração com o mesmo princípio de medição da umidade relativa. Essa leitura pode ser convertida em correspondente valor de conteúdo de água, com a ajuda de curvas isotérmicas. Para conteúdo de água há dois princípios:

- Sensor com princípio capacitivo;
- Sensor baseado no princípio de condutividade elétrica.

Todos os sensores enviam um sinal proporcional ao conteúdo de água, que depende do material medido.

Observação: Ar úmido é o ar seco que contém vapor de água.

Umidade absoluta: (dado em gramas/m³ de volume de ar - g/m³) 1 m³ de volume de ar que contém 15 g de água em diferentes temperaturas contém a "mesma" umidade absoluta, porém o ar quente (40°C) absorve mais vapor, diminuindo a umidade, e com ar frio (15°C) o ar não absorve tanto vapor, aumentando a umidade. Assim sendo, nota-se que com a umidade absoluta constante em unidade volume, com diferentes temperaturas há variações nas quais são analisadas diferentemente, isto é, há uma variação da umidade relativa.

Exemplo: com 1 m³ de ar contendo 15 g de água numa temperatura de 20°C temos aproximadamente 90% UR e com a temperatura de 40°C tem-se somente 30% UR.

12.1.14. Métodos para medição da umidade

12.1.14.1. Medições de Bulbo Úmido/Bulbo Seco (Psicrométricas)

A psicrometria é um método bastante popular de medir a umidade devido à sua simplicidade e baixo custo. Um psicrômetro industrial típico consiste em um par de termômetros (elétricos) conjugados, um deles equipado com pavio e reservatório automatizado para conservar o sensor umedecido. Limita-se, geralmente, a aplicações em que as principais exigências são baixo custo e uma precisão moderada.

O psicrômetro conta com certas **vantagens** inerentes:

- Sua precisão à saturação (UR de 100%) é superior à de todos os outros sensores de umidade. Os sensores de bulbo seco e de bulbo úmido podem ser ligados diferencialmente, a fim de permitir que a depressão do bulbo úmido (que se aproxima do zero à medida que a umidade relativa vai se aproximando dos 100%) seja medida com um mínimo de erro;
- Reparos simples e econômicos.

As principais **desvantagens** do psicrômetro são:

- A precisão é baixa a menos de 20% de UR, não funcionando abaixo de 10% de UR;
- Tem a tendência para congelar abaixo de 0°C;
- Não se presta a ambientes pequenos e fechados.

12.1.14.2. Ponto de orvalho do tipo de sal saturado

O sensor de ponto de orvalho de sal saturado (cloreto de lítio) é muito difundido devido à sua simplicidade, robustez, baixo custo e capacidade de ser reativado. É um sensor pouco dispendioso para medições em que uma precisão moderada e resposta lenta (tipicamente três minutos para uma mudança de 63%) podem ser toleradas. Seus campos de aplicação podem ser encontrados em almoxarifados, no controle de ar condicionado, monitoração de secadores, etc. Entre temperaturas de ponto de orvalho de aproximadamente –10°C e 40°C, esse dispositivo oferece uma precisão de ±1°C.

12.1.14.3. Sensores elétricos de umidade relativa

Existe uma variedade de sensores elétricos de UR, inclusive elementos Dunmore e células Pope. Esses sensores são relativamente econômicos, mas, uma vez contaminados, não têm reparo. São úteis em aplicações em que o gás é limpo e isento de contaminantes. Os sensores elétricos apresentam tempos de resposta muito mais rápidos do que o necessário para a maioria dos processos industriais. Costumam ser pequenos, podendo ser prontamente inseridos no fluxo de gás, geralmente por uma guarnição de pressão. São, portanto, utilizados onde o baixo custo, boa precisão e rapidez de resposta são os principais fatores, e o nível de contaminação é baixo.

12.1.15. Sensor de óxido de alumínio

Um sensor de óxido de alumínio é um capacitor com eletrodos de alumínio e ouro separados por óxido de alumínio. São freqüentemente usados em aplicações petroquímicas, em que baixos pontos de orvalho são controlados "em linha" e precisões mais baixas e outras limitações são aceitáveis.

Os sensores têm ampla faixa de medição, são pequenos e prestam-se a uso local. Podem facilmente medir pontos de orvalho até –75°C, podendo ser usados em disposições múltiplas. Não requerem resfriamento.

Há certas limitações. Os sensores não são uniformes e requerem freqüente calibragem separada. A precisão por longos períodos de tempo é baixa e a saída é não-linear. Os efeitos do envelhecimento, a histerese e a contaminação alteram a calibragem.

12.1.16. O higrômetro eletrolítico

O higrômetro eletrolítico usa uma célula revestida por uma fina camada de pentóxido fosfórico. É um dos poucos instrumentos que oferece desempenhos seguros na região de ppm baixos. Pode ser aplicado à maioria dos gases elementares inertes e a compostos orgânicos e inorgânicos que não reagem com o pentóxido fosfórico. O instrumento normalmente não pode ser usado com gases corrosivos, tais como alquinas, alcadinas e alquenas superiores ao

propileno. É um instrumento muito eficaz para controlar níveis de vapor d'água em gases limpos, inertes e secos.

Um instrumento típico tem a faixa de medição de 0 a 2.000 ppm. Um higrômetro eletrolítico típico fornece uma precisão de leitura de ±5%, tornando-o suficientemente preciso para a maioria das finalidades industriais.

Quando devidamente usado, o instrumento proporciona um serviço duradouro e de confiança. Em se tratando de um dispositivo essencialmente primário, não há necessidade de calibragem por ocasião da substituição da umidade. Comparada com os sensores de óxido de alumínio, a célula eletrolítica tem uma melhor precisão em ampla faixa de medição, não apresenta histerese e é mais fácil de ser calibrada. Sua resposta geralmente é mais lenta do que a do sensor de alumínio, mas este último constitui melhor escolha para controle "em linha" ou para um sistema de sensor múltiplo.

12.1.17. Higrômetros ópticos de condensação

O higrômetro de ponto de orvalho da condensação com detecção óptica - um dispositivo de medição fundamental - é um dos instrumentos mais precisos e seguros. Oferece ampla faixa de medição de ponto de orvalho e tem excelente repetibilidade, todavia é um sensor complexo e dispendioso. O higrômetro óptico de condensação proporciona precisão a longo prazo, superior a + 0,5°C em faixas de umidade muito amplas, tipicamente de 95°C a –75°C de ponto de orvalho.

O sensor de condensação está sujeito à contaminação por materiais que não sejam água, como, por exemplo, sais solúveis que se condensam na superfície refrigerada. Isso pode provocar leituras erradas. O instrumento tende, também, a controlar-se pelo mais alto componente do vapor presente no fluxo, e que pode não ser o vapor d'água.

Sua manutenção é simples. A maioria dos instrumentos usa câmaras de condensação que podem ser abertas, para permitir a limpeza do espelho com um pano.

O higrômetro óptico de ponto de orvalho presta-se bem a muitas aplicações em que a contaminação é suave-a-severa, e é possível a aplicação de programas de manutenção rotineiros. Raramente se faz necessário substituir um sensor de ponto de orvalho óptico.

O instrumento é mais adequado para aplicações em que se requer a precisão máxima na determinação do teor de vapor d'água em uma faixa razoavelmente ampla de ponto de orvalho. Os sensores de condensação existem em uma variedade de configurações, incluindo tipos diretos e de amostragem. Sua escolha geralmente é ditada pela aplicação, pela vazão da amostra disponível e pela necessidade de pronto acesso ao espelho, para limpeza. Por exemplo, em aplicações limpas geralmente se utiliza o sensor montado por rosca ou bocal. Já nas aplicações mais contaminadas o mais utilizado é um sensor externo, no qual o gás é aspirado pelo dispositivo por meio de uma bomba ou passa por ele pela pressão positiva no

sistema. Esse instrumento tem precisão e repetibilidade suficientes para ser usado como padrão secundário, caso haja necessidade.

As faixas de medição úteis da maioria dos diversos sensores estão resumidas na figura 12.3.

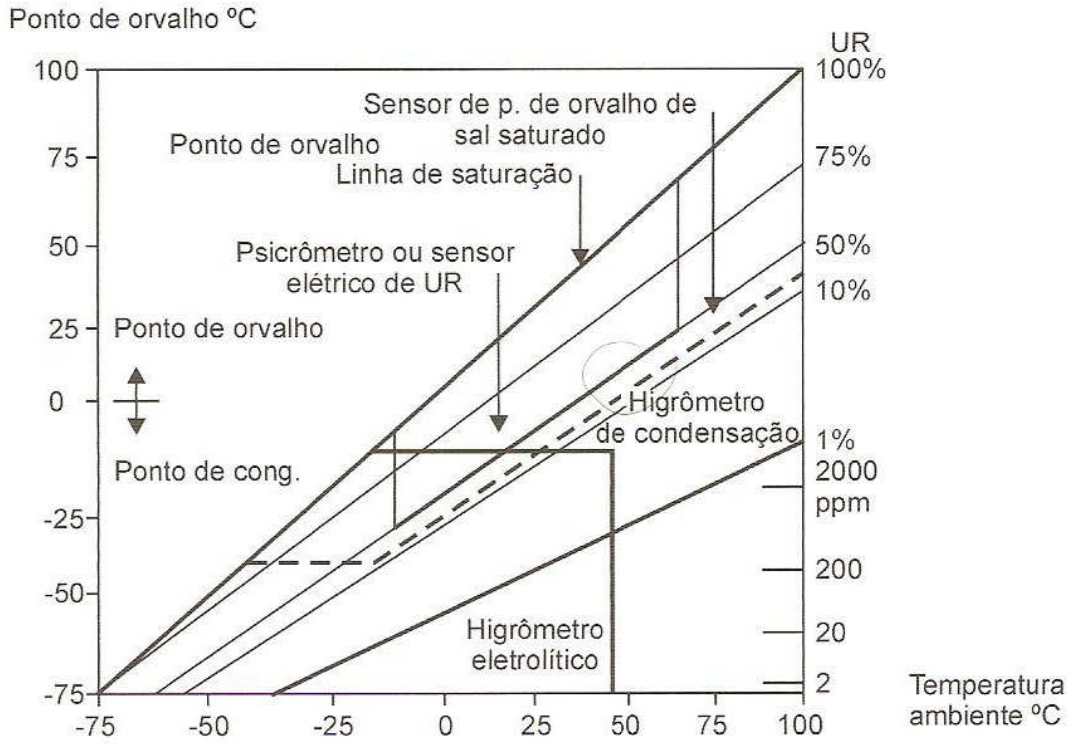


Figura 12.3 - Faixas de medição úteis de vários sensores.

12.1.18. Aplicação dos sensores de umidade

A umidade é um importante parâmetro de muitos processos industriais, uma vez que o vapor d'água contido no ar, ou em um gás, pode alterar as especificações de um produto ou serviço afetando a sua qualidade e, conseqüentemente, a sua aceitação pelo mercado.

Alguns trabalhos laboratoriais e processos industriais podem, muitas vezes, ser desenvolvidos adequadamente apenas em um meio em que os valores de temperatura e de umidade estejam dentro de limites bem definidos.

As razões mais comuns para o estabelecimento de um controle ambiental incluem, entre outras, o conforto, a saúde, a conservação de produtos, o controle da estática em equipamentos eletrônicos, etc.

Um outro exemplo prático, comumente encontrado, está relacionado ao controle de centrais de processamento de dados. Níveis de 40 a 60% de umidade relativa são especificados pela maioria dos fabricantes de computadores para os ambientes de operação de seus equipamentos. A instalação desses equipamentos em locais que não atendam a tais especificações pode resultar em descargas eletrostáticas que acabam danificando os componentes eletrônicos do computador.

Outros exemplos poderiam ser encontrados nos processos de secagem industrial. Em uma indústria de papel, um controle permanente das condições ambientais evita, de um lado, o fornecimento de um produto fora das especificações de gramatura e, de outro, o dispêndio adicional de energia pela secagem excessiva do papel.

O armazenamento da maioria dos produtos exige o controle da temperatura e da umidade relativa do ar. Cereais devem ser estocados em ambientes com umidade relativa entre 55 e 70%, enquanto o leite e seus derivados devem ser armazenados em uma faixa de 80 a 90%.

12.2. Analisadores de gases

Para a análise técnica de gases é preciso diferenciar dois tipos de aparelhos de medição, ou seja, os que medem os gases, pelos quais se mede a concentração de um componente gasoso, e os que permitem análises quantitativas e qualitativas de misturas de matérias conhecidas e desconhecidas. Características de ambos os aparelhos é o tempo gasto para análise e o resultado da medição em forma de sinal elétrico: os valores de medição podem ser indicados, registrados, ou teletransmitidos. Com auxílio de indicadores de valor limite, pode-se efetuar a sinalização óptica e acústica de concentrações indesejáveis. Uma vantagem especial é a possibilidade de interligação com controladores e equipamentos para processamentos de dados.

12.2.1. Tipos de analisadores

A depender da aplicação do analisador, eles podem ser divididos em dois grupos:

- *in loco*;
- extrativos.

O primeiro possui a sua unidade sensora colocada junto com o processo, já nos denominados extrativos a unidade sensora está colocada externamente ao processo. Podemos classificar no grupo aqueles que possuem unidade sensora junto com o processo, os analisadores de oxigênio por célula de óxido de zircônio ZrO_2. Os instrumentos com características de *in loco* estão, limitados em suas aplicações, pois dependem integralmente das variáveis do processo, existindo inclusive um certo desfavorecimento no que se refere à manutenção.

Algumas vantagens fazem com que boa parte dos analisadores de gases sejam extrativos, pois podem ser utilizados em qualquer aplicação, com benefícios no desempenho, na manutenção e na sensibilidade superiores aos que então denominamos *in loco*.

A seguir, relacionamos os principais tipos de analisadores, conforme o seu princípio de medição e características dos gases:

- Analisadores de gases por absorção de radiação infravermelha não dispersiva NDIR (normalmente usados em gases heteroatômicos, por exemplo: CO, CO_2, H_2S, CnHm);
- Analisadores de gases pelo método paramagnético (oxigênio);
- Analisadores de gases pelo método da condutibilidade térmica TCD, normalmente usados para gases como: H_2, CH_4, SO_2, etc.;
- Analisadores de gases por ionização de chama (normalmente para gases compostos de hidrocarbonetos);
- Analisadores de gases por célula eletroquímica (O_2 de um modo geral); e
- Analisadores de gases por quimiluminescência: NO, NO_2, NO_x.

Convém mencionar que normalmente os analisadores extrativos necessitam de sistemas de amostragem.

12.2.2. Como especificar um analisador de gás

Alguns pontos devem ser levados em consideração na hora de especificar um analisador de gás, os quais podem ser vistos na descrição seguinte:

- Aplicação;
- Desempenho;
- Conhecimento da amostra;
- Conhecimento da área em que será instalado.

12.2.2.1. Aplicação

O fator pré-requisito nessa escolha é ter pleno conhecimento da aplicação, para determinar o tipo de analisador mais conveniente ao processo. Isso significa dizer qual a finalidade da análise, qual o período de utilização desse analisador, ou ainda, quais os itens mínimos de manutenção do sistema a ser instalado.

12.2.2.2. Desempenho

Costuma-se avaliar o desempenho de um analisador de gás por suas características técnicas, tais como: sensibilidade, seletividade, reprodutibilidade e sistema de amostragem.

- **Sensibilidade:** a capacidade que o analisador tem de detectar a menor variação possível na composição da amostra.
- **Seletividade:** a propriedade de um analisador de gás suprir as interferências dentro dos componentes que formam a amostra.

- **Reprodutibilidade:** a propriedade de um analisador de gás reproduzir o desvio médio quadrático dos valores medidos sobre condições similares com o mesmo instrumento.
- **Sistema de amostragem:** um bom tratamento da amostra implica no bom desempenho dele.

12.2.2.3. Conhecimento da amostra

É importante notar que a composição da amostra deve ser conhecida, pois determinados componentes presentes nela podem influenciar o resultado final. Quando mencionamos composição, devemos ter em mente que fazem parte dela os componentes corrosivos, voláteis, condensáveis, gás de fundo e ainda o pó, os resíduos, etc.

12.2.2.4. Conhecimento da área em que será instalado

O conhecimento da área em que será instalado o instrumento contribui muito para o bom funcionamento e desempenho dele, pois em certas aplicações existe a necessidade de condicionar o equipamento a áreas classificadas ou ainda a ambientes agressivos que, se não forem conhecidos, podem influenciar no sistema.

Vale a pena lembrar que os fornecedores normalmente possuem suas folhas de dados técnicos a serem preenchidas pelo usuário, que ajudarão na hora da especificação e servirão de base para escopo de fornecimento. Portanto, deve-se preenchê-la da maneira mais completa possível. Na figura 12.4 é mostrado o princípio de funcionamento de uma sonda de O_2.

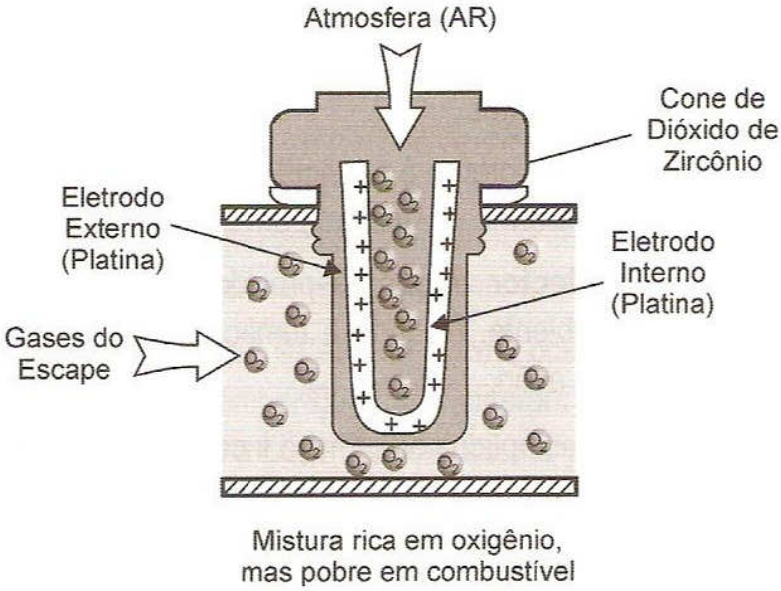


Figura 12.4 - Funcionamento de uma sonda de O_2.

12.2.2.5. Detecção de incêndio

Um dos sensores mais utilizados para detecção de incêndios é o iônico, o qual reage à presença de gases. Para efeito de melhor entendimento desse campo de aplicação, será feito um breve comentário sobre o assunto, além de serem mostradas outras tecnologias de detecção de incêndio e suas aplicações.

O desenvolvimento de um incêndio pode acontecer com intervalos de tempo mais ou menos longos conforme o tipo de combustível:

- **Estado latente:** não produz nenhuma fumaça visível, nem chama nem calor aparente. O processo de combustão está desprendendo partículas invisíveis ao olho humano, que sobem até o teto. Está se ionizando o ambiente.
- **Fumaça visível:** as partículas da combustão se acumulam de tal forma que se fazem visíveis ao olho humano (fumaça).
- **Chamas:** em condições favoráveis para o fogo, alcança-se rapidamente o ponto de ignição com as chamas. Emitem raios infravermelhos, ultravioleta e luz.
- **Calor:** à chama segue a produção do calor, que se desenvolve em questão de segundos.

Para cada estado apresentado são oferecidos, no mercado, detectores específicos:

- **Detector iônico:** recomendado para os riscos de fogo em evolução lenta. Reage rapidamente perante os fenômenos precursores de um princípio de incêndio, tais como a exalação de gases de destilação e combustão.

Esse detector possui alta confiabilidade, utilizando o princípio de comparação entre dois compartimentos de sua câmara iônica dupla.

Possui a propriedade de detectar desde gases invisíveis até fumaças de todo espectro e coloração, assim sendo permite a detecção do incêndio desde seu início.

Devido ao posicionamento de suas aberturas, reage igualmente a correntes verticais, bem como horizontais.

Seu circuito interno é protegido contra influências eletromagnéticas e sinaliza visualmente a condição de alarme por meio de um LED vermelho.

- **Detector óptico:** é provido de uma célula fotoelétrica sensível à luminosidade ambiente. Quando a fumaça obstrui a lente do detector, ele entra imediatamente em ação.

Detectores ópticos de fumaça incorporam um LED pulsante, localizado no labirinto dentro da cobertura do detector. O labirinto é desenhado para excluir qualquer luz de origem externa. No ângulo do LED existe um fotodiodo que normalmente não registra a coluna de luz emitida pelo LED.

Caso entre fumaça no labirinto, o impulso da luz do LED se dispersa, sendo registrado pelo fotodiodo. Se o fotodiodo "vê" fumaça nos dois impulsos seguintes, o detector muda ao estado de alarme e o LED indicador acende.

A aparência do detector é idêntica à do detector iônico de fumaça (ver figura 12.5). O que diferencia é o tipo de LED, que é claro no estado de repouso, mas produz uma luz vermelha em alarme.

Figura 12.5 - Sensor óptico de incêndio produzido pela Jocoya.

- **Detector térmico:** entra em estado de alarme quando a temperatura ambiente ultrapassa a temperatura máxima para a qual foi ajustado.
- **Detector termovelocimétrico:** caracteriza-se por sua dupla sensibilidade, ou seja, a subida da temperatura em relação à do ambiente. Ele entra em estado de alarme quando o crescimento da temperatura, em determinado intervalo de tempo, ultrapassa o valor preestabelecido; ou a temperatura ambiente ultrapassa a temperatura máxima para a qual o detector foi ajustado. Esse detector é recomendado para os fogos de evolução rápida (produtos químicos, armazéns, depósitos, etc.).

Os detectores de temperatura termovelocimétricos são ajustáveis e operam usando um par calibrado de termistores. Um termistor está exposto à temperatura ambiente, e o outro está selado. Em condições normais, os dois termistores registram temperaturas similares, mas no desenvolvimento do fogo, a temperatura registrada pelo termistor exposto aumenta rapidamente, resultando um desbalanceamento entre os dois termistores, o que leva o detector ao estado de alarme.

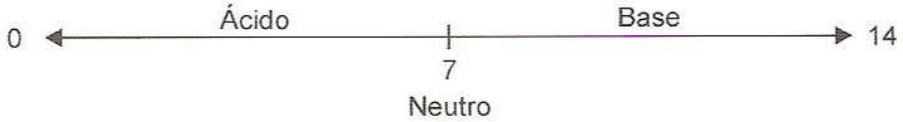
A termovelocimetria está calibrada para detectar o fogo assim que a temperatura aumentar rapidamente, mas também existe um limite máximo fixo, no qual o detector passará ao estado de alarme, mesmo que o aumento de temperatura tenha sido lento.

Os detectores de temperatura fixa só passam para o estado de alarme com temperaturas preestabelecidas. Externamente os detectores de temperatura são diferenciáveis dos de fumaça por terem aberturas largas, que permitem um bom movimento do ar ao redor do termistor externo.

12.3. Sensores de pH

O pH é a medida de acidez ou alcalinidade de uma solução definido por:

$$pH = -\log [H^+], \text{ sendo } [H^+] \text{ a concentração de íons } H+.$$



Quanto menor o pH (<7) maior a **acidez**, quanto maior o pH (>7) maior a **alcalinidade**.

A medida de pH é feita por dois eletrodos: o **eletrodo de vidro** (*glass electrode*) e o de **referência** (*reference electrode*).

Uma combinação particular de materiais de vidro produz uma superfície sensível a pH. O potencial desenvolvido é dado por:

$$V = R + 0{,}059\ pH$$

sendo R uma constante que depende da escolha do eletrodo de referência.

Devido à isolação do vidro, a impedância do eletrodo é da ordem de $10^{10}\Omega$ a $10^{14}\Omega$, trazendo corrente da ordem de $10^{-14}A$.

Por ter alta impedância, o eletrodo de pH exige circuito amplificador com elevadíssima impedância de entrada, determinando um cuidado todo especial ao circuito amplificador de entrada.

12.3.1. Medidores de pH

Os primeiros medidores de pH eram classificados como:

(a) de leitura direta; ou

(b) medidores do tipo potenciométrico.

Nos medidores do tipo (a), a f.e.m. da pilha que continha o eletrodo de vidro era imposta sobre uma resistência elevada e a corrente que fluía na resistência era ampliada e aplicada sobre um medidor de bobina móvel sensível. Sendo calibrada em milivolts, a f.e.m. da pilha era registrada diretamente, mas como a quantidade a ser medida era o pH, a escala era calibrada em unidades de pH, sendo provido um seletor para permitir a escolha da escala de leitura.

Em medidores do tipo (b), era empregado um circuito potenciométrico em conjunção com um amplificador eletrônico e um miliamperímetro para detectar o ponto de equilíbrio. O potenciômetro foi equilibrado contra uma pilha-padrão contida no instrumento e, então, a f.e.m. da pilha contida no eletrodo de vidro foi aplicada ao potenciômetro e atingiu-se um ponto de equilíbrio no modo usual por ajuste primeiramente de controle "grosso" (passo a passo), e depois pelo controle "fino" (potenciômetro). Os controles foram calibrados em milivolts e também em unidades de pH.

Com a introdução de um circuito de estado sólido foi simplificado o problema de potenciais pequenos em circuitos de alta impedância. Atualmente, utiliza-se medidores de pH de leitura direta. Na maioria dos medidores do tipo moderno é usado o voltímetro digital com escala que permite a leitura direta do pH.

12.3.2. Controle de medição

O eletrodo de vidro possui um potencial de assimetria que torna impossível relacionar a medida do potencial do eletrodo diretamente com o pH da solução. É necessário calibrar o eletrodo. Um medidor de pH inclui, portanto, sempre um controle ("Ajuste o Tampão", Padronize" ou " Calibre") de modo que, montado o eletrodo (vidro mais eletrodo de referência, ou um eletrodo combinado) e colocado numa solução tampão de pH conhecido, seja possível ajustar a leitura da escala do instrumento para o valor correto.

A equação de Nernst mostra que o potencial do eletrodo de vidro depende, num dado pH, da temperatura da solução. O medidor de pH inclui, então, um controle limitador de modo que a escala do medidor possa ser ajustada no correspondente valor da temperatura da solução. Se ele estiver na forma de um controle manual, calibrado em °C, é ajustado de acordo com a temperatura da solução determinada com um termômetro de mercúrio ordinário. Em alguns instrumentos o arranjo é feito de modo a se ter uma compensação automática da temperatura, inserindo uma sonda (termômetro de resistência) na solução, cuja informação é alimentada no circuito do medidor de pH.

Alguns instrumentos também incluem o que se conhece como "Controle de Pendente". Ele permite que, nos casos em que o medidor for calibrado num certo pH (digamos pH 4,00), mas se o conjunto do eletrodo é introduzido numa nova solução tampão de diferente pH (digamos, 9,20), a leitura do medidor não concorde exatamente com o pH conhecido para a solução, faça-se um ajuste com o "Controle de Pendente", de modo que a leitura do medidor numa segunda solução venha a concordar com o valor conhecido de pH. O medidor é, em seguida, novamente verificado na primeira solução. Se a escala de leitura estiver corrigida (4,00), admite-se que o medidor fornecerá as leituras corretas para todos os outros valores de pH que recaiam dentro dos limites das duas soluções tampões.

Utilizando um dado conjunto de eletrodo de vidro-eletrodo de referência, se medirmos a f.e.m. num intervalo de pH, com todas as medidas feitas à mesma temperatura, e se as leituras forem repetidas para uma diferente série de temperaturas, os gráficos dos resultados da série de isotermas revelarão que em certos valores de pH (pHi), a f.e.m. da pilha será dependente da temperatura. Esse valor pHi foi chamado por Jackson de "pH de isopotencial". Se a composição da solução que está em torno do prata-cloreto de prata interno for alterada, ou se for usado um eletrodo de referência externo inteiramente diferente, o valor de pHi mudará; alguns medidores de pH incluem um controle do "isopotencial" que pode ser utilizado para corrigir tais mudanças no sistema de eletrodo. A figura 12.6 apresenta detalhes de fabricação de uma sonda de pH.

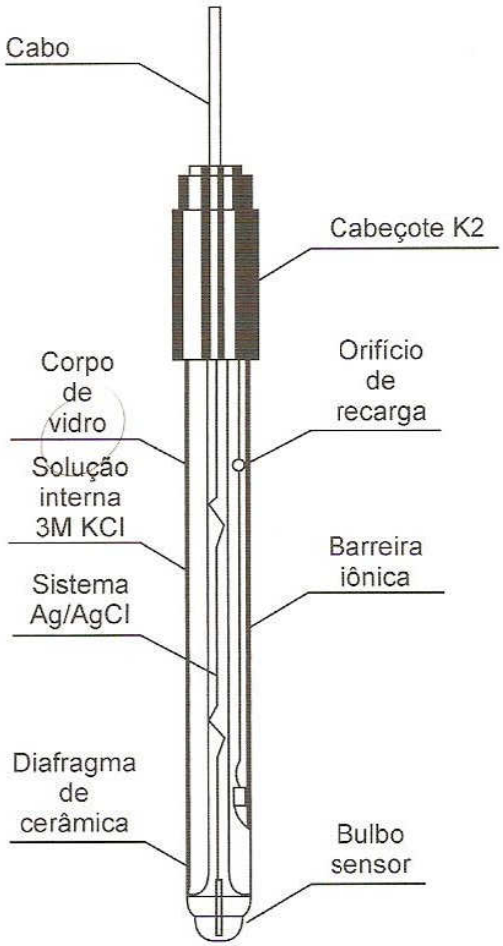
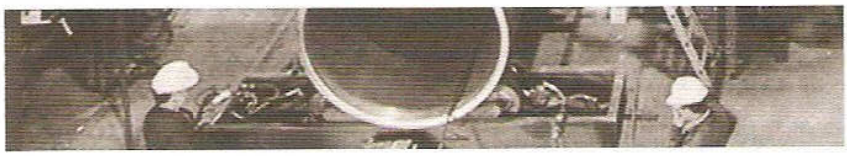


Figura 12.6 - Detalhes de um sensor de pH e de instalação de um modelo para inserção.

Alguns eletrodos e sondas de pH são utilizados também para medição de ORP - Potencial de Oxirredução.



Capítulo 13

Exercícios

Capítulo 1 - Instrumentação de Controle

1. Desenhe um diagrama de blocos que mostre a arquitetura básica de um sistema de controle digital.

2. Defina os seguintes termos utilizados em sistemas de controle de processos:

   a) Sistema;

   b) Controle;

   c) Processo;

   d) Set Point.

3. Mostre a evolução dos sistemas de controle e compare com os sistemas atuais.

4. Dê um exemplo de um sistema de controle, evidenciando os seguintes elementos: variável controlada, manipulada, secundária; meio controlado e agente de controle. Defina cada um deles.

5. Como se classificam e quais as características dos sistemas de controle quanto à função de transferência? Explique com exemplos práticos.

6. Quais são as principais características desejáveis em um sistema de controle? Defina-as.

7. Quais são os valores normalizados (padrões internacionais) para transmissão dos sinais de pressão, corrente e tensão?

8. Quais são os níveis básicos dos controles integrados de manufatura CIM? Mostre por meio de um diagrama a interação entre eles.

9. Suponha que para a torradeira seguinte cada elemento aquecedor fornece a mesma quantidade de calor por todos os lados do pão e a qualidade da torrada pode ser determinada pela sua cor. A torradeira está inicialmente programada para a qualidade de torrada desejada por meio do botão de ajustamento de cor. Esse ponto não necessita de ajuste, a não ser que o critério de qualidade mude. Quando o interruptor está fechado, o pão é torrado até que o detector de cor veja a cor desejada. Então o interruptor é automaticamente aberto. Determine e justifique:

   a) Tipo de controle.

   b) O sistema é malha aberta ou fechada?

c) Desenhe em bloco toda a malha de controle especificando cada elemento e cada Variável de entrada e de saída de cada elemento.

d) Quais são as variáveis e elementos de controle.

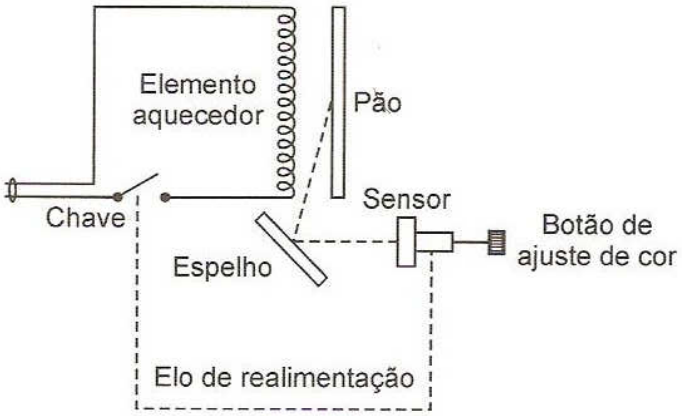


Figura 13.1. Torradeira automática.

Conceitos de instrumentação

1. a) Cite as principais características desejáveis inerentes aos transdutores utilizados em controle industrial.

b) Cite três tipos de atuadores. Explique os princípios de funcionamento.

2. Defina sensor, transdutor e transmissor.

3. Mostre as diferenças entre sensores digitais e analógicos.

4. Faça um comentário baseado em pesquisa nas normas especializadas sobre os termos "calibração" X "aferição".

Capítulo 2 - Sensores de Presença

1. Quais são os componentes do sensor óptico:

a) Resistência, válvula e diodo.

b) Termostato, diodo e uma chave.

c) Emissor e receptor.

d) Potenciômetro e um LED.

e) Bobina e um tiristor.

2. Assinale com Verdadeiro (V) ou Falso (F):

( ) O oscilador gera um sinal elétrico modulado e envia-o ao emissor.

( ) O emissor transforma o sinal elétrico vindo do oscilador em um feixe de luz contínua, sendo executada a emissão do sinal.

( ) O receptor converte o sinal de luz em sinal elétrico contínuo.

( ) O pré-amplificador adequa o sinal elétrico vindo do receptor a níveis com o circuito eletrônico do sensor.

( ) O analisador de freqüência compara a freqüência do sinal transmitido pelo receptor com a freqüência do sinal gerado pelo emissor.

3. Assinale a opção correta:

( ) Reflexão difusa: retrotransmissão e barreira de luz.

( ) Refletores: retrorreflexão e reflexão difusa.

( ) Fibra óptica: retrotransmissor e barreira de luz.

( ) Barreira difusa: retrorreflexão e barreira de luz.

( ) Reflexão: retrorreflexão e barreira de luz.

4. Assinale a opção que não é característica do sensor óptico:

( ) O sensor trabalha sem contato mecânico.

( ) Possui componentes eletrônicos para executar a comutação do sinal.

( ) Não utiliza elementos sensores físicos.

( ) Permite trabalhar com fontes de energia de diferentes naturezas.

( ) Detecta a presença de qualquer objeto que seja capaz de interromper ou refletir o sinal luminoso em nível suficiente para causar mudança de estado, sem que para isso ocorra contato físico entre o sensor e o material.

5. Indique a opção que não é uma vantagem do sensor óptico:

( ) Ausência de desgaste mecânico, portanto grande durabilidade.

( ) Vida útil é afetada pelo número de comutações.

( ) Possibilidade de alcance de até 10 m.

( ) Possibilidade de várias formas de instalação.

( ) Alta freqüência de comutação, até 250 Hz.

6. Assinale V ou F:

( ) Distância de acionamento nominal determina o alcance do sensor na detecção de um objeto.

( ) Distância de acionamento real é medida a 10º C e consideradas as variações no processo de fabricação; a variação não ultrapassa 10% da distância nominal.

( ) Distância de acionamento assegurada é a distância na qual a operação do sensor é garantida dentro dos limites de variação de temperatura e tensão de alimentação.

7. Marque a opção que não é aplicação para o sensor por reflexão difusa:

( ) Verificar se a caixa está completa.

( ) Identificar falhas.

( ) Seleção de material.

( ) Controlar posição de peças.

( ) Identificar objetos.

8. Identifique a aplicação que não é do sensor por retrorreflexão:

( ) Contar peças.

( ) Controle de nível.

( ) Controle de falhas.

( ) Regulagem de tensão.

( ) Controle de qualidade.

9. Assinale a opção que não se aplica ao sensor por barreira de luz:

( ) Detecção em locais de alta temperatura.

( ) Seleção de fluxo.

( ) Controle final de fluxo.

( ) Controle e segurança de portões.

( ) Contagem de peças.

10. Assinale V (Verdadeiro) ou F (Falso):

( ) Sensores de presença são dispositivos que detectam a proximidade de outros objetos.

( ) Sensores ópticos de presença podem ser projetados somente usando fontes de luz visível.

( ) Os sensores infravermelhos podem ser ativos ou passivos.

( ) Os sensores ativos detectam presença de radiação infravermelha no ambiente.

( ) Os sensores passivos são efetivos para cobrir grandes áreas no interior de prédios.

11. Indique as afirmativas corretas:

a) O sensor óptico de detecção por barreira de luz possui o emissor e o receptor montados em corpos separados.

b) O sensor óptico de reflexão difusa possui o emissor e o receptor montados no mesmo corpo.

c) No sensor óptico por barreira de luz, a luz gerada pelo emissor cria uma região ativa em que a presença de um objeto faz com que a luz seja refletida de forma difusa, de volta ao receptor ativando-o.

Capítulo 3 - Sensores de Posição

1. O princípio de funcionamento do sensor de aproximação indutivo se baseia:

   ( ) Na absorção de um campo eletromagnético de baixa freqüência.

   ( ) Na absorção de um campo eletromagnético de alta freqüência.

   ( ) Na geração de um campo eletromagnético de alta freqüência.

   ( ) Na geração de um campo eletromagnético com freqüências variáveis.

2. Quando um metal aproxima-se do campo eletromagnético, ele:

   ( ) Aumenta a energia do campo, aumentando assim a amplitude do sinal gerado no oscilador.

   ( ) Absorve a energia do campo, diminuindo a amplitude do sinal gerado no oscilador.

   ( ) Mantém a energia do campo, porém diminui a amplitude do sinal gerado no oscilador.

   ( ) Absorve a energia do campo, alimentando a amplitude do sinal gerado no oscilador.

   ( ) Aumenta a energia do campo, fazendo com que a amplitude do sinal gerado no oscilador diminua.

3. Nos sensores para corrente contínua o amplificador de saída incorporado ao sensor é constituído de:

   a) Transistor b) Tiristor c) Relé d) Diodo e) Válvula

4. Nos sensores para corrente alternada o amplificador de saída incorporado ao sensor é constituído de:

   a) Transistor b) Tiristor c) Relé d) Diodo e) Válvula

5. Assinale a alternativa verdadeira:

   ( ) O amplificador de saída incorporado ao sensor para corrente contínua deve ser compatível com a freqüência eletromagnética do campo.

   ( ) O amplificador de saída incorporado ao sensor para corrente contínua deve ser compatível com um contator.

   ( ) As chaves de aproximação para corrente contínua devem ser equipadas sem protetor de polarização.

( ) Não existe chave de aproximação indutiva para corrente contínua que tenha um circuito independente para a alimentação.

( ) Existe um tipo de chave de aproximação indutiva para a ligação em corrente alternada, construída segundo o sistema de dois condutores.

6. Assinale a opção verdadeira em relação aos tipos de instalação.

( ) O campo alternado em alguns sensores projeta-se apenas longitudinalmente.

( ) Na montagem "saliente" não há preocupação em evitar que nas imediações do sensor permaneça algum material que possa influenciá-lo.

( ) Com a diminuição das medidas mínimas com relação às imediações altera-se a distância de acionamento.

( ) Nos sensores do tipo faceado não existe proteção contra a distribuição lateral das linhas do campo magnético.

( ) O tipo faceado tem uma distância de acionamento superior à chave do tipo "saliente".

7. Marque a opção verdadeira com relação ao acionamento de sensores indutivos.

( ) A distância real de acionamento pode afastar-se em até 60% da distância nominal de acionamento.

( ) A distância real de acionamento é igual à distância nominal com uma tolerância de 10%.

( ) A distância de acionamento da chave de aproximação não depende da temperatura.

( ) O sensor não pode possuir um diferencial de sustentação.

( ) A histerese nos sensores de aproximação é independente no que se refere à distância.

8. Qual das características seguintes pertence a sensores indutivos?

( ) São magnéticos.

( ) Possuem partes móveis e atuam.

( ) Atuam através de um pequeno contato físico.

( ) São totalmente vedados com resina epóxi.

( ) Possui pouca precisão na repetição do ponto de comutação.

9. Qual das seguintes aplicações não se refere a sensores indutivos?

( ) Controle de presença ou ausência.

( ) Detecção de passagem.

( ) Detecção de posicionamento.

( ) Contagem de peças.

( ) Identificação de objetos.

10. A utilização dos sensores indutivos é particularmente recomendada quando:

( ) Velocidade de ataque e funcionamento são elevados.

( ) Condições ambientais apropriadas, sem poeira, sem agentes químicos, etc.

( ) Peças a serem detectadas são de grandes dimensões.

( ) Associados a um automatismo dinâmico.

( ) Peças a detectar são de compostos fortes.

11. Assinale a alternativa verdadeira:

( ) Os sensores capacitivos não podem atuar com a aproximação de materiais orgânicos, plásticos, pós, vidros, etc.

( ) Seu funcionamento baseia-se na variação do dielétrico do meio em que a região de sensibilidade está atuando.

( ) A distância sensora permanece constante para massas diferentes.

( ) A mudança do tipo de material a ser detectado não causa variação na distância sensora.

( ) Os modelos fixos não servem para operar em locais com líquidos.

12. Marque a afirmativa falsa:

( ) Os sensores de proximidade capacitivos são indicados para detectar materiais metálicos.

( ) Os sensores de proximidade capacitivos são indicados para detectar materiais não-metálicos.

( ) O sensor de proximidade capacitiva nada mais é do que um oscilador de alta freqüência.

( ) O elemento sensível desse tipo de sensor é um indutor, de uma placa sensora, que detecta a aproximação de um material.

( ) Possui um circuito detector para transformar essa variação em nível de tensão e chaveamento na saída.

Capítulo 4 - Sensores Ópticos

1. Explique o funcionamento e a polarização de um LDR.
2. Comente o efeito "pré-histórico" que ocorre no LDR.
3. Comente o "tempo de recuperação" de um LDR.
4. Explique o funcionamento do fotodiodo e fototransistor e compare a sua velocidade de resposta.
5. Cite os tipos de material utilizados na fabricação de fotodiodos e suas aplicações. Explique a relação entre seu encapsulamento e a ação de iluminação externa sobre o componente.
6. No que consiste a tecnologia VLSI de produção dos CCD's?
7. Qual a principal característica dos CCD's?
8. Compare a tecnologia de produção CMOS e CCD em relação às características funcionais.
9. Explique o funcionamento das válvulas ultravioleta.
10. Cite um problema da célula fotovoltaica.

Capítulo 6 - Sensores de Aceleração

1. São características do acelerômetro, exceto:
   a) Pode ser considerado um transdutor que converte a energia mecânica associada ao movimento em forma elétrica.
   b) Ele pode ser usado, como um instrumento, para monitorar as mudanças na velocidade (isto, é aceleração) devido ao choque, vibração ou impacto.
   c) Serve para medir variação de aceleração.
   d) É empregado também, em grande escala, em sistemas de guia de navios, aviões, satélites, etc.
2. Os principais tipos de acelerômetros são:
   a) Mecânico, elétrico, pneumático.
   b) Linear, angular, tetraédrico.
   c) Resistivo, capacitivo, indutivo.
   d) De deslocamento, de deformação, a balanço de força.
3. Sobre os acelerômetros de deslocamento, é correto afirmar que:
   a) São transdutores que convertem a aceleração numa variação de resistência devido à deformação de um "strain-gage" num dos braços de uma ponte de Wheatstone.

b) Apresentam um anel de reação de alto ganho, que por meio de um elemento atuador chamado força F equilibra a força agente sobre a massa móvel.

c) A corrente, que dá uma queda de tensão na resistência R, é proporcional à aceleração.

d) O deslocamento (em cm) da massa é dado pela aceleração (em cm/s^2) multiplicada pela relação entre a massa (em g) e a constante da mola K (em dynas/cm).

4. Sobre os acelerômetros de deformação, é correto afirmar:

a) São transdutores que convertem a aceleração numa variação de resistência devido à deformação de um "strain-gage" num dos braços de uma ponte de Wheatstone.

b) Apresentam um anel de reação de alto ganho, que por meio de um elemento atuador chamado força F equilibra a força agente sobre a massa móvel.

c) A corrente, que dá uma queda de tensão na resistência R, é proporcional à aceleração.

d) O deslocamento (em cm) da massa é dado pela aceleração (em cm/s^2) multiplicada pela relação entre a massa (em g) e a constante da mola K (em dynas/cm).

5. Sobre os acelerômetros a balanço de força, é correto afirmar:

a) São transdutores que convertem a aceleração numa variação de resistência devido à deformação de um "strain-gage" num dos braços de uma ponte de Wheatstone.

b) Servem para medir variação de aceleração.

c) A corrente, que dá uma queda de tensão na resistência R, é proporcional à aceleração.

d) O deslocamento (em cm) da massa é dado pela aceleração (em cm/s^2) multiplicada pela relação entre a massa (em g) e a constante da mola K (em dynas/cm).

6. Qual equação melhor exprime o princípio de funcionamento dos acelerômetros de deslocamento:

a) $W.a/g = ks.x$

b) $F = k.i$

c) $x = a.m/k$

d) $T^2 = kr^3$

7. Qual equação melhor exprime o princípio de funcionamento dos acelerômetros de deformação:

a) $W.a/g = ks.x$

b) $F = k.i$

c) $x = a.m/k$

d) $F = kQq/d^2$

8. Qual equação melhor exprime o princípio de funcionamento dos acelerômetros a balanço de força:

   a) W .a /g=ks . x
   b) F=k . i
   c) x=a . m/k
   d) E=uvg

9. O LVDT pode ser usado associado ao acelerômetro:

   a) De deslocamento.
   b) De deformação.
   c) A balanço de força.
   d) Nenhum.

10. O strain-gage faz parte do acelerômetro:

   a) De deslocamento.
   b) De deformação.
   c) A balanço de força.
   d) Nenhum.

Capítulo 9 - Sensores de Nível

1. Qual(ais) a(s) utilização(ções) dos sensores de nível?
2. Quais os dois tipos de medição? Defina-os.
3. Cite exemplos de sensores de nível do tipo flutuadores.
4. Dados os exemplos da questão anterior, explique seus princípios de funcionamento e aplicações.
5. Qual a aplicação dos ELETRODOS METÁLICOS?
6. Diga as vantagens da utilização da MEDIÇÃO DE NÍVEL HIDROSTÁTICA.
7. Sobre a MEDIÇÃO DE NÍVEL CAPACITIVA, explique seu princípio de funcionamento, suas vantagens e aplicações.
8. Idem para a DETECÇÃO DE NÍVEL VIBRATÓRIO.
9. Qual o princípio de funcionamento da MEDIÇÃO DE NÍVEL A LASER.
10. Defina strain-gages e explique o seu funcionamento.
11. Para o sensor de nível ultra-sônico explique: suas características, aplicações, vantagens e desvantagens.
12. Explique o funcionamento das PÁS ROTATIVAS.

Capítulo 10 - Sensores de vazão

1. Relacione as duas formas de medida de vazão e diga quais variáveis podem influenciar na vazão.
2. Defina pressão diferencial e cite os principais tipos de elementos primários.
3. Sobre a placa de orifício, marque V ou F:

   ( ) A placa de orifício consiste em um disco fino de material resistente e inoxidável.

   ( ) Suas dimensões são iguais, não ocorrendo perda de carga.

   ( ) A placa de orifício causa uma queda de pressão de entrada de acordo com a pressão de saída.

   ( ) A principal desvantagem desse sensor é a perda de carga permanente.
4. Diferencie placa de orifício de tubos de Venturi.
5. Cite vantagens e desvantagens do tubo de Pitot.
6. Marque a opção correta sobre sensores de vazão do tipo turbina:

   a) Transdutores do tipo turbina são usados tanto para sólidos como para líquidos.

   b) Seu funcionamento é baseado no princípio magnético, que induz a uma tensão alternada nos terminais de uma bobina externa.

   c) Essa freqüência é inversamente proporcional à velocidade do líquido e diretamente proporcional à vazão.

   d) O transdutor do tipo turbina é classificado como não-intrusivo.
7. Explique o princípio de funcionamento dos sensores ópticos de vazão.
8. O efeito de CORIOLIS é usado para que tipo específico de medição de vazão. Por quê?
9. Sensores ultra-sônicos também são usados para medir vazão. Cite suas vantagens e desvantagens, além do princípio de funcionamento, citando os dois tipos de aplicação do ultra-som.

Capítulo 11 - Sensores de Tensão, Corrente e Potência

1. Explique os resistores Shunt e sua utilização.
2. Como é possível afirmar que a leitura do valor da tensão de Hall na placa do sensor de mesmo nome equivale ao valor da corrente que passa pelo circuito?
3. Compare o princípio de funcionamento do transformador C.C. com o do transformador de corrente (T.C.). Por que apenas o transformador C.C. precisa de uma fonte de tensão alternada?

4. Quais são as vantagens e desvantagens da utilização dos relés térmicos? Como a temperatura ambiente pode influenciar na precisão deles e o que pode ser feito para amenizar tal inconveniente?

5. Assinale com Verdadeiro (V) ou Falso (F) e justifique as falsas:

   ( ) O resistor Shunt só pode ser usado para medir corrente contínua.

   ( ) O campo magnético no núcleo do transformador C.C. se deve apenas à passagem de corrente pelo condutor a ser medido e pelo enrolamento ligado à fonte C.A., não havendo a necessidade de um ímã permanente.

   ( ) Os enrolamentos com o mesmo número de espiras não são ligados em oposição de fase porque, nesse caso, a tensão no secundário seria constante.

   ( ) A diferença entre os coeficientes de dilatação dos metais que formam o par bimetálico do relé térmico define sua sensibilidade.

   ( ) Os relés térmicos só podem ser inseridos diretamente no circuito se a sua corrente estiver compreendida entre 0,13 A e 630 A.

6. Por que o secundário de um T.C. nunca pode ficar em aberto, e quanto ao secundário de um T.P. pode ficar?

7. Marque a(s) opção(ões) seguinte(s) de acordo com esta afirmação: o uso de um T.C. em um sistema de controle com uma corrente nominal muito maior do que a que reconhecidamente passará pelo circuito pode afetar sua:

   a) estabilidade;

   b) precisão;

   c) velocidade de resposta;

   d) sensibilidade.

8. Faça um rápido comentário acerca de cada tipo de T.C. abordado, analisando os casos em que o uso de cada um deles é mais adequado.

9. Suponha que para o monitoramento de um sistema de 600 kVA e 3,8 kV de linha, um técnico tenha especificado um T.P. de 2300/115 V e um T.C. de 50/5 A, classe de isolação de 10kV e fator térmico 2,0. Com base nos dados disponíveis, comente a escolha de seus equipamentos, em seguida assuma o lugar do técnico e solucione eventuais problemas que possa ter detectado.

10. O que são e como funcionam os transdutores de potência? Por que é possível afirmar que com o crescente uso de sistemas de controle microprocessados, esses dispositivos têm adquirido papel cada vez mais importante?

11. Discorra acerca da necessidade de utilização de medidores multigrandezas nas indústrias.

Capítulo 12 - Sensores de Umidade, Gases e pH

1. Qual a importância da variável ***"umidade"*** nos processos industriais?
2. Qual a importância da limpeza do ambiente na monitoração e controle de sua umidade?
3. Cite exemplos de sensores de umidade.
4. Quais são as principais desvantagens do psicrômetro?
5. Cite algumas aplicações dos sensores de umidade.
6. Cite alguns métodos para medição de umidade e suas aplicações.
7. Quais são os dois tipos de aparelho de medição utilizados na análise técnica de gases?
8. Cite os dois grupos em que os tipos de analisadores de gases podem ser divididos e suas características.
9. Cite os principais tipos de analisadores de gases, conforme o seu princípio de medição e características dos gases.
10. Quais são os eletrodos através dos quais se faz a medida de pH?

Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, P.; LIRA, F.; BOSCOV, J. **Instrumentação e controle**. ETFCE, 1997.

ANALOG DEVICES. AD592. http://www.analog.com/en/prod/0%2C2877%2CAD592%2C00.html, acesso em 08/08/2006.

ANALOG DEVICES. TMP03. http://www.analog.com/en/prod/0,,764_814_TMP03,00.html, acesso em 06/08/2006.

Austrália, Y. **Coriolis Principle**. http://www.flowmeterdirectory.com/flowmeter_artc/flowmeter_artc_02020102.html, FLOWMETER DIRECTORY, acesso em 18/08/2005.

BEGA, E.A.; GERARD J.D.; COHN; P.E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; SCHMIDT, V.F. **Instrumentação Industrial.** INTERFERÊNCIA / IBP, 2003.

BOLTON, W. **Instrumentação e controle**. São Paulo: Hemus, 1982.

Catálogo IOPE, Uso e Aplicação de Termosensores. http://www.iope.com.br/index_port.htm, acesso em 28/02/2005

Centrales de incêndio y detectores de humo y calor, http://www.jocoya.cl/alarm01.htm, acesso em 13/08/2005.

Carlos Eduardo de Oliveira Chaves, Confiabilidade metrológica da medição de elevadas temperaturas em processos industriais, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2004.

COBBOLD, R.S.C. **Transducers for Biomedical Measurements**. New York: John Wiley & Sons-Interscience, 1974.

COELCE - Companhia de eletricidade do Ceará, Depto. de Treinamento Técnico, **Tecnologia dos Materiais - Transformadores de Medição,** Fortaleza-CE, 1978.

CONAUT. **Sensor vazão magnético**. http://www.conaut.com.br/produtos.htm, acesso em 19/05/2005.

CONCETTI, C.; CUPIDO, A.; LOTTI, G. **Eletrônica Industriale**. *Volume Segundo La Tecno Editrice. Fermo, 1976.*

CorsaClube, http://www.corsaclube.com.br/abre_materias.php?pagina=materias/faca_voce_mesmo/hallmeter/, acesso em 13/08/2005.

CRC Handbook of Chemistry and Physics (CRC Press), 85th edition, 2004.

DARLING, Charles R. **Pyrometry**: a practical treatise on the measurement of high temperatures. Londres: E. & F. N. Spon Ltda., 1991.

DEETER. **Sensor flutuador *reed-switch***. http://www.deeter.co.uk/pdf/usa_lvcsseries_new.pdf, acesso em 20/07/2004.

Detector de incêndio, http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialincendio/pagina_3.asp.

DEXTER MAGNECTIC TECNOLOGIES. **Magnets for reed switch, hall effect and MR sensor**, http://www.dextermag.com/Page26.aspx, acesso em 02/02/2005

DRUCK. **Transdutor de pressão**. http://www.druck.com/cgi-bin/druck.cgi?br-products+search+display+164&, acesso em 16/08/2005.

ECIL Notícias técnicas - http://www.ecil.com.br/pdf/sensores%20e%20acessorios%20para%20medicao%20de%20temperatura.pdf.

ELETROSIL. **Sensor de nível diafragma**. http://www.eletrosil.com.br/CL-400.pdf, acesso em 16/03/2005.

ELSCOTT. **Sensor de temperatura**. Termistor, http://www.elscott.com/thermistors.html, acesso em 16/11/2004.

EMCOFLOW. **Sensor de vazão Vortex.** http://www.emcoflow.com/em_prods/vortex_phd.aspx, acesso em 21/10/2004.

ENEVCO. **Sensor de aceleração**. http://www.endevco.com/industrial/indu_prod.php, acesso em 10/03/2005.

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL. Especificação de infravermelho. http://www.instrumentacaosp.hpg.ig.com.br/infra.htm, acesso em 05/08/2006.

FESTO. **Sensor de proximidade magnético**. http://catalog.festo.com/bra/asp/start.asp, acesso em 03/05/2005.

FLOWLINE. **Sensor de Vazão**. http://www.flowline.com/catalog/action.lasso?-database=Asset%20Superstore&-layout=Application&-response=application.lasso&-recordID=32&-search, acesso em 03/01/2005.

FREESCALE ELECTRONICS. **Transdutor de pressão integrado**. http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX12.pdf, acesso em 06/07/2005.

HEUPTMANN, P. **Sensor:** *Principles And Aplications. Carl Hanser Verlag.* Great Britain, 1993.

HITECH. **Transmissor de nível ultrasônico**. http://www.hitechtech.com/super-mini.htm, acesso em 30/03/2005.

HONEYWELL. **Sensor de Nível Capacitivo**. http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/temperature/, acesso em 16/03/2005.

ICOS. **Sensor de vazão magnético eletrônico**. http://www.icos.com.br/pdf/fluxo_fc34.pdf, acesso em 16/04/2005.

Instrumentation Sybolis and Identification. American National Standard/ Instrument Society of America - ANSI/ISA. S5.1. 1984.

J. ROMA Ltda. **Equipamento para medidas de temperaturas**. http://www.jroma.pt/temperaturas_indus.htm, acesso em 05/08/2006.

J. M. BERGADA. **Práctica 15**. http://www.mf-t.upc.es/JMBergada/mf/practicas/Pr%E0cti15.doc.

LAO SP. **Sensor de vazão multijato**. http://www.laosp.com.br/htmls/w_wsta000.apw?local=8, acesso em 16/03/2005.

LEVEL CONTROL. **Sensor de nível tipo pás rotativas**. http://www.levelcontrol.com.br/rp80.htm, acesso em 25/03/2005.

LOPES, H. **Curso de Sensores Industriais**. CEFET-PR, 1988.

MARGIRIUS. **Chave de nível tipo Bóia**. http://www.margirius.com.br/p/71.pdf, acesso em 20/06/2005.

MEDEIROS, F.; SOLON. **Medição de energia elétrica**. Recife: Universitária, 1980.

MIKRON INSTRUMENT COMPANY, INC. **Black Book**, 1 CD ROM, 2003.

MIT. EXACTA.S.A. Indústria e Comércio de Instrumentos e Sistemas de Automação. **Manual de Pirometria**- 09/1981

MOTOROLA. **Sensor Device Data**. DL200/d- USA,1995.

MSPC. **Medidas de Temperatura I**. http://www.mspc.eng.br/fldetc/tpr1.asp, acesso em 05/08/2006.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Sensor de temperatura de circuito integrado**. http://cache.national.com/ds/LM/LM34.pdf, acesso em 06/01/2005.

National Semiconductor. **LM75**. http://www.national.com/JPN/ds/LM/LM75.pdf, acesso em 06/08/2006.

NIVELCO. **Chave de nível vibratória**. http://www.nivelco.hu/download/pdf/rc45s04a0404b.pdf, acesso em 20/06/2005

NORTON, H.N. **Handbook of Transducers for Eletronic Measuring Systems**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.j. ,1969.

NUSSBAUMER, H. **Infformatique Industrialle III"** - *Presses Politechniques Romandes.* Lausanne Suisse, 1987.

NYKONDWYLER. **Sensor de Vazão Engrenagens Ovais**. http://www.nykondwyler.com.br/vazao/dp/, acesso em 16/07/2005.

OMEGA. **The strain gage**. http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html, acesso em 08/08/2005.

Optical Encoders Types and How They Function. http://www.encoders.us/, acesso em 10/01/2005.

PACHÊCO, Admilson P. **Emissividades de Superfícies Naturais no Infravermelho Termal (8 – 12 μm)**. Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos, Brasil. 11-18 setembro 1998, INPE, pp. 1307-1313.

PAZOS, F. **Automação de sistemas & robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.

Ramsay D. C. **Principles Of Engineering Instrumenttation**. ARNOLD. 1996

Revista *Selezione di elettronica e Microcomputer. Milano -1986.*

Revistas C & I – Controle e instrumentação, Publicações VALETE - ano 7- nº 70- 06/02.

RHOD ZIMMERMAN. **Resolvers as Velocity and Position Encoding Devices**. Control Sciences, Inc.

Sensor de Imagem CCD e CMOS. http://209.196.177.41/01/01-04.htm, acesso em 20/04/2005

Sensores e Actuadores. http://www.ipb.pt/~jpcoelho/SA/parte1_sa.pdf, acesso em 08/08/2005.

SIGHIERI, L.; NISHINARI, A. **Controle automático de processos Instrumentação**. Edgard Blücher, 1987.

TUROTEST. **Sensor magnético de presença**. http://www.turotest.com.br/industriais/sensmag.htm, acesso em 26/03/2005.

UNITED ELECTRIC CONTROL. **termistor** http://www.ueonline.com/products/fp_tempsensors.htm, acesso em 05/01/2005.

VEGA. **Sensor de nível capacitivo**. http://www.vega.com/inh/e/pdf/pi/EN/19768-EN.pdf, acesso em 24/05/2005.

WERNECK. M. M. **Transdutores e Interfaces**- LTC-1996.

Marcas Registradas

Todas as marcas e produtos apresentados no livro pertencem a seus respectivos proprietários.

Índice Remissivo

A

Acelerômetro(s), 85
  a balanço, 90
  de deformação, 88
  mecânico, 85
Acoplador óptico, 82
Alfassônicos, 143
Alternador taquimétrico, 79
Ampola reed, 46, 157
Analisador de freqüência, 31
Analógica, 21
Asi, 20
Aterramento, 44
Atrito viscoso, 85
Atuadores, 17
Automobilísticos, 17

B

Baioneta, 96
Barreira ultra-sônica, 37
BCD, 21
Bending, 115
Bimetal, 176
Bobina
  "pick-up", 80
  piloto, 79

C

Cabo(s)
  de compensação, 100
  e fios, 100
  elétrico, 130
Calibração, 122, 131
Canister, 115
Cantilever spring, 88
CCD, 62, 69
  linear, 70
Célula
  de carga, 21, 113, 141
  de pope, 187, 188, 192
  eletroquímica, 196
  fotovoltaica, 75
Chave de nível
  diafragma, 144
  tipo bóia, 132
CHROMEL, 98
Cilindros, 17
Circuitos integrados, 106
Cisalhamento, 115
CMOS (Complementary Metal
  Oxide Semiconductor), 71
Constantan, 98, 114
Constantes dielétricas, 45
Conversores
  A/D e D/A, 19
  analógico-digital ou
    digital-analógico, 19
Coriolis, 160
Corpo negro, 108
Cromo, 98

D

D, 38
DA, 38
Detector iônico, 198
Digital ou binária, 20
Dínamo
  taquimétrico, 77
  típico, 78
Diodo, 105
Discriminador, 31
Dispositivos de
  montagem, 116
  proximidade, 40
Distância sensora, 42
Doppler, 159
Dunmore, 187, 188

E

Efeito
  HALL, 172
  pré-histórico, 64
Eletrodo, 132
  de pH, 200
  de vidro, 200
  metálicos, 133
  metálicos para uma cota, 133
Eletrodutos, 117
Emissor, 30
Encoders, 18, 54
  absoluto, 58
  absoluto multirrevolução, 59
  lineares, 56
Engrenagens ovais, 164
Equação de Nernst, 201
Erro de um termopar, 97
Estabilidade, 23
Estado latente, 198
Estágio de saída, 31
Exatidão, 22
Extensômetro, 113

F

Fator de correção, 34, 45
Fibra óptica, 33
Fieldbus, 20
    Foundation, 20
Flange, 149
Fluência, 117
Flutuação do filósofo, 129
Flutuador tipo, 131
Flutuadores
    a contato de mercúrio, 130
    potenciométricos, 132
Fonte de alimentação, 31
Fotoacoplador, 82
Fotocélulas, 62
Fotocorrente, 66
Fotodiodo(s), 65, 125, 198
Fotoelétricos, 143
Fotorresistores, 62
Fototiristores, 73
Fototransistor, 62, 67
Fototransmissor, 155
Fotovoltaico, 65
Freqüência de comutação, 41
FVC, 84

G

Gray, 21

H

Hall, 47, 58
HART, 20
Haste
    metálica, 130
    piezoelétrica, 137
Hidrodinâmica, 148
Higrômetro, 192

I

Influência mútua, 42
Infravermelho, 36
Interruptor de mercúrio, 130

J

Janelas de luz, 37
Junção, 99
    aterrada, 100
    exposta, 99
    isolada, 100
    pn, 76

L

LAPUT, 73
LASCR, 73
LDR (Light Dependent Resistor), 62, 54
LED, 31, 125
Lei de
    Kirchhoff, 108
    Lorentz, 172
Ligação a 3 fios, 103
Linearidade, 22
LVDT, 47, 88, 123, 124
    com enrolamento aberto, 48

M

Magnético, 158
Malhas de controle, 25
Massa, 85
Medição, 133
    a 2, 3 e 4 fios, 102
    de empuxo, 135
    de nível capacitiva, 135
    de nível hidrostática, 133
    de nível laser, 138
    de pressão/deformação, 116
Micromachining, 126
Montagem, 101
Motores, 17

N

N (NPN), 41
Níquel, 100
Nível vibratório, 137
NTC (Negative Temperature Coefficient), 93

O

Oscilador, 30

P

P (PNP), 41
Par bimetálico, 105
Pás rotativas, 143
Peltier, 94
Pick up, 157
Piezoelétrico, 134, 137
Piezorresistivo, 134
Pirômetros, 108
Pitot, 148, 151
Placa de orifício, 148
Patina, 102
Platina, 98, 100
PLC, 166
Ponto de orvalho, 183, 189, 192
Potenciômetro, 56, 131
Pré-Amplificador, 31
Precisão, 22
PROFIBUS-PA, 20
Projetos elétricos, 94
Psicrômetro, 191
PTC (Positive Temperature Coefficient), 92, 163

Q

Quartzo, 120
piezoelétrico, 86

R

Radar, 139
Radiação infravermelha não dispersiva, 196
Radioativos, 140
Reação da armadura, 80
Receptor, 31
Reed switch, 130
Reflectometria, 139
Relé, 17
térmico, 174
Retrorreflexão, 31, 68
Reynolds, 162
Ródio, 98
Rotâmetros, 153
RVDT, 50

S

SCR, 73
SDCD, 166
Seebeck, 94, 95
Semicondutores, 91
Sensibilidade, 22
Sensor(es), 17
analisadores de cores, 69
analógicos, 18
ativo e passivo, 72
capacitivos blindados, 44
de aceleração, 85
de contraste, 69
de distância, 69
de luminescência, 69
de nível tipo bóia, 132
de posição, 40
de pressão capacitivo, 128
de pressão integrado, 126
de pressão ópticos, 125
de proximidade capacitivos, 43
de proximidade magnéticos, 46
de reflexão difusa, 33
digitais, 18
eletrônicos, 105
flutuador potenciométrico, 131
incremental angular, 54
indutivos para corrente alternada (AC), 41
óptico, 30
óptico por retrorreflexão, 32
óptico por transmissão, 32
piezoelétrico, 119
potenciométrico, 52
vibratório, 138
Set point, 131
Shear beam, 115, 116
Shunt, 172
Silício, 126
Sistemas industriais, 17
Solenóides, 17
Strain-gage, 87, 113, 141
Syncro, 51

T

Tacômetro de indução, 79
Tanques, 129, 133
Taquimétrico, 78
Temperatura, 95
Tempo de pesagem, 116
Termistores, 91
Termoelementos, 95
Termoelétricos, 94
Termopar com isolação
mineral, 99
Termopares, 94, 112
E, 96
J, 96
K, 97
N, 97
S - R, 97
T, 96
TIPO B, 97
Termopiles, 95
Termopilha, 112
Termorresistência, 100, 102, 104
Transdutor(es), 19, 87
de pressão piezoelétrico, 119
Transistores, 106
Transmissor, 20, 143
ultra-sônico, 142
Tubo de Bourdon, 123, 125
Tungstênio, 95

U

Ultra-sônica, 60, 142, 159
Umidade
absoluta, 183
relativa, 183

V

Válvulas, 17
de ultravioleta, 73
Velocidade, 23
de deslocamento, 85
Venturi, 148, 149, 150
Vidicons, 70

W

Wheatstone, 116, 119

Sensores Industriais

Fundamentos e Aplicações

Destinado a alunos de graduação em engenharia ou tecnologia, técnicos e engenheiros que atuam na área de automação de processos e sistemas industriais e prediais.

Trata dos conceitos e características dos dispositivos em geral, como atuador, transdutor, sensor analógico e conversores.

Apresenta os tipos de sensores utilizados na indústria e alguns de uso doméstico, destacando o fundamento físico aplicado a eles, além de algumas de suas aplicações em campo como os sensores de fim de curso do tipo chave, de nível por radiação, de posição, acelerômetros, presença, ópticos, velocidade, temperatura, pressão, nível, vazão, tensão, corrente, potência, umidade, gases e pH.

Traz uma lista de exercícios propostos para fixação do aprendizado.

"Os sites ou e-mails eventualmente mencionados neste livro são ilustrativos, podendo ser modificados ou extintos a qualquer momento."

INVISTA EM VOCÊ.
LEIA LIVROS!

www.editoraerica.com.br

Código: 0719
ISBN: 978-85-365-0071-3
9 788536 500713