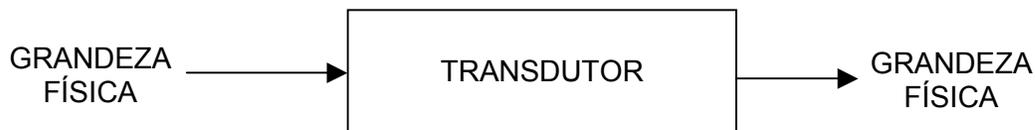


2. Sensoriamento

Transdutor:

É todo dispositivo que recebe um sinal de entrada em forma de uma grandeza física e fornece uma resposta de saída, da mesma espécie ou diferente, reproduzindo certas características do sinal de entrada, a partir de uma relação definida. É mais comum que um elemento seja batizado de transdutor quando opera diretamente, convertendo uma forma de energia em outra.



Sensor:

Sensores são dispositivos que mudam seu comportamento sob a ação de uma grandeza física, podendo fornecer um sinal que indica esta grandeza de forma direta ou indireta.

Os de ação direta, na verdade, são transdutores que convertem a grandeza física de entrada em um sinal elétrico na saída. Os de operação indireta não produzem energia na forma de um sinal elétrico. Entretanto sob ação de uma grandeza física, apresentam alterações em suas propriedades elétricas, como a resistência, a capacitância ou a indutância, cujas variações guardam relação com a grandeza física na entrada.



Exemplos de aplicações

Um sistema de alarme é um exemplo típico e atual de utilização de sensores. Mas há uma variedade de áreas em que os sensores encontram aplicação.

Num automóvel, por exemplo, identificamos várias dessas aplicações:

- O sistema de indicação do volume de combustível no tanque;
- O sistema de indicação do nível de óleo no cárter;
- O sistema de freios;
- Os sistemas mais modernos que indicam que as portas estão abertas e que o cinto de segurança não está sendo utilizado.

Os sensores também apresentam ampla utilização em várias aplicações industriais, tanto na tecnologia de produção quanto no próprio produto.

Características estáticas dos sensores

São um conjunto de parâmetros inerentes aos dispositivos sensores que permitem selecionar um dado dispositivo em função das características da grandeza que se deseja medir. Dentre as características estáticas dos sensores destacam-se as principais:

Função de transferência:

Representa a associação matemática entre a grandeza física de entrada e o sinal elétrico na sua saída

Ex.1: Um dado sensor de temperatura resistivo, dentro de uma faixa, tem função de transferência aproximada por:

$$R(T) = K + \alpha T$$

Ex.2: Um dado acelerômetro apresenta em sua saída uma tensão V, que tem como função de transferência:

$$V(a) = 1,8V + \frac{0,0019 V}{g} a$$

Sensibilidade:

É descrita pela taxa de variação infinitesimal (derivada), entre o sinal de saída e a grandeza de entrada de um sensor. Um determinado sensor é dito mais sensível que outro se apresentar uma saída maior para o mesmo sinal de entrada. Por vezes sensibilidade é tomada como a menor variação na grandeza que o sensor é capaz de detectar, porém neste sentido, é mais correto empregar-se o termo resolução.

Ex: Um termistor pode ter uma sensibilidade de $0,5 \Omega / ^\circ\text{C}$.

Ex: Um acelerômetro pode ter uma sensibilidade de $0,0019\text{V/g}$

Faixa:

Representa os limites entre os quais a grandeza de entrada a ser medida pode variar, fora dos quais a grandeza não pode ser corretamente mensurada, importando em alguns casos em danos ao dispositivo.

Ex: uma célula de carga (dispositivo que utiliza extensômetro), mede forças entre 0 e 100N.

Erro:

É descrito como a diferença, entre a quantidade real da grandeza e resultado do valor medido pelo sensor. Quando o erro é variável ao longo da faixa, é melhor representado pela curva de erro. Seu valor é expresso na mesma unidade da grandeza medida.

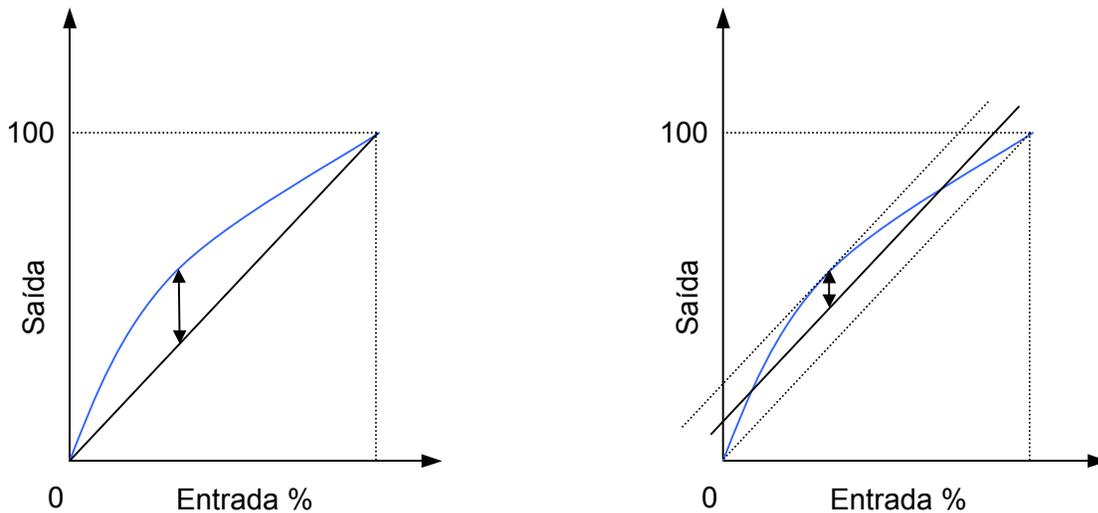
Precisão:

Exprime o maior erro esperado entre o valor indicado pelo sistema de medida e o valor real da grandeza. É representada pelo desvio, expresso em percentagem, (ou do valor máximo ou da banda) entre o valor medido e o valor real da grandeza. A melhor maneira de conhecer a precisão consiste na determinação da curva de erro, em toda a banda da medida.

Ex: Um sensor de temperatura possui uma precisão de $\pm 5\%$, sobre uma faixa de 0 a 200 °C, logo o valor lido pelo sensor pode estar ± 10 °C desviado do real valor da temperatura.

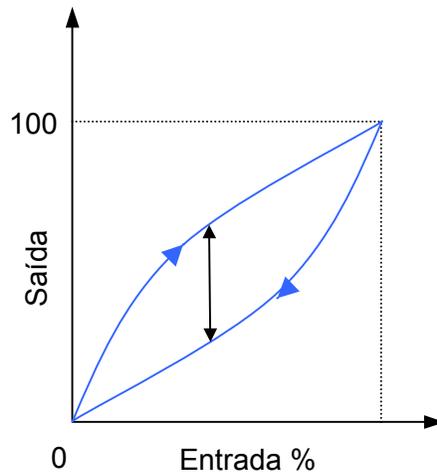
Linearidade:

É uma avaliação comparativa entre um comportamento linear ideal, geometricamente representado por uma reta inclinada, e o comportamento verdadeiro do sensor, ou seja, a sua função de transferência. Existem diferentes métodos para expressar os erros relativos à linearidade. Um método é o mostrado na figura 2.1, onde a avaliação é feita entre o comportamento ideal e a função de transferência real, onde erro máximo é a própria precisão. Outra forma, muito comum, é mostrada na figura 2.2, que compara a função de transferência real com uma função linear interpolada que melhor representa a função real. Os desvios à linearidade são expressos em percentagem.



Histerese:

Diferença máxima entre os valores indicados pelo sensor, quando estes valores são obtidos de forma crescente e decrescente, para um mesmo valor da grandeza medida.



Resolução:

É a menor variação da grandeza medida que o sensor é capaz de detectar e apresentar um resultado mensurável. Também é comum, apesar de não ser o mais correto, referir-se a resolução como o número de divisões de uma dada porção da grandeza.

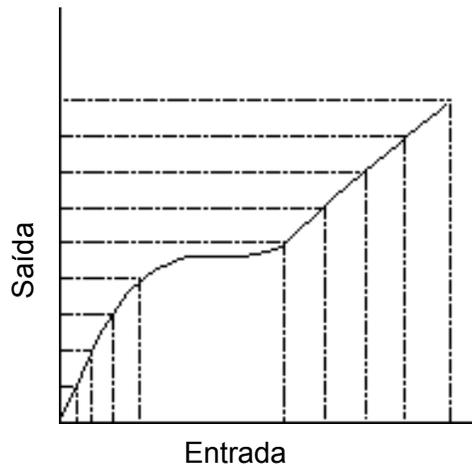
Ex.: Um extensômetro pode ter uma resolução de 0,001 mm ou 1000 partes por milímetro.

Repetitividade (repetibilidade):

Representa a exatidão com a qual se obtém a mesma medida quando ao longo do tempo se aplica a mesma entrada, mantendo todas as demais condições constantes. É expressa na forma de percentagem em relação a faixa total.

Banda morta ou Faixa morta:

É tida como uma porção anômala do comportamento de um sensor para a qual a saída não apresenta resultado mensurável em relação na presença de uma variação da entrada. É comum este tipo de fenômeno quando o sistema de medida está sujeito a folgas e insensibilidades.



Características dinâmicas dos sensores

Existem ainda um outro conjunto de características, as dinâmicas, que levam em conta parâmetros do comportamento tanto do sinal como do próprio sensor, em função do tempo.

Tempo de resposta:

Tempo necessário para que o sensor alcance um mínimo de 95% do valor presente na entrada.

Constante de tempo:

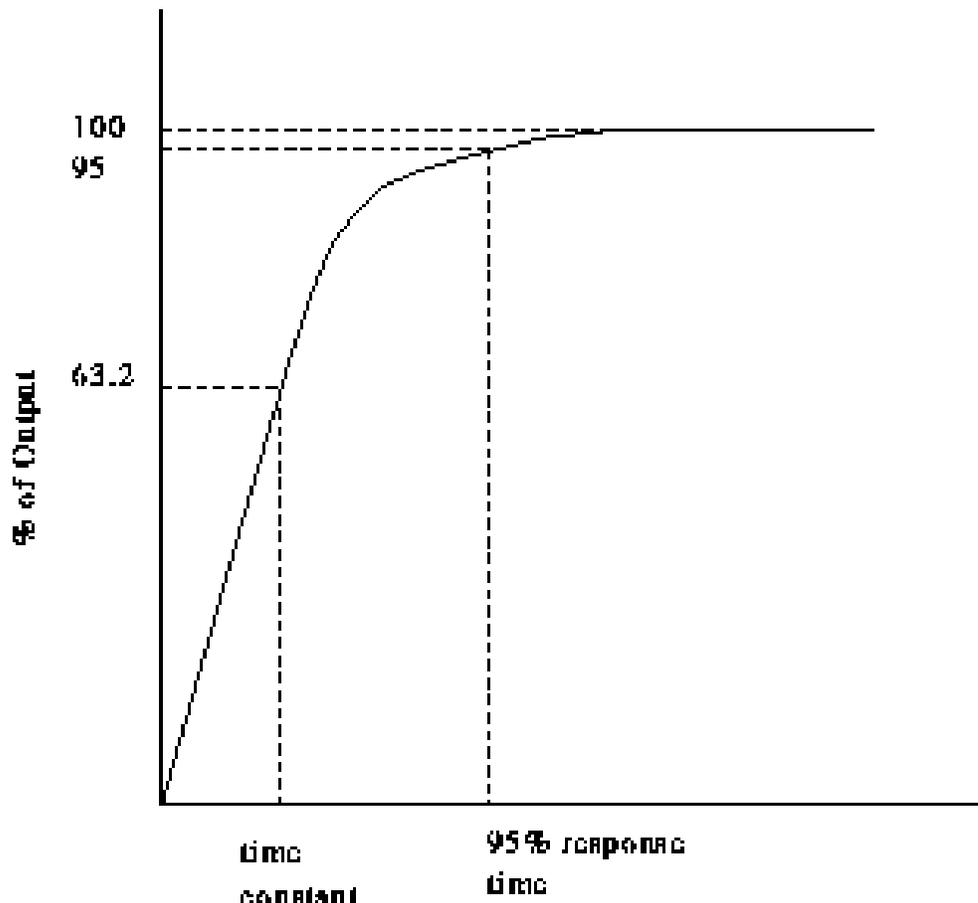
Tempo necessário (relativo a um sistema de primeira ordem) para que o sensor alcance 63,5% da valor presente na entrada.

Settling Time (tempo de povoamento):

Tempo necessário para que o sensor alcance um valor pré escolhido, por exemplo 2% da entrada.

Banda passante:

Representa o intervalo de velocidades de variação do sinal de entrada, para as quais o sensor é capaz de fornecer uma indicação adequada. Ex: 30 a 3000 Hz



CLASSIFICAÇÃO DE SENSORES

A classificação dos diversos tipos de sensores pode ser feita segundo diferentes critérios, alguns dos quais veremos a seguir.

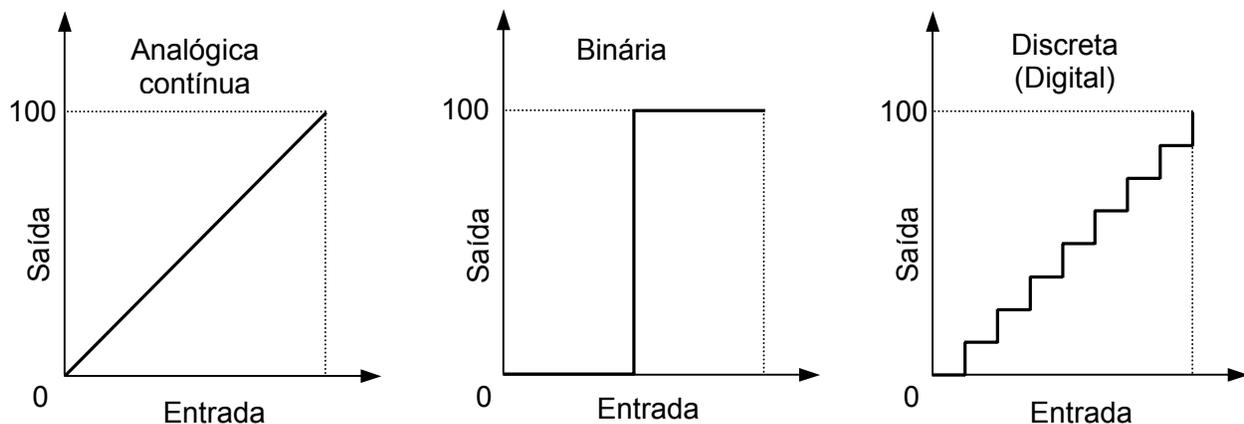
Classificação quanto ao tipo de saída.

um sensor pode ser classificado de acordo com a forma com que um sinal de entrada é retratado na sua saída.

- **A saída analógica contínua** permite retratar a grandeza de entrada ponto a ponto dentro de toda a faixa.

- **Na saída binária**, a faixa de entrada é representada por apenas dois valores ou estados bem distintos, a partir de um ponto específico do valor da entrada, ou dois pontos caso a histerese não seja desprezível. (este tipo de saída é conhecida também como liga/desliga, on/off, tudo/nada).

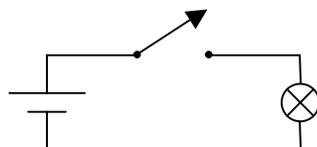
- **Na saída discreta (ou digital)**, apenas um limitado número de valores escalonados e distribuídos pela faixa são utilizados para representar as variações na entrada.



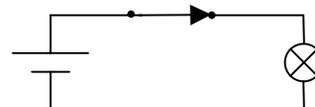
Classificação quanto ao princípio de funcionamento

Podemos classificar os sensores do ponto de vista referente ao parâmetro do comportamento que é modificado sob a ação da grandeza de entrada.

- **Sensores mecânicos de contato:** São o tipo mais simples e comum de sensor e são representados pela família dos interruptores e chaves, muitas vezes chamados pelo termo em inglês, switch. Seu princípio de funcionamento é resistivo de saída binária, ou seja, possui apenas dois estados, um de alta resistência quando funciona como circuito aberto e outro de baixa resistência quando funciona como circuito fechado. As chaves apresentam-se em uma grande variedade de tipos e formas. Suas principais aplicações são na interface com o usuário (botões e interruptores), ou sensoriamento de uma posição específica.



chave aberta



chave fechada

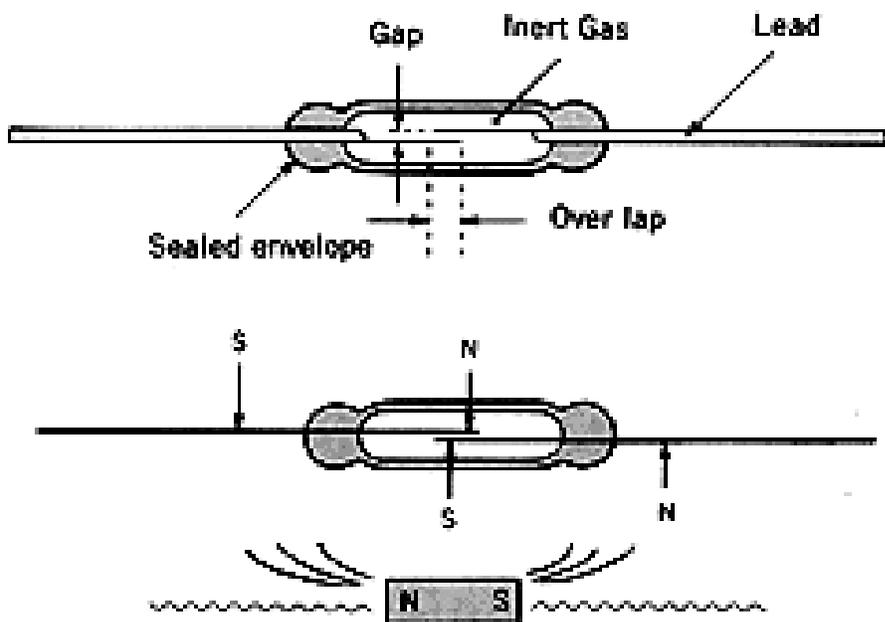


Ilustração de alguns modelos de chaves mecânicas de contato

Sensor magnético de lâminas "reed switch"

Sensor magnético de lâminas ou reed switch é um uma chave que se fecha nas proximidades de um campo magnético. De comportamento igualmente resistivo, é composto de duas partes, uma pequena caixa plástica que possui no seu interior um êmbolo de vidro que abriga duas lâminas metálicas, ferromagnéticas, milimetricamente afastadas que, quando sofrem ação de um campo magnético, se flexionam até se tocarem, fechando o contato elétrico permitindo assim a circulação de corrente. O campo magnético pode ser obtido, por exemplo, de um solenóide ou um ímã permanente, normalmente com um encapsulamento plástico na forma de um componente, de dimensões semelhantes ao sensor.

A caixa com o reed switch é colocada normalmente em um ponto fixo, enquanto o ímã é colocado na parte móvel.



- Sensores Resistivos:

Representam uma família de sensores que retratam as variações presentes na entrada através da modificação de sua resistência elétrica.

Sensores Resistivos Potenciométricos: Empregam os resistores variáveis (potenciômetros ou reostátos) como elemento sensor, normalmente empregado para medir deslocamentos lineares ou angulares. Suas principais aplicações são na determinação de deslocamentos absolutos e orientados.

Tipos de Potenciômetros: Linear e Revolução

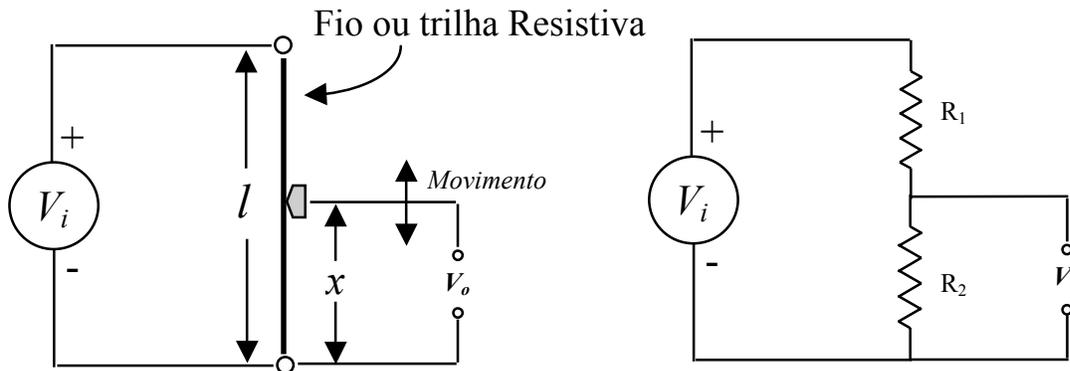
Vantagens:

- barato;
- simples;
- absoluto;
- robusto.

Desvantagens:

- Pouco Exato
- Baixa Resolução
- Impõe carga ao Sistema

Deslocamento linear (Trilha Resistiva ou Fio Reto)



como $R = \rho \frac{l}{a}$, e sendo assim R é diretamente proporcional a l , então :

$$\frac{x}{l} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

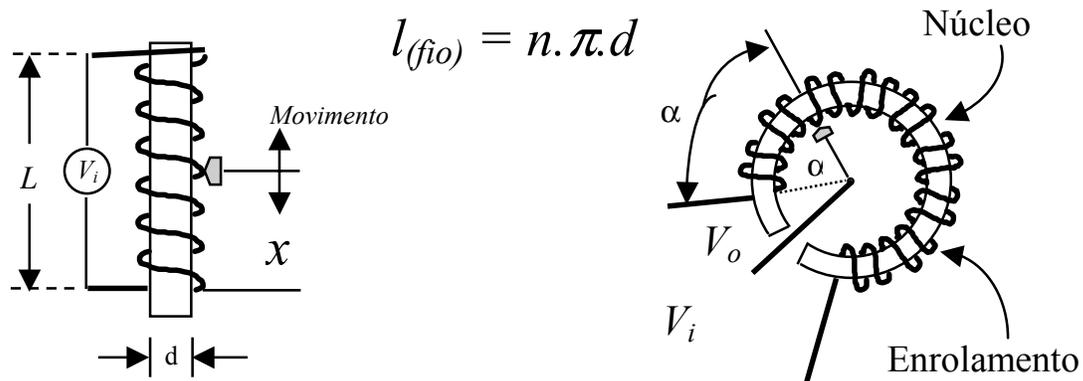
$$\text{se } i = \frac{V_i}{R_1 + R_2} \quad \text{e} \quad i = \frac{V_o}{R_2}, \text{ logo } \frac{V_o}{R_2} = \frac{V_i}{R_1 + R_2} \quad \therefore \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

de (1) e (2) temos: $\frac{x}{l} = \frac{V_o}{V_i}$, então $x = l \frac{V_o}{V_i}$, que é a expressão que relaciona a tensão V_o com a posição x .

sendo os valores de R_1 e R_2 definidos de acordo com a posição do cursor,

destacando que a soma de R_1 e R_2 é sempre igual a resistência total de comprimento l .

Deslocamento Linear e Deslocamento Angular com fio enrolado.



$$l_{(\text{fio})} = n \cdot \pi \cdot d$$

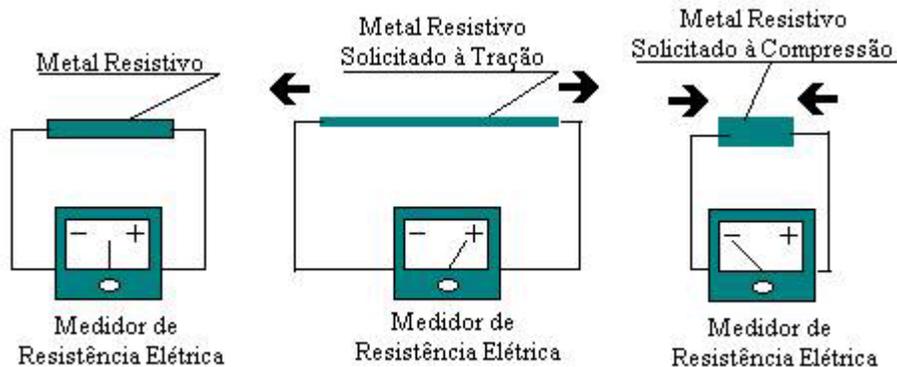
Com bobina linear de fio $x = L \frac{V_o}{V_i}$

com bobina angular $\alpha = \beta \frac{V_o}{V_i}$

Resolução: (L/n , onde n é o número de espiras no comprimento L da bobina)

EXTENSÔMETRO RESISTIVO

Em 1856 o professor da Royal Society of London, William Thomson (Lord Kelvin) notou que a resistência elétrica de um condutor aumentava, quando este era submetido a uma força de tração, e diminuía quando a força de tração diminuía, sendo essa variação da resistência elétrica proporcional a grandeza de tração ou compressão a que o metal resistivo está sendo submetido.

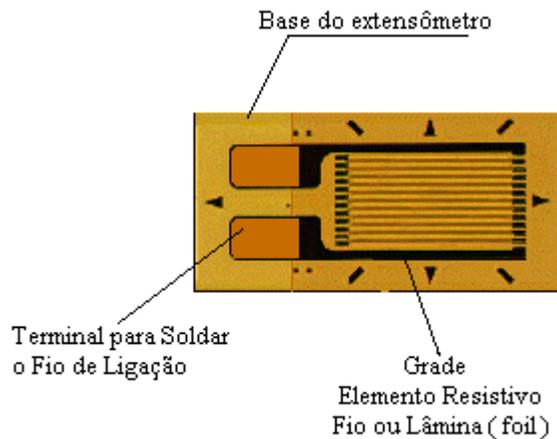


Esta experiência deu origem aos extensômetros que são utilizados atualmente criando uma nova área de estudo a extensometria.

O extensômetro elétrico ou strain-gage, é na sua forma mais completa, um resistor elétrico composto de uma finíssima camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante. Este é então colado sobre a estrutura em teste e, transforma pequenas variações de dimensões em variações equivalentes de sua resistência elétrica, constituindo um meio de se medir e registrar o fenômeno da deformação como sendo uma grandeza elétrica.

Como o strain-gage é sensível as deformações oriundas das cargas presentes na estrutura, pode-se então estudá-las, medindo o comportamento de deformação no corpo. As tensões mecânicas são calculadas, considerando-se estas deformações e seu estado de orientação geométrica na peça. Uma vez que se pode utilizar dos valores de deformação para medir as forças que dependem exclusivamente do tipo de material e geometria da estrutura, o extensômetro elétrico pode ser utilizado para medir deformações em diferentes estruturas tais como: pontes, máquinas, locomotivas, navios e associado a instrumentos especiais possibilita a medição de pressão, tensão, força, aceleração e outros instrumentos de medidas que são usados em campos que vão desde a análise experimental de tensão até a investigação e práticas médicas e cirúrgicas.

O extensômetro elétrico é composto basicamente de um terminal de Soldar, uma base e um elemento resistivo, como pode ser visto na figura abaixo:



- O material da base

Inicialmente a base do extensômetro era feita de papel, sendo que até hoje alguns fabricantes mantêm em sua linha de produção esse tipo de extensômetro. Com o desenvolvimento da tecnologia de materiais, os extensômetros atualmente são produzidos com vários tipos de materiais de base que são: poliamida , epóx , fibra de vidro reforçada com resina fenólica, baquelita, poliéster.

Cada tipo de material utilizado como base, em combinação com o material utilizado na fabricação da lâmina, faz com que o extensômetro tenha uma aplicação específica para: medição dinâmica, medição estática, ou para utilização em alta temperatura e outras.

Os fabricantes têm à disposição grande variedade de tamanhos e modelos de extensômetros, permitindo assim a escolha correta para cada caso específico.

- O elemento resistivo

Confeccionado de ligas metálicas tais como Constantan, Advance, Nicromo V, Karma, Níquel, Isoelatic e outros.

Resumidamente os extensômetros elétricos de resistência podem ser caracterizados por apresentar:

- 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 tratamento adequado;
- Possibilidade de se efetuar medidas à distância.

Essas e outras características explicitam o porque dos extensômetros elétricos de resistência serem tão largamente utilizados no ramo da engenharia civil, e indispensáveis a qualquer estudo experimental de medidas.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

$$R = \rho \cdot (L/A) \quad (1.1)$$

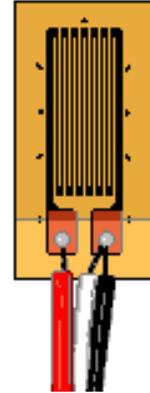
Onde:

R = resistência em Ohms;

L = comprimento do condutor;

A = seção transversal do condutor;

ρ = resistividade do condutor, que é função da temperatura do condutor e das solicitações mecânicas à ele aplicadas.



Se submetermos este condutor a uma solicitação mecânica (tração ou compressão) sua resistência irá variar, devido às variações dimensionais de seção e comprimento **L**, também pela propriedade fundamental dos materiais chamado piezo-resistividade, a qual depende da resistividade do material, sob uma deformação mecânica.

A experiência mostra que à deformação ϵ ($\Delta L / L$) corresponde uma variação unitária de resistência $\Delta R / R$ que, dentro de certos limites, é sensivelmente proporcional à deformação do fio,

$$(\Delta R / R) = K \cdot \epsilon$$

Pela equação acima, deduzimos que se o fator **K** (fator do extensômetro) for conhecido, medindo-se a variação relativa de resistência ($\Delta R / R$) obteremos a medida de deformação ϵ ($\Delta L / L$). Este é o princípio do extensômetro elétrico de resistência.

O termo ($\Delta R / R$) / ϵ pode também ser expresso como:

$$\pi_1 \cdot E$$

logo

$$\pi_1 \cdot E = K$$

Onde:

π_1 = Coeficiente piezo-resistivo longitudinal;

E = Módulo de elasticidade.

O valor de **K** para os extensômetros elétricos de resistência mais empregados, varia entre 2,0 e 2,6 ; para a platina chega a valores entre 4,0 e 6,0 e para o níquel, o valor de **K** é negativo (-12,0), o que vale dizer que quando submetemos à tração um fio de Níquel, sua resistência elétrica diminui, ao contrário do que ocorre com outros metais.

É interessante observar que a resistência "**R**", do elemento resistivo utilizado na confecção do extensômetro elétrico, deve ser elevada para podermos ter condições de medir variações de resistências " ΔR ".

Por volta de 1980, extensômetros baseados em materiais semicondutores em vez de metálicos, se tornaram comercialmente viáveis, porém esses tipos de extensômetros são mais caros, e necessitam de uma técnica mais cuidadosa, do que a aplicada aos extensômetros metálicos, tendo como vantagem um alto fator de sensibilidade à deformação, o qual é aproximadamente de 150, podendo ser positivo ou negativo.

ESQUEMAS DE LIGAÇÕES DOS EXTENSÔMETROS

Quanto a forma que os strain-gages devem ser colados na peça, podemos dizer que são subdivididas quanto a precisão requerida nas medições, grau de proteção com o ambiente e fidelidade de medidas a médio / longo prazos.

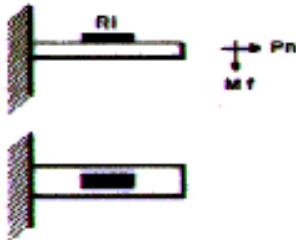
Abaixo são apresentados alguns tipos possíveis de ligações a serem feitos:

LIGAÇÃO Nº 1

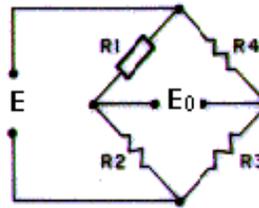
Neste tipo de ligação haverá influência da temperatura nas leituras de deformações.

A medida da deformação será devido ao esforço normal, ao momento fletor e a variação da temperatura.

POSICIONAMENTO



ESQUEMA DE LIGAÇÃO



TENSÃO NA SAÍDA

$$E_0 = \frac{E}{4} K \varepsilon$$

DEFORMAÇÃO MEDIDA

$$\varepsilon_n + \varepsilon_f + \varepsilon_t$$

R2, R3 e R4 são resistores fixos de precisão.

Pn = Força normal

Mf = Momento fletor

E0 = Tensão de saída

E = Tensão de alimentação

K = Fator do extensômetro

ε = Soma de todas as deformações do extensômetro

ε_n = Deformação devido a força normal

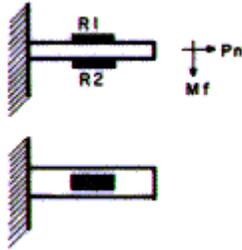
ε_f = Deformação devido ao momento fletor

ε_t = Deformação devido ao efeito da temperatura

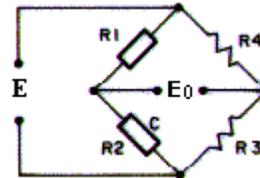
LIGAÇÃO Nº 2

Neste tipo de ligação a temperatura não terá influência nas leituras das deformações.
A medida da deformação devido ao esforço normal será nula.
A medida da deformação devido ao esforço de flexão será em **dobro**.

POSICIONAMENTO



ESQUEMA DE LIGAÇÃO



TENSÃO DE SAÍDA

$$E_o = \frac{E}{2} K \varepsilon$$

DEFORMAÇÃO MEDIDA

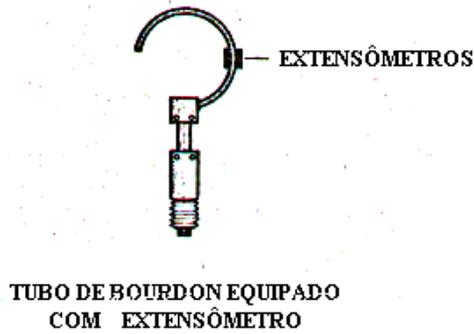
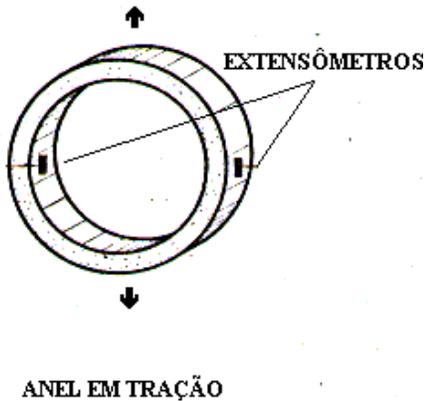
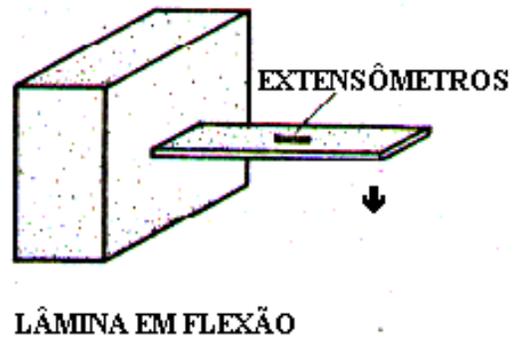
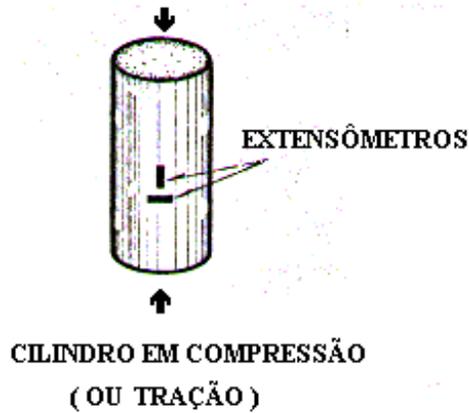
$$\varepsilon_f$$

- R3 e R4** são resistores fixos de precisão.
- Pn** = Força normal
- Mf** = Momento fletor
- Eo** = Tensão de saída
- E** = Tensão de alimentação
- K** = Fator do extensômetro
- ε** = Deformação total dos extensômetros
- εf** = Deformação devido ao momento fletor

Os principais sensores construídos com extensômetros são:

- sensor de carga (célula de carga);**
- sensor de pressão;**
- sensor de deslocamento;**
- sensor de inclinação;**
- sensor de aceleração (acelerômetros)**

TIPOS DE ELEMENTOS ELÁSTICOS ASSOCIADOS A EXTENSÔMETROS RESISTIVOS



Classificação dos extensômetros quanto à geometria da grade.

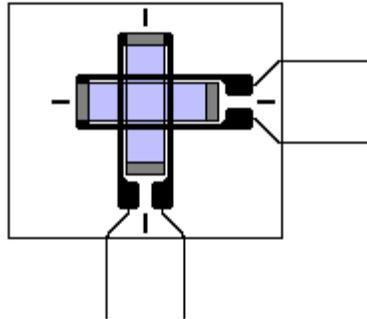
- Extensômetro axial único:

Utilizado quando se conhece a direção da deformação, que é em um único sentido.

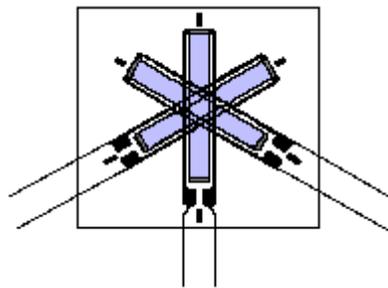


- Extensômetro axial múltiplo (Roseta):

Roseta de 2 direções: São dois extensômetros, independentes, montados sobre uma mesma base, sensíveis a duas direções. É utilizada para se medir as deformações principais quando se conhecem as direções.



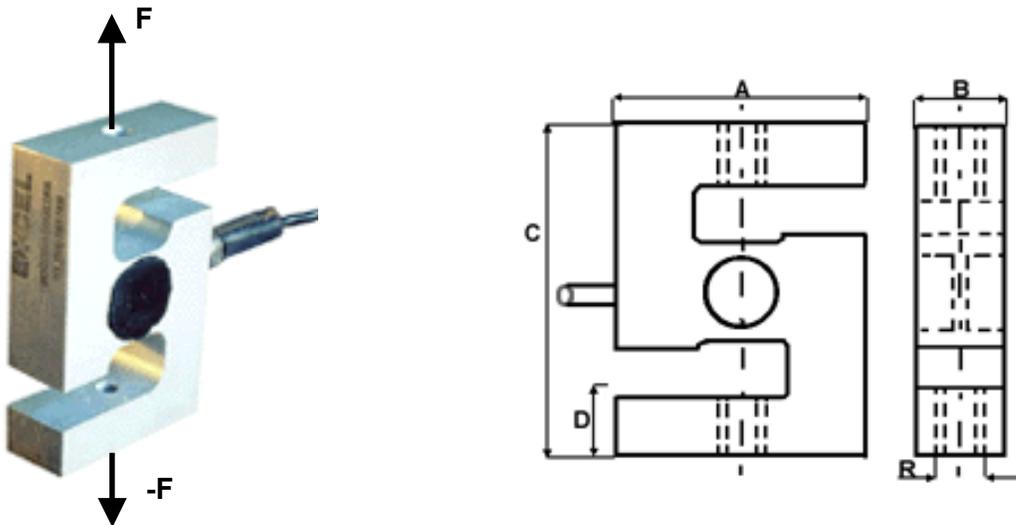
Roseta de 3 direções: São três extensômetros sobre uma mesma base, sensíveis a três direções. É utilizada quando as direções principais de deformações não são conhecidas.



Células de carga:

São um exemplo da aplicação dos extensômetros ou "strain-gages", sendo constituídas do próprio extensômetro além de uma estrutura metálica geometricamente modelada, sendo encontradas em diversos tipos de acordo com os aspectos da força mecânica a ser medida.

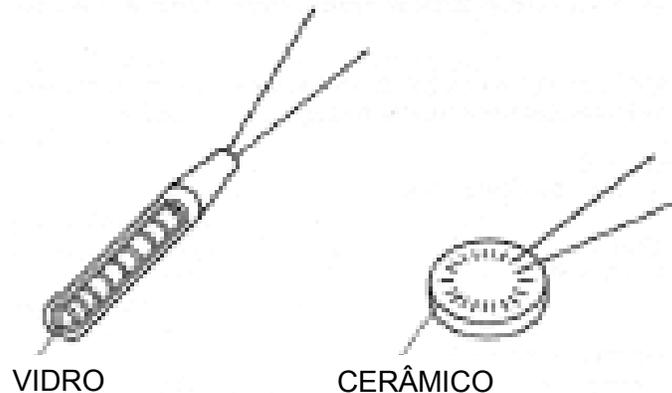
Abaixo podemos ver um modelo utilizado para medir forças de tração.



RTD

As RTD ou resistências dependentes da temperatura ou termoresistências ou bulbos de resistência ou termômetros de resistência, são sensores que se baseiam no princípio da variação da resistência ôhmica em função da temperatura. Elas aumentam a resistência com o aumento da temperatura. Seu elemento sensor consiste de uma resistência em forma de fio de platina de alta pureza existindo também em níquel ou cobre (menos usados), encapsulado num bulbo de vidro ou na forma de um filme metálico com encapsulamento cerâmico.

- Filme com encapsulamento cerâmicos: aplicações industriais, pois resistem a temperaturas mais altas e tem uma maior resistência mecânica.
- Fio com bulbos de vidros: são usados em laboratórios, onde se deseja um tempo de resposta baixo.



A expressão que relaciona, genericamente, a resistência como função da temperatura de um RTD para pequenas variações é do tipo $R_T = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$. para intervalos grandes de temperatura deve-se aplicar uma expressão polinomial do tipo $R_T = R_0 (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n)$, onde R_0 é a resistência a 0 °C, R_T é a resistência na temperatura T e α é o coeficiente de temperatura do metal.

Um exemplo de RTD, bastante utilizado, é o PT100 que possui os seguintes parâmetros:

100 Ω a 0 °C e 138,4 Ω a 100 °C, ou seja, 1 °C de variação corresponde a uma variação de 0,384 Ω . Se desconsiderarmos a pequena não linearidade nesta faixa (0 a 100 °C), teríamos uma precisão (erro máximo) de 0,4 °C no meio da faixa, ou seja a 50 °C. Para aplicações de maior precisão é preciso utilizar a expressão de linearização abaixo:

$$R_t = R_0 * (1 + A * t + B * t^2 + C * (t - 100) * t^3)$$

$$A = 3.9083 \times 10^{-3}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12}, \text{ abaixo de } 0 \text{ °C ou } C = 0, \text{ acima de } 0 \text{ °C.}$$

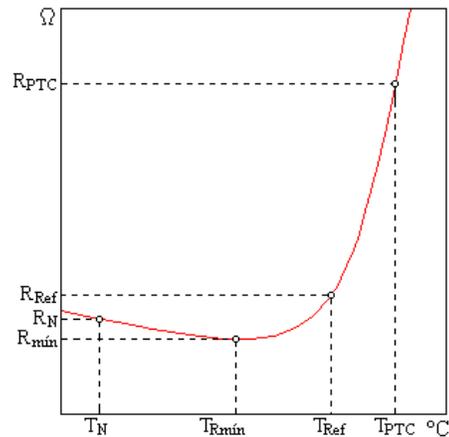
Estes componentes possuem uma elevada precisão e estabilidade principalmente para aplicações em torno da temperatura ambiente com boa linearidade, possuindo entretanto um elevado custo devido a utilização de elementos nobres com alto grau de pureza como a platina.

TERMISTORES

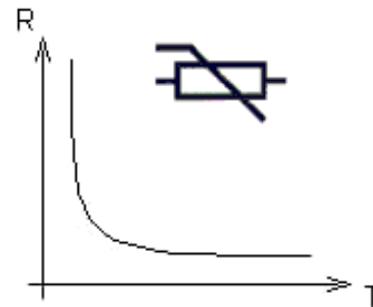
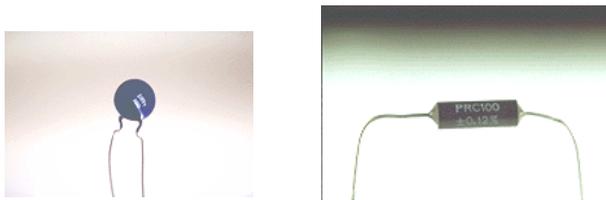
São resistores também dependentes de temperatura, porém constituídos de compostos semicondutores de silício ou germânio dopados com óxidos de ferro, magnésio ou cromo.

De acordo com o coeficiente de temperatura, podem ser classificados em PTC e NTC.

O PTC (Positive Temperature Coefficient) tem resistência proporcional à temperatura numa faixa restrita com coeficiente positivo. A variação da resistência é maior que a de um NTC, na mesma faixa. Seu uso é mais freqüente como sensor de sobretemperatura, em sistemas de proteção, por exemplo, de motores.



O NTC (Negative Temperature Coefficient, Coeficiente Negativo de Temperatura), tem resistência inversamente proporcional à temperatura.

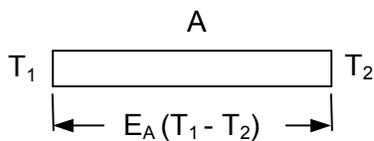


Devido a seu comportamento não linear, o NTC é utilizado numa faixa pequena de temperaturas, em que a curva é próxima de uma reta, ou com uma rede de linearização. O NTC é empregado em temperaturas de até uns 150° C.

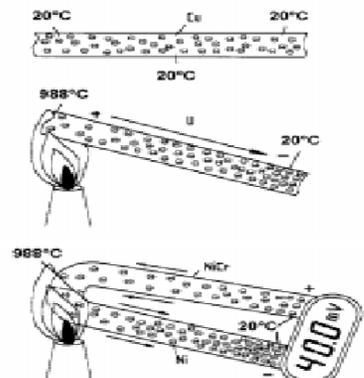
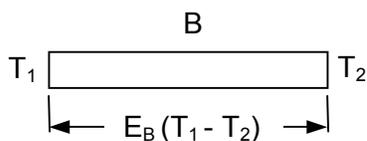
Termopar

Obs.: O termopar não se enquadra na classe dos sensores de comportamento resistivo, (o classe mais adequada seria a termoeétrica), sendo abordado aqui para agrupar os sensores de temperatura.

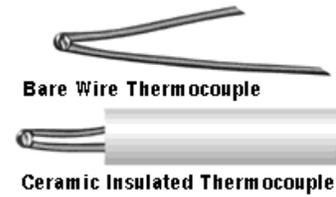
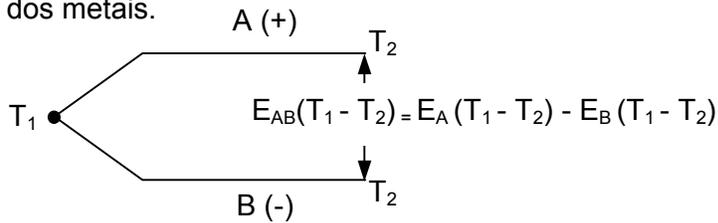
Quando dois metais encostados são submetidos a uma temperatura, surge nos extremos deles uma tensão proporcional à temperatura. Este fenômeno é denominado efeito Seebeck. Consideremos dois metais denominados genericamente "A" e "B" submetidos à mesma diferença de temperatura entre suas extremidades. Em cada um deles surgirá uma força eletromotriz, (módulo e polaridade) conforme figura próxima:



$$(T_2 > T_1)$$



Verificou-se que quando os metais são unidos (soldados) em uma das suas extremidades, conforme a figura abaixo, mede-se uma força eletromotriz entre as extremidades separadas cujo valor corresponde à diferença entre os valores da f.e.m. que surge em cada um dos metais.



A configuração anterior corresponde ao sensor de temperatura conhecido como termopar ou par termoeletrico. Os elementos "A" e "B" que constituem o termopar são denominados termoelementos e, em função da polaridade da força eletromotriz E_{AB} , "A" é o termoelemento positivo e "B" o termoelemento negativo do termopar "AB". Na configuração de um termopar a extremidade em que se faz a união dos termoelementos é denominada junção de medição (T_1), enquanto a outra é denominada junção de referência. Se a temperatura da junção de referência for fixada em 0°C , então o valor da f.e.m. dependerá somente da temperatura da junção de medição " T_1 ", estabelecendo a relação entre $T = E_{AB}(T)$. O conhecimento desta relação permite utilizar o termopar como um sensor de temperatura.

No ambiente industrial, nem sempre é possível manter-se a temperatura de referência em 0°C , utilizando-se uma normalmente como referência a própria temperatura ambiente o que implica em uma imprecisão que é normalmente atenuada através de compensação eletrônica.

A relação da f.e.m. termoeletrica com a temperatura, normalmente, não é linear, mas para algumas faixas de temperatura, pode ser considerada como se o fosse, do tipo $\epsilon = B + KT$, como a reta 1 abaixo.



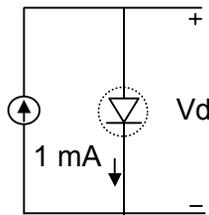
Sendo K é uma constante para cada par de metais, que é utilizável até seu limite térmico. Os termopares comerciais se designam por letras (T,E,J,K,R) que identificam os materiais que o constituem, são especificados geralmente por faixa de temperatura e sensibilidade, o coeficiente térmico $\text{mV}/^\circ\text{C}$.

Metal	Temperatura Máxima	Constante K
Cobre-constantán	375°C	$0.1\text{mV}/^\circ\text{C}$
Ferro-constantán	750°C	$0.0514\text{mV}/^\circ\text{C}$

Há também uma outra forma sensoriar temperatura, utilizando-se da variação da queda de tensão em uma junção semicondutora de um diodo em função da temperatura (efeito também não resistivo, colocado nesta seção para agrupar os sensores de temperatura)

Um diodo de silício, polarizado diretamente com corrente de 1mA, tem queda de tensão próxima de 0.62V, a 25°C.

Esta tensão cai aproximadamente 2mV para cada grau °C de aumento na temperatura, e pode ser estimada por uma equação de reta do tipo $V_d = A - BT$. Esta equação vale até uns 125 °C, limite para o silício.



LDR:

O LDR (**L**ight **D**ependent **R**esistor) constitui um tipo de sensor classificado como sensor fotoelétrico do tipo fotocondutor. Estes dispositivos são geralmente fabricados a partir de sulfureto de cádmio. Na ausência de luz o material possui muito poucos elétrons livres, o que faz sua resistência ser extremamente alta. Quando a luz incide sobre o LDR, os elétrons são libertados, provocando um aumento de condutividade no material e conseqüente diminuição da resistência.

A relação (aproximada) entre a resistência e a iluminação pode ser descrita pela seguinte expressão:

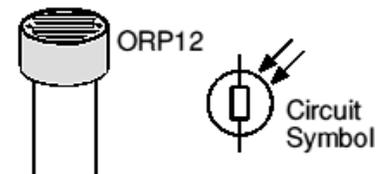
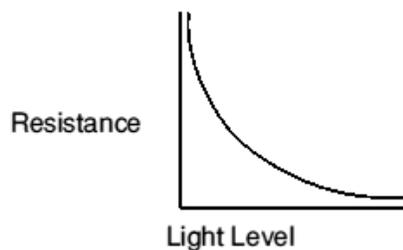
$$R = A L e^{-\alpha}$$

onde:

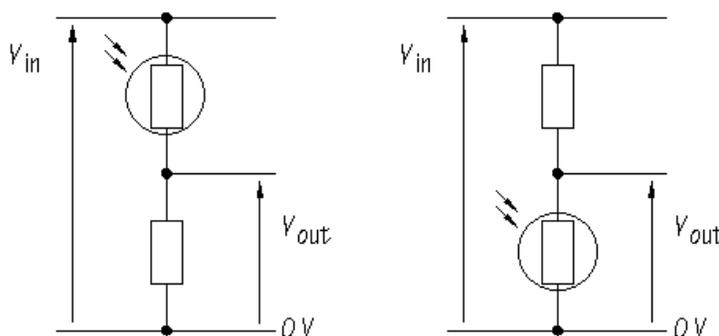
R : resistência, em ohm

L : iluminação, em lux

A e α : constantes.



O valor de α depende do tipo de sulfureto de cádmio, usado no processo de fabrico. Valores entre 0,5 e 0,7 são típicos. A resistência varia de alguns $M\Omega$, no escuro, até centenas de Ω , com luz solar direta.

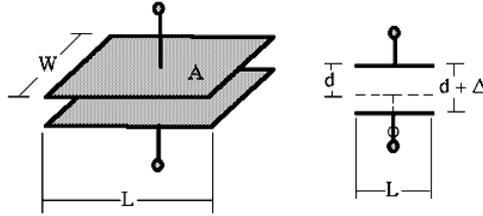


Na figura acima são mostradas duas configurações típicas de montagem do LDR em um divisor de tensão na primeira a tensão de saída (V_{out}) se eleva na presença de luz, na segunda configuração a tensão de saída diminui na presença de luz

Os usos mais comuns do LDR são em relés fotoelétricos, fotômetros e alarmes. Sua desvantagem está no alto tempo de resposta, que limita sua operação.

Sensores Capacitivos:

Em um capacitor de placas paralelas, capacitância depende da área das placas A , da constante dielétrica do meio, ϵ , e da distância entre as placas, d : $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$



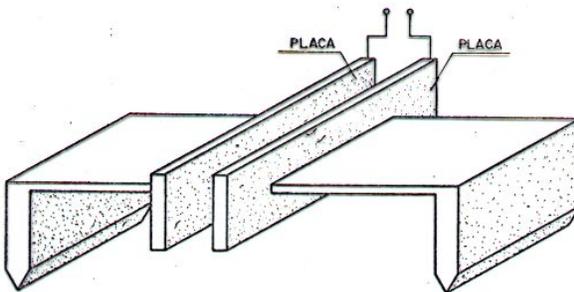
Os sensores capacitivos são capazes de detectar a presença ou aproximação de materiais orgânicos, plásticos, pós, líquidos, madeiras, papéis, metais, etc.

Princípio de Funcionamento:

Nos sensores Capacitivos podemos variar qualquer destes fatores, sendo mais prático alterar a distância entre uma placa fixa e uma móvel, ou a área, fazendo uma placa móvel cilíndrica ou em semicírculo (ou várias paralelas, como no capacitor variável de sintonia) se mover em direção à outra fixa.

A variação na capacitância pode ser convertida num desvio na frequência de um oscilador, ou num desvio do equilíbrio (tensão) numa Ponte feita com dois capacitores e dois resistores, alimentada com C.A.. O desvio de tensão será inversamente proporcional ao desvio na capacitância, neste caso, e usando um sensor por distância entre as placas, será proporcional ao deslocamento entre as placas.

Este método é usado em sensores de posição, força e pressão, havendo uma mola ou diafragma circular suspenso por borda elástica (como o cone de um alto-falante), suportando a placa móvel.



Extensômetro capacitivo com dielétrico de ar



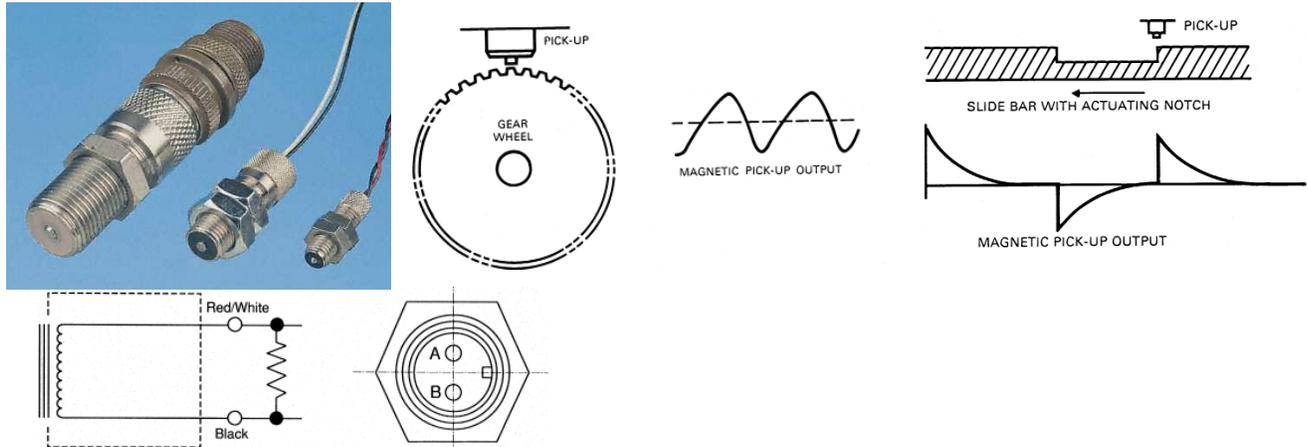
Sensor capacitivo de placas "abertas"

Sensores indutivos

Num indutor, a indutância depende do número de espiras, da área da espira, do comprimento do enrolamento e da permeabilidade do núcleo.

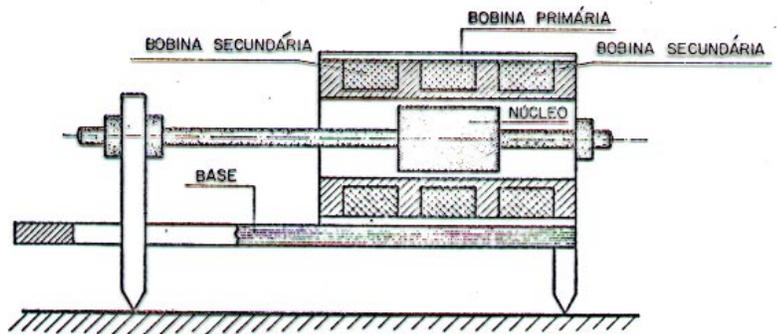
$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

Nos sensores práticos, se altera em geral a permeabilidade do núcleo, deslizando um núcleo ferromagnético para dentro ou fora do enrolamento, ou aproximando uma parte do enrolamento móvel de outra fixa.



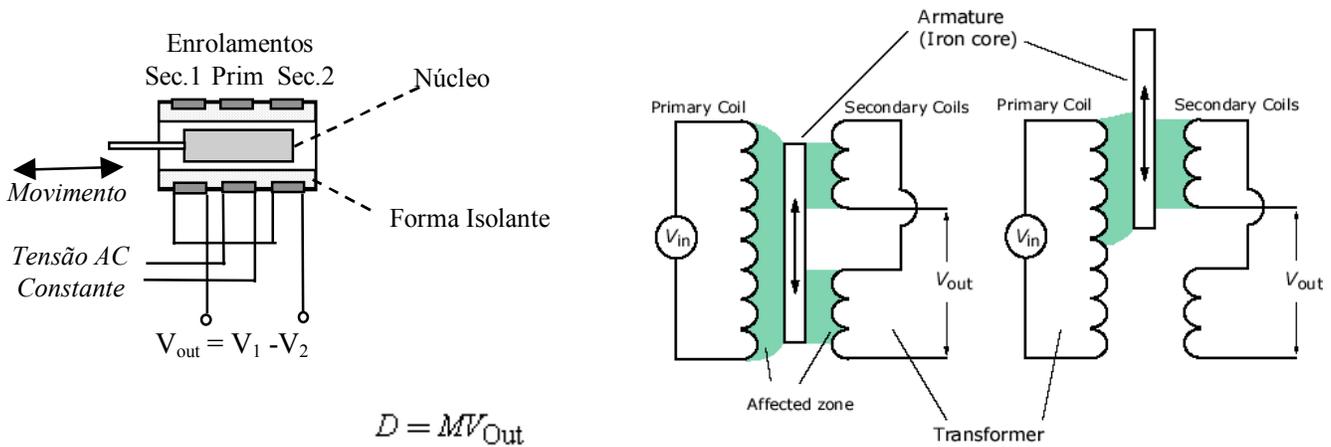
Também se usam sensores que detectam variações na permeabilidade do meio, como nos detectores de metais. Esta variação é facilmente convertida em variação na frequência de um oscilador LC, e o desvio na frequência acusado por um demodulador FM.

O LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

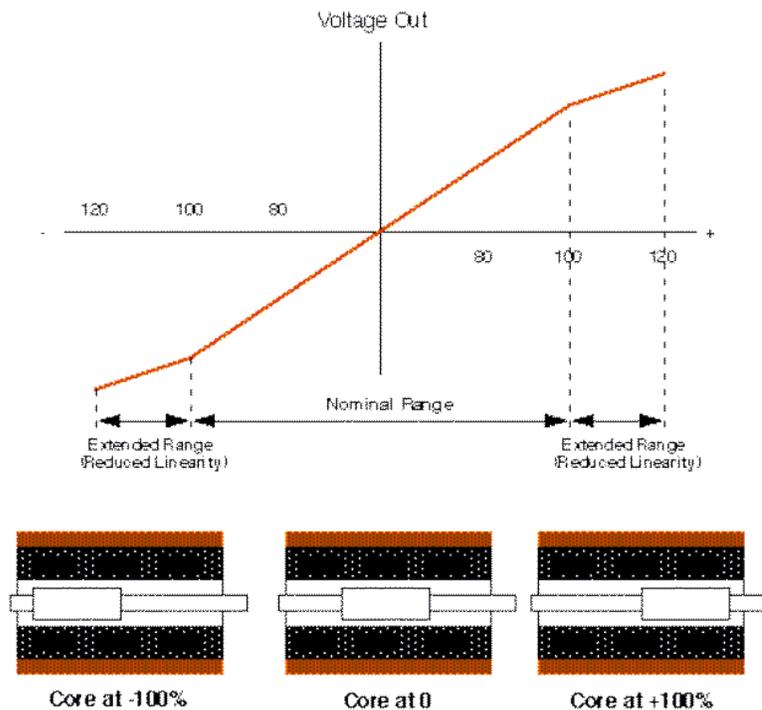


Para uso em medida de posição é comum se usar a indutância mútua, ou coeficiente de acoplamento entre 2 enrolamentos num transformador. Isto pode ser feito movendo-se uma das bobinas direção à outra, ou movimentando-se o núcleo entre elas. A variação do fator de acoplamento modifica a tensão C.A. induzida na bobina secundária.

O LVDT (Linear Variable Differential Transformer), transformador diferencial linear variável, tem esta característica, dentro de uma faixa em torno de metade do comprimento do núcleo móvel, ferromagnético. Usa 3 enrolamentos fixos, alinhados, sendo aplicada a alimentação no central, os 2 outros estão em série, mas com os terminais invertidos, de modo que as tensões se subtraem. Quando o núcleo fica na posição central, a tensão induzida nos 2 enrolamentos são iguais, se cancelando. Ao se deslocar o núcleo para fora da posição central, o acoplamento entre o enrolamento primário e cada um dos outros varia, e as tensões não se cancelam, resultando uma tensão de saída diferente, conforme o núcleo penetre mais numa ou outra bobina.



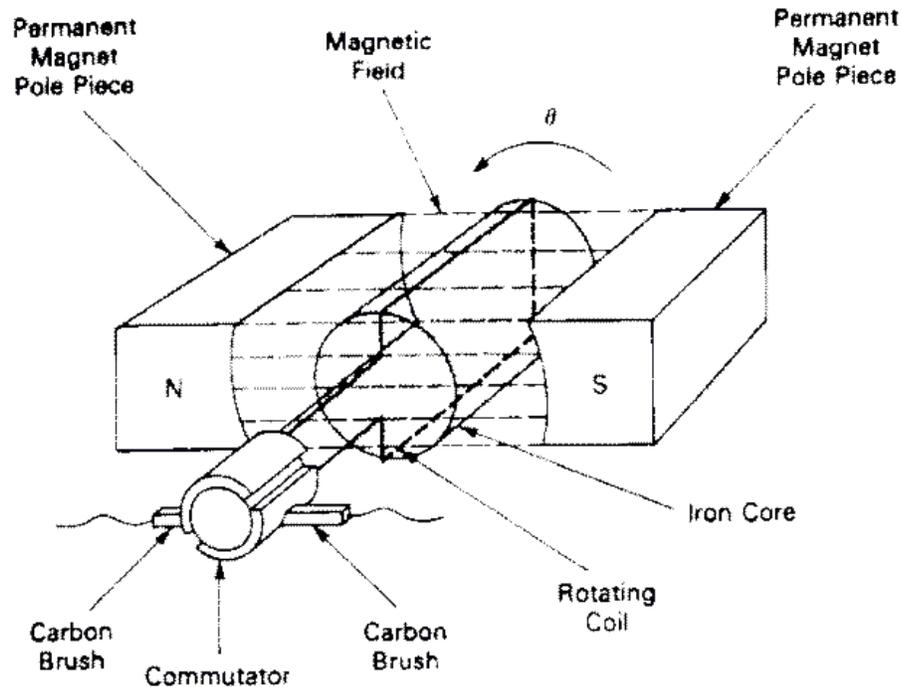
O LVDT é usado em posicionadores de precisão, desde frações de mm até dezenas de cm. É usado em máquinas ferramentas, CNC e robôs industriais.



Tacogerador:

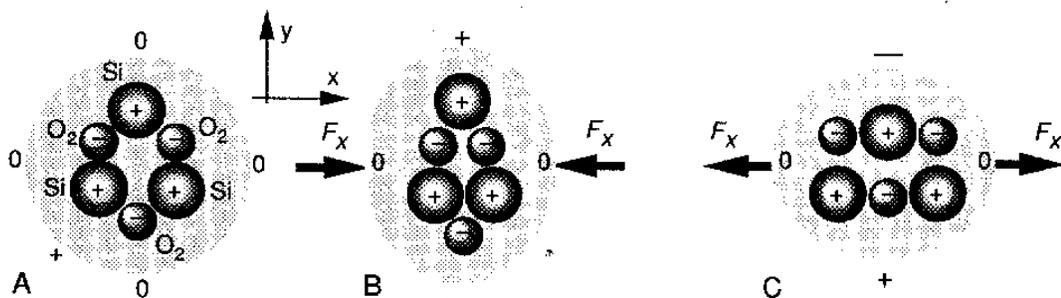
É um pequeno gerador elétrico de CC, com campo fornecido por imã. A tensão gerada, pela Lei de Faraday é proporcional à velocidade com que o fluxo magnético é cortado pelo enrolamento do rotor. Assim, o Tacogerador também é um transdutor mecânico elétrico linear. $V = K n$

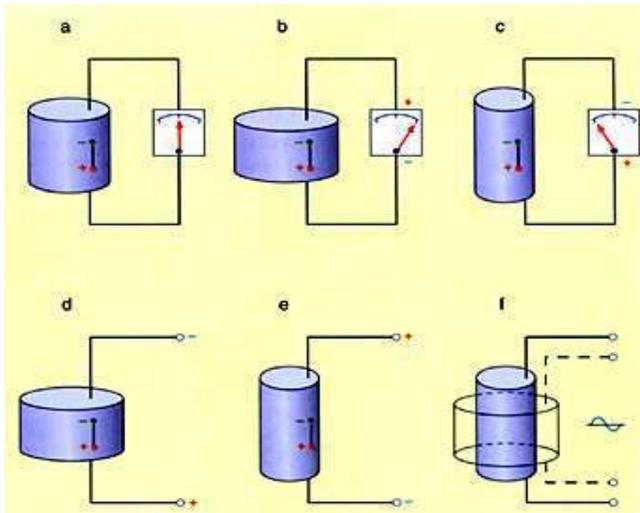
K é uma constante que depende do campo do imã, do número de espiras e pólos e das dimensões do rotor; n é a rotação do eixo (por minuto, rpm, ou segundo, rps).
A polaridade da tensão gerada depende do sentido de rotação.



Sensores piezoelétricos

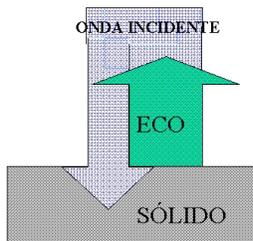
Um sensor **piezoelétrico**, como o próprio nome diz, faz surgir uma ddp, um sinal elétrico, quando está sendo deformado sob a ação de uma força externa. A origem do fenômeno está na perturbação do equilíbrio na distribuição das cargas. De todos os materiais piezoelétricos, o cristal de quartzo (SiO_2) é um dos materiais mais convenientes para desenvolvimento de sensores deste tipo, principalmente devido à estabilidade de seu sinal. Os cristais usados em transdutores são cortados segundo um plano de corte, de modo que somente sejam sensíveis às pressões ou forças de cisalhamento em uma determinada direção.





Em **a**, o material piezolétrico está em seu estado natural, portanto não gera nem uma d.d.p.; em **b**, o material piezolétrico sofre uma compressão e gera uma d.d.p. positiva; em **c**, o material piezolétrico sofre uma tração e gera uma d.d.p. negativa. Em **d** e **e**, uma d.d.p. é aplicada ao material piezolétrico que se contrai e se expande respectivamente; em **f**, o material sofre uma d.d.p. alternada, ou seja, se contrai e se expande, na frequência do sinal (d.d.p. alternada). Este princípio é o utilizado para construção de sensores ultrasônicos.

Também é possível construir sensores que medem forças de empuxo, esforços de corte, momentos fletores, etc. Para medir forças de tração procede-se a uma pre-compressão do cristal, de modo que a tração atua como agente de descompressão. Essa técnica é necessária já que o material, por peculiaridades anisotrópicas, não resistiria ao esforço mecânico de tração. Existem dois tipos principais de sensores de quartzo usados para medição. O primeiro é do tipo no qual a força aplicada causa o surgimento de uma carga eletrostática e mede-se a voltagem produzida. O segundo tipo envolve um cristal na forma de elemento ressonante, onde a frequência é modificada com a força aplicada.



Uma das técnicas empregadas é ilustrada à esquerda, onde a velocidade do som refletido é a base para a medição através desta técnica, a de **ECO**, usada em alguns equipamentos dotados de sensores ultra-sônicos.

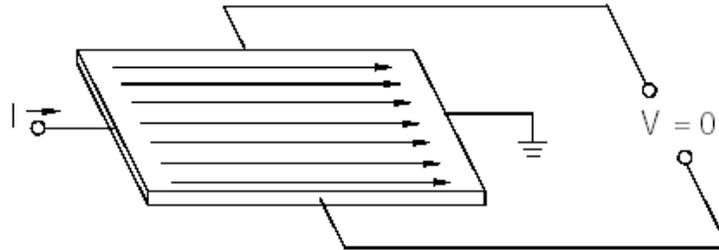
O princípio de operação tem por base uma lei da ótica geométrica : "o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão ". Quando uma onda ultra-sônica, que se propaga em um meio, incide sobre a interface de duas substâncias de densidades diferentes, faz surgir duas ondas emergentes:

uma onda ultra-sônica proveniente da reflexão nessa interface (onda refletida) e outra proveniente da mudança de meio de propagação, denominada onda refratada .

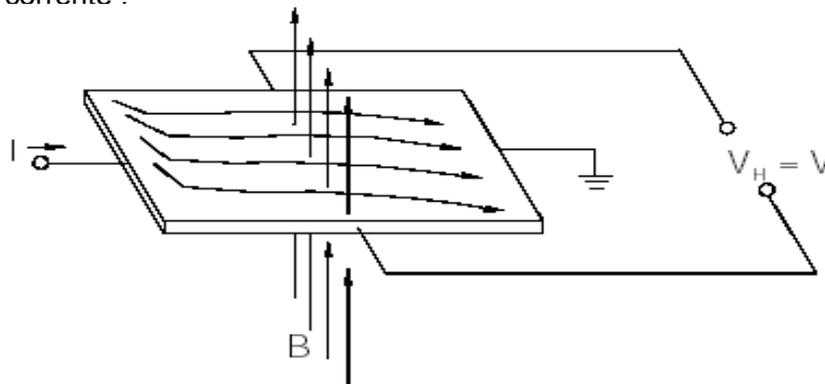
Sensores de Efeito Hall

O efeito Hall é o princípio de funcionamento de alguns sensores de fluxo magnético. O efeito Hall, apesar de ter sido descoberto em 1879, ganhou ênfase nas três últimas décadas com a evolução da microeletrônica, o que os tornou tais componentes comercialmente viáveis.

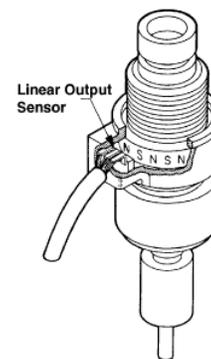
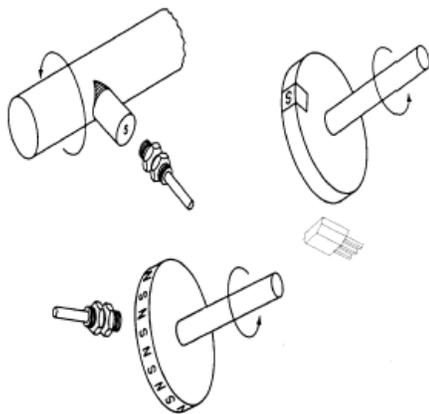
Quando o uma corrente atravessa um condutor, em condições normais, esta é uniformemente distribuída, sendo assim não aparece a d.d.p. (tensão Hall) no sentido perpendicular a direção da corrente, ou seja $V=0$.



Porém, na presença de um campo magnético, com componente perpendicular à direção da corrente, surge uma força magnética que atua sobre as cargas em movimento, $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ que é perpendicular ao campo magnético e a corrente (produto vetorial). deformando assim a distribuição da corrente .



Essa mudança de direção da corrente provoca um desequilíbrio na distribuição o que dá origem a uma d.d.p., aproximada pela expressão $V_H = K (\mathbf{I} \times \mathbf{B})$,



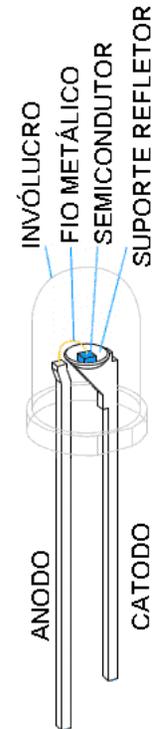
Sensores Optoeletrônicos

LED

O led (light emitter diode - diodo emissor de luz), como o próprio nome já diz, é um diodo (junção P-N) que quando energizado emite luz visível. O LED é abordado aqui por uma questão didática sendo ele uma fonte de luz e não um sensor. A luz é monocromática e é produzida pelas interações energéticas do elétron. O processo de emissão de luz pela aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado "eletroluminescência".

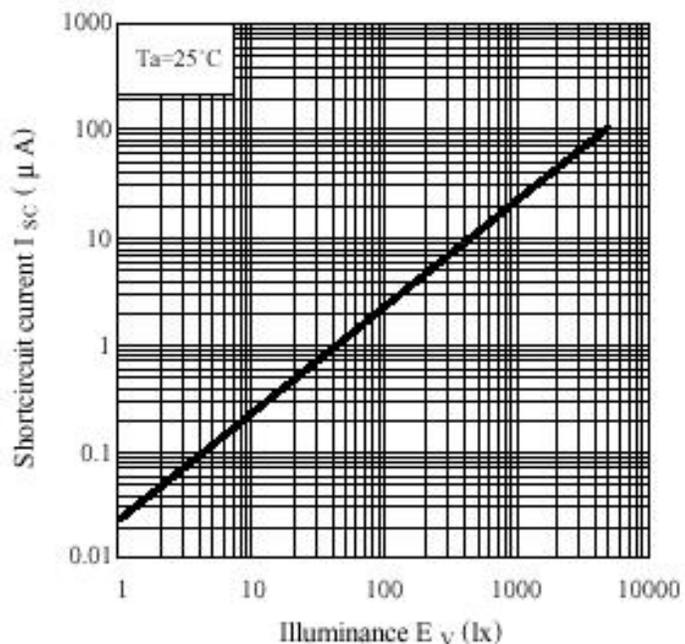
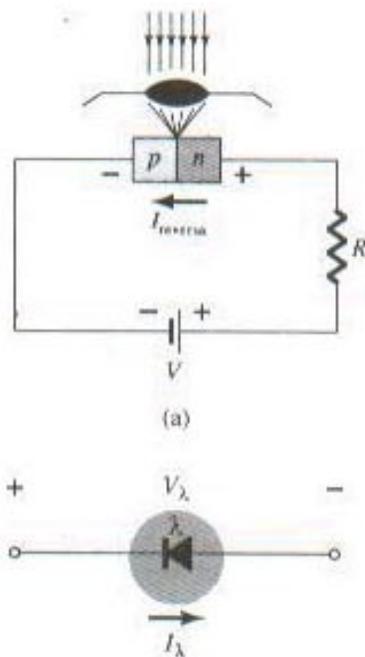
Em qualquer junção P-N polarizada diretamente, dentro da estrutura, próximo à junção, ocorrem recombinações de lacunas e elétrons. Essa recombinação exige que a energia possuída por esse elétron, que até então era livre, seja liberada, o que ocorre na forma de calor ou fótons de luz.

No silício e no germânio, que são básicos nos diodos e transistores, entre outros componentes eletrônicos, a maior parte da energia é liberada na forma de calor, sendo insignificante a luz emitida, e os componentes que trabalham com maior capacidade de corrente chegam a precisar de irradiadores de calor (dissipadores) para ajudar na manutenção dessa temperatura em um patamar tolerável. Já em outros materiais, como o arsenieto de gálio (GaAs) ou o fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons de luz emitido é suficiente para constituir fontes de luz bastante visíveis, existindo também LEDs fabricados para emitir luz na região infravermelho.



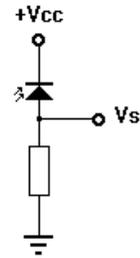
Fotodiodo

O fotodiodo é um dispositivo de junção p-n semicondutor cuja região de operação é limitada pela região de polarização inversa. A aplicação de luz à junção resultará em uma transferência de energia das ondas luminosas incidentes (na forma de fótons) para a estrutura atômica, resultando em um aumento do número de portadores minoritários e um aumento do nível da corrente inversa. A corrente negra é a corrente que existirá sem nenhuma iluminação aplicada.





Símbolo do foto-diodo



Circuito sensor

A corrente inversa e o fluxo luminoso variam quase que linearmente, ou seja, um aumento na intensidade luminosa resultará em um aumento semelhante na corrente inversa.

Podemos admitir que a corrente inversa é essencialmente nula na ausência de luz incidente. Como os tempos subida e queda (parâmetros de mudança de estado) são da ordem de nanossegundos, o dispositivo pode ser usado na aplicação de detecção e medição de intensidade luminosa, contagem ou comutação de alta velocidade. O nível de corrente gerada pela luz incidente sobre um fotodiodo não é suficiente para que ele possa ser usado em um controle direto, sendo necessário para isto que haja um estágio de amplificação.

Fototransistor

O foto-transistor, como um transistor convencional, é uma combinação de dois diodos de junção, no entanto, associa ao efeito transistor o efeito foto-elétrico. Em geral, possui apenas dois terminais acessíveis (coletor e emissor), no entanto, alguns incorporam o terminal de base para uma eventual polarização ou controle elétrico.

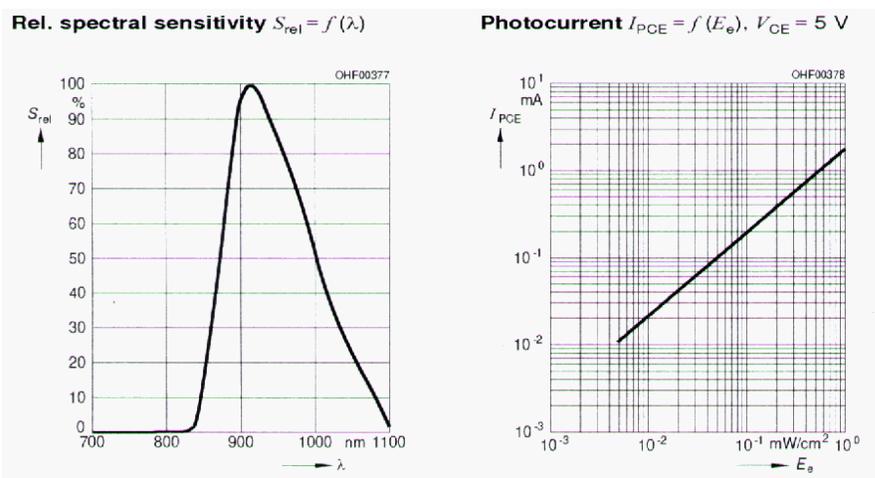
Seu funcionamento é idêntico ao do foto-diodo, exceto que o foto-transistor é muito mais sensível, devido à ação amplificadora do efeito transistor, uma vez que a corrente produzida pelo efeito foto-elétrico na base é amplificada beta vezes, originando a corrente de coletor.

Como desvantagem, apresenta uma resposta mais lenta.

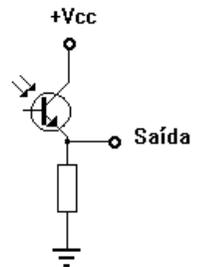
Mecanicamente, sua construção enfoca a luz incidente sobre uma ou ambas as junções. Para isso, seu invólucro é transparente. Em transistores convencionais, o invólucro é opaco, a fim de evitar a influência da luz sobre seu comportamento. Se retirarmos o invólucro de um transistor comum, ele irá se comportar como um foto-transistor, no entanto, a falta de proteção da junção causará sua rápida deterioração.

Quando não está exposto à luz, um foto-transistor se comporta exatamente como um transistor convencional, podendo então ser testado da mesma forma.

As aplicações dos foto-transistores são diversas e, mais à frente, exemplificaremos algumas.



Símbolo do foto-transistor

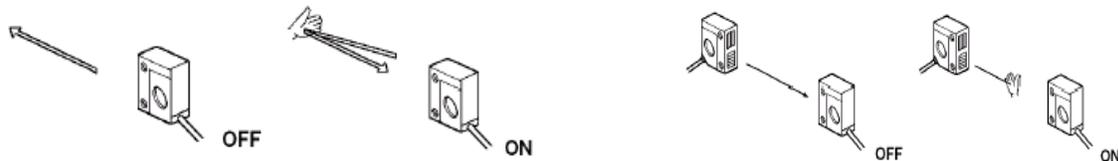


Aplicações dos sensores opto-eletrônicos

Chaves Ópticas

As chaves ópticas são formadas por um emissor de luz, usualmente um led, (podendo ser também um laser) e um receptor, que pode ser tanto um foto-transistor como um foto-diodo. Há dois tipos básicos:

- Sensor de reflexão de luz
- Sensor de Interrupção de luz.

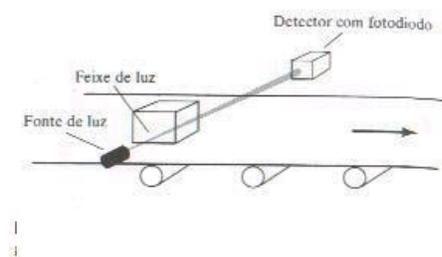
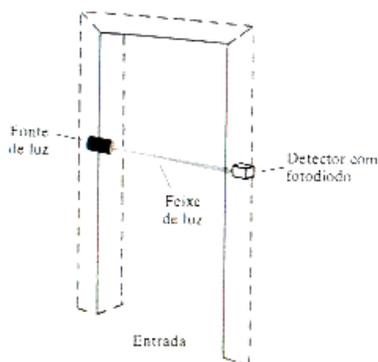
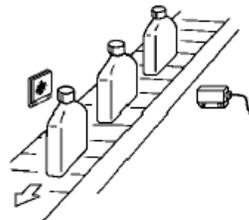


No sensor de reflexão:

Um emissor colocado ao lado do sensor emite um feixe luminoso contínuo que é refletido e atinge o sensor caso um objeto seja colocado próximo. anterior

O sensor de interrupção de luz:

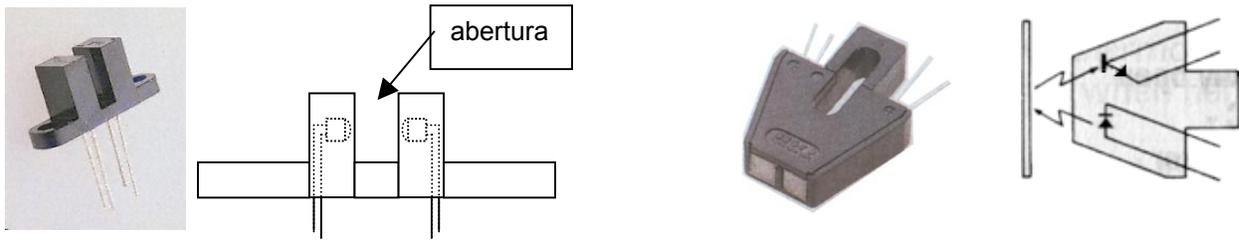
Neste dispositivo a diferença em relação ao anterior é que a luz captada pelo emissor não é refletida, e sim recebida diretamente vinda do emissor que é colocado em um outro módulo em lado oposto ao sensor.



Na chave óptica existe uma abertura, entre o transmissor e o receptor, por onde pode passar um objeto que interrompa a passagem de luz.

Nas aplicações das chaves ópticas, o led ou outro emissor fica ativado continuamente.

Para pequenas montagens, estas chaves também são tipicamente encontradas comercialmente contendo um suporte com um led, geralmente do tipo infravermelho, e um fototransistor, com uma abertura entre eles (por interrupção) ou justapostos (por reflexão).



Quando um objeto passa pela abertura existente na chave, a interrupção da luz do led leva o foto-diodo ou foto-transistor ao corte, o que pode ser detectado por um circuito associado para realizar certa operação, sendo muito comum aplicações como monitoração do funcionamento de máquinas e contagem de rotações de rodas dentadas ou perfuradas.

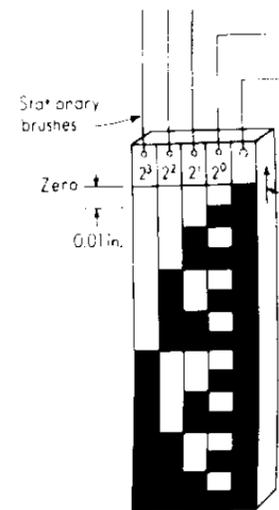
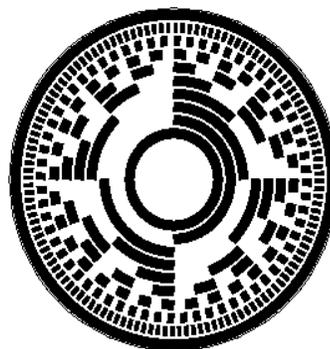
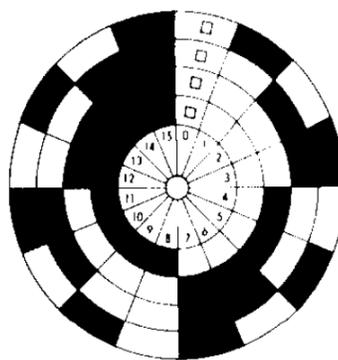
Encoders ópticos:

São sensores, utilizados na determinação de posição ou deslocamento. Podem ser de dois tipos básicos, absolutos ou relativos

Encoder óptico absoluto:

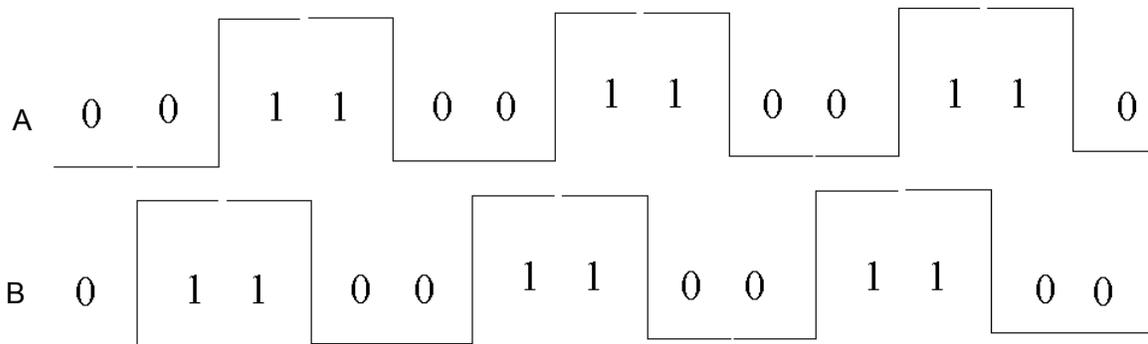
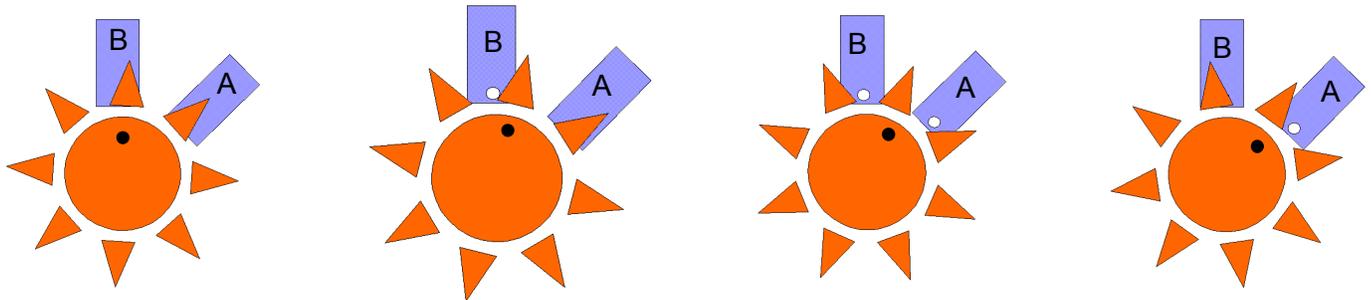
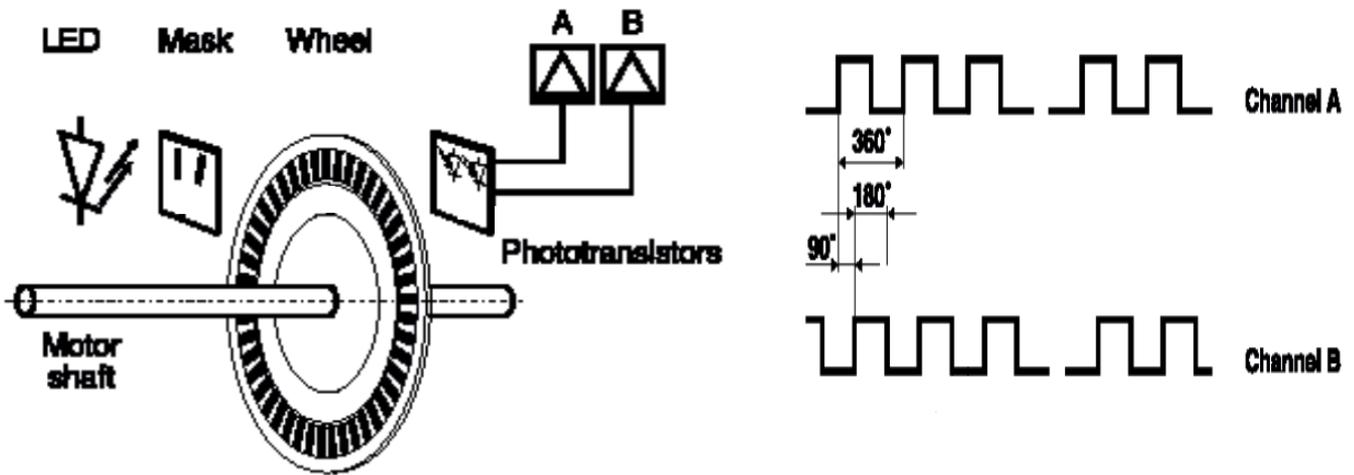
É capaz de determinar posições discretas específicas, lineares ou angulares. Sua resolução é dada dividindo-se o comprimento total, angular ou linear, por 2^n onde n é o número de sensores instalados. No caso dos encoders abaixo são utilizados 4 sensores, o que dá uma resolução de 1/16 do comprimento.

seq	bit's	posição angular (graus)
0	0000	0 (360)
1	0001	22,5
2	0010	45,0
3	0011	67,5
4	0100	90,0
5	0101	112,5
6	0110	135,0
7	0111	157,5
8	1000	180,0
9	1001	202,5
10	1010	225,0
11	1011	247,5
12	1100	270,0
13	1101	292,5
14	1110	315,0
15	1111	337,5



Encoder óptico relativo ou incremental:

Mede apenas variações no deslocamento, podendo indicar também o sentido da variação. Um exemplo é o mostrado abaixo onde é possível medir-se o deslocamento e o sentido por diferença de quadratura muito empregado nos "mouses".



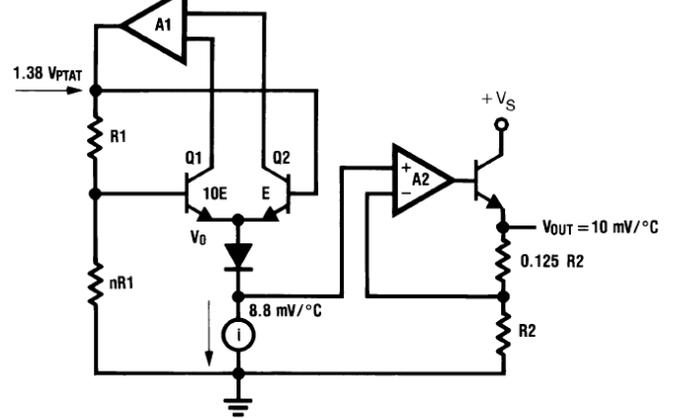
	00	01	10	11
00	0	+1	-1	<i>n</i>
01	-1	0	<i>n</i>	+1
10	+1	<i>n</i>	0	-1
11	<i>n</i>	-1	+1	0

0 = sem mudança
 -1 = decrementa contador
 +1 = incrementa contador
n = operação ilegal
 01 = encoder A é 0 e B é 1

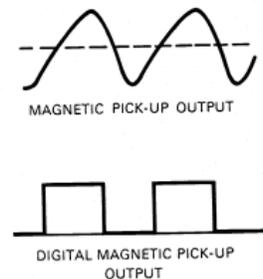
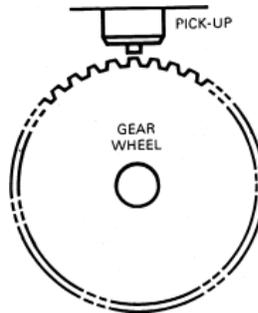
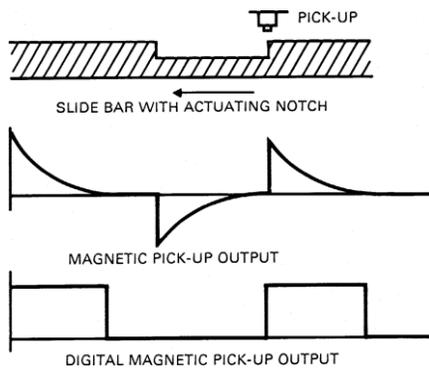
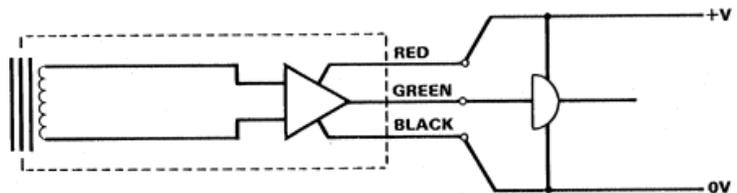
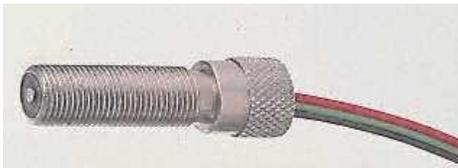
Sensores Integrados:

Os componentes desta categoria são assim chamados porque o elemento sensor, ou seja, aquele que reage às variações da grandeza física e circuitos eletrônicos auxiliares são colocados num mesmo invólucro, formando um só componente. Estes componentes são fabricados para efetuar medidas específicas de várias grandezas físicas como temperatura, pressão, aceleração, velocidade, posição, campo magnético etc.

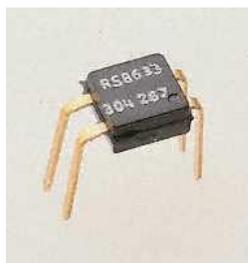
Sensores de temperatura, como o LM 35, da National, figura ao lado, TO-92, oferecem alta precisão, por conterem circuitos linearizados. Operam de 0 a 100°C aproximadamente fornecendo uma tensão de 10mV/°C.



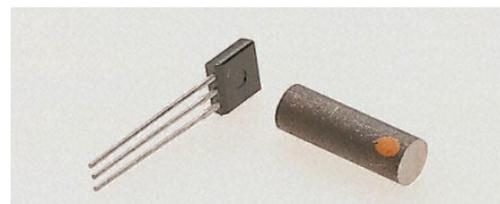
Sensor magnético integrado tipo "switch" (chave, binário)



Sensor integrado de efeito de saída Hall

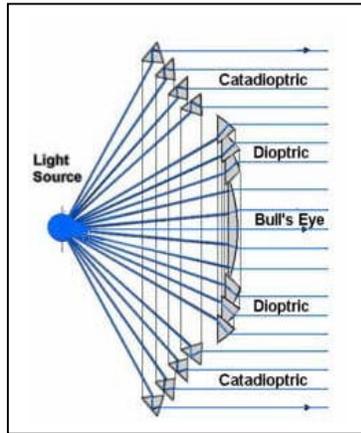


Saída Linear



Saída binária

Sensores de Movimento com sensores de infravermelho passivo piroelétrico



PIR325

SENSITIVE AREA 2 ELEMENTS
 SPECTRAL RESPONSE 5 - 14 μm
 OUTPUT VOLTAGE mv pp 20
 NOISE μVpp 20
 OFFSET VOLTAGE volts 1.0
 SUPPLY VOLTAGE volts 2.5 - 15
 OPERATING TEMP $^{\circ}\text{C}$ 30 - 70

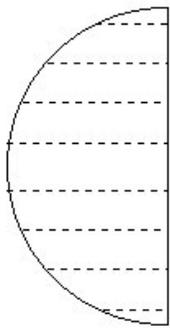
Test Conditions for output voltage:
 Supply voltage = 5 volts
 100K load resistor from pin 2 to 3
 IR source = Hand moving 6" from sensor

1 drain
 2 source
 3 ground

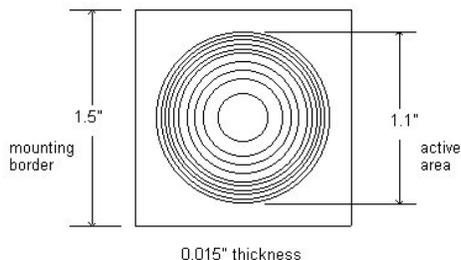
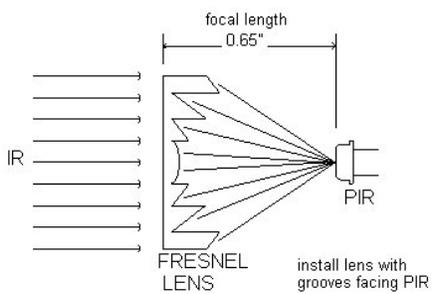
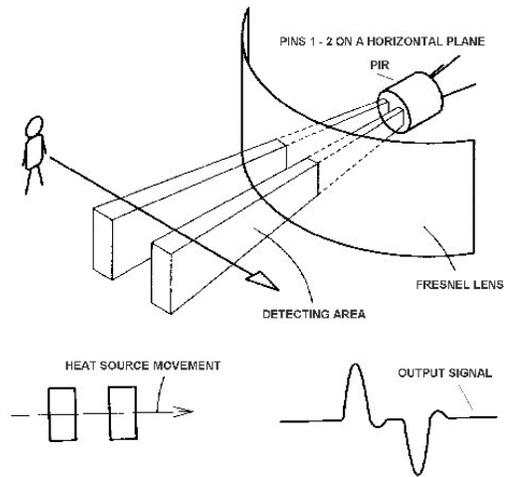
View Angle 95°

TOP VIEW

PLANO CONVEX

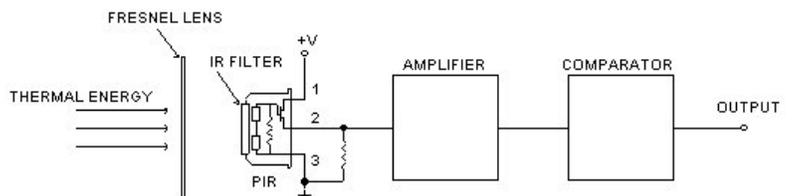


FRESNEL



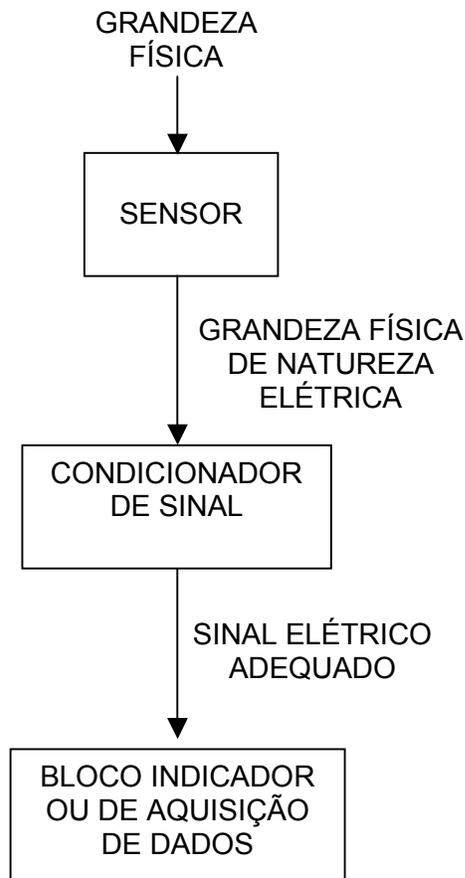
Optimum transmittance in the 8 to 14 μm region

TYPICAL CONFIGURATION



3. Condicionamento de Sinal

Os sinais provenientes dos sensores possuem características elétricas próprias, inerentes a cada tipo de sensor. Quando as características do sinal de saída do sensor não são compatíveis com a etapa seguinte, seja ela um simples indicador ou um complexo sistema de aquisição de dados, é freqüente a necessidade de inclusão de um circuito intermediário que vise compatibilizar a saída do sensor e a etapa seguinte. Este bloco nem sempre é necessário e muitas vezes pode passar despercebido por estar incluído junto ao sensor. A função de um condicionador de sinais é receber o sinal do sensor e ajustá-lo em relação à freqüência, amplitude, impedância ou outro parâmetro para que possa ser manipulado pelo bloco indicador ou de aquisição. Esta operação pode inclusive incluir a conversão do sinal de corrente em sinal de tensão, muito comum quando a transmissão do sinal se dá em cabos muito longos. Também cabe ao condicionador, em alguns casos, fornecer as tensões e correntes necessárias para o funcionamento de alguns tipos de sensores.



Amplificador Operacional

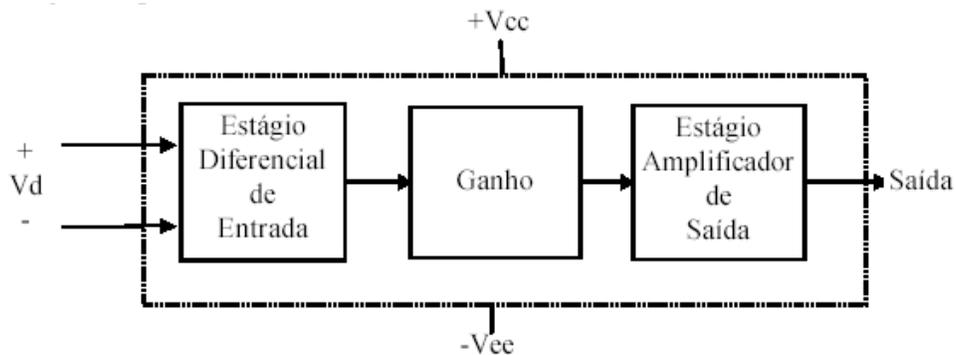
O Amplificador Operacional é um dos componentes mais utilizados em circuitos eletrônicos, tendo ampla aplicação nos condicionadores de sinal. Amplificador Operacional (AOP ou AmpOP) combina algumas características interessantes:

- Manuseio simples;
- Baixo custo, pois é produzido em grande escala;
- Extremamente confiável,
- Projetado para um grande número de aplicações diferentes;
- Apresenta-se como um Amplificador Ideal nas aplicações em geral;

Podemos definir o Amplificador Operacional como sendo um amplificador de tensão CC, multistágios, com entrada diferencial, cujas características se aproximam de um amplificador idealizado (sem erros).

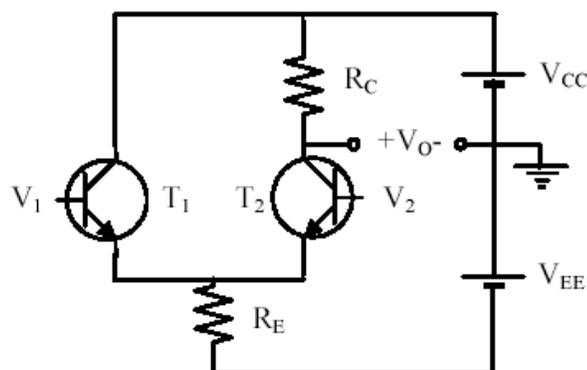
Vemos no diagrama de blocos abaixo seus principais estágios, que são:

- Estágio diferencial de entrada,
- Estágio de ganho
- Estágio amplificador de saída a transistor.



A Figura abaixo exemplifica, de forma simplificada, a etapa diferencial de entrada. A tensão de saída é dada por:

$$V_o = A_v (V_1 - V_2)$$



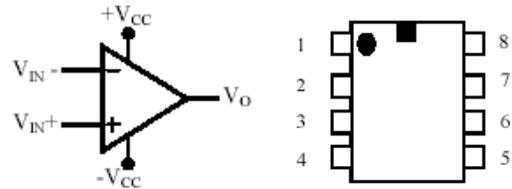
Amplificador Operacional Integrado

É um amplificador de tensão integrado em uma única pastilha - "chip" - com a entrada conectada de forma diferencial. Existem diversos modelos de AOP, de acordo com as exigências da aplicação, havendo também diversas formas de encapsulamento.

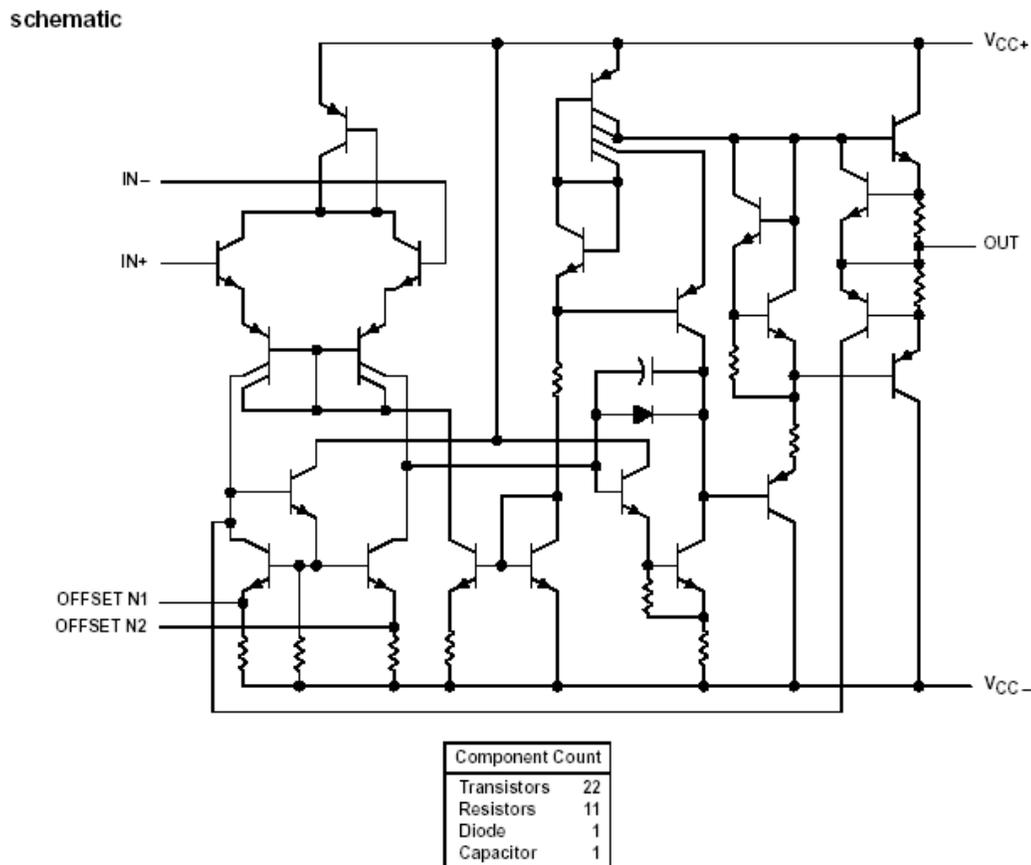
As figuras a seguir mostram a simbologia, o encapsulamento do AOP 741 (UA741, μA 741 ou outras letras antes do código, dependendo do fabricante) é um modelo simples, barato e bastante popular de AOP.

PINAGEM TÍPICA:

- 1 : Destinado ao ajuste de Off-Set de tensão
- 2 : Entrada Inversora (-)
- 3 : Entrada não-inversora (+)
- 4 : Alimentação negativa (-3V até 18 V tip)
- 5 : Destinado ao ajuste de Off-Set de tensão
- 6 : Saída
- 7 : Alimentação positiva (+3 V até +18 V tip)
- 8 : Não conectado (NC)



A ilustração abaixo mostra os conexões e o circuito eletrônico que compõe o UA741 internamente.



São 22 transistores, 11 resistores, 1 diodo e 1 capacitor. numa pastilha que, fora o encapsulamento externo, é pouco maior que a cabeça de um alfinete.

Características ideais de um AOP

- Impedância de entrada infinita;
- Impedância de saída igual a zero;
- Ganho de tensão infinito;
- Linear (V_O proporcional a V_{IN});
- Tempo de resposta nulo (num AOP este tempo é denominado Slew-rate);

Na prática, os Amplificadores Operacionais não possuem estas características ideais, mas tais características podem ser adotadas de forma ampla ou parcial como uma boa aproximação para um grande número de aplicações, pois são realmente muito próximas disto.

Modos de operação de um AOP

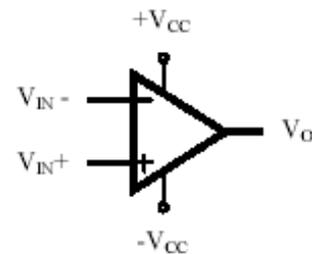
- Sem realimentação:

Este modo, ilustrado abaixo, é denominado “operação em malha aberta”. Nesta configuração a diferença entre os sinais é amplificada sem controle, utilizando ao máximo o ganho máximo do AOP.

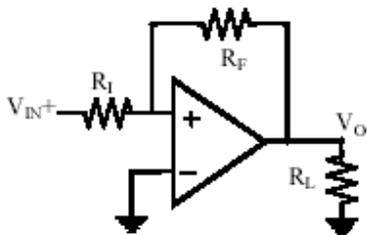
Esta configuração, não linear, bastante utilizada nos circuitos comparadores de tensão.

se $V_{in+} > V_{in-} \Rightarrow V_O = +V_{saturação}$ (pouco abaixo de $+V_{CC}$)

se $V_{in-} > V_{in+} \Rightarrow V_O = -V_{saturação}$ (pouco acima de $-V_{CC}$)



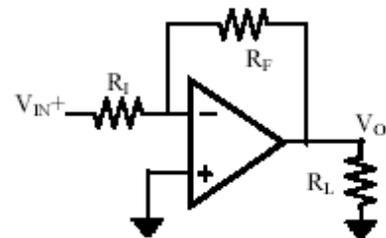
- Com Realimentação Positiva:



Realimentar significa que uma fração da tensão de saída é re-injetada numa das entradas. Se esta entrada for a entrada +, então temos a realimentação positiva. Esse tipo de realimentação é instável e por isso apenas usado em osciladores.

- Com Realimentação Negativa:

A Realimentação Negativa é o mais importante meio de realimentação, pois estabiliza o sinal e tende a aproximar as características do amplificador real com o ideal ($Z_{IN} \Rightarrow \infty$, $Z_o \Rightarrow 0$, $A \Rightarrow$ constante). Existem muitas aplicações dentro da eletrônica usando este tipo de realimentação. O grande mérito da realimentação negativa é que podemos controlar (variar) o ganho de tensão, e estabilizá-lo num valor desejado.

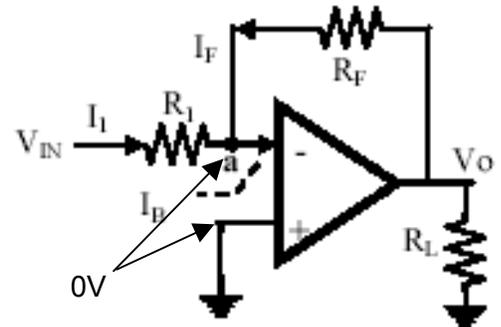


Circuitos Lineares com o AOP

- Amplificador inversor

Assim chamado porque inverte o sinal de entrada em 180° e permite amplificar o sinal de acordo com o ganho preestabelecido.

Analisaremos todos os circuitos com AOP, LCK - Lei das Correntes de Kirchoff, aplicadas ao nó "a" (na entrada inversora do AOP). No nó "a", temos que $I_1 + I_F = I_B$. Como $I_B = 0$, isto é, a corrente de entrada do AOP é praticamente nula. Outra característica importante na configuração com realimentação negativa é que as tensões nos pinos de entrada + e - sempre se igualam, num efeito denominado "curto circuito virtual". Como a entrada + está aterrada (0V), o AOP se encarregará de manter o nó a também em 0V.



$$\frac{V_{IN} - V_A}{R_1} + \frac{V_O - V_A}{R_F} = 0 \quad , \text{ As entradas do AOP tem que se iguais, (curto circuito virtual) } V_A = 0$$

$$\frac{V_{IN}}{R_1} + \frac{V_O}{R_F} = 0 \quad \therefore \frac{V_{IN}}{R_1} = -\frac{V_O}{R_F} \quad \therefore \frac{V_O}{V_{IN}} = -\frac{R_F}{R_1} \quad \therefore V_O = -V_{IN} \frac{R_F}{R_1}$$

Assim, a tensão de saída V_O é proporcional à relação entre R_F/R_1 , defasada de 180 graus de V_{IN} . A impedância Z_{IN} é aproximadamente igual a R_1 .

- Amplificador não Inversor

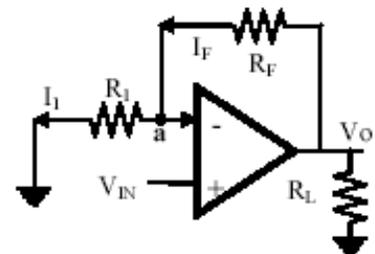
Assim chamado porque não inverte o sinal de saída e permite controlar o ganho. Neste caso a tensão de entrada é aplicada à entrada não inversora do AOP. Aplicando a LTK no nó "a", temos que:

$$\frac{0 - V_A}{R_1} + \frac{V_O - V_A}{R_F} = 0$$

Como $V_A = V_{IN}$, temos que:

$$-\frac{V_{IN}}{R_1} + \frac{V_O - V_{IN}}{R_F} = 0$$

$$\frac{V_O}{R_F} = \frac{V_{IN}}{R_F} + \frac{V_{IN}}{R_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{R_F}{R_1} + 1$$



- Seguidor de Tensão (Buffer)

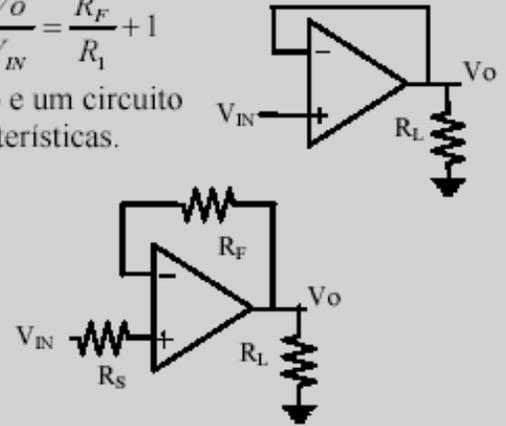
No Amplificador não-inversor, a equação do ganho é: $\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{R_F}{R_1} + 1$

Se fizermos $R_F \Rightarrow 0$ e $R_1 \Rightarrow \infty$, isto é, um curto-circuito e um circuito aberto, obtemos o Ganho igual a unidade e mais algumas características.

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = 1 \quad Z_{IN} = \text{alta} \quad Z_O = \text{baixa}$$

Aplicações:

- isolador de estágios
- reforçador de corrente
- casador de impedâncias



- Somador de Tensões com Inversão

Esta configuração permite amplificar e somar as entradas V_1 e V_2 , porém invertendo a fase da tensão de saída em relação a entrada. Veja o circuito abaixo.

A função do R_E é como resistor de equalização. Sabemos que $V_A = 0$. Aplicando o teorema da superposição com $V_1 = 0$ e V_2 ativo.

$$\frac{V_2}{R_2} + \frac{V_O}{R_F} = 0 \Rightarrow V_O = -\frac{R_F}{R_2} V_2$$

Da mesma forma, fazendo $V_2 = 0$

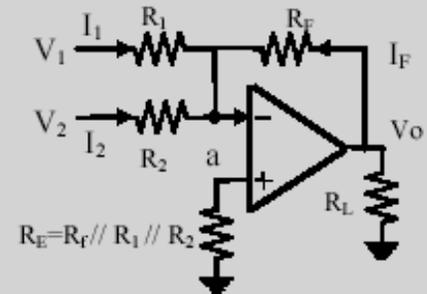
$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_O}{R_F} = 0 \Rightarrow V_O = -\frac{R_F}{R_1} V_1$$

Somando-se os resultados

$$V_O = -\left(\frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 \right)$$

Expandindo para mais de duas entradas podemos reescrever a equação anterior como sendo

$$V_O = -\left(\frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \frac{R_F}{R_3} V_3 + \dots + \frac{R_F}{R_n} V_n \right)$$



Comparadores

São circuitos que comparam dois sinais entre si, tendo como resultado uma saída num nível lógico (alto ou baixo) indicando qual dos dois sinais prevalece. Quando a tensão de entrada não inversora for maior do que a tensão de entrada inversora, então a tensão de saída saturará em + VSAT, e assim vice-versa.

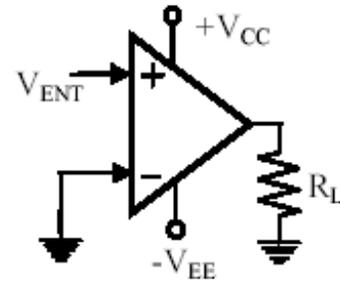
Simbolicamente, se $V_+ > V_-$ $VO = + VSAT$
ou se $V_+ < V_-$ $VO = - VSAT$

O circuito básico que realiza a operação de comparação com zero é mostrado a seguir. Assim:

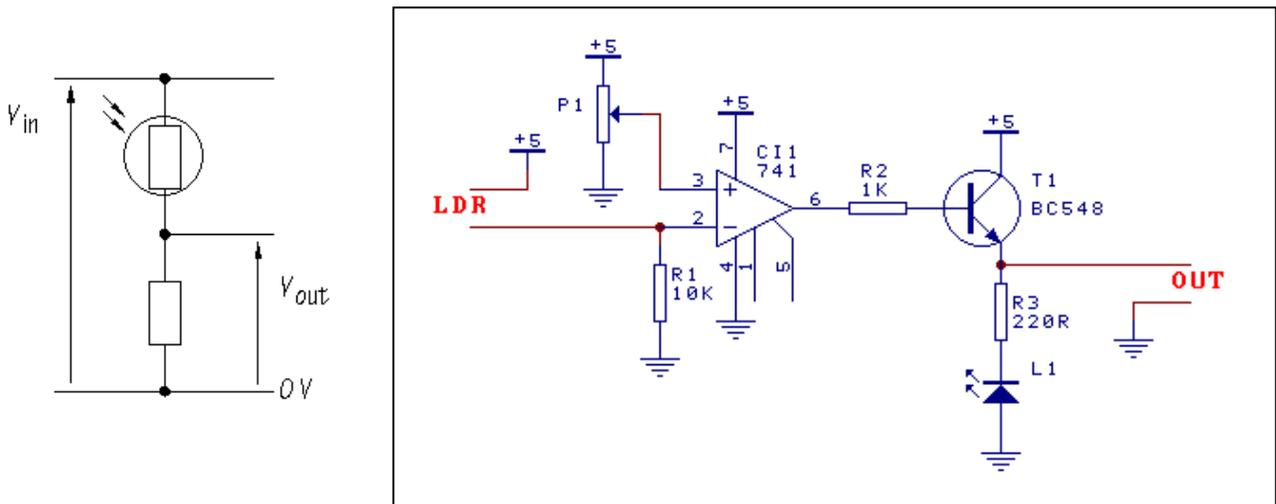
Quando $V_{ENT} > 0$ então $VO = + VSAT$

Quando $V_{ENT} < 0$ então $VO = - VSAT$

Quando $V_{ENT} = 0$ então $VO = \text{indefinido}$.



O exemplo abaixo é um acionador ativado por um sensor do tipo LDR



O potenciômetro P_1 regula o nível do disparo. Quando a iluminação sobre o LDR diminui, a tensão produzida pelo divisor formado pelo próprio LDR e R_1 for menor do que a ajustada por P_1 ($V_+ > V_-$), a saída vai a $+V_{sat}$ e aciona o transistor ligando a saída. Caso o LDR esteja suficientemente iluminado acontece o contrário e o transistor opera no corte e desliga a saída.