

Índice Capítulo VIII: Transdutores

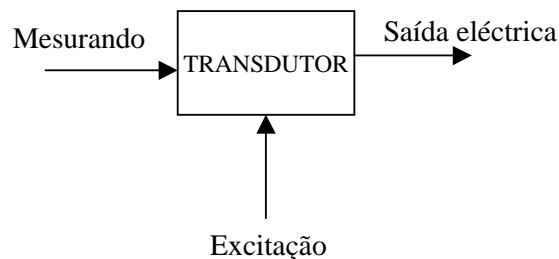
8 TRANSDUTORES.....	2
8.1 Classificação dos transdutores	2
8.2 Modo de selecção de um transdutor	2
8.3.1 Transdutores resistivos de posição	3
8.3.2 Transdutores resistivos de pressão.....	4
8.4 Transdutores Capacitivos	7
8.5.1 Transdutores indutivos	10
8.5.2 Transdutores indutivos variáveis: os transformadores diferenciais variáveis lineares	11
8.5.3 Transformadores diferenciais variáveis rotativos (RVDT)	13
8.6 Transdutores piezoeléctricos	14
8.6.1 Efeito Piezoeléctrico	14
8.6.2 Tipo de oscilações provocadas por um cristal de quartzo	14
8.6.3 Circuito equivalente	15
8.6.4 Factor de qualidade	15
8.7 Transdutores de temperatura	16
8.7.1 Detectores de Temperatura Resistivos.	16
a) Tipos de RTD e tabelas de calibração.	17
b) Determinação do factor de dissipação de um RTD.....	18
8.7.2 Termopares	20
8.7.3 Termístores	23
8.7.4 Transdutores de temperatura ultra-sónicos	28
8.8 Transdutores Fotoeléctricos	31
8.8.1 Válvulas Fotomultiplicadoras	31
8.8.2 Transdutor fotocondutivo.....	33
8.8.3 Fotodíodo	34
8.8.3.1 Circuito eléctrico equivalente e modos de funcionamento.....	37
8.8.4 Fototransístor	39
8.9 Transdutores Biológicos	41

8 TRANSDUTORES

Transdutor é um dispositivo que converte uma forma de energia em outra forma de energia. Na maioria dos casos, consiste em converter energia eléctrica num deslocamento mecânico ou converter alguma grandeza física não eléctrica tal como som, temperatura, pressão, velocidade ou luz, numa grandeza eléctrica. Com o recurso a transdutores podemos utilizar instrumentação electrónica para medir, modificar e melhorar o actual estado tecnológico das aplicações industriais. Por exemplo, hoje em dia existem já transdutores integrados de temperatura com sensibilidades da ordem dos 10 a 200 mV por grau centígrado, extremamente lineares. Existem também transístores de efeito de campo sensíveis a diferentes iões, utilizados na medida de potenciais bioelectrónicos. Os transdutores são também hoje muito utilizados em telemetria (transmissão de informação quantificada à distancia).

As funções de um transdutor são:

1. ser sensível à presença, magnitude e variação de um dado mesurando;
2. proporcionar a saída de um sinal eléctrico a ser lido por um leitor.



8.1 Classificação dos transdutores

A maneira mais satisfatória de classificar os transdutores é pelos princípios eléctricos envolvidos no seu funcionamento. Os transdutores podem também ser classificados de acordo com a sua aplicação.

Em termos eléctricos, os transdutores podem ser classificados em *passivos* ou *auto-generativos*. No primeiro caso, o transdutor necessita de uma fonte de excitação externa e a sua saída é a medida de uma variação de uma grandeza de um componente eléctrico, tal como uma resistência ou capacidade. No segundo caso o transdutor não necessita de qualquer fonte de alimentação externa, produzindo eles próprios um sinal analógico de corrente ou tensão, quando estimulado por alguma forma de energia. Estão neste caso os transdutores piezoeléctricos, células solares, termopares, geradores de bobina móvel.

8.2 Modo de selecção de um transdutor

O transdutor ou sensor a seleccionar deve ser fisicamente compatível com a aplicação desejada. Assim, ao seleccionar-se um transdutor deve-se ter em conta:

A sua *faixa de funcionamento*, de modo a que este tenha uma boa resolução.

Sensibilidade do transdutor em termos da grandeza física a medir.

Frequência de resposta e frequência de ressonância do transdutor.

Compatibilidade ambiental.

Sensibilidade mínima, em termos de precisão da grandeza a medir.

Eficácia.

Robustez.

Características *funcionais eléctricas*, nomeadamente, no que se refere á relação sinal/ruído.

Em termos genéricos, os transdutores são classificados em passivos, tais como: os resistivos; piezoresistivos;; capacitivos, transformador diferencial linear variável; indutivo; conversores de sinal; potenciométricos e termopares; termistores ou auto generativos, tais como: piezoeléctricos; auto-transformadores; fotoeléctricos (foto-emissivos; fotocondutores e células solares); .

8.3.1 Transdutores resistivos de posição

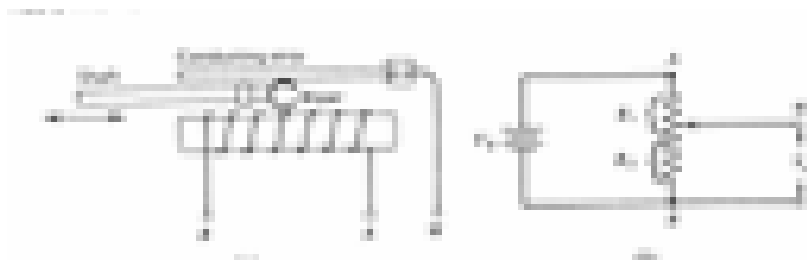


Figura 8.1: Transdutor resistivo de posição ou transdutor de deslocamento

O princípio de funcionamento de um sensor resistivo de posição é a de que a variável física sob medida provoca uma variação da resistência eléctrica do transdutor, quando se pretende , por exemplo, determinar a posição de um objecto ou de quanto este se deslocou.

Neste caso o transdutor consiste numa resistência variável do tipo potenciómetro em que o cursor da variação da resistência se encontra ligado ao objecto a ser monitorado. Assim, aplicando-se uma tensão aos terminais fixos da resistência e monitorando-se a variação de tensão entre o terminal variável e o de referência da resistência, a tensão de saída é proporcional à variação de resistência :

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_T \quad 8.1$$

onde R_2 é a componente da resistência variável ligada a V_0 e R_1 é a outra componente da resistência variável, ligada à fonte V_T .

Problema 8.1- Um transdutor de deslocamento com um cursor com excursão máxima de 10 cm é ligado a um objecto. Sabendo que a variação da resistência com a posição é linear, determine o valor da tensão de saída quando o cursor está a 3 cm e 8 cm da referência, respectivamente, sabendo que a tensão de excitação é de 5 V e a resistência total é de 5 k Ω .

Resolução.

Primeiro, devemos calcular o valor da resistência variável, para os diferentes deslocamentos e depois as respectivas tensões de saída.. Assim tem-se: $R_v(3\text{cm})=(3/10).5000=1500 \Omega \Rightarrow V_0=(1500/5000).5=1,5 \text{ V}$; $R_v(8\text{cm})=4000 \Omega \Rightarrow V_0=4\text{V}$.

8.3.2 Transdutores resistivos de pressão

O princípio de funcionamento consiste em alterar a resistência ou o comprimento de um fio resistivo, quando este é sujeito a uma pressão.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad 8.2$$

onde ρ é a resistividade eléctrica do fio, L o comprimento e A a secção do fio.

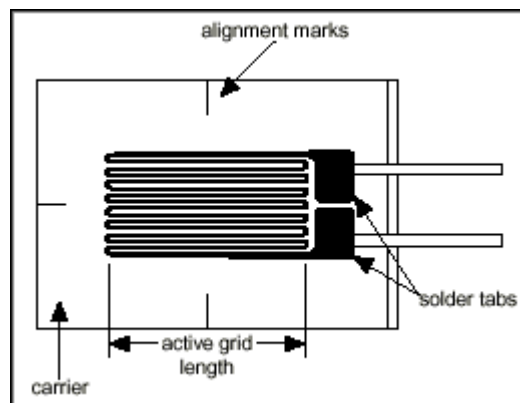


Figura 8.2.: Resistência metálica típica de um sensor resistivo

À razão entre a variação da resistência eléctrica e do comprimento, designamos por factor de calibração de pressão

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}, \quad 8.3a)$$

$$\text{onde } G = \Delta L / L, \quad 8.3b)$$

corresponde à variação extensométrica do fio. Como a força de pressão p , é dada por: $p=F/A$ (força por unidade de área) e como a constante de proporcionalidade tensão e extensão para uma variação linear destes dois parâmetros é o modulo de elasticidade E ou o módulo de Young, tem-se pela lei de Hooke que

$$E=p/G. \quad 8.4$$

Problema 8.2- Um extensómetro resistivo utilizado para ler tensões mecânicas, com um factor de calibração de 2 é ligado a uma chapa de aço inox que é sujeita a um alongamento relativo de 10^{-6} . Se a resistência eléctrica original do calibrador for de 130Ω , calcule a variação da resistência deste.

Resolução.

$$K=(\Delta R/R)/G \Rightarrow \Delta R=KGR=2 \times 10^{-6} \times 130=260 \mu\Omega.$$

Problema 8.3-Uma barra de aço de secção circular (diâmetro de 2cm) e com o comprimento de 40 cm é sujeita a uma força de tensão de 33000 Kg, onde $E=2 \times 10^{10}$ Kg/m². Calcule a elongação sofrida pela barra, em metros.

Resolução.

$$A = \pi(D/2)^2 = 3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2. \quad E = p/G = (F/A)/(\Delta L/L) \Rightarrow \Delta L = FL/AE = 2,1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Os medidores de pressão metálicos são constituídos por um fino fio resistivo, formado a partir da erosão de folhas metálicas muito finas, sobre a qual se impressionou o padrão da resistência com o comprimento e secção desejadas. Normalmente estes sensores de pressão são utilizados em aplicações onde o ambiente envolva a utilização de altas temperaturas.

Os sensores de pressão podem também ser baseados em elementos resistivos semicondutores. . Neste caso os sensores são extremamente sensíveis às variações de pressão, possuindo factores de calibração (G) que variam entre 50 e 200. Contudo estes sensores são altamente afectados pela variação de temperatura.

Os sensores de pressão são normalmente utilizados como um dos braços de uma ponte Wheastone (ver capítulo IV).

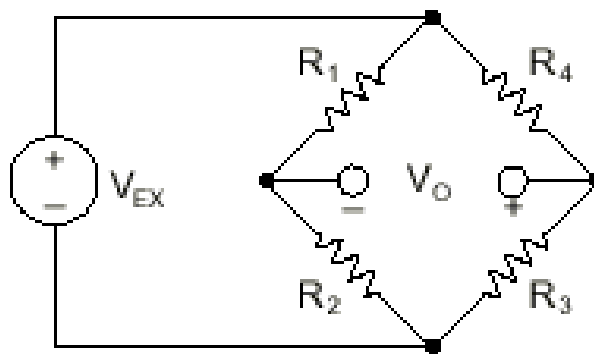


Figura 8.3a: Ponte de Wheatstone

Na prática os medidores de pressão lêem valores da ordem dos milésimos de E. Por conseguinte, a ponte deve ser sensível a pequenas variações da resistência (por exemplo, para uma resistência da ordem dos 120 Ω , a ponte deve ser capaz de detectar variações da ordem dos 0,12 Ω).

Se tivermos em conta a figura 8.2, quando a ponte não está balanceada tem-se:

$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \times V_{EX} \quad 8.5$$

onde $V_0 \neq 0$, Se substituirmos R_4 pela resistência R_G do sensor, e se a variação da resistência do sensor poder ser expressa pela relação: $\Delta R = R_G \cdot G \cdot K = R_G K p / E$.

Se $R_1 = R_2$ e $R_3 = R_G$, tem-se:

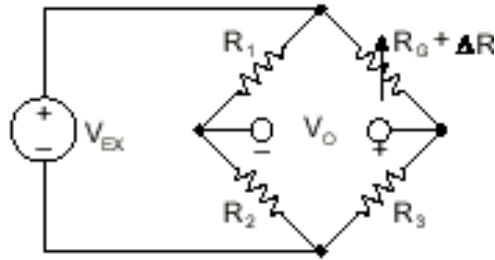


Figura 8.3b: Ponte de Wheatstone ligada a sensor de pressão

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \frac{GK}{4} \left(\frac{1}{1 + GK/2} \right)$$

8.6

Ao utilizar-se no braço que vai "medir" e num outro, a mesma resistência de sensor, o efeito da temperatura pode ser minimizado. Por exemplo, se tivermos um dos sensores activos ($R_G + \Delta R$), e um segundo sensor inactivo colocado transversalmente, qualquer variação de temperatura afectara igualmente ambos os sensores, compensando-se deste modo o seu efeito final no valor de V_0 .

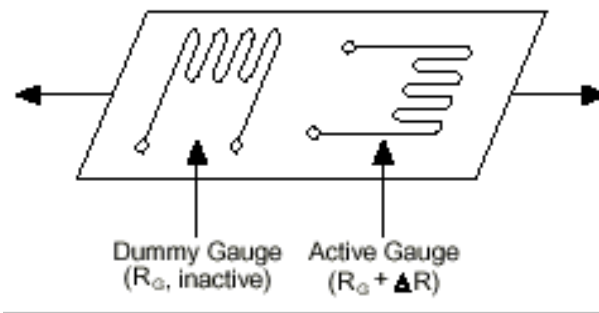


Figura 8.4a: Utilização de um sensor inactivo (resistência de teste) para eliminação/compensação da temperatura.

A sensibilidade da ponte pode ser aumentada para o dobro se se fizer com que os dois sensores sejam activos em cada uma das metades da ponte, tal como se ilustra na figura que se segue.

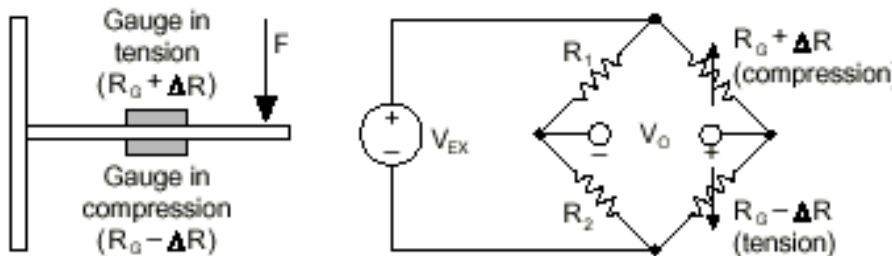


Figura 8.4b: Ponte com dois elementos sensoriais activos.

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \frac{GK}{2}$$

8.7

No processo de selecção do sensor de pressão mais adequado deve-se ter em conta: (1) os componentes que constituem a ponte; (2) a forma de excitação da fonte; (3) tipo de sensor utilizado; (4) que tipo de amplificação do sinal obtido se vai utilizar; (5) o circuito de filtragem usado; (6) o nível de "offset"; (7) a resistência shunt de calibração.

8.4 Transdutores Capacitivos

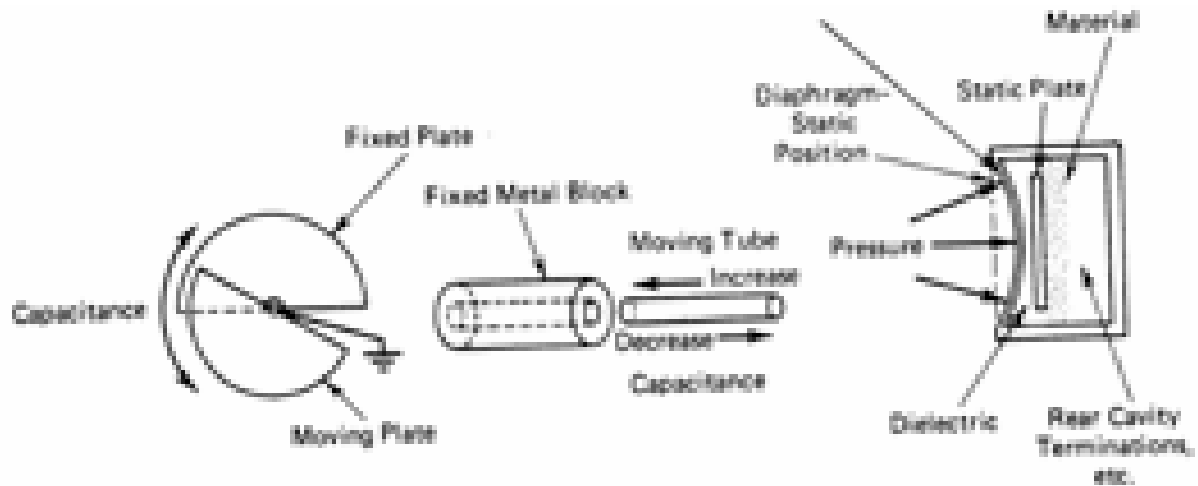


Figura 8.5: Diferentes tipos de transdutores capacitivos

Como a capacidade de um condensador de placas paralelas varia inversamente com a distancia entre placas ($C = \epsilon\epsilon_0 A/d$), qualquer variação em d provoca uma variação em C . Os transdutores capacitivos podem ser do tipo de placas variáveis (utilizados nos rádios), de núcleo variável ou de membrana. Estes últimos são muito utilizados para medir depressões. Outros transdutores capacitivos funcionam por remoção do material dieléctrico existente entre duas placas fixas.

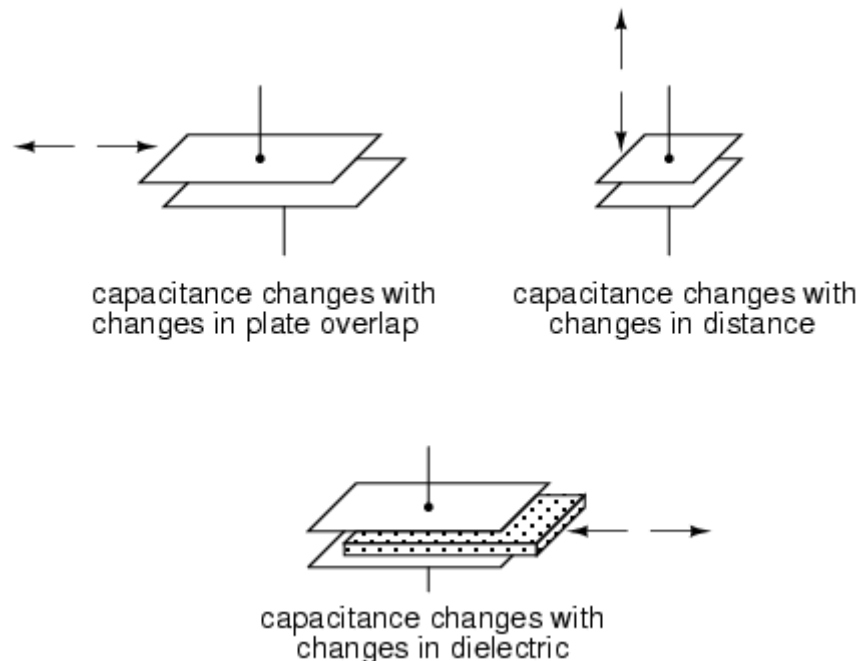


Figura 8.6: Exemplos de transdutores capacitivos de placas paralelas.

Problema 8.4- A membrana de um medidor de pressão capacitivo tem a área de $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ e uma distância entre placas de $1 \times 10^{-3} \text{ m}$. Calcule o valor da sua capacidade se este se encontra a medir a pressão do ar ($\epsilon=1$).

Resolução

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d} = \frac{1 \times 5 \times 10^{-3} \times 8,854 \times 10^{-12}}{10^{-3}} = 44,25 \text{ pF}$$

Transdutores capacitivos de elevada sensibilidade e imunes a variações de outras variáveis baseiam-se em sensores diferenciais capacitivos, do género dos que a seguir se indicam:

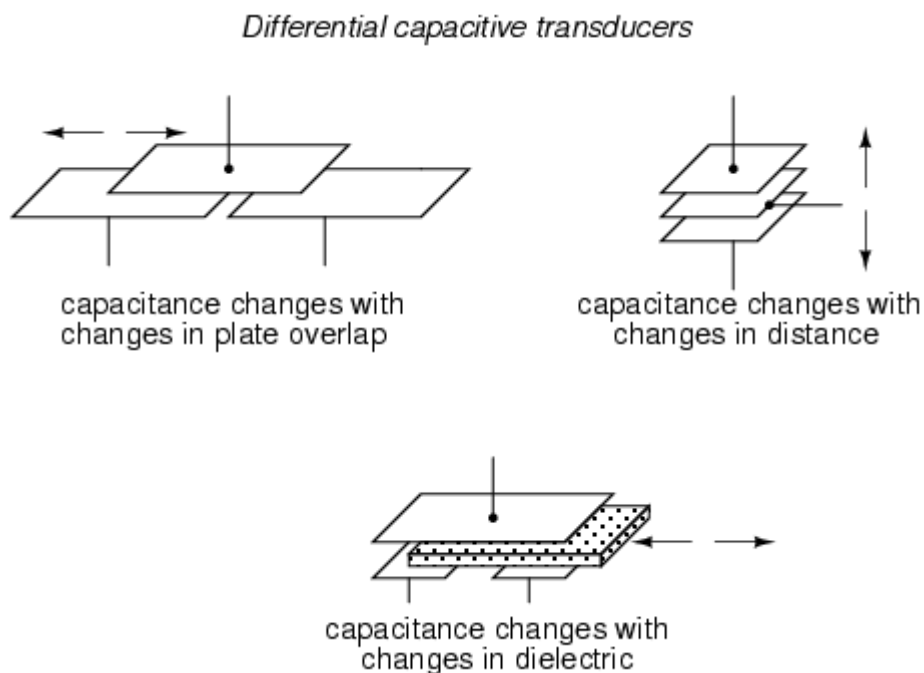


Figura 8.7: Sensores diferenciais capacitivos

Como se pode ver, os sensores capacitivos diferenciais possuem *3 fios de ligação*, em vez de 2. Isto é, um fio ligado a cada placa do condensador e um terceiro, ligado à placa comum. Isto é, a variação da capacidade em cada uma das secções é complementar da outra (quando uma aumenta a outra diminui i vice-versa).

Este tipo de estrutura é fácil de implementar num circuito medidor, agora baseado em pontes ac (ver capítulo IV).

Os transdutores capacitivos operam por variações muito pequenas da capacidade, normalmente da ordem dos picofarads. Tal faz com que se utilizem fontes de excitação de frequências muito elevadas, de forma a reduzir os valores da reactância em jogo, para valores razoáveis. Para além disso, o sistema deve ser convenientemente blindado para reduzir o efeito das capacidades distribuídas e ter-se bons contactos óhmicos, de forma a reduzir a influência do ruído.

Differential capacitive transducer
bridge measurement circuit

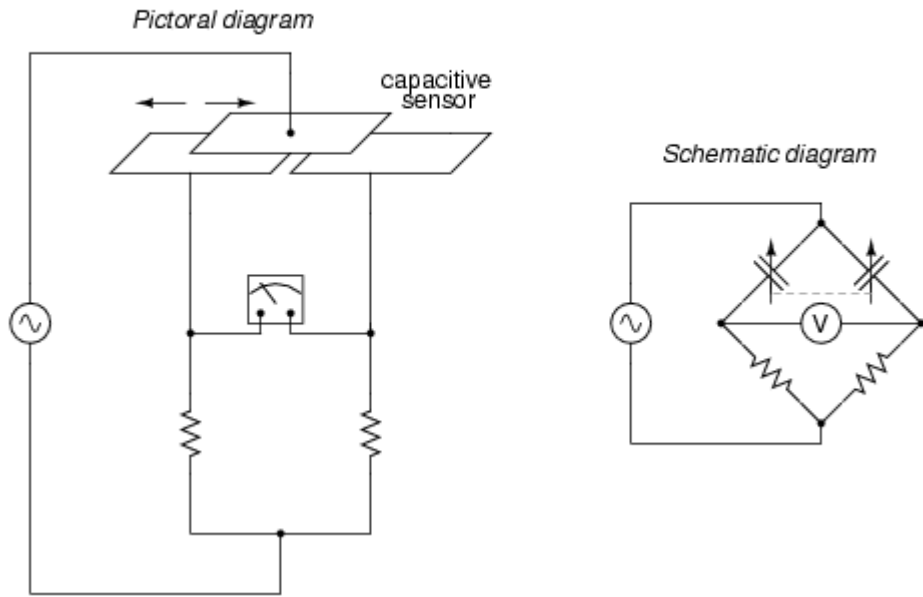


Figura 8. 8: Ponte ac de um transdutor capacitivo diferencial.

A forma alternativa à ponte ac da figura 8.8 é o recurso à ponte *gêmea T* (twin T) em que dois dos braços são constituídos por díodos ligados em oposição de fase tal como se indica no esquemático que se segue.

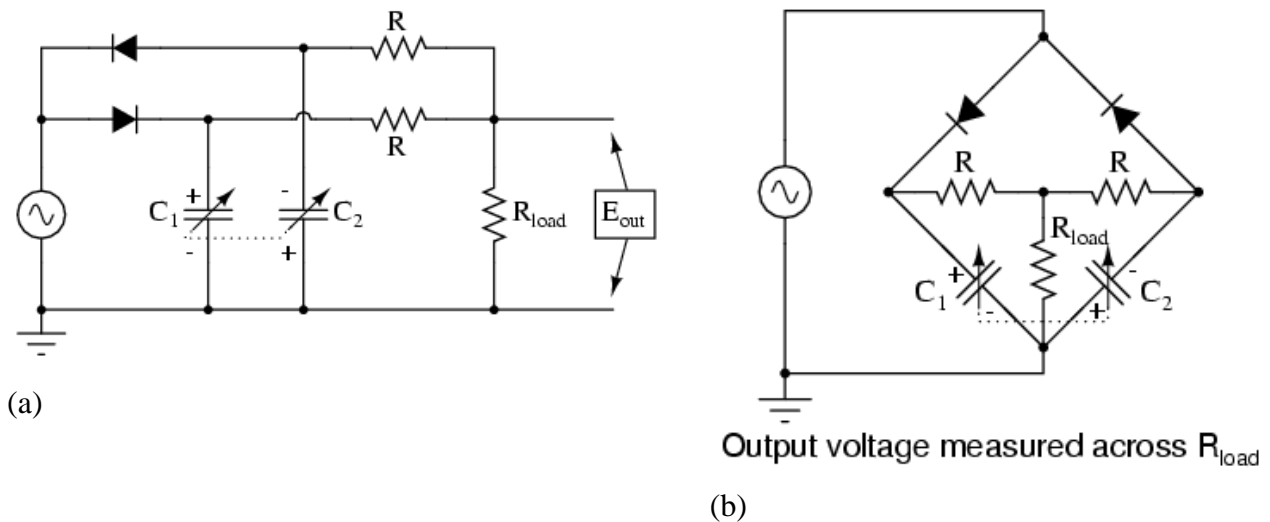


Figura 8.8: Ponte T gêmea capacitiva (a); esquemático eléctrico

Neste circuito, o condensador C_1 carrega durante o meio ciclo positivo da fonte ac enquanto que o condensador C_2 carrega durante o meio ciclo negativo. Enquanto um dos condensadores é carregado o outro descarrega-se (a uma razão menor do aquela com que foi carregado) sobre as 3 resistências do circuito. Como consequência, C_1 mantém uma tensão dc positiva em relação à massa, enquanto que C_2 mantém uma tensão negativa. Assim, se a capacidade do

transdutor variar. Tal significa que um dos condensadores aumenta a sua capacidade e outro diminui (não esquecer: trata-se de uma capacidade diferencial!).

A queda de tensão associada à resistência de carga, (R_{load}), ligada entre o ponto de ligação das 2 resistências (R) de igual valor e a massa será nula se a carga dos dois condensadores for a mesma. Caso contrário existirá uma queda de tensão, cujo sinal depende do valor da tensão associada a cada um dos condensadores: positiva quando C_1 é dominante e negativa no caso inverso.

8.5.1 Transdutores indutivos

Os transdutores indutivos podem ser passivos ou auto generativos. Os auto generativos utilizam o princípio básico do gerador eléctrico que é quando existe um movimento relativo entre um condutor e o campo magnético, induz-se neste uma tensão.

Um tacómetro é um transdutor indutivo que converte directamente a velocidade ou aceleração num sinal eléctrico. Assim, o objecto cuja velocidade angular se pretenda conhecer é directamente acoplado ao rotor de um gerador de corrente contínua, que roda em torno dos pólos de uma armadura de um magnete permanente (estator).

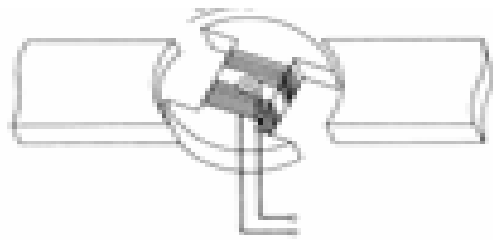


Figura 8.9a) Tacómetro em que o estator é um magneto permanente

Deste modo, induz-se uma tensão aos enrolamentos das espiras do rotor. A tensão desenvolvida é da ordem dos 10 mV por rotação e minuto (rpm) e pode ser directamente fornecida a um voltímetro de corrente contínua calibrado em rpm.

Alternativamente, a armadura rotativa pode ser um magnete permanente e as bobinas serem o estator. Este tipo de configuração proporciona um sinal de corrente alterna, apresentando com vantagem a facilidade de se poder filtrar o ruído e o "ripple" do sinal, para eventual amplificação do sinal obtido.

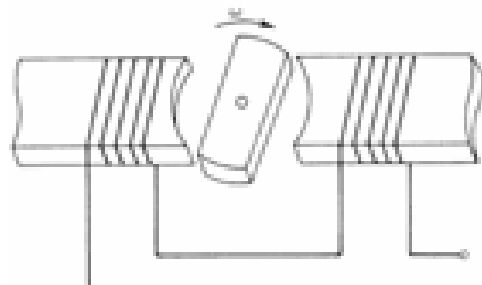


Figura 8.9b) Tacómetro em que o rotor é um magneto permanente.

Uma aplicação típica deste transdutor é para determinar a frequência de um tacómetro, para além da velocidade de fluxos de fluidos condutores, que atravessam um campo magnético estático. Deste modo, a velocidade de deslocação do fluxo condutor (v), na direcção perpendicular do campo magnético B , origina o aparecimento de um fluxo de energia perpendicular ao plano definido por $v \times B$, que induz uma força electromotriz (E) a uma bobina que constitui os terminais dos eléctrodos, colocados perpendicularmente à direcção do fluido: Genericamente, o princípio de determinação da velocidade tem em conta que:

$$E(\text{força electromotriz})=Blv,$$

8.8

em que B é a intensidade do campo magnético em weber m^{-2} ; l o comprimento do condutor (neste caso, o diâmetro interno do tubo isolante, por onde flui o fluido condutor); v a velocidade em m/s.

No caso de fluxímetro electromagnético, o rotor é substituído por um tubo colocado entre os dois pólos do magnete. Assim, á medida que flui um líquido através do campo magnético, induz-se uma força electromotriz no enrolamento deste que é mensurável.

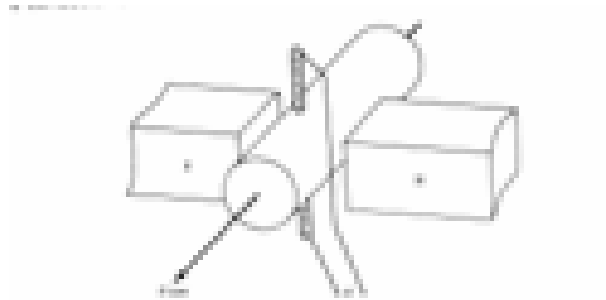


Figura 8.10: Transdutor indutivo para medição de fluxos.

Problema 8.5- Tem-se um dado transdutor indutivo para medir fluxos, em que o diâmetro da conduta é de 1,25 cm. Se a velocidade de um fluxo de 10m/s produz um campo magnético de 0,2 T, determine a força electromotriz gerada.

Resolução.

$$E=Blv=0,2 \times 1,25 \times 10^{-2} \times 10=25 \text{ mV.}$$

8.5.2 Transdutores indutivos variáveis: os transformadores diferenciais variáveis lineares

Os transdutores passivos indutivos necessitam de uma fonte de excitação externa. A acção do transdutor consiste principalmente em modular a excitação do sinal.

The Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

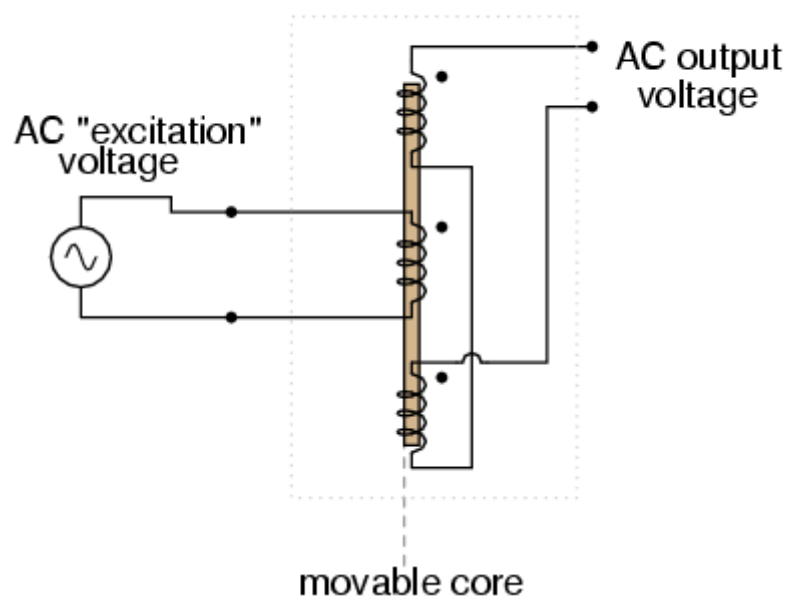


Figura 8.11. O transformador diferencial variável linear (LVDT)

Tal é o que acontece com o transformador diferencial linear variável (LVDT). O LVDT consiste basicamente num enrolamento primário (onde se aplica a excitação) e dois enrolamentos secundários (onde se tira o sinal de saída), que envolvem um tubo oco, posicionados de tal modo que o enrolamento primário é rodeado pelos enrolamentos secundários, em oposição de fase. No tubo oco é colocado um material ferromagnético, movível tal que quando o núcleo se encontra centrado, os pólos A e B estarão em oposição de fase, as f.e.m geradas em cada um dos enrolamentos do secundário iguais, pelo que não existe qualquer tensão à saída.

Se o núcleo se desloca para um dos lados, por exemplo A, a tensão gerada no enrolamento do secundário próximo de A (V_1) é superior à do outro enrolamento (V_2), sendo a diferença, directamente proporcional à distancia percorrida pelo núcleo, que se pressupõe variar linearmente.

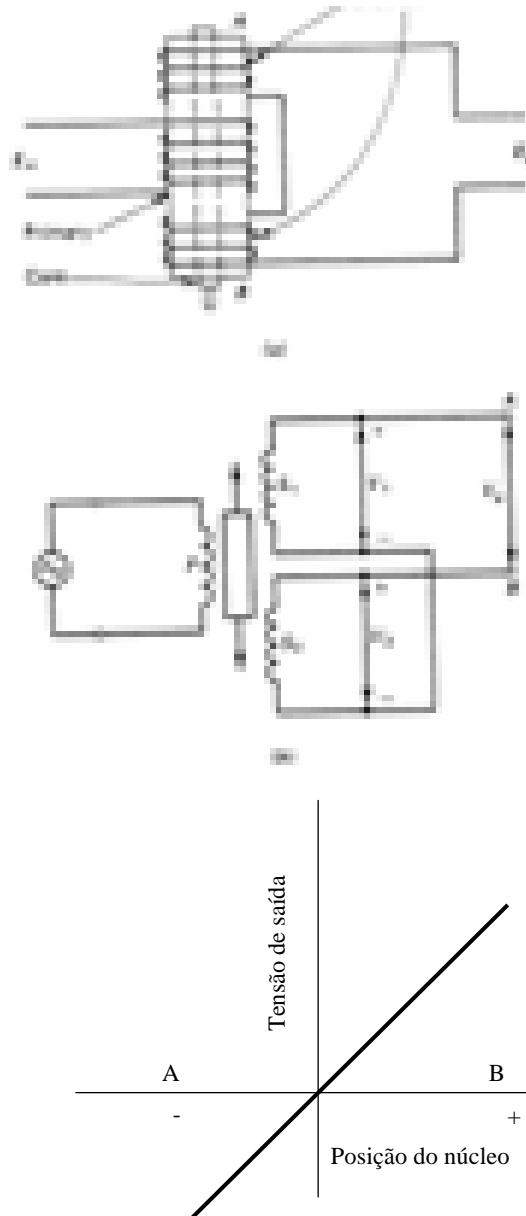


Figura 8.12: O LVDT (a); esquemático do LVDT; (c) forma de variação da tensão de saída, em função do posicionamento do núcleo

A principal vantagem do LVDT sobre um potenciómetro para a determinação da posição, é a de ausência de contactos físicos entre as partes móveis e estacionárias.

As tensões de excitação do LVDT são geralmente da ordem dos 10 V eficazes, utilizando-se sinais em que a frequência varia entre os 50 Hz e os 20 kHz.

Uma das potenciais desvantagens do LVDT é o tempo de resposta, que é dependente da frequência da fonte do sinal de excitação utilizado. Se se pretenderem tempos de resposta muito rápidos, as frequências do sinal a utilizar devem ser muito elevadas, de modo a que qualquer que seja o circuito de detecção da tensão decorram o número de ciclos suficientes capazes de determinarem o nível de tensão correspondente ao movimento do núcleo. Por exemplo, se tivermos um LVDT alimentado por um sinal de 50 Hz em que o núcleo se mova para dentro e para fora de algumas centenas de vezes por segundo. O sinal de saída deste LVDT não se parecerá em nada com uma função sinusoidal, uma vez que o núcleo se mova ao

longo de todo um ciclo, de forma mais rápida que o sinal, pelo que também não é possível relacionar o nível de tensão com a posição do núcleo.

Problema 8.6- Num dado transformador linear diferencial, a tensão de entrada é de 6,5 V e a tensão de saída é de 5 V, para uma excursão máxima de 2 cm. Determine qual a tensão de saída quando o núcleo do transformador se desloca de 2 cm para -1 cm.

Resolução

Tendo em conta os dados fornecidos e que o sistema é simétrico, tem-se que $V_o = (-1 \times 5/2) = -2,5$ V.

8.5.3 Transformadores diferenciais variáveis rotativos (RVDT)

Uma variação dos LVDT são os RVDT. O princípio de funcionamento destes dispositivos é similar aos dos LVDT, excepto que agora o movimento linear é transformado num movimento angular rotacional de ou superior a 360° . Baseado neste princípio, temos os chamados *Synchro* ou *Selsyn*, que não é mais do que um dispositivo similar a um rotor polifásico de um motor ac. Neste caso, o rotor é livre de rodar de 360° e em que existe um único enrolamento ligado à fonte de excitação. Por outro lado, o estator é composto por 3 enrolamentos dispostos na forma de Y. As tensões induzidas nos braços do estator pelo rotor não se encontram desfasadas de 120° , como acontece num motor trifásico com o estator com ligação em estrela. Com o rotor excitado pelo sinal ac, a tensão aos terminais de cada enrolamento do estator será em módulo, proporcional à posição angular do rotor.

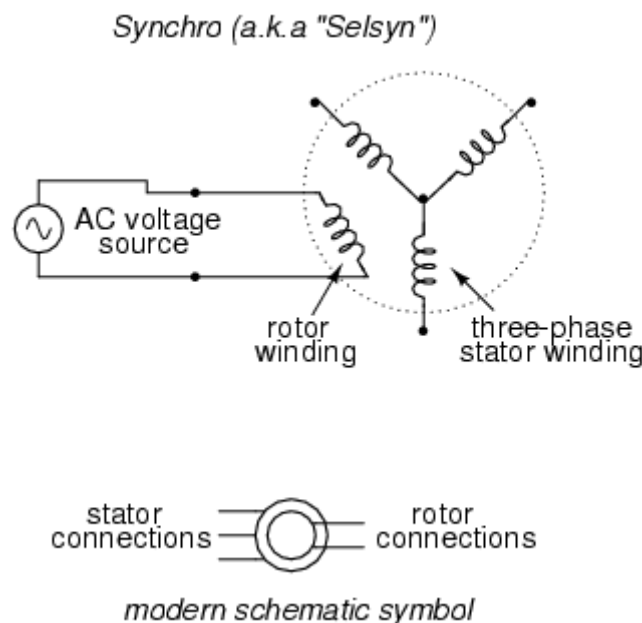


Figura 8.13: Esquemático de um RVDT.

8.6 Transdutores piezoelétricos

8.6.1 Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie em França e consiste na transformação de tensão mecânica num sinal eléctrico (acumulação de cargas à superfície de um cristal) ou vice-versa.

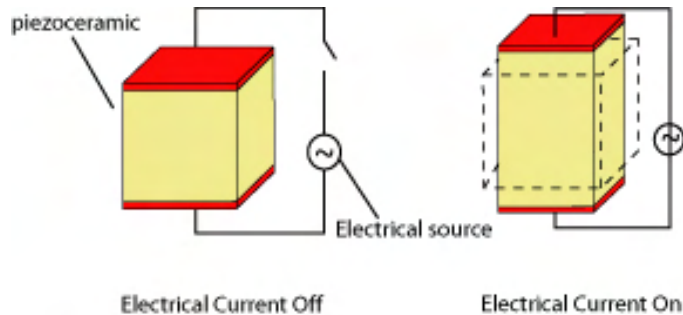


Figura 8.14. Efeito Piezoelétrico

Isto é, a aplicação de uma tensão mecânica (pressão) ao longo do eixo de um cristal de quartzo provoca o aparecimento de cargas eléctricas na direcção dos outros eixos ou, reciprocamente como resultado de uma diferença de potencial aplicada numa direcção particular, ocorre uma variação nas dimensões físicas do cristal, ao longo de um outro eixo. Este é o efeito básico que provoca o aparecimento de uma vibração num cristal anisótropo (as suas propriedades variam com a direcção). No caso do cristal de quartzo, este tem 3 eixos, (X;Y;Z), dispostos ao logo de um hexágono, fazendo-se o efeito piezoelétrico sentir somente ao longo dos eixos X e Y. Isto é, os eixos que passam respectivamente através das arestas laterais do hexágono (eixos eléctricos) ou que são perpendiculares aos lados do hexágono (eixos mecânicos).

Tipicamente, define-se coeficiente de acoplamento à razão:

$K = (\text{energia mecânica convertida em eléctrica}) / (\text{energia mecânica aplicada})$ ou, $K = (\text{Energia eléctrica convertida em mecânica}) / (\text{Energia eléctrica aplicada})$.

8.6.2 Tipo de oscilações provocadas por um cristal de quartzo

O cristal pode produzir 4 tipos diferentes de oscilações:

1. Oscilações longitudinais, nas quais o cristal se alonga e contrai, dando origem a uma frequência fundamental ou harmónica da oscilação fundamental;
2. Oscilações de curvatura, em que o raio de curvatura varia, dando origem a uma frequência fundamental ou harmónica da oscilação fundamental;
3. Oscilações de corte, ao longo de uma das diagonais do cristal, dando origem a uma frequência fundamental ou harmónica da oscilação fundamental;
4. Oscilações de torção, ao longo dos planos de escorregamento do cristal, dando origem a uma frequência fundamental ou harmónica da oscilação fundamental.

8.6.3 Circuito equivalente

O circuito equivalente de um cristal piezoelétrico é o que apresenta no esquema ao lado em que C_0 representa a capacidade dos eléctrodos que são formados por um filme fino metálico depositado na sua superfície, conjuntamente com a capacidade associada ao revestimento deste (encapsulamento). R_1 é a resistência série equivalente do cristal, resultante da montagem e perdas mecânicas que ocorrem no cristal. L_1 resulta da vibração da massa do cristal e C_1 representa a elasticidade mecânica do quartzo.

L_1 varia tipicamente entre alguns Henrys a algumas centenas de henrys; C_1 tem normalmente valores da ordem dos milésimos de PF; R_1 varia entre as dezenas às centenas de ohms; C_0 é normalmente da ordem de vários pF.

A frequência de ressonância do cristal pode ser determinada quer por L_1 , C_1 e R_1 (Frequência de oscilação série), quer por C_0 (frequência de oscilação paralelo). Isto é:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}, \text{ frequência série} \quad 8.9a)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1\frac{C_1C_0}{C_1+C_0}}}, \text{ frequência paralelo} \quad 8.9b)$$

$$\text{em que } f_p = f_s\sqrt{1 + \frac{C_1}{2C_0}} \quad 8.9c)$$

8.6.4 Factor de qualidade

O factor de qualidade (Q) representa a medida da eficiência da oscilação. Os valores deste parâmetro para osciladores de quartzo é cerca de 3 a 4 ordens de grandeza superior aos osciladores à base de componentes eléctricos passivos. Os factores que limitam Q são: impurezas e defeitos do material (da ordem de $16 \times 10^6/f$); perdas devido à montagem (tensões mecânicas); o acabamento da superfície do cristal e a sua geometria; gases no interior da cápsula; temperatura; tipo de eléctrodos.

$$Q = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1}. \quad 8.10$$

Problema 8.7- Um dado cristal tem um coeficiente de acoplamento de 0,32. Qual a quantidade de energia eléctrica que se lhe deve aplicar para produzir uma saída equivalente a 7mJ?

Resolução

Nestas condições, sabe-se que $0,32 = 7 \times 10^{-3}/E \Rightarrow E = 21,9 \text{ mJ}$.

8.7 Transdutores de temperatura

Os transdutores de temperatura são dispositivos que permitem ler temperaturas desde a criogenia (temperaturas muito baixas, próximas do zero absoluto) à fusão, incluindo a fusão nuclear. A forma de selecção do tipo de transdutor mais conveniente para cada aplicação é também condicionada pelo tipo de ambiente onde este irá ser aplicado. Em termos gerais existem 3 grandes tipos de transdutores de temperatura: resistivos, termopares e termístores.

8.7.1 Detectores de Temperatura Resistivos.

Os detectores de temperatura resistivos (RTD) são normalmente feitos de fio ou chapa fina gravada de Pt, Ni ou outros materiais cuja resistência varia com a temperatura, de forma coerente. Neste caso, a resistência do metal aumenta com a temperatura.

A relação entre a resistência e a elevação de temperatura é dada por:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T), \quad 8.11$$

onde R é a resistência do condutor à temperatura t (°C), R₀ é a resistência do condutor a 20 °C, α é o coeficiente de temperatura da resistência e ΔT é a diferença entre a temperatura de serviço e a temperatura ambiente, (20°C).

A incerteza de medida com estes detectores é da ordem dos ±0,1 °C. Este tipo de detectores existe na forma não encapsulada ou encapsuladas (com isolantes à base de MgO; Al₂O₃ ou outros compostos similares), função do meio onde estes são utilizados.

As vantagens destes detectores são: (saídas estáveis por longos períodos de tempo; (2) fácil de serem recalibrados; (3) elevada precisão sobre uma faixa estreita de temperaturas.

Como desvantagens temos: (1) faixa de precisão de leituras de temperatura menor (entre os -200°C e os 700°C), quando comparados com os termopares; (2) custo inicial mais elevado do que o dos termopares; (3) menos robustos que os termopares, quando sujeitos ao choque e vibrações mecânicas.

Em termos de processo de medida, o detector funciona como o braço de uma ponte não balanceada (ver capítulo IV). Neste circuito, os cabos de ligação podem contribuir para o erro da medida, especialmente se os cabos são demasiado compridos. O erro introduzidos pelos cabos de ligação pode ser minimizado com recurso a cabos de compensação ou pela utilização de um transmissor montado próximo do RTD. Neste caso, os *transmissores* convertem o valor medido da resistência num sinal analógico de corrente ou sinal série digital, que é enviado a grandes distancias por um cabo de ligação ou sinal de rf, para um sistema de aquisição de dados ou controlo e/ou indicador.

Os RTD mais baratos e de menos precisão são feitos de fio de cobre ou níquel (comportamento não linear da sua resistividade em função da temperatura, em faixas largas de temperatura). Para mais informação sobre as potencialidades dos RTD e suas aplicações, ver a "Hart Scientific website".

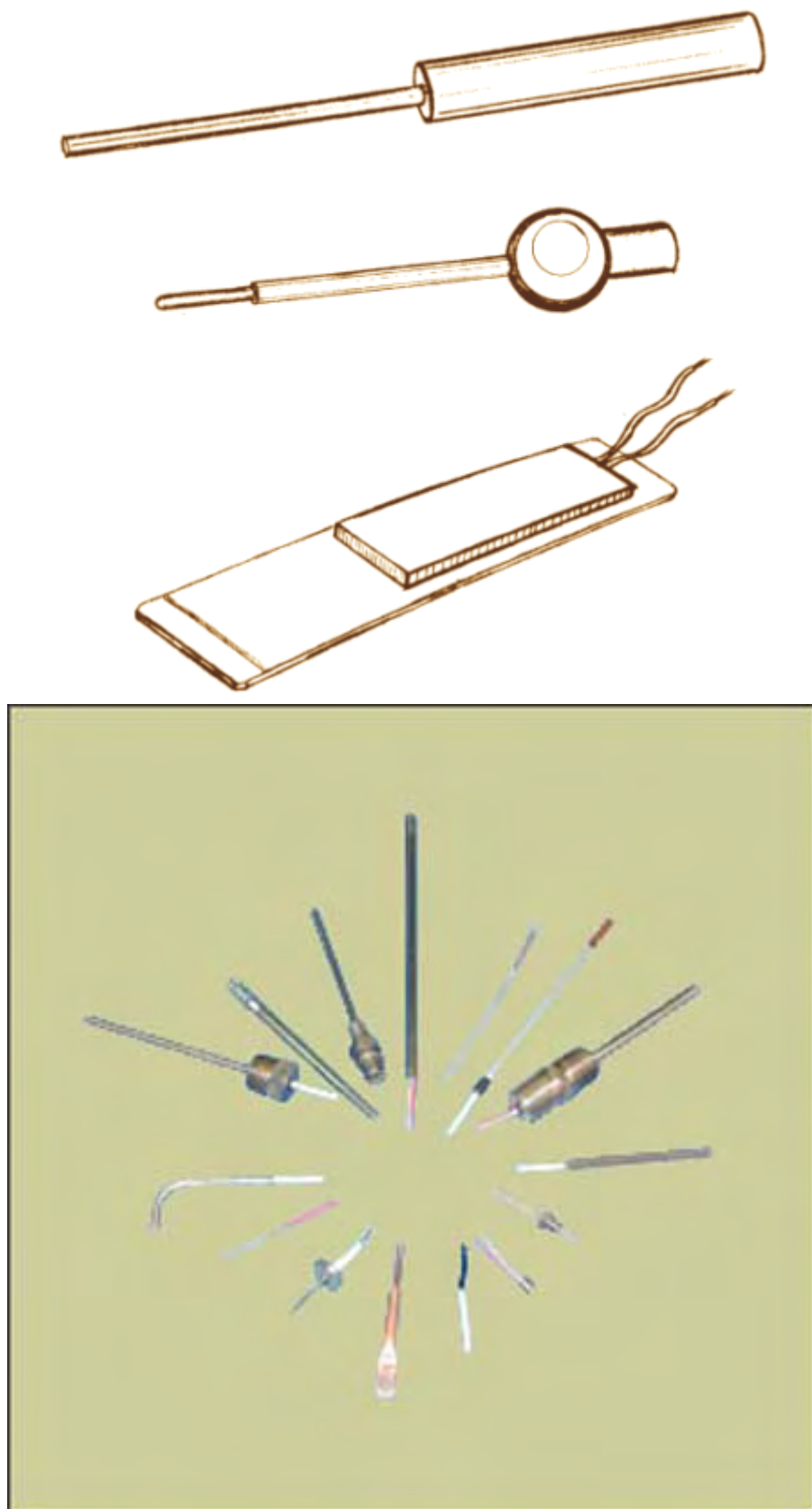


Figura 8.15: diferentes tipos de detectores de temperatura resistivos.

a) Tipos de RTD e tabelas de calibração.

Em termos de calibração as normas que são seguidas é a alemã (DIN 751), somente para RTD de Pt com um coeficiente $\alpha=0,00385$.

Os padrões ASTM E-1137 para termômetros resistivos de Pt, diz que para a faixa de temperaturas entre os 0°C e os 650°C, o comportamento da resistência deve ser traduzido pela relação:

$$R(T) = R(0)[1 + AT + BT^2] \quad 8.12$$

onde: T= temperatura em °C; R(T) a resistência à temperatura T; R(0) a resistência a 0°C; A = $3.9083 \times 10^{-3}(\text{°C})$; B = $-5.775 \times 10^{-7}(\text{°C}^{-2})$. Esta equação é ligeiramente diferente da relação geral dada pela equação 8.11.

Nos EUA as especificações ASTM E1137 para RTD industriais de Pt incluem um conjunto de recomendações, nomeadamente à tolerância de admissíveis para A e B que são: Tolerância gradual de A com T = $\pm[0.13 + 0.0017 \times |T|]$ °C; Tolerância gradual de B com T = $\pm[0.25 + 0.0042 \times |T|]$ °C, em que |T| é o valor absoluto da temperatura de RTD em °C.

Na tabela que se segue mostramos mostram-se exemplos dessas tolerâncias para um RTD de Pt em que a 0°C a resistência é de 100Ω.

Tabela 8.1 Classificação de RTD e limites de tolerância de acordo com ASTM E1137				
Temperatura em Graus C	Limites de A		Limites de B	
	°C	Ohms	°C	Ohms
-200	0.47	0.20	1.1	0.47
0	0.13	0.05	0.25	0.10
100	0.30	0.11	0.67	0.25
400	0.81	0.28	1.9	0.66
650	1.24	0.40	3.0	0.94

O padrão DIN quando comparado com as normas ASTM reconhece a existência de 3 classes diferentes de tolerâncias:

DIN Classe A tolerância: $\pm[0.15 + 0.002 \times |T|]$ °C

DIN Classe B tolerância: $\pm[0.30 + 0.005 \times |T|]$ °C

DIN Classe C tolerância: $\pm[1.20 + 0.005 \times |T|]$ °C

b) Determinação do factor de dissipação de um RTD

A constante de dissipação de um RTD é usualmente definida sob duas condições: ar livre (atmosfera) e sob as condições de um banho de óleo. O auto-aumento de temperatura é determinado pela potência dissipada pelo RTD e pela constante de dissipação:

$$\Delta T = \frac{P}{P_D} \quad 8.13$$

onde ΔT é o aumento de temperatura provocado pelo auto-aquecimento em $^{\circ}\text{C}$; P é a potência dissipada na RTD pelo circuito, em W; P_D é a constante de dissipação da RTD em $\text{W}/^{\circ}\text{C}$

Problema 8.8- Um RTD tem $\alpha_0 = 0.005/^{\circ}\text{C}$, $R = 500 \Omega$, e uma constante de dissipação $P_D = 30 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$ a 20°C . A RTD é usada num circuito ponte em que $R_1 = R_2 = 500\Omega$ e R_3 é uma resistência variável usada para balancear a ponte. Se a fonte de excitação da ponte for de 10 V e a RTD for colocada num banho a 0°C , determine o valor de R_3 que conduza à condição de balanceamento da ponte.

Resolução

A primeira coisa é determinar o valor de RTD a 0°C sem incluir os efeitos de dissipação. A partir da equação 8.11 tem-se:

$$R = 500[1 + 0.005(0 - 20)]\Omega$$

$$R = 450 \Omega$$

Se não tivermos em conta a condição de auto aquecimento, a ponte está balanceada quando R_3 for igual a 45Ω .

Vejam agora o que acontece se tomarmos em conta a condição de auto-aquecimento. Assim, a potência dissipada em RTD (que ainda vale 450Ω) pelo circuito é dada por :

$$P = I^2 R$$

em que a corrente I é obtida a partir da relação:

$$I = \frac{10}{500 + 450} = 0,011 \text{ A}$$

pelo que a potência dissipada é de: $P = (0.011)^2(450) = 0.054 \text{ W}$

Tendo em conta este valor, a subida de temperatura é dada por: $\Delta T = 0,054/0,030 = 1,8^{\circ}\text{C}$.

Nestas condições, a RTD não se encontra à temperatura de 0°C , mas sim de 1.8°C . Nestas condições, tem-se: $R = 500[1 + 0.005(1.8 - 20)]\Omega$

$$R = 454.5 \Omega$$

pelo que para a ponte ficar balanceada se deve ter $R_3 = \mathbf{454.5 \Omega}$.

Problema 8.9- Um termómetro de resistência de Platina tem uma resistência de 150Ω a 20°C . Calcule qual deverá ser a sua resistência a 570°C .

Resolução

Sabemos que a variação da resistência com a temperatura é dada por: $R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$, pelo que se tem:

$$R = 150[1 + 0,00392(570 - 20)] = 473,4\Omega$$

8.7.2 Termopares

O termopar é um sensor usado para medir a temperatura. Consiste na união de dois metais dissimilares, que produzem uma muito pequena tensão a uma dada temperatura. Esta tensão é proporcional à variação da temperatura e é lida e convertida em unidades de temperatura pelo medidor apropriado, depois de devidamente compensado (ver o caso da RTD).

Na verdade, uma das formas mais comuns de se medir a temperatura de um corpo é baseado no efeito termopar (efeito Peltier). Isto é, quando se faz uma junção de dois fios feitos de materiais metálicos diferentes a diferença de temperatura entre este terminal (junção) e a outra extremidade do fio (c.a.) gera uma diferença de potencial proporcional à variação da temperatura. A junção designa-se de junção sensível enquanto que os outros dois terminais são ligados a um voltímetro, graduado em temperatura, constituem os terminais de referência. Uma vez que a diferença de temperaturas entre as duas extremidades é um factor crítico, a outra extremidade deve ser mantida a uma temperatura constante (junção de referência). Tipicamente tem-se que

$$E = c(T_1 - T_2) + k(T_1^2 - T_2^2), \quad 8.14$$

onde c e k são constantes típicas dos materiais de que o termopar é feito, T_1 refere-se à temperatura da junção quente e T_2 à temperatura da junção fria.

Existem diferentes **tipos de termopares**, função dos metais utilizados e do calibre dos fios utilizados. Os quatro tipos mais comuns de termopares são o J (os metais usados são de ferro-constant), K (os metais usados são Chromega®-Alomega®, Cromoniquel-alumén), T (os metais usados são cobre-constant) e E (os metais usados são Chromega-Constantan). Cada um deles tem uma faixa específica de medida de temperaturas.

O processo de **selecção do termopar** mais adequado a uma dada aplicação deve ter em conta: (1) faixa de temperaturas a usar; (2) resistência química do termopar ou da sua bainha de protecção ao meio ambiente onde vai ser usado; (3) resistência à abrasão e às vibrações; (4) compatível com a instalação pretendida, (5) compatibilidade do diâmetro e forma de apresentação do termopar (não encapsulado ou encapsulado), função da aplicação pretendida. No processo de selecção de um termopar deve-se também ter em conta que a junção pode ser blindada e poderá estar numa das 3 configurações possíveis: à massa, flutuante ou exposta.

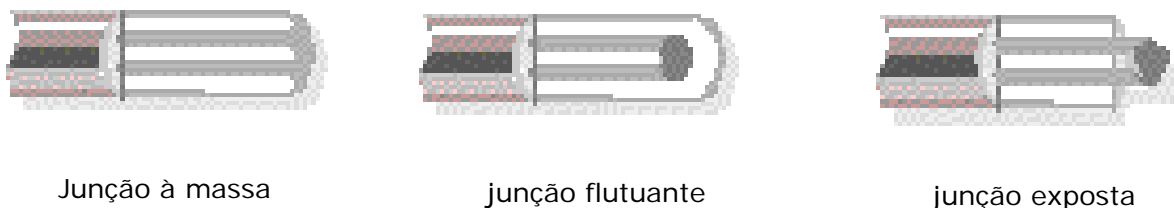


Figura 8.16; Diferentes formas de ligação da junção com a ponta de prova.

No caso da junção à massa, os fios do termopar estão fisicamente ligados à parte interior da ponta de prova/blindagem. Tal faz com que existe uma boa transferência de calor do exterior para a junção através das paredes da ponta de prova/blindagem. Este tipo de junção é

recomendada para medições de temperatura estacionárias ou em que existam gases corrosivos ou elevadas temperaturas ou pressões.

Numa junção flutuante, a junção não se encontra ligada às paredes da ponta de prova ou blindagem. Embora possua tempos de resposta baixos, a vantagem que oferece é do seu isolamento eléctrico, de cerca de 500 MΩ a 500 Vdc.

Tabela 8.2- Materiais de que a ponta de prova ou blindagem são constituídos e seu comportamento em diferentes atmosferas.

Material	Temperatura Máxima	Atmosfera usada			
		Oxidante	Hidrogénio	Vácuo	Inerte
304 SS	900°C (1650°F)	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom
Inconel 600	1148°C (2100°F)	Muito bom	Bom	Muito bom	Muito bom

No caso da junção exposta, esta encontra-se em contacto directo com o ambiente cuja temperatura se pretende determinar. Este tipo de configuração está associada a sistemas com os melhores tempos de resposta mas está limitada a meios não corrosivos e não pressurizados.

A constante de tempo do termopar é definida como correspondendo ao intervalo de tempo necessário para que o sensor atinja 63,2% do valor da temperatura pretendido, sob determinadas condições, bem especificadas.

Os diâmetros padrões dos termopares são: 0.010", 0.020", 0.032", 0.040", 1/16", 1/8", 3/16", e 1/4", com 2 fios. Normalmente, o terminal negativo (menor potencial) do termopar corresponde à cor vermelha.

Tabela 8.3- Diferentes tipos de termopares, materiais constituintes e faixa de temperaturas de utilização.

Tipo de termopares	Nome dos Materiais	Faixa de temperaturas de aplicação
B	Platinum 30% Rhodium (+) Platinum 6% Rhodium (-)	2500 -3100F 1370-1700C
C	W5Re Tungsten 5% Rhenium (+) W26Re Tungsten 26% Rhenium (-)	3000-4200F 1650-2315C
E	Chromel (+) Constantan (-)	200-1650F 95-900C
J	Iron (+) Constantan (-)	200-1400F 95-760C
K	Chromel (+) Alumel (-)	200-2300F 95-1260C
N	Nicrosil (+) Nisil (-)	1200-2300F 650-1260C
R	Platinum 13% Rhodium (+) Platinum (-)	1600-2640F 870-1450C
S	Platinum 10% Rhodium (+) Platinum (-)	1800-2640F 980-1450C
T	Copper (+) Constantan (-)	-330-660F -200-350C

Num termopar designa-se por junção fria ou de referência à junção que é mantida a uma temperatura relativamente constante ou a que corresponde um potencial fictício de referência. Por **compensação da junção fria**, entende-se o valor que se deve adicionar ao da leitura da junção do ponto de medida, tendo em conta a temperatura de referência usada (normalmente a ambiente e nunca superior a 27,2°C) e a que se encontra a junção fria (referência).

Por junção quente, entende-se a junção no ponto de medida.

Um das condições importantes a ter em conta pelo utilizador é a identificação do tipo de termopar que está a utilizar. Para isso existe um código de cores que os identificam. Infelizmente, a sua identificação ainda não é Universal, mesmo na Europa. Nas tabelas que se seguem apresentamos os códigos de cores seguidos em cinco países de referência.

Tabela 8.4 Código de cores dos termopares, de acordo com os padrões ASTM nos EUA



Tabela 8.5 Código de cores dos termopares, de acordo com os padrões ingleses BS1843: 1952:



Tabela 8.6 Código de cores dos termopares, de acordo com os padrões ingleses BS4937: Part 30: 1993:



Tabela 8.7 Código de cores dos termopares, de acordo com os padrões franceses NFE:



Tabela 8.8 Código de cores dos termopares, de acordo com os padrões alemães DIN:



Problema 8.10- Durante um conjunto de experimentações com um termopar de ferro constant verificou-se que $c=3,75 \times 10^{-2} \text{ mV}/^\circ\text{C}$ e $k=4,5 \times 10^{-5} \text{ mV}/^\circ\text{C}^2$. Se $T_1=150^\circ\text{C}$, e a junção fria se encontrar à temperatura do gelo fundente, determine qual a força electromotriz desenvolvida na junção.

Resolução

$$\text{Como } E = c(T_1 - T_2) + k(T_1^2 - T_2^2) \Rightarrow E = 3,75 \times 10^{-2} (150 - 0) + 4,5 \times 10^{-5} (150^2 - 0) = 6,64 \text{ mV}$$

8.7.3 Termístores

Os termístores são dispositivos sensoriais térmicos que possuem coeficientes de temperatura ou positivos (PTC) ou negativos (NTC) da resistência e elevados.

Os termístores PTC são resistências cujo valor é dependente da temperatura, normalmente fabricadas a partir de titanato de bário e são normalmente utilizadas em sistemas em que se pretenda uma drástica variação da resistência a uma dada corrente ou temperatura. Os PTC funcionam nos seguintes modos: (1) sensor térmico para temperaturas entre os 60°C e os 180°C . Podem ser aplicados como por exemplo, na protecção de enrolamentos em motores eléctricos e transformadores; (2) fusível de estado sólido para protecção contra níveis de correntes excessivas, que variam dos mA aos vários amperes e níveis de tensão continua que podem ir até cerca de 600 V. Podem ser aplicados, como por exemplo, na protecção de fontes de alimentação; (3) sensores de níveis de líquidos. Podem ser utilizados, por exemplo no controlo do líquido de arrefecimento de motores de automóveis.

No caso dos NTC, o termistor é um transdutor de temperatura feito de semicondutores degenerados, baseados na sinterização de uma mistura de óxidos metálicos tais como de Mn, Ni, Co, Cu ou Ur (a resistência diminui com o aumento de temperatura). Estes sensores térmicos são normalmente muito estáveis, suportam elevadíssimas temperaturas, sendo por isso usados para controlar a temperatura de reactores nucleares.

Em termos comerciais existem dois tipos de termístores, função do modo como o eléctrodo se encontra ligado ao corpo de detector cerâmico. Cada um destes grupos pode ainda ser subdividido em outros tipos de termístores, função da sua geometria, forma de empacotamento e técnicas de processamento utilizadas.

O primeiro grupo de termístores consiste de termístores na forma de gota/pérola. Estes dispositivos têm normalmente fios de Pt ligados sinterizados directamente com o corpo cerâmico do termistor. Os termístores deste tipo incluem: gotas despedidas; gotas revestidas a vidro; gotas rugosas; pontas de prova de vidro miniaturizadas, varetas de vidro, gotas enclausurados em vidro.

O segundo tipo de termístores possuem superfícies de contacto metalizadas, com cabos de ligação radiais ou axiais ou mesmo sem cabos de ligação, para os casos de montagem superficial destes num dado circuito ou se a ligação se faz através de uma mola que precisa de ser pressionada. Estes termístores aparecem sob a forma de: discos, bolachas, montagem superficial, lâminas, varetas, anilhas.

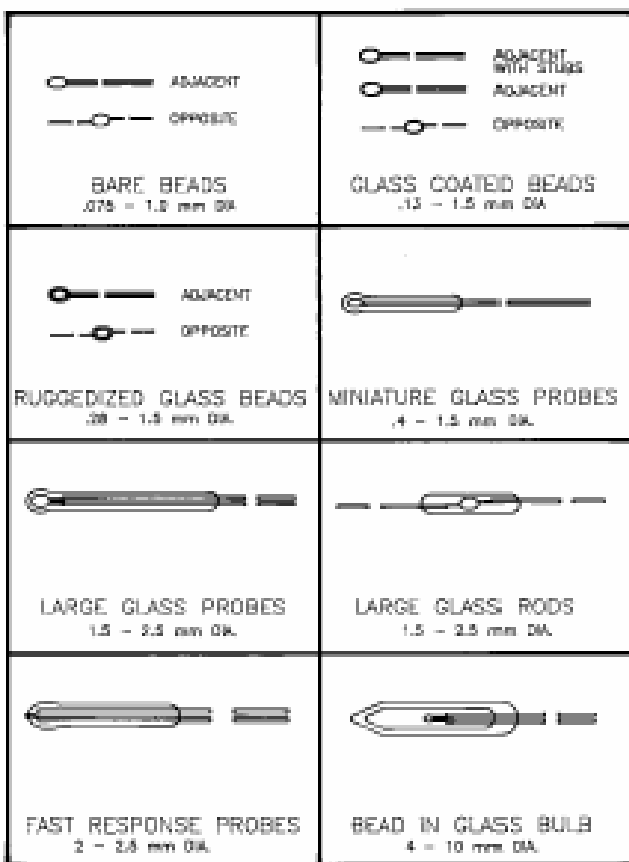


Figura 8. 17a: Termístores NTC com a forma de gota

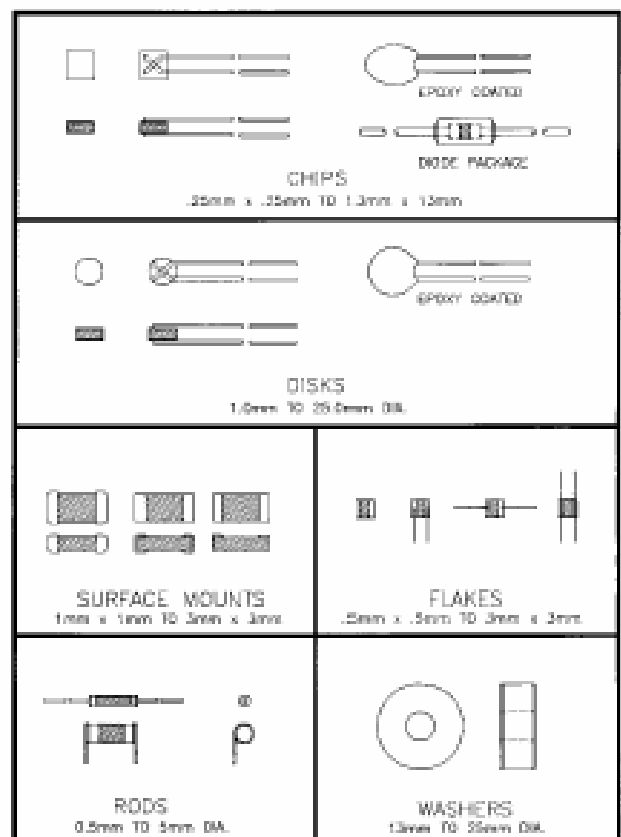


Figura 8. 17b: Termístores NTC de superfície metalizada

Os termístores NTC comercialmente disponíveis possuem secções transversais que variam entre os 0,25mm×0,25mm e os 3mm×3mm, com espessura entre os 0,15 mm e os 0,75mm. Na figura 8.18 mostramos a razão de variação da resistência normalizada com a temperatura de um NTC, onde se também se mostra o comportamento típico de uma RTD de Pt. Os resultados claramente mostram a superioridade destes, em termos de discriminação dos valores de leitura e portanto, a maior fiabilidade e precisão dos valores de leitura, numa faixa extensa de temperaturas. Para além disso, estes dispositivos têm também como vantagem, o facto de possuírem resistências elevadas e portanto minimizarem a contribuição da resistência de contactos, o seu baixo custo e a possibilidade de poderem ser utilizados em formas miniaturizadas, quando comparados com os RTD.

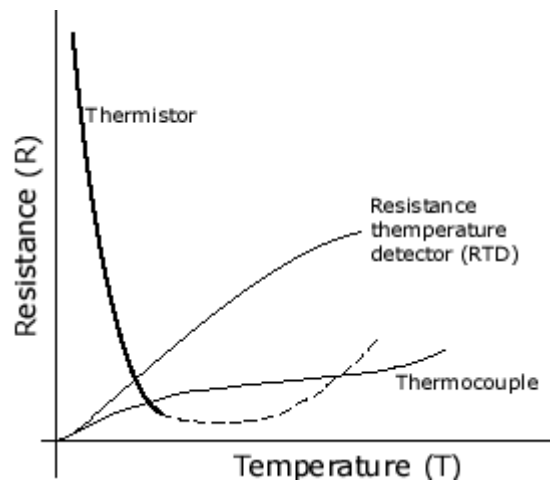


Figura 8.18: Razão da variação da resistência normalizada de um termístor com a temperatura, onde também se mostra o comportamento de um RTD e de um termopar

A razão a que a energia térmica é fornecida ao termístor num circuito eléctrico é igual à energia dissipada no termístor:

$$\frac{dH}{dt} = P = I^2 R = EI = \delta(T - T_A) + c \frac{dT}{dt} \quad 8.15$$

onde δ é a constante de dissipação do termístor, definida como sendo a razão entre a variação da potencia dissipada no termístor e a variação resultante de temperatura; c a capacidade calorífica do material de que o termístor é constituído.

Resolvendo a equação anterior tem-se:

$$\Delta T = T - T_A = \frac{P}{\delta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta}{c} t\right) \right] \quad 8.16$$

onde δ/c tem as dimensões da constante do tempo de resposta do termístor.

Quando o termístor é encapsulado, o tipo de resposta exponencial deixa de existir. A massa da cápsula e a condutividade térmica dos materiais utilizados no sensor normalmente fazem aumentar a constante de dissipação do termístor, fazendo com que o tempo de resposta aumente, passando o dispositivo a ter um comportamento essencialmente estacionário, com

tempos de resposta independentes da rampa de aquecimento/arrefecimento utilizadas no processo.

Em termos de aplicação, existem três características dos termístores (NTC ou PTC) que determinam o seu campo de aplicação:

(1) **Característica Resistência - temperatura.** A relação da resistência do termístor com a temperatura é aproximadamente dada por:

$$R = R_{ref} \exp \left[\beta_T \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \Rightarrow T = \frac{T_{ref} \beta_T}{\beta_T + T_{ref} [\ln(R) - \ln(R_{ref})]} \quad 8.17$$

onde T é a temperatura em graus Kelvin; T_{ref} é a temperatura de referência, usualmente 298,15 °K; R é a resistência do termístor; R_{ref} é o valor de R a T_{ref} ; β_T é a constante de calibração usualmente entre 3000 a 5000 °K.

Para termístores NTC o coeficiente NTC α_T é utilizado para descrever a sensibilidade do termístor:

$$\alpha_T = -\frac{\beta_T}{T^2}$$

Os valores típicos de α_T são de -2% a -8%.

(2) **Característica Tensão – corrente.** Para os NTC a característica tensão – corrente do termístor depende da razão de auto aquecimento deste e das condições que levam à obtenção da condição de equilíbrio (a razão das perdas de calor pelo dispositivo são iguais à potência fornecida). Se se considerarem desprezáveis as variações da constante de dissipação e se conhecer a característica resistência temperatura do termístor, então é possível resolver-se a equação:

$$\delta(T-T_A) = \delta\Delta T = P = ET IT \quad 8.18$$

em termos da característica estática tensão – corrente. Neste caso, o traçado em escala log – log onde a condição de resistência constante tem um declive de +1 e a condição de potência constante corresponde a um declive -1 (ver tabela 8.9). Quando a quantidade de energia dissipada no termístor é desprezável, a característica tensão – corrente corresponde a uma condição de resistência de dissipação nula (condição de cc) e portanto ao ponto de inflexão mostrado na figura da tabela 8.9.

Nos PTC a curva tensão –corrente define a relação destes dois parâmetros em qualquer ponto em equilíbrio térmico. Neste caso, o valor da resistência associada é afectada pelas condições ambientais e o auto aquecimento. Assim qualquer factor que afecte a razão de dissipação, também afectará a relação tensão – corrente. Neste caso, o ponto de inflexão corresponde à condição da tangente inversa do que acontecia no caso dos NTC, ou seja o declive da curva será paralelo ao eixo Log V (condição de resistência infinita ou de circuito aberto), enquanto que no caso anterior era paralela ao eixo Iol.

(3) **Característica corrente – tempo.** No caso dos NTC a dependência que se obtém inicialmente é a que é devida a uma resistência muito elevada e portanto, a sinais de corrente muito baixo. Contudo, á medida que a temperatura se eleva, a corrente aumenta pelo facto da resistência do termístor baixar. Finalmente, à medida que o dispositivo se aproxima da condição de equilíbrio, a razão de variação da corrente diminui, até que atinge o seu valor final estacionário. No Caso dos PTC, o comportamento é inverso. Inicialmente a corrente sobe, associado a problemas de estabilização da resistência, mas depois desce até atingir a condição estacionária. A característica corrente - tempo é usada em processos como tempo de atraso em sistemas com supressão de movimentos ondulatórios, protecção de filamento, protecção de sobre carga e aplicações de comutações sequenciais

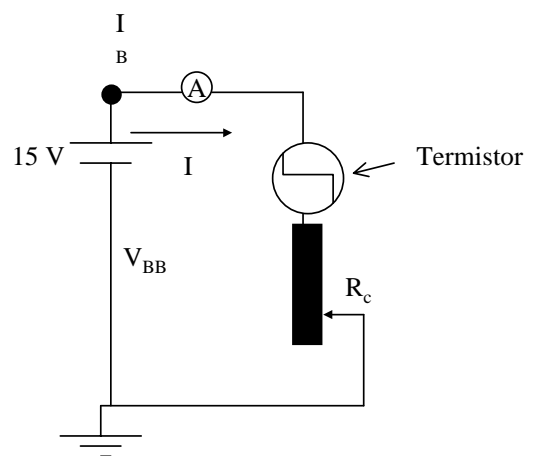
Tabela 8.9- Características principais dos termístores

	Característica Resistência - Temperatura	Característica Tensão - Corrente	Característica Dinâmica
PTC termístor de BaTiO ₃			
NTC termístor de Mn-Ni, Mn-Co-Cu, Mn-Ni+X			

Problema 8.10- O circuito que se mostra é utilizado para medir temperaturas. O Termistor utilizado possui uma resistência de 4 kΩ e o amperímetro que se utiliza lê correntes de fim de escala de 50 mA e possui uma resistência interna de 3 Ω. Sabendo que $R_c = 17 \Omega$ e que a tensão de alimentação vale 15 V, qual será o valor da leitura do amperímetro quando a temperatura for de 40°C (nota, para 20°C temperatura a resistência do termístor vale 4KΩ e para 40°C vale 900Ω).

Resolução

Para as condições iniciais (ditas de referencia) tem-se: $I = V_T / R_T = 15 / (4000 + 17 + 3) = 3,73 \text{ mA}$.
 A 40°C, o valor da resistência do termístor baixou, pelo que a corrente deve subir. Isto é:
 $I' = V_T / R'_T = 15 / (950 + 17 + 3) = 15,5 \text{ mA}$.



8.7.4 Transdutores de temperatura ultra-sónicos

Por ultra-sónicos designam-se as vibrações do som de frequência superior a 20 kHz. Os sensores de temperatura ultra-sónicos baseiam-se neste efeito e permitem “ler” desde temperaturas criogénicas até temperaturas de fusão de plasmas, com elevada resolução e precisão.

O processo de detecção e medida de ondas ultra-sónicas é efectuado utilizando receptores piezoeléctricos ou por meios ópticos. O ultra-som está bem acima do limiar da audição humana que inclui a banda dos 18 Hz aos 18 kHz. Ondas ultra-sónicas não devem ser confundidas com o termo supersónico, que se refere a fenómenos ao facto da velocidade de um corpo sólido exceder a velocidade do som.

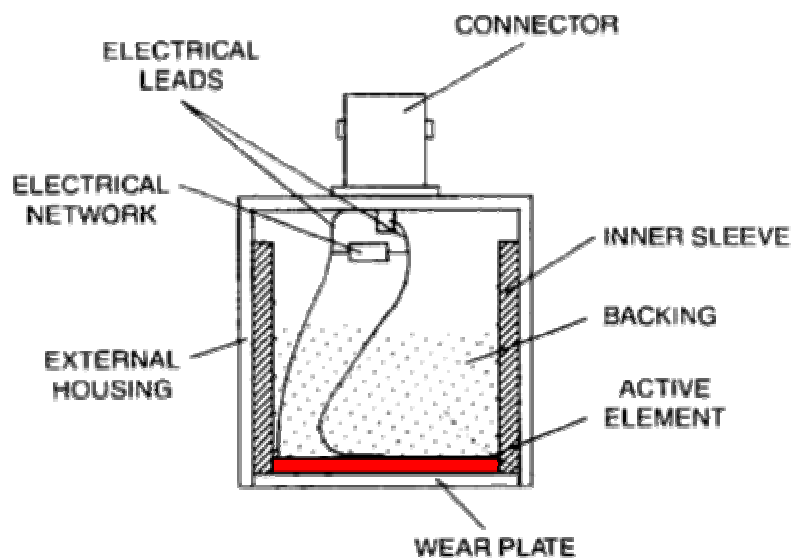


Figura 8.19: esquemático de um transdutor ultra-sónico

Os mecanismos conhecidos para produzir ultra-sons são: fluxo de fluidos turbulentos; movimento de líquidos; movimentos mecânicos; geradores de som; descargas eléctricas.

As raízes da tecnologia remontam aos trabalhos efectuados por Pierre Curie, em termos de efeito piezoeléctrico, em 1880, onde observou que cristais assimétricos de quartzo ou de tartarato de potássio de sódio geravam uma carga eléctrica quando sobre estes se aplicava uma pressão mecânica. Inversamente, obtinha vibrações mecânicas ao aplicar oscilações eléctricas aos mesmos cristais. Uma das primeiras aplicações para as ondas ultra-sónicas foi o sonar (“sound navigation ranging”), de elevada utilidade à navegação. Para além desta aplicação, os ultra-sons são muito utilizados em: **limpeza** de superfícies (de grande aplicabilidade nas industria electrónica e médica); sistemas **medidores de fluxo** (baseado no efeito Doppler); **teste não destrutivos** de falhas superficiais e em volume; **maquinação e soldagem** de peças; **electrónica** (filtros de ondas acústicas superficiais, para telefones, TV, ...); **sonoquímica** (ondas sonoras a provocarem a aceleração de reacções químicas, oxidação, hidrólise, polimerização, despolimerização e produção de emulsões); **agricultura** (os ultra-sons são utilizados para medir a espessura de da gordura na carne de porco e de vaca; são também utilizados na homogeneização do leite e no controlo de pestes, incluindo o matar

insectos); **Oceanografia** (localização de submarinos, cardumes, etc.); **medicina** (em imageologia de tecidos humanos, com a vantagem de aparentemente não ter as contra-indicações, normalmente associadas aos raios X)

As técnicas de detecção ultra-sónicas são altamente dependentes do tipo de transdutores usados. Normalmente os detectores térmicos usados são do tipo RTD à base de PZT (zirconato-titanato de chumbo) ou LM (metaniobato de chumbo) ou de materiais piezo-compósitos, de elevada sensibilidade térmica, devido ao elevado factor de acoplamento destes materiais e portanto, recomendada a sua utilização em aplicações de espectro largo.

O acoplamento acústico dos componentes de ponta de prova ao meio a medir/controlar a temperatura é normalmente efectuado por:

(1) alta pressão (acoplamento seco). Neste caso a ponta de prova deve ter um acabamento superficial muitíssimo bom. Contudo, não permitem o recurso a membranas (por exemplo, folhas de ouro), como camadas intermediárias como forma de amplificar o sinal obtido, uma vez que estas não são capazes de suportar pressões elevadas em jogo. Neste caso, a pressão de acoplamento exerce sobre o sinal a medir o efeito de amplificação do eco até uma dada pressão crítica.

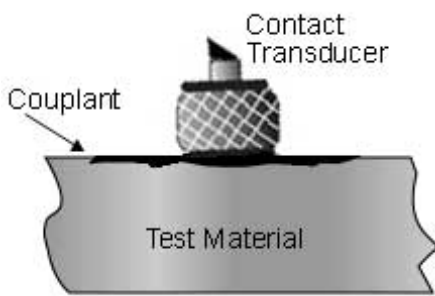


Figura 8.20 a) Transdutor ultra-sónico de contacto/pressão

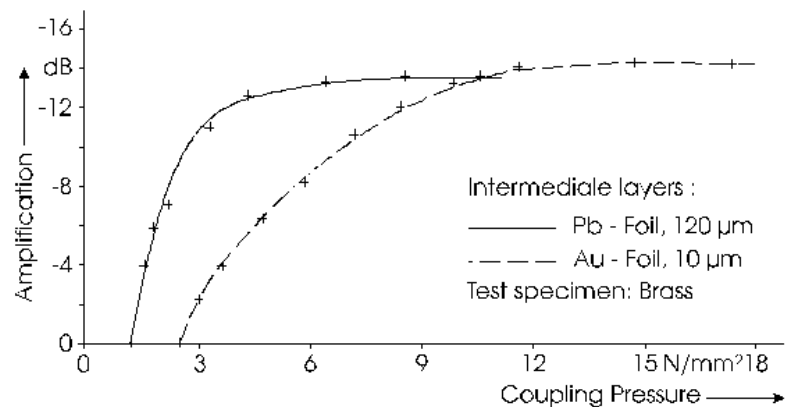


Figura 8.20b) amplificação do eco de um sistema ultra-sónico, em função da pressão de acoplamento para uma amostra teste de bronze e utilização de camadas intermédias de Chumbo e ouro.

(2) usando um fluido (acoplamento fluidico). Neste caso, o acoplamento é efectuado através

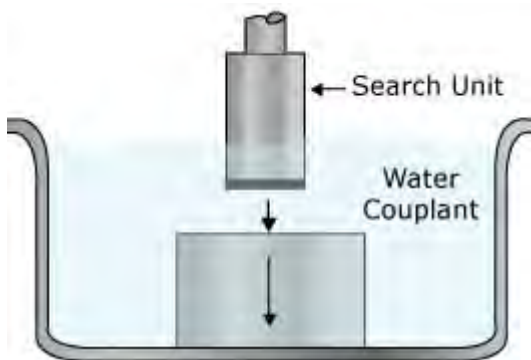


Figura 8.21: Acoplamento do transdutor por um fluido

de um fluido. Nestas condições, as pressões em jogo são baixas e permitem a utilização de membranas finas como camadas intermédias. Neste caso, o problema que se põe é o da eventual corrosão promovida pelo fluido, a medida que a temperatura sobe, em termos de material de base ou da membrana (que deve ser de material nobre, de forma a reduzir esses efeitos).

(3) por soldagem (acoplamento sólido). Neste caso, o problema que se põe é o dos coeficientes de expansão térmica dos materiais envolvidos.

Em termos de leitura de informação, os fabricantes normalmente fornecem o comportamento no domínio do tempo e da frequência, da resposta do transdutor. Os sinais que a seguir se mostram correspondem à formas de onda de resposta a um impulso de um transdutor ultra-sónico, no domínio do tempo (amplitude versus tempo) e da frequência (amplitude versus frequência).

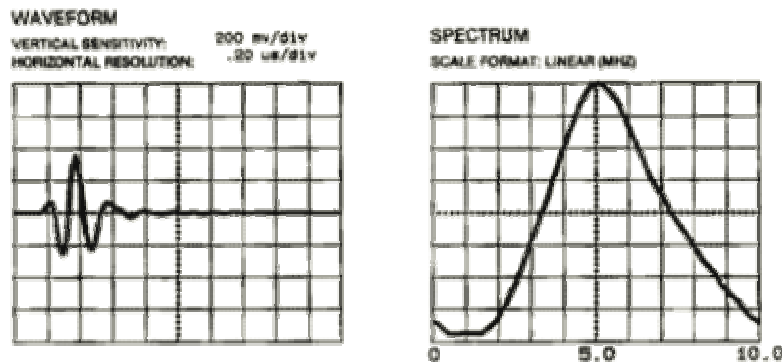


Figura 8.22: Resposta de um transdutor ultra-sónico, no domínio dos tempo e frequência.

Como transdutor térmico, os medidores ultra-sónicos são essencialmente utilizados para controlo de temperatura em ambientes altamente agressivos, ou em que se desenvolvam elevadas temperaturas, como é o caso da industria de fundição. Na figura que se segue mostra-se a forma de onda típica obtida através de um disco de 3 mm de espessura de nitreto de silício a 200°C no modo de transmissão, no interior de um forno, capaz de suportar temperaturas até 500 °C. Este transdutor é utilizado para medida de temperaturas por acoplamento fluidico (ar). Este processo de controlo é utilizado na queima de polímero ligante na industria de moldes.

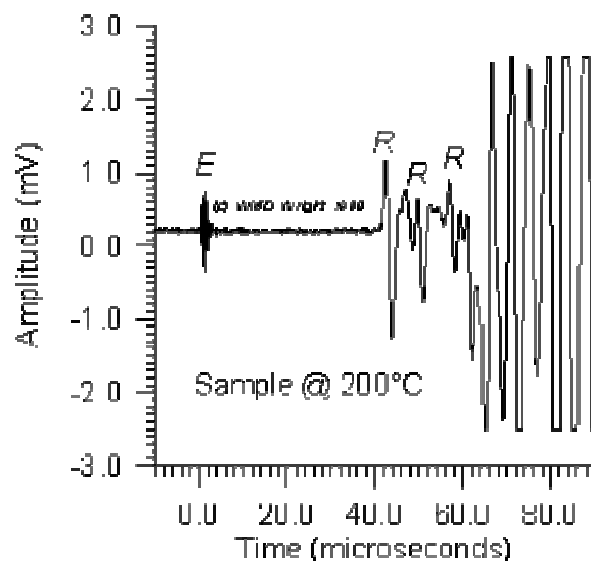


Figura 8. 23: Resposta de um transdutor ultra-sónico

8.8 Transdutores Fotoelétricos

Neste tipo de transdutor, a radiação luminosa é convertida directamente num sinal eléctrico, proporcional á intensidade do fluxo luminoso utilizado. Os materiais que melhor proveito tiram deste efeito são à base de semicondutores (resistências de semicondutor ou dispositivos activos). Neste caso, o transdutor não necessita de qualquer excitação externa. Existem três tipos de transdutores fotoelétricos:

- Fotoemissivos, em que a radiação ao incidir num cátodo provoca a emissão de electrões da superfície do cátodo. Neste caso, existe um cátodo, um ânodo e vários eléctrodos secundários designados de dinodos, cada um a um potencial superior que o antecedente. Neste caso, os electrões emitidos pelo cátodo são atraídos para um primeiro ânodo, que ao embaterem neste, dão lugar à emissão de electrões secundários, que se vão multiplicando, até ao último eléctrodo.
- Deste modo, podem conseguir-se amplificações do primeiro sinal tão elevadas quanto 10^5 ou 10^9 .
- As sensibilidades luminosas variam normalmente entre 1 A/lumen a cerca de 2000 A/lumen. As correntes típicas de ânodo são da ordem dos 100 μA a 1mA. Tipicamente, dispositivos com uma sensibilidade de 100 A/lumen, precisam somente de 10^{-5} lumen de intensidade luminosa para produzirem uma corrente de saída de 1 mA. Por lumen entende-se a unidade de luz igual à luz emitida por um ângulo sólido a partir de uma fonte luminosa pontual, com a intensidade de uma candeia (cdl)
- Fotocondutivos, em que a radiação luminosa provoca uma alteração da resistência eléctrica, traduzindo-se por uma variação do potencial ou corrente debitada por um dado circuito de excitação (foto-transístores, foto-resistência).
- Fotocélulas, em que a radiação luminosa ao incidir numa junção do tipo díodo pn gera uma tensão de saída proporcional à intensidade da radiação luminosa.

8.8.1 Válvulas Fotomultiplicadoras

As válvulas ou tubo fotomultiplicadores (PMT) são utilizados para a detecção de sinais luminosos de muito baixa intensidade. O PMT é um dispositivo foto-emissivo em que a absorção de um fóton resulta na emissão de um electrão. Estes detectores funcionam por amplificação dos electrões gerados por um fotocátodo exposto a um fluxo de fótons. O fluxo de fótons é acoplado ao cátodo através de janela de quartzo, que por sua vez liberta electrões que são multiplicados pelos eléctrodos conhecidos por canais metálicos dinodos. No extremo da cadeia de dinodos existe um ânodo ou eléctrodo de colecção, dando lugar a uma corrente que é directamente proporcional ao fluxo de electrões gerados pelo fotocátodo, multiplicada pelo factor de amplificação, função do número de dinodos utilizados (lembrar que a amplificação dos electrões segue a regra 2^n).

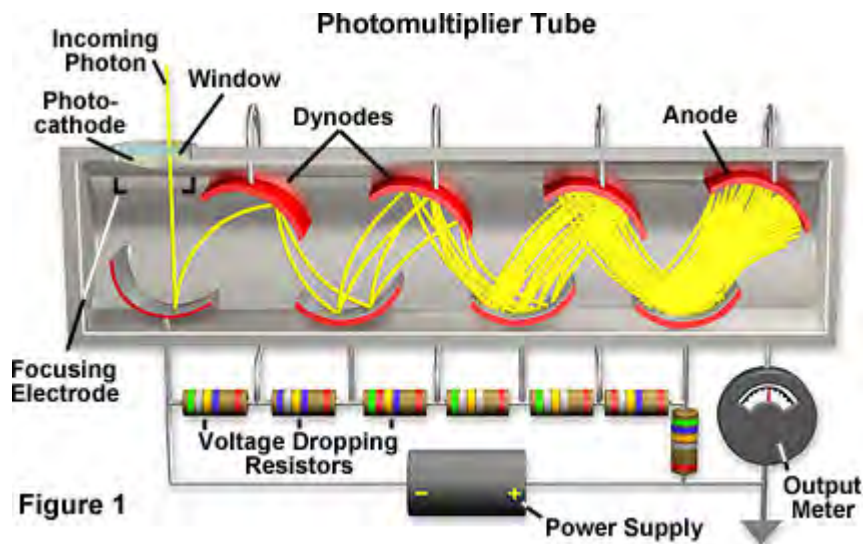


Figura 8. 24: Fotomultiplicador

A resposta espectral, eficiência quântica, sensibilidade e corrente no escuro de um PMT são determinadas pela composição do PMT. Os melhores fotocátodos, capazes de responderem à luz visível apresentam eficiência quânticas cerca de 30% mais baixas, o que significa que 70% do impacto dos fótons no fotocátodo não produzem electrões e portanto, não são detectados.

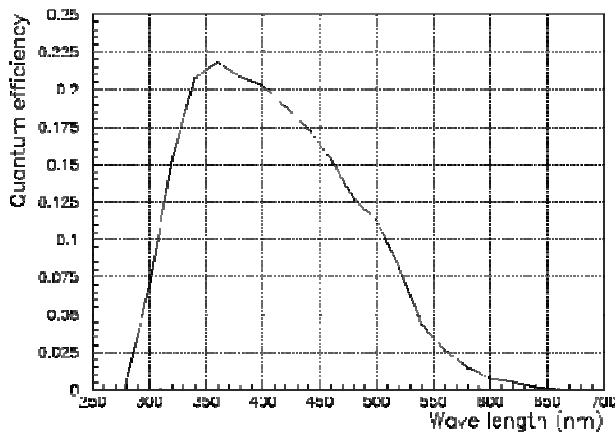


Figura 8. 25: Eficiência quântica de um PMT em função do comprimento de onda da radiação incidente.

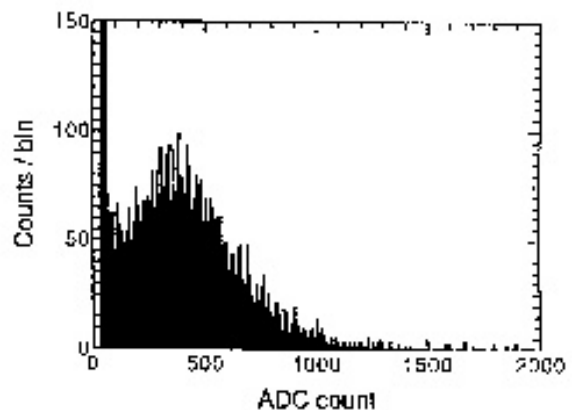


Figura 8.26: Pico de um fotoelectrão de um PMT.

A espessura do fotocátodo é um parâmetro importante, que deve ser monitorada, de forma a garantir a resposta adequada em função dos fótons absorvidos. Se o fotocátodo for demasiado espesso, mais fótons serão absorvidos mas menos electrões serão emitidos da sua superfície posterior. Mas, se o PMT for demasiado fino, menos fótons serão absorvidos.

Os electrões emitidos pelo fotocátodo são acelerados em direcção à cadeia de dinodos, que pode conter até 14 elementos.

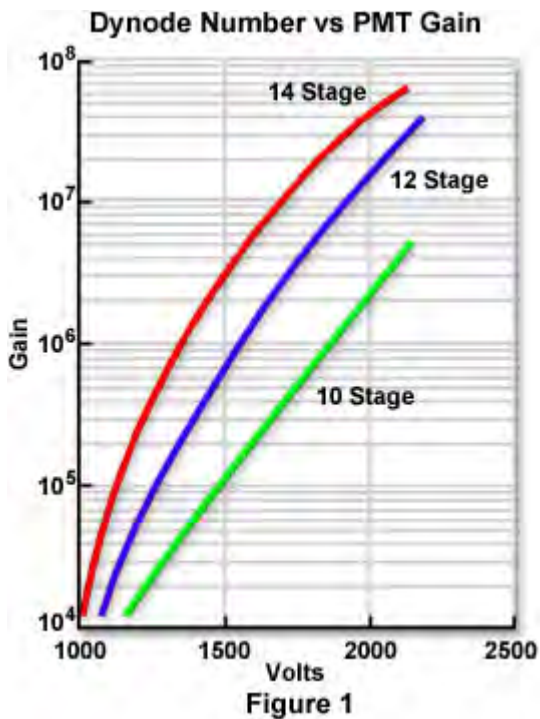


Figura 8. 27- Ganho do PMT em função da tensão de aceleração, tendo como parâmetro o número de dinodos do PMT.

O PMT costuma também ter eléctrodos de focagem, de forma a garantir que os foto-electrões emitidos próximos das bordas do fotocátodo sejam "colectados" pelo primeiro dinodo. Após colidirem com o primeiro dinodo os foto-electrões promoverão a libertação de mais electrões (dois por cada impacto), que serão de novo acelerados em direcção ao próximo dinodo e assim sucessivamente. A composição da superfície dos dinodos e a sua geometria determinam a sua capacidade para servirem como multiplicadores de electrões. Ganhos de electrões da ordem dos 10^7 são possíveis de se obterem usando 12 a 14 dinodos. Os PMT produzem a sinal, mesmo na ausência de luz, devido à corrente no escuro proveniente da emissão térmica dos electrões do fotocátodo, correntes de fuga entre dinodos e outro ruído electrónico

8.8.2 Transdutor fotocondutivo

O transdutor fotocondutivo não é mais do que uma resistência feita de material do tipo semiconductor cujo valor é dependente da intensidade luminosa que sobre ele incide. Isto é, quanto maior for a intensidade do feixe luminoso incidente, menor será o seu valor.

Os seus valores variam de várias ordens de grandeza, apresentando normalmente uma resistência elevada no escuro (quase circuito aberto) a uma baixa resistência, sob condições de forte iluminação (quase curto circuito).

O tipo de semiconductor a utilizar é função do comprimento de onda da luz a utilizar. Para utilizações no visível ou do infravermelho próximo, utiliza-se o silício cristalino ou amorfo. Nestes casos, para baixos níveis de iluminação, existe uma relação linear entre o foto-corrente e o nível

da intensidade luminosa utilizada. Quando se utilizam intensidades luminosas muito elevadas, a relação deixa de ser linear. No extremo, a foto-corrente varia com a raiz quadrada da intensidade luminosa utilizada.

Este tipo de dispositivos é utilizado como sensor óptico, nomeadamente em sistemas de abertura e fecho de circuitos, por interrupção de um feixe de luz, tal como acontece com a abertura e fecho de muitas portas, de forma automática.

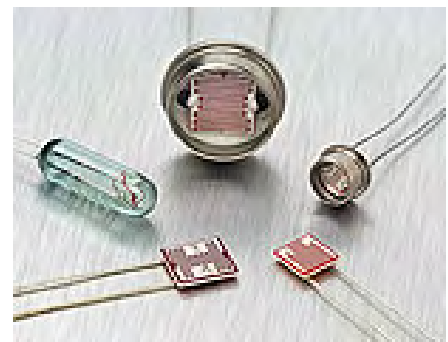
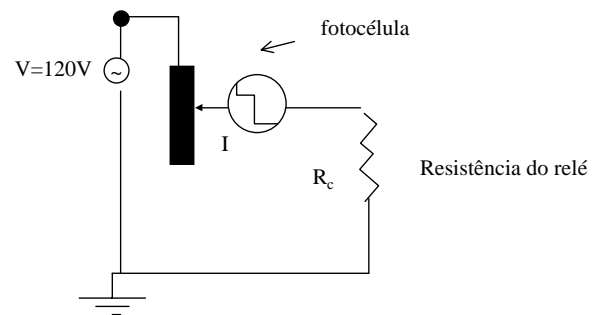


Figura 8.28: Exemplos de sensores fotocondutivos

Problema 8.11- O relé do circuito que se mostra é controlado por uma fotocélula tal que no escuro o relé desligue e para uma iluminação de 400 lm/m^2 o circuito debite uma corrente de 30 mA , para uma tensão de entrada de 30 V .



Nestas condições, determine qual o valor da resistência em série a adicionar ao circuito, bem como a corrente que passa por este, quando a fotocélula não é iluminada.

(Nota: a resistência da célula é de $1 \text{ K}\Omega$ para um nível de iluminação de 400 lm/m^2 , enquanto que no escuro vale $200 \text{ K}\Omega$).

Resolução

$$I = 30 / (R_1 + R_{\text{fotocélula}}), \text{ portanto, } R_1 = 30 / 10^{-2} - 10^3 = 2 \text{ K}\Omega.$$

Para se determinar a corrente no escuro, tem-se: $I = 30 / (2000 + 200000) = 0,15 \text{ mA}$.

8.8.3 Fotodíodo

O fotodíodo é um dispositivo semicondutor de junção (pn, para dispositivos cristalinos ou pin para dispositivos de filme fino amorfos ou nanocristalinos), sensível à radiação luminosa, que podem funcionar no modo fotovoltaico (sem polarização) ou no modo fotocondutivo (polarizado inversamente). No modo fotovoltaico, o fotodíodo funciona sem qualquer tipo de polarização. No modo fotocondutivo a junção é polarizada inversamente, actuando como uma fonte de corrente controlada pela luz. A saída de corrente do dispositivo é proporcional à iluminação incidente, sendo relativamente independente da tensão aplicada.

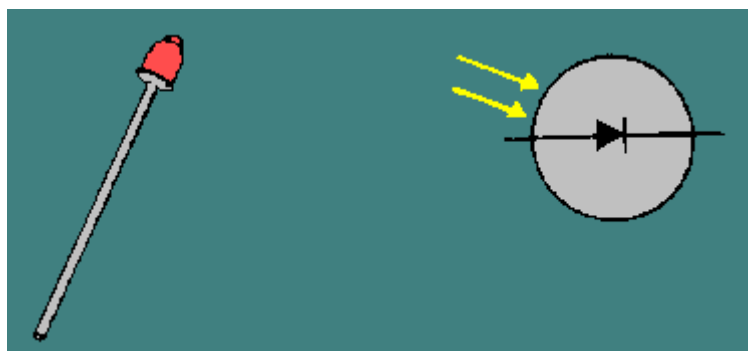


Figura 8.29: Fotodíodo

Os componentes fotoelétricos são utilizados em electrónica, são utilizados como acopladores ópticos, de forma a garantir isolamento eléctrico entre componentes. O acoplador óptico é constituído por um díodo emissor de luz (LED) e um fotodíodo, ligado a um meio condutor. Neste caso, o LED é polarizado directamente, enquanto o fotodíodo é polarizado inversamente. Neste caso, o aumento de corrente no LED faz com que a sua intensidade luminosa aumente e portanto, que a resistência do fotocondutor diminua e portanto, que a corrente que o

atravessa aumente. Deste modo, é possível controlar o circuito que contém o fotodíodo, do qual o LED se encontra electricamente isolado.

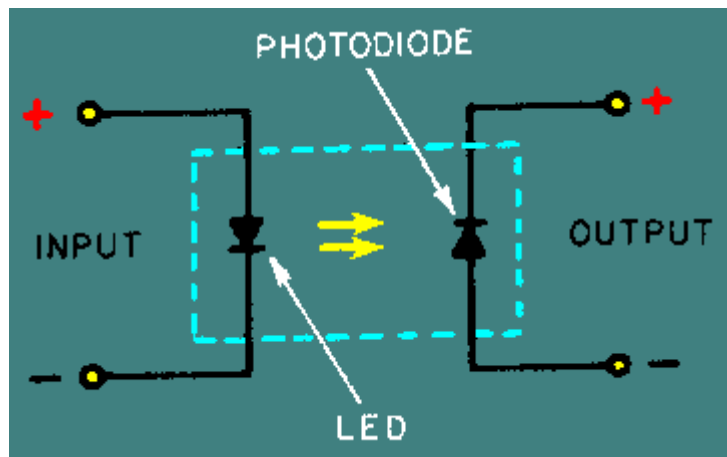


Figura 8.30: Acoplador óptico

O fotodíodo é um dispositivo de dois terminais, designados de cátodo (terminal negativo) e o (ânodo), em que o modo de polarização é idêntico ao de uma junção diodo normal. Isto é, em polarização directa o ânodo está ligado ao terminal positivo e em polarização inversa, o ânodo está ligado ao terminal negativo da fonte de excitação.

A medida de sensibilidade de um fotodíodo, designa-se de **responsividade**, que não é mais do que a razão entre a corrente fornecida pelo fotodíodo e a energia radiante (em Watts) incidente no fotodíodo. As unidades da responsividade são A/W. Na figura que se segue mostramos a responsividade típica de um fotodíodo, com e sem polarização inversa.

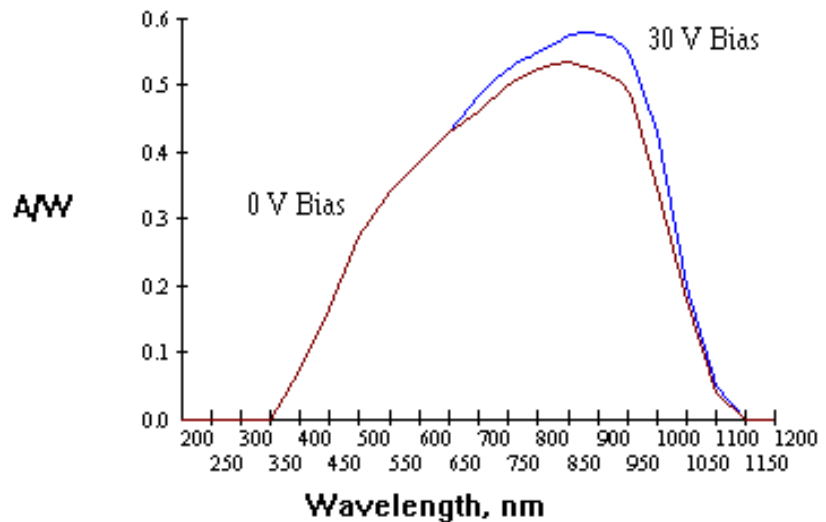


Figura 8.31: responsividade sem e com polarização de um fotodíodo de silício cristalino

O comprimento da radiação é de primordial importância, pois em função do material constituinte, a radiação poderá ser absorvida ou transmitida. Por exemplo, no caso do silício cristalino o material torna-se transparente para comprimentos de onda superiores a 1100 nm. Mas, por outro lado, a luz ultravioleta é absorvida nos primeiros 100 nm de espessura do silício.

Em termos de linearidade, a saída em corrente do fotodíodo quando inversamente polarizado é extremamente **linear** com a intensidade da iluminação usada, como se mostra na figura que se segue.

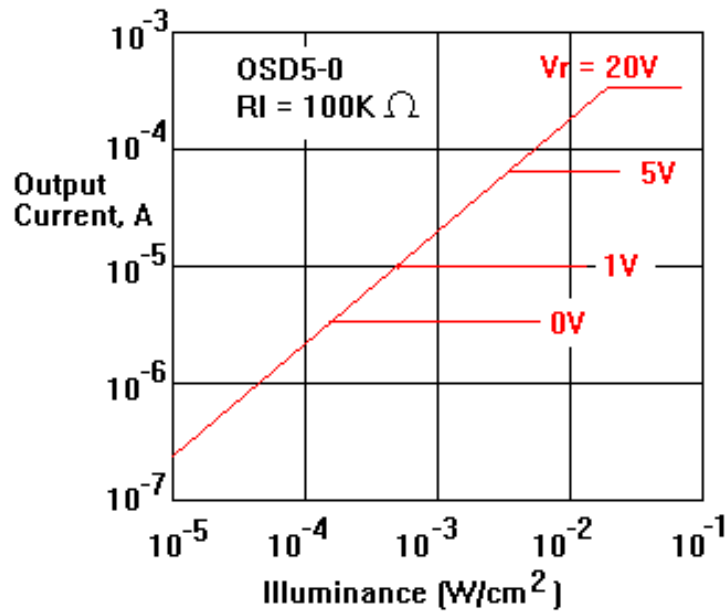


Figura 8.32: Variação da corrente de saída de um fotodíodo em função da intensidade luminosa usada, para diferentes valores de polarização inversa.

A capacidade de um fotodíodo converter energia luminosa em energia eléctrica é expressa através da sua **eficiência quântica** (QE):

$$QE(\%) = \frac{1,24 \times 10^5}{\lambda(\text{nm})} R(\text{A/W}) \quad 8.19$$

onde R(A/W) é a responsividade do fotodíodo e as outras letras têm o seu significado habitual.

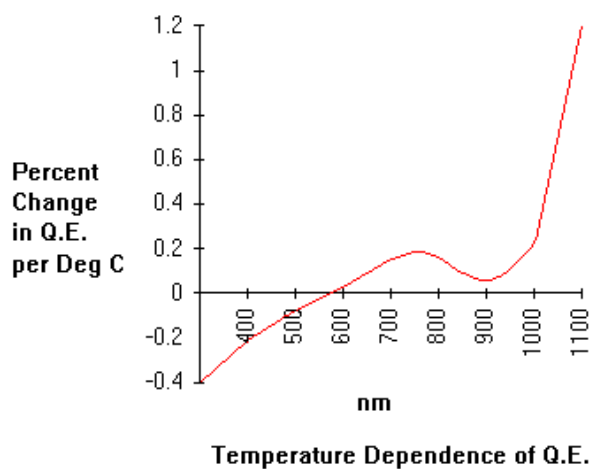


Figura 8.33: Variação incremental percentual de QE com a temperatura.

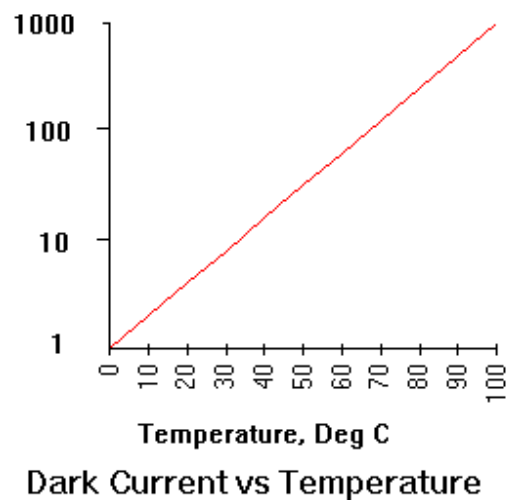


Figura 8.34: Variação da corrente no escuro de um fotodíodo com a temperatura.

A variação da temperatura de um fotodíodo provoca o deslocamento do espectro de QE e a sua diminuição na região do ultravioleta, enquanto que aumenta, na região próxima do infravermelho. Para além disto, a temperatura faz com que a corrente no escuro aumente e por conseguinte, que a responsividade diminua.

8.8.3.1 Circuito eléctrico equivalente e modos de funcionamento

O fotodíodo pode ser representado pelo circuito equivalente que se segue:

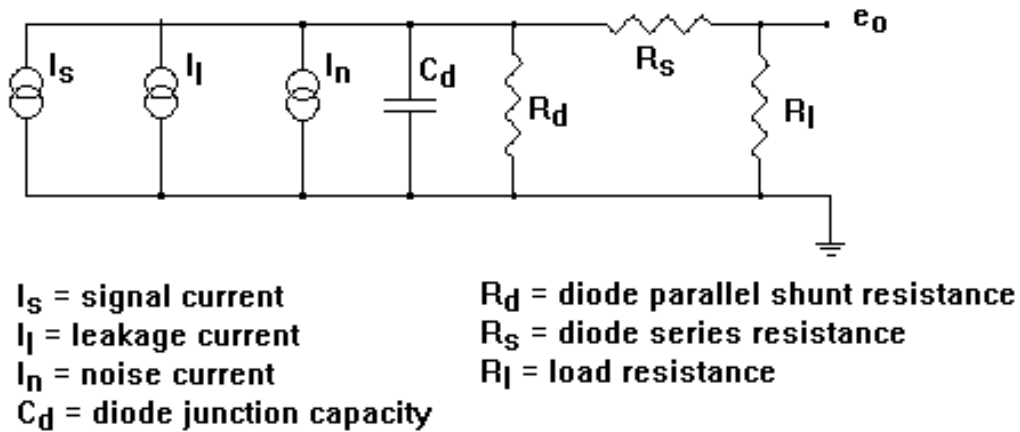


Figura 8. 35: Circuito eléctrico equivalente de um fotodíodo.

$$\text{Onde } e_0 = (I_s + I_l + I_n) \times \frac{R_l R_d}{R_l + R_d + R_s}$$

Fundamentalmente o fotodíodo é um gerador de corrente controlado pela tensão de polarização. Nestes dispositivos, a resistência shunt (paralelo) é normalmente elevada (da ordem dos $M\Omega$), enquanto que a resistência série é muito baixa(da ordem dos ohms). O efeito da resistência de carga na característica tensão do dispositivo é a que a seguir se mostra.

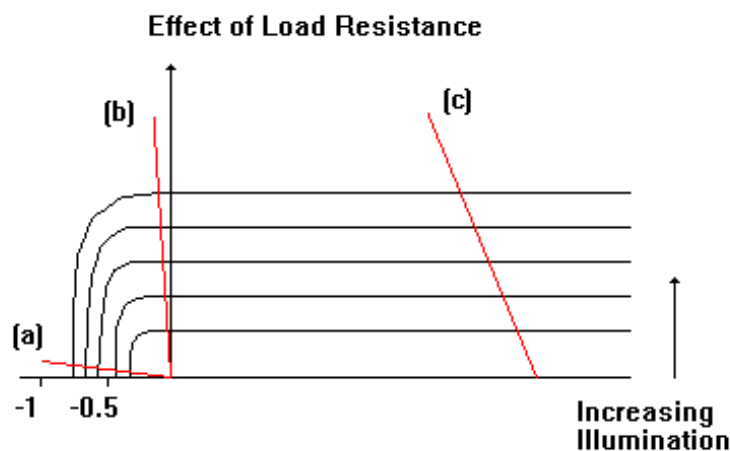


Figura 8.36: Curva I-V de um fotodíodo, mostrando o efeito da resistência de carga (linha a vermelho)

Quando o dispositivo funciona na **região a** (ver figura 8.36), $R_i \gg R_d$, diz-se que o mesmo está a funcionar no modo fotovoltaico. Neste caso o valor de R_d decai exponencialmente à medida que a intensidade de iluminação aumenta. A maior desvantagem deste modo de funcionamento é que a intensidade doo sinal depende da temperatura do dispositivo.

Basic Photovoltaic Circuit

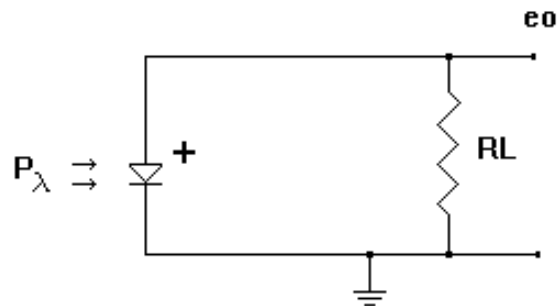


Figura 8. 37: Circuito fotovoltaico básico

Na **região b** o fotodíodo funciona sem polarização, $R_i \ll R_d$. Neste caso, R_i é fixo e a tensão aos terminais da carga varia linearmente com a corrente e portanto, com a intensidade da luz usada.

Uma das formas que existe de se conseguir uma resistência de carga baixa e uma tensão de saída amplificada, é por aplicação do sinal da foto-corrente do fotodíodo a um amplificador diferencial, com uma massa virtual, como se mostra na figura que se segue. Neste caso, o circuito tem uma resposta linear e baixo ruído, devido à eliminação de praticamente todas as correntes de fuga.

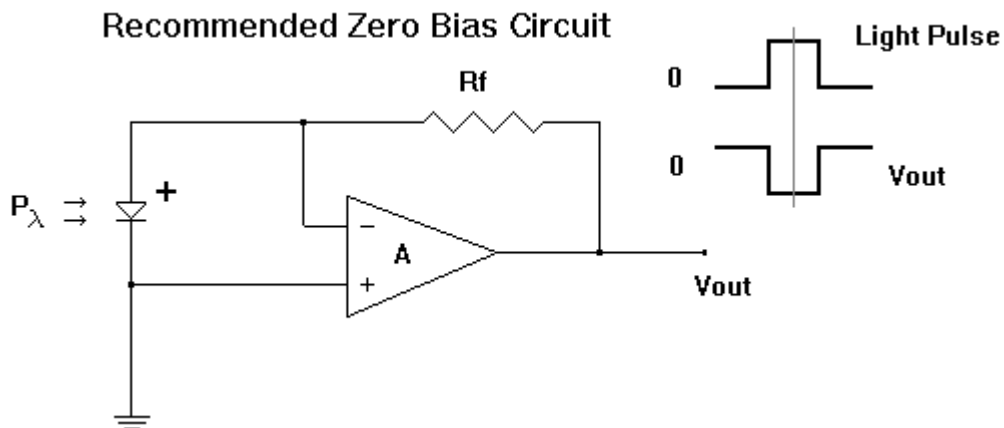


Figura 8.38: circuito de polarização nula

Na **região c**, o fotodíodo está no modo fotocondutivo, em que a foto-corrente produz uma tensão aos terminais da resistência de carga, ligada em paralelo com a resistência shunt. Uma vez que em polarização inversa R_d se mantém praticamente constante e de valor elevado, pode-se recorrer ao uso de R_i elevados e obter-se ainda uma resposta linear do dispositivo, em função da intensidade luminosa usada. Este tipo de circuito utiliza-se quando se pretendem tempos de resposta curtos. A principal desvantagem deste modo de funcionamento é o

aumento da corrente de fuga devido à tensão de polarização. Tal faz com que o ruído seja elevado, quando comparado com o ruído obtido nos outros circuitos já descritos.

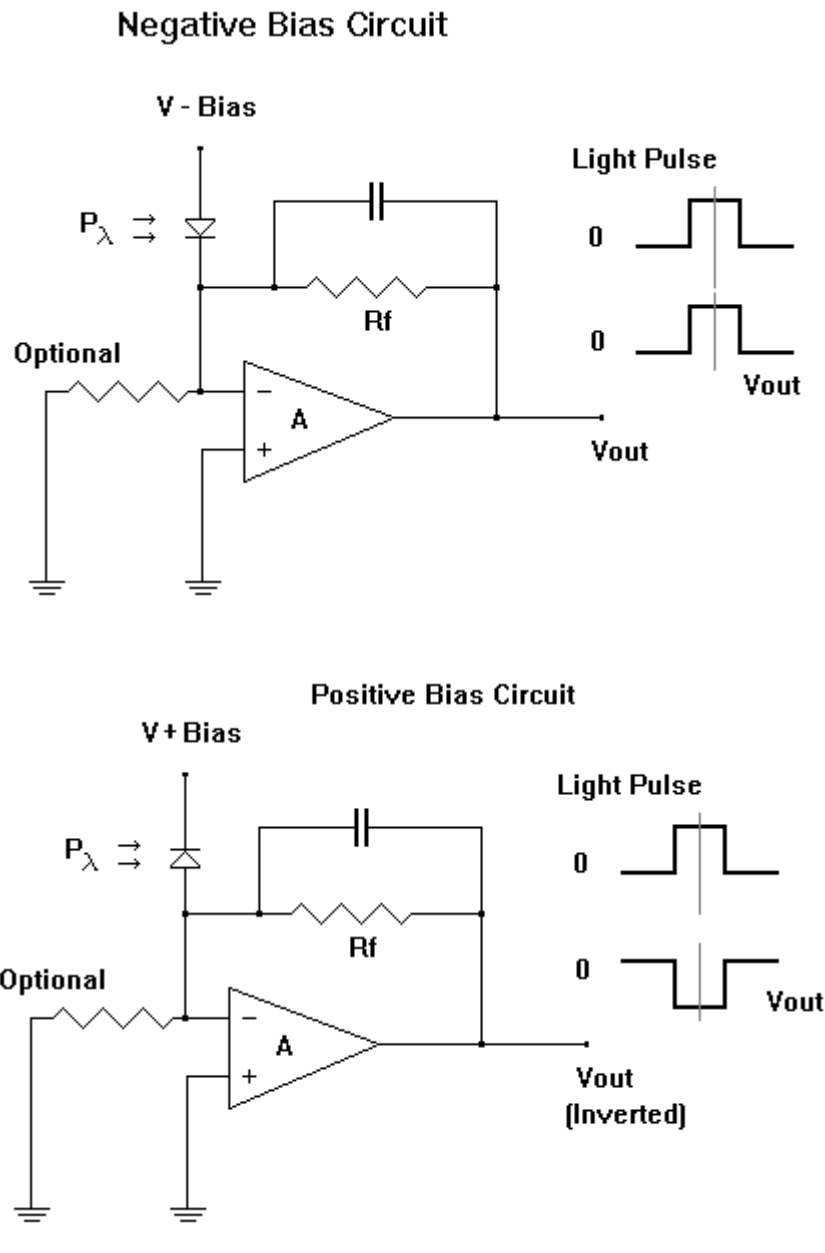


Figura 8. 39 Circuitos de polarização de um fotodíodo: (a) polarização negativa; (b) polarização positiva.

8.8.4 Fototransísttor

Um segundo dispositivo optoelectrónico que conduz corrente quando exposto à luz é o fototransísttor. Um fototransísttor é muito mais sensível e produz muito mais corrente, quando estimulado por um dado feixe de luz que um fotodíodo.

Na figura que se segue mostramos um fototransísttor NPN em que no circuito de base, a junção é um fotodíodo. A luz ao incidir na base deste dispositivo faz com que a corrente de base

varie, e portanto, que a corrente no colector, amplificada, aumente. Os fototransistores podem também ser do tipo PNP.

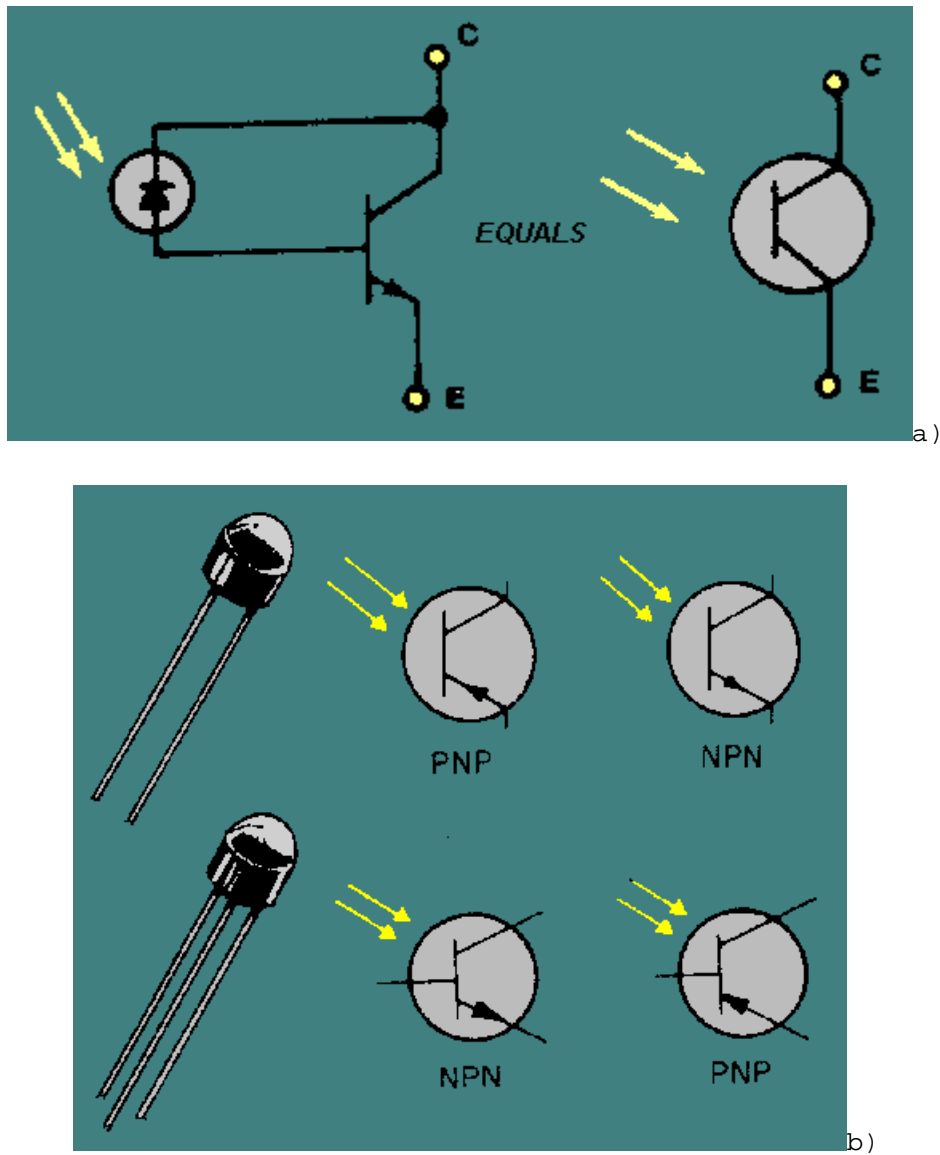
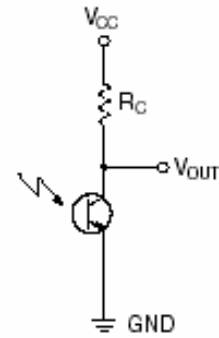


Figura 8. 40(a) Ilustração esquemática do modo de funcionamento de um fototransistor NPN; (b) exemplos de diferentes fototransistores NPN e PNP de dois e três terminais.

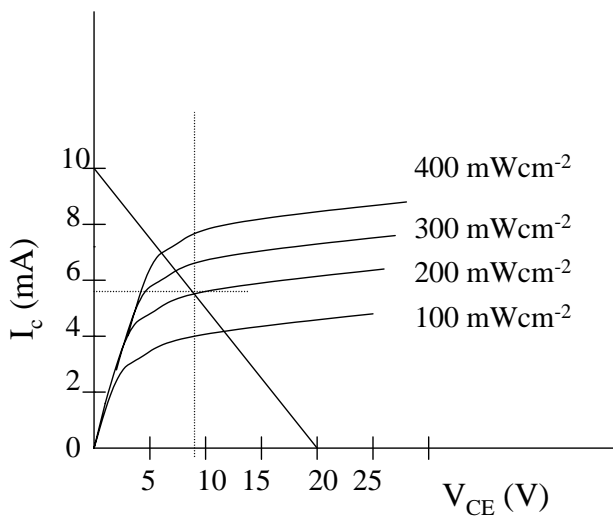
Os fototransistores podem ser de dois ou três terminais. Nos foto-díodos de dois terminais, a intensidade da luz no fotodíodo, só por si determina a quantidade de condução eléctrica (corrente). No de 3 terminais, é possível aplicar uma dada tensão de polarização à base, de forma a otimizar o nível de condução (compensação da corrente devida à luz ambiente).

Problema 8.12- Considere um dado fototransistor que apresenta as curvas características que abaixo se indicam, quando sujeito a diferentes níveis de iluminação. Sabendo que a tensão de alimentação é de 20 V e que a resistência de carga vale 2 K Ω , determine o valor da tensão de saída e da respectiva corrente quando o nível de iluminação é de 200 mWcm⁻².



Resolução

A análise da malha de saída deste circuito conduz-nos à relação: $V_{CE} = V_{cc} - IR_L$, onde V_{cc} é a tensão de polarização e R_L a resistência de carga. Nestas condições tem-se que a corrente de curto-circuito ($V_{CE}=0$ V) é de 10 mA. Traçando-se agora a recta de carga que contém a corrente de curto circuito e a tensão em circuito aberto (V_{cc}), o ponto de intercepção com a curva parametrizada para 200 mWcm⁻², dá-nos o ponto quiescente pretendido. Neste caso, obtém-se $V_{CE}=9$ V e $I=5,6$ mA.



8.9 Transdutores Biológicos

Os transdutores biológicos são dispositivos que permitem converter um agente biologicamente activo num sinal celular ou vice versa. Os transdutores são, em regra geral, do tipo dos descritos na secção 8.8, mas agora adaptados ao reconhecimento de sinais, essencialmente electroquímicos. Os sensores bioquímicos mais típicos são os sensores de pressão de membrana; sensores piezoeléctricos e sensores de fluxo (micro canais).

Como exemplo de um biosensor temos o caso de um sensor térmico do tipo memória de forma, que pode ser utilizado no bombeamento de fluidos no corpo humano ou sensores ópticos, utilizados por exemplo em imagiologia ou na investigação do DNA.