

Sumário

Introdução	5
Radiação eletromagnética	6
Princípios básicos	6
Espectro eletromagnético	9
Luz	10
Intensidade de luz	11
Fotodetectores e sensores de temperatura	12
Fotodetectores	12
Responsividade	13
Resposta em frequência	14
Fotoresistores	15
Fotodiodo	18
Fototransistor	21
Termistores	24
Termistor PTC	24
Termistor NTC	25
Aplicações	25
Apêndice	28
Questionário	28
Bibliografia	29



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os últimos anos têm caracterizado uma penetração cada vez maior da eletrônica nos diversos ramos da atividade humana. Essa influência tem sido particularmente mais significativa na indústria e no lazer. Na área industrial a cada dia surgem novos instrumentos e aparelhos que permitem observar e controlar os processos de produção.

A aplicação da Eletrônica no meio industrial está intimamente ligada ao controle de variáveis não elétricas tais como temperatura, luz, pressão, umidade etc. Para que seja possível controlar essas grandezas através de circuitos eletrônicos, são necessários componentes que transformem as variações ou os valores dessas grandezas em variações elétricas correspondentes. Os componentes que possibilitam a realização desse tipo de conversão são em geral denominados de sensores.

Tendo em vista a abrangência do tema, este fascículo se restringirá ao tratamento dos princípios de operação e aplicações de alguns tipos de sensores, com o objetivo de permitir ao leitor uma avaliação inicial da importância dessa classe de dispositivos.



Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo semicondutor.
- Transistor bipolar: princípio de operação.
- Disparador Schmitt.

Radiação eletromagnética

PRINCÍPIOS BÁSICOS

Campos elétricos que variam no tempo induzem campos magnéticos que também variam no tempo, e vice-versa. Esses campos podem ser originados por exemplo, em um circuito elétrico alimentado por uma tensão *ac*.

O efeito de indução de um campo elétrico a partir de um campo magnético, e vice-versa, propaga-se rapidamente no espaço e define o que é largamente denominado de **radiação eletromagnética**. O campo elétrico e o campo magnético que compõem essa forma de energia, recebem conjuntamente a denominação de **campo eletromagnético**.

Uma vez emitida, a radiação eletromagnética pode influenciar um circuito remoto, conforme ilustrado na **Fig.1**. Da mesma forma que tensões e correntes induzem radiação eletromagnética, o inverso também é verdadeiro, permitindo assim que o circuito remoto seja alimentado, pela simples existência da radiação eletromagnética aí presente. Essa é uma forma possível de transmissão de informação, a partir de radiação eletromagnética, freqüentemente empregada nas telecomunicações.

Em síntese, uma tensão *ac*, além de produzir uma corrente *ac* no circuito, pode também servir como fonte de radiação eletromagnética que se propaga no espaço. Se, por exemplo, a tensão aplicada variar senoidalmente no tempo com freqüência *f*, a amplitude do campo eletromagnético gerada pelo circuito irá também variar senoidalmente no tempo, com a mesma freqüência *f*.

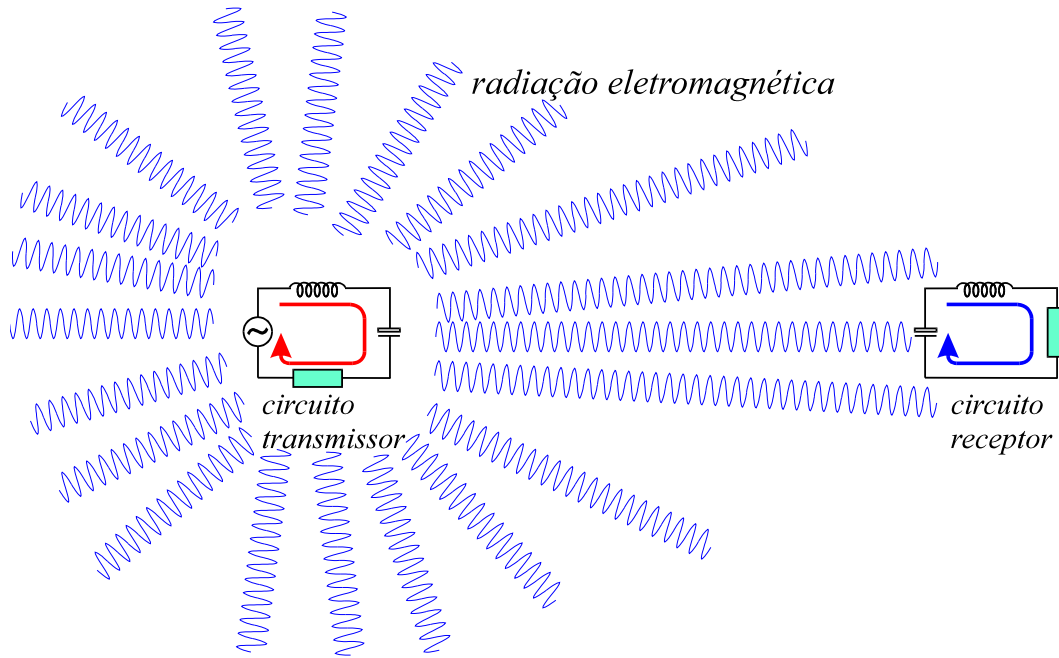


Fig.1 Radiação eletromagnética gerada em um circuito, influenciando um circuito remoto.

Dois aspectos importantes caracterizam o campo ou radiação eletromagnética:

- No ar, a velocidade de propagação **praticamente independe** da frequência, sendo dada pela velocidade da luz no vácuo

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m / seg}$$

- Se a variação no tempo for senoidal na frequência f , a amplitude da radiação eletromagnética também varia senoidalmente no espaço. O período λ associado a essa variação senoidal no espaço, denominado de **comprimento de onda**, pode ser obtido da relação

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

A **Fig.2** ilustra as dependências temporal e espacial das amplitudes de campos para frequências distintas. Para os gráficos aí ilustrados, a dependência com o tempo representa o que seria medido em um ponto fixo do espaço, ao passo que, a dependência espacial da amplitude representa a forma como o campo se distribui em dada direção do espaço, em dado instante de tempo.

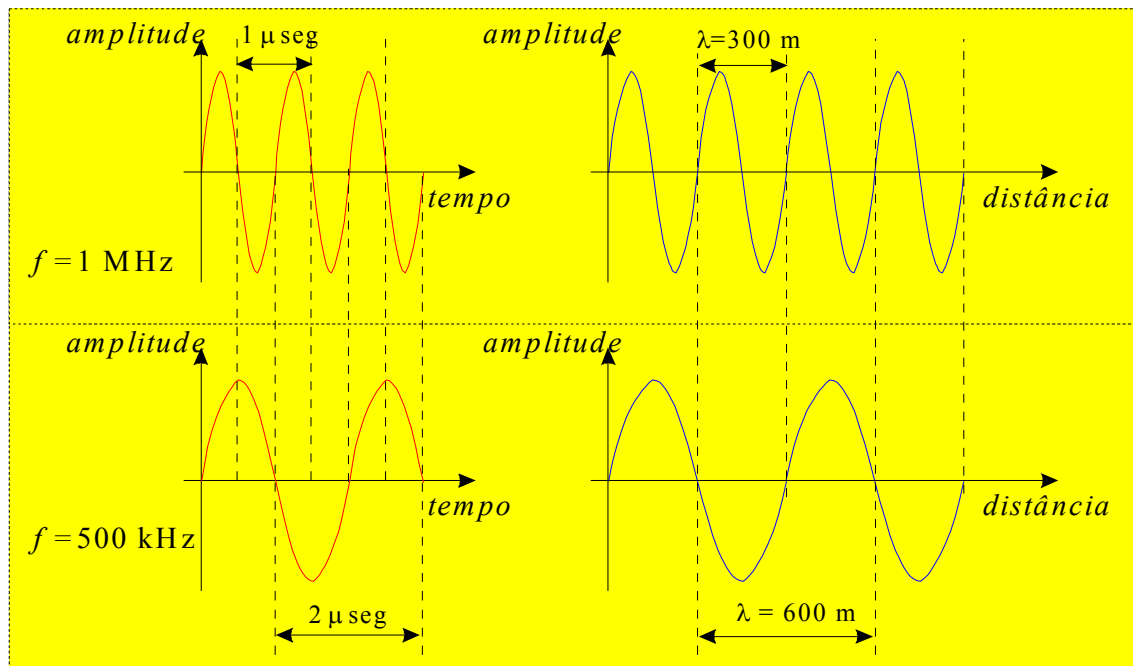


Fig.2 Dependências temporal e espacial das amplitudes de campo para frequências distintas.

Por exemplo, para $f = 60 \text{ Hz}$ a amplitude do campo eletromagnético tem um comprimento de onda dado por

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{60} = 5.000.000 \text{ m} = 5.000 \text{ km}$$

Esse comprimento de onda é muito extenso, e a curtas distâncias a variação espacial da amplitude é praticamente inexistente. Por outro lado, para $f = 60 \text{ MHz}$, o comprimento de onda diminui para

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{60 \times 10^6} = 5 \text{ m}$$

que evidencia uma variação de amplitude significativa a curtas distâncias.

Os gráficos apresentados na **Fig.2** servem para demonstrar a proporção inversa entre os parâmetros f e λ , imposta pela **Eq.(1)**.

Existem vários processos capazes de produzir radiação eletromagnética. O elemento comum a todos esses processos é pura e simplesmente **a carga elétrica**.



O elemento básico responsável pela emissão de radiação eletromagnética é a carga elétrica.

No exemplo do circuito *ac* tratado anteriormente, é necessária a presença das cargas elétricas associadas à corrente *ac* para produção de radiação eletromagnética. Ou seja, radiação eletromagnética será produzida sempre que cargas elétricas estiverem em jogo. Isso inclui processos associados às oscilações de corrente em um circuito, a colisões de elétrons em um anteparo, à recombinação de elétrons e lacunas após passagem através da barreira de potencial de uma junção *pn*, ou mesmo à transição de elétrons entre níveis de energia de átomos ou moléculas. Enfim, cada um desses processos pode gerar radiação eletromagnética de determinada frequência.

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A **Fig.3** mostra uma larga faixa de frequências que compõe o **espectro eletromagnético**. Determinadas bandas de frequência dentro do espectro recebem denominações específicas, como por exemplo:

- A faixa de frequências de rádio, que comporta todas as frequências $f \leq 1 \text{ GHz} = 1 \times 10^9 \text{ Hz}$ e que inclui as ondas longas, médias e curtas e as bandas VHF (*very high frequency*) e UHF (*ultra high frequency*).
- Frequências de microondas na região $1 \text{ GHz} < f < 30 \text{ GHz}$, ou correspondentemente, $30 \text{ cm} > \lambda > 1 \text{ cm}$.
- Ondas milimétricas na região $30 \text{ GHz} < f < 1.000 \text{ GHz}$ que compreende a região de comprimentos de onda $1 \text{ cm} > \lambda > 0,3 \text{ mm} = 300 \mu\text{m}$.

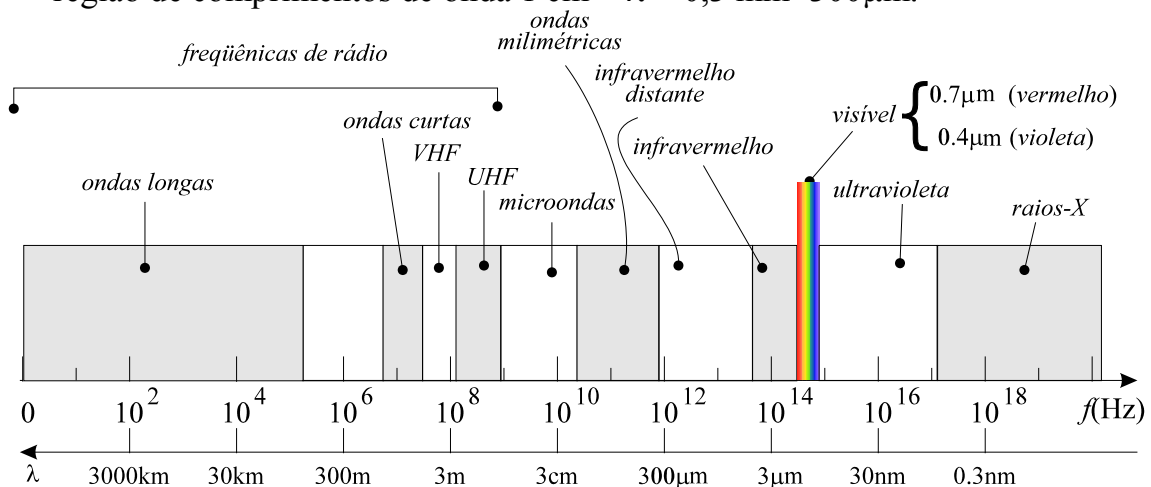


Fig.3 Espectro eletromagnético.

LUZ

A partir do limite superior da faixa de ondas milimétricas, a frequência da radiação eletromagnética se torna muito alta, sendo mais comum o emprego do comprimento de onda para denominar o tipo de radiação. Em particular, existe um estreita região do espectro eletromagnético, mostrado na **Fig.3**, onde a radiação se torna visível ao olho humano.

Essa região visível está situada na faixa de comprimento de onda

$$780 \text{ nm} > \lambda > 380 \text{ nm}$$

e está ilustrada em mais detalhe na **Fig.4**. Como pode ser aí observado, a variação de comprimento de onda dentro dessa faixa corresponde a uma variação contínua de cores desde o vermelho escuro, para $\lambda=780 \text{ nm}$, até o violeta, no comprimento de onda $\lambda=380 \text{ nm}$.

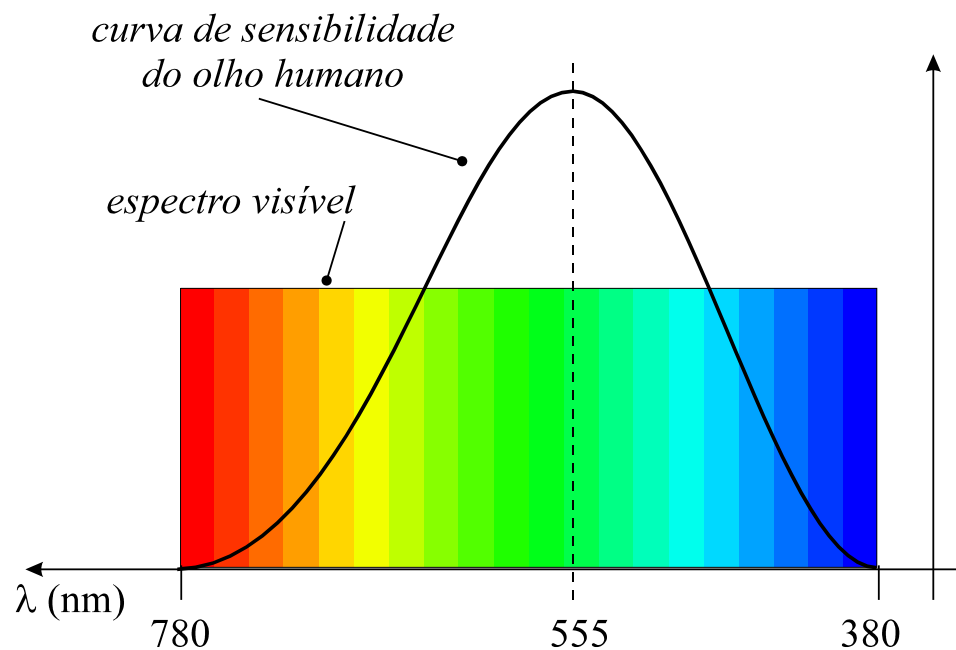


Fig.4 Espectro visível e curva de sensibilidade do olho humano.

Na **Fig.4**, está também representada a curva de sensibilidade do olho humano, que atinge seu valor máximo no comprimento de onda $\lambda = 555 \text{ nm}$, correspondente à porção verde do espectro. Fora dos limites do espectro mostrado na **Fig.4**, a radiação torna-se invisível ao olho humano, devido aos baixos níveis da curva de sensibilidade para $\lambda > 780 \text{ nm}$ e para $\lambda < 380 \text{ nm}$.

INTENSIDADE DE LUZ

Um parâmetro de importância que caracteriza a radiação visível é a sua **intensidade luminosa** ou **iluminamento**. O iluminamento é diretamente relacionado aos conceitos de claridade e escuridão, ou seja, um ambiente claro exibe maior grau de iluminamento do que um ambiente escuro. A unidade **lux** (**lx**) é freqüentemente utilizada para expressar esse parâmetro.

O **fluxo luminoso** ou **potência luminosa** é outro parâmetro diretamente relacionado ao conceito de iluminação. A **Fig.5** ilustra a iluminação de uma superfície por uma fonte de luz, tal como uma lâmpada. Uma pequena porção de área A da superfície está submetida a uma intensidade luminosa $ilum$. Define-se o fluxo luminoso Φ incidente sobre a área A pela relação

$$\Phi = ilum \times A \quad (3)$$

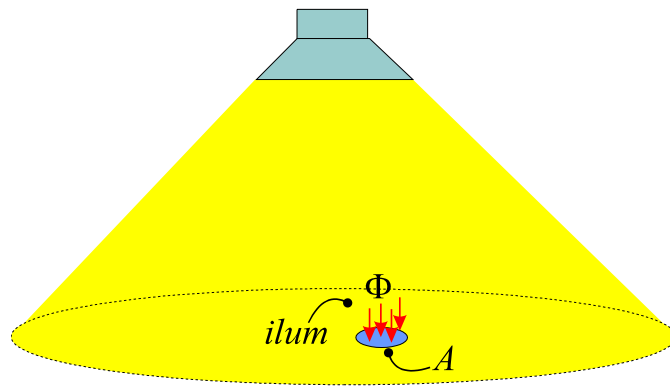


Fig.5 Superfície sob iluminação e parâmetros utilizados na definição do fluxo luminoso.

Com o iluminamento medido em lx e a área A medida em m^2 , a potência luminosa pode ser expressa em unidades de $(lx \times m^2)$. Esse produto de unidades define o **lúmen (lm)**, ou seja,

$$\boxed{1 \text{ lm} = 1 \text{ lx} \cdot m^2}$$

Por exemplo, se $A = 1 \text{ cm}^2$ e $ilum = 1.000 \text{ lx}$, o fluxo luminoso, obtido da **Eq.(3)** vale

$$\Phi = (1.000 \text{ lx}) \times (0,01 \text{ m})^2 = 1.000 \times 0,0001 \text{ lx} \cdot m^2$$

$$\boxed{\Rightarrow \Phi = 0,1 \text{ lm}}$$

Fotodetectores e sensores de temperatura

O termo sensor é geralmente utilizado para designar um dispositivo capaz de transformar variações de uma determinada grandeza física em variações correspondentes de uma grandeza elétrica. Muitas propriedades físicas dos materiais são utilizadas na construção de sensores dedicados a uma larga gama de aplicações, tais como:

- Sensores para detecção e medição de aceleração, ou acelerômetros.
- Sensores de viscosidade de líquidos.
- Sensores de pressão.
- Sensores de umidade.
- Sensores para detecção e medição de luz, ou fotodetectores.
- Termistores, para medição de temperatura.

Devido à abrangência do tema, e ao importante papel desempenhado pelos fotodetectores e termistores na área da Eletrônica, as seções seguintes se limitam à análise das propriedades dessas duas classes de dispositivos.

FOTODETECTORES

Um dispositivo fotosensível ou **fotodetector**, é aquele que produz uma corrente elétrica quando exposto à radiação na região do espectro eletromagnético compreendida entre as porções do infravermelho próximo e ultravioleta. Esses dispositivos são geralmente fabricados com materiais semicondutores, cuja condutividade é alterada sob a ação de um fluxo luminoso.

Fotodetectores são utilizados em várias aplicações, tais como:

- **Detecção de luz:** sensores de presença em sistemas de alarme, contagem de objetos em processos industriais etc.
- **Medição do nível de iluminamento:** fotômetros em processos fotográficos.
- **Caracterização da variação de iluminamento:** sistemas de controle automático de iluminação em rodovias, sensores de proximidade de câmaras fotográficas de focalização automática etc.

A caracterização dessa classe de dispositivos requer a especificação de suas características elétricas e ópticas.

Duas características de importância associadas aos fotodetectores são:

- Responsividade.
- Resposta em frequência.

RESPONSIVIDADE

Uma corrente elétrica é produzida pelo fotodetector sob iluminação. A relação entre a corrente gerada I e o fluxo luminoso Φ detectado pelo dispositivo define a **responsividade** r do fotodetector, ou seja,

$$r = \frac{I}{P} \quad (2)$$

A corrente gerada pelo fotodetector, e portanto a responsividade do dispositivo, é dependente do comprimento de onda da luz nele incidente. Dessa forma, a corrente gerada em um fotodetector iluminado, por exemplo, por luz verde pode ser bem diferente daquela obtida para luz vermelha, mesmo que o fluxo luminoso incidente no fotodetector seja o mesmo em ambas as situações.

O folheto de especificações técnicas do fotodetector fornece uma **curva de sensibilidade espectral** que representa a variação relativa da responsividade do dispositivo com respeito ao comprimento de onda.

A **Fig.6** mostra a curva de sensibilidade espectral para um fotodetector fabricado com o semicondutor CdS (sulfeto de cádmio). Como pode ser aí observado, o dispositivo exibe máxima responsividade para $\lambda \approx 680$ nm, que corresponde à luz vermelha. Verifica-se também que a responsividade relativa

do dispositivo é inferior a 30% para $\lambda < 500$ nm (verde a azul) e para $\lambda > 820$ nm (infravermelho).

Em geral, admite-se como região ideal de funcionamento a faixa de comprimentos de onda na qual o dispositivo tem um mínimo de 70% de responsividade relativa. Para o caso da curva de sensibilidade espectral da **Fig.6** essa faixa estaria localizada na região $540\text{nm} < \lambda < 760\text{nm}$, cujos limites correspondem às cores verde e vermelho, respectivamente.

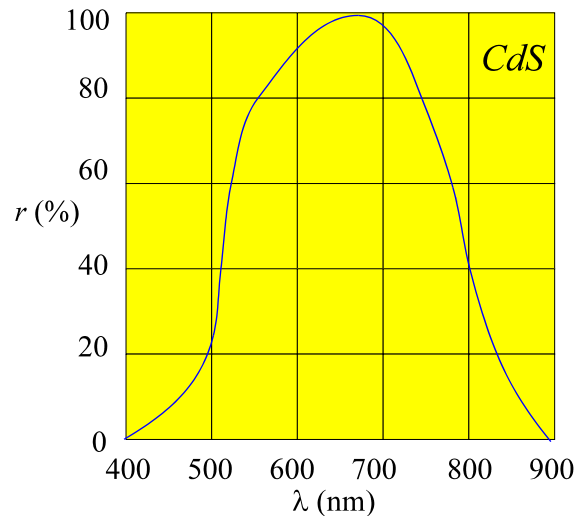


Fig.6 Curva de sensibilidade espectral para um fotodetector de *CdS*.

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Quando um fotodetector é submetido a variações de intensidade luminosa, a responsividade do dispositivo tende a decrescer com o aumento da taxa de variação da intensidade. Uma forma de caracterizar esse efeito é assumir que o fluxo luminoso incidente no dispositivo varie senoidalmente com o tempo a uma dada frequência f_0 , conforme ilustrado na **Fig.7**.

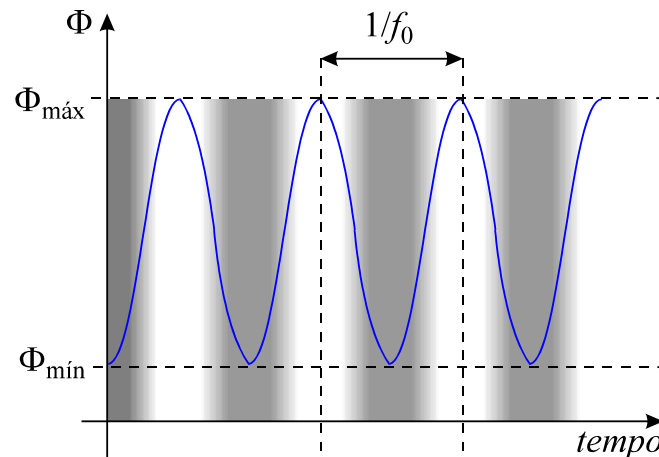


Fig.7 Fluxo luminoso que varia senoidalmente com o tempo na frequência f_0 .

O tipo de variação mostrado na **Fig.7** produziria uma alteração contínua de iluminação com o tempo, entre os limites de máxima claridade e máxima escuridão. Aumentar a frequência f_0 dessas variações equivale a aumentar a taxa de variação do fluxo luminoso sobre o fotodetector. Com isso a responsividade do dispositivo tende a diminuir.

A dependência com a frequência f_0 da responsividade de um fotodetector pode ser representada graficamente por uma **curva de resposta em frequência**, do tipo mostrado na **Fig.8**. Como pode ser aí observado, a responsividade é

máxima se o fluxo luminoso sobre o fotodetector for constante, ou seja, para $f_0=0$. Se as variações de intensidade luminosa forem muito rápidas, o que equivale a aumentar o valor do parâmetro f_0 , a responsividade do dispositivo tende a diminuir substancialmente, e eventualmente o dispositivo torna-se insensível à presença da luz nele incidente.

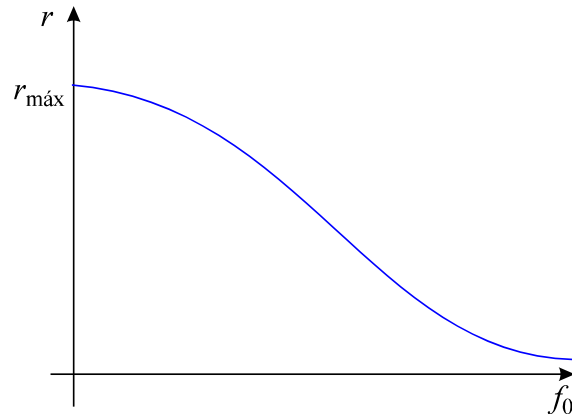


Fig.8 Curva de resposta em frequência de um fotodetector.

Para caracterizar a região de operação ideal do dispositivo, define-se a **freqüência de corte f_c** , como aquela a partir da qual a responsividade do fotodetector se torna inferior a 70% do valor máximo. A **Fig.9** mostra a localização da região de operação ideal no diagrama de resposta em freqüência de um fotodetector.

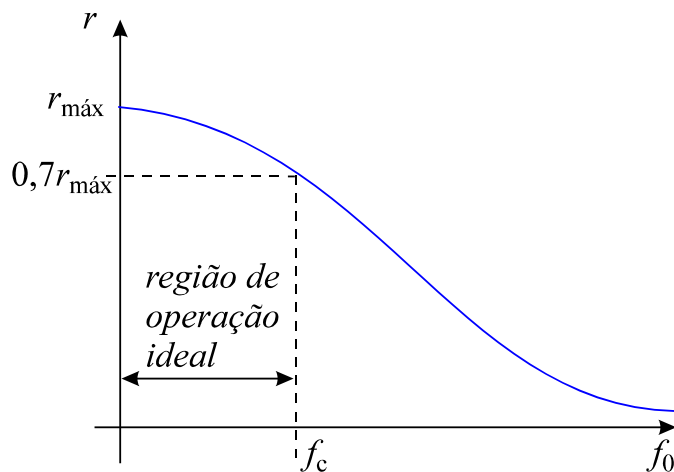


Fig.9 Região de operação ideal de um fotodetector no diagrama da resposta em frequência do dispositivo.

Nas seções seguintes, é feito exame mais detalhado de alguns tipos de fotodetectores de uso freqüente na Eletrônica.

FOTORESISTORES

O **fotoresistor** ou **LDR** (do inglês *light dependent resistor*) é um componente constituído à base de material semicondutor cuja condutividade é alterada sob iluminação. O LDR recebe também a denominação de **fotocélula** ou **célula fotoelétrica**.

Uma estrutura simplificada de um LDR é mostrada na **Fig.10**. Ela é feita com um semicondutor intrínseco, de alta resistência, com dois contatos metálicos. Os pontos de contato são submetidos a uma tensão constante V . A iluminação da superfície do semicondutor produz um acréscimo no número de portadores de carga, o que provoca um aumento de condutividade com conseqüente diminuição da resistência elétrica do dispositivo. Como a tensão aplicada é constante, a corrente que circula no circuito aumenta. Dessa forma, o LDR submetido a uma tensão constante responde a variações de fluxo luminoso com variações correspondentes da corrente que flui através de seus terminais.

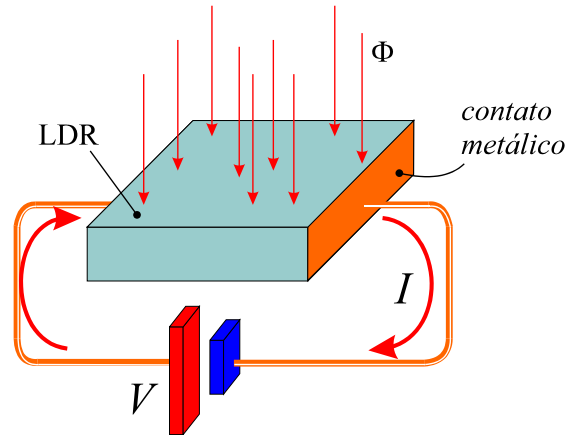


Fig.10 Estrutura simplificada de um LDR.

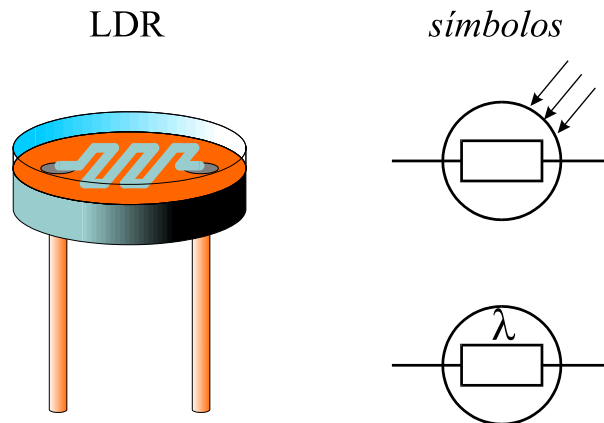


Fig.11 Aspecto típico de um LDR e símbolos correspondentes.

A **Fig.11** mostra o aspecto de um LDR e os símbolos comumente utilizados para sua representação em diagramas de circuito.

Os LDRs apresentam resistência elevada quando colocados no escuro, e sofrem redução de resistência à medida que a intensidade da luz incidente sobre o componente aumenta. A resistência do LDR varia não-linearmente de alguns megaohms em ambientes escuros a algumas centenas de ohms sob iluminação, conforme ilustrado na **Fig.12**.

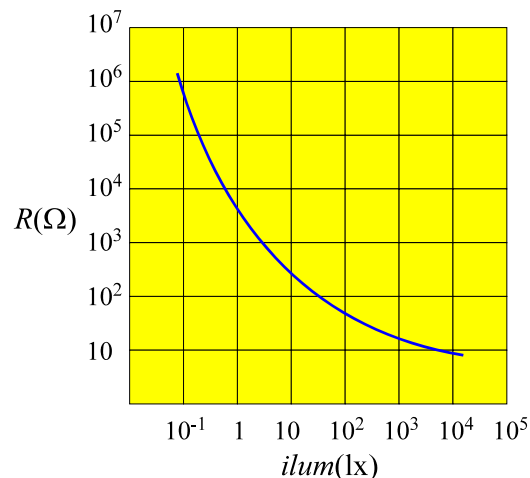


Fig.12 Variação típica da resistência elétrica de um LDR.



A resistência elétrica de um LDR varia não-linearmente com a intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

A **Fig.13** mostra as curvas de sensibilidade espectral dos fotoresistores de CdS e PbS . Como pode ser aí observado, o LDR de sulfeto de cádmio é apropriado para operação na região visível, ao passo que o LDR de sulfeto de chumbo é mais adequado para operação no infravermelho.

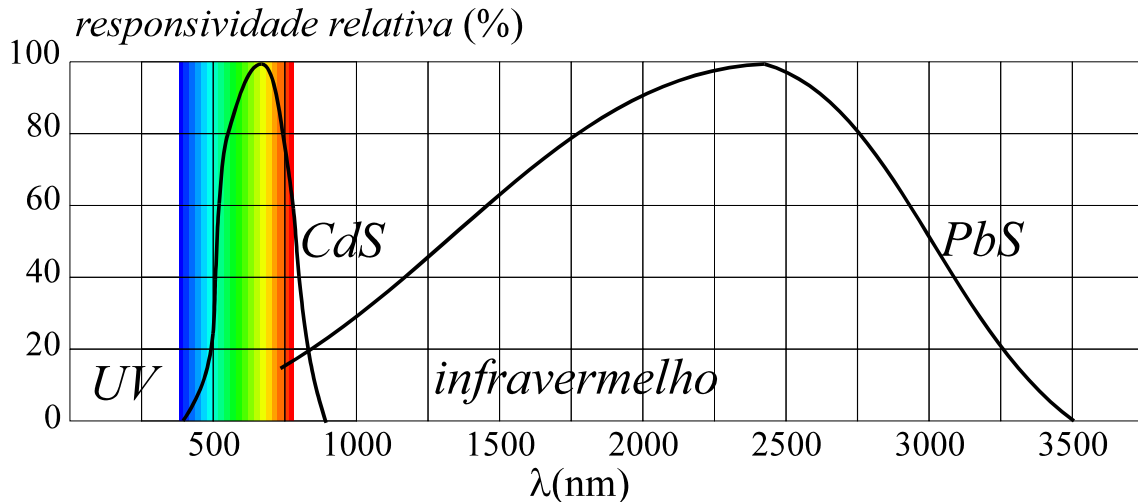


Fig.13 Curvas de sensibilidade espectral para LDRs de CdS e PbS .

O LDR pode ser configurado para produzir uma tensão dependente do fluxo luminoso nele incidente. Um circuito divisor de tensão, do tipo mostrado na **Fig.14**, permite esse tipo de operação.

O circuito mostrado na **Fig.14**, utilizado em conjunto com um disparador Schmitt, na forma ilustrada na **Fig.15**, forma um circuito de controle para o acionamento de uma lâmpada, que só é ligada quando a iluminação natural do ambiente diminui. Essa é uma aplicação tipicamente utilizada no controle de iluminação de rodovias, cujas lâmpadas são acesas no início da noite.

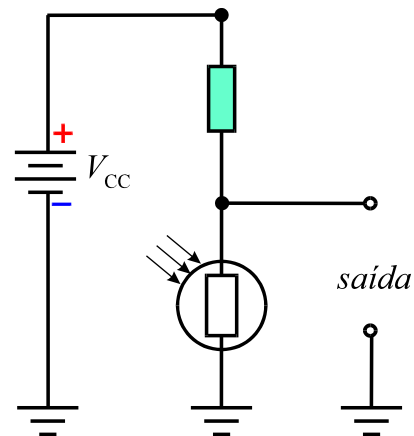


Fig.14 LDR configurado como parte de um divisor de tensão.

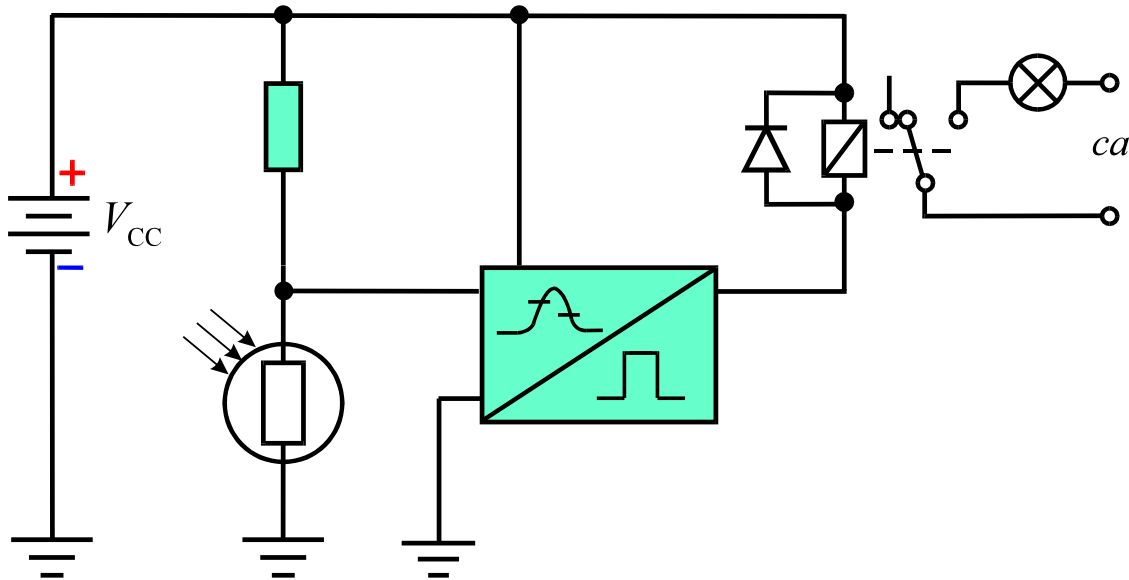


Fig.15 Circuito de acionamento de lâmpada controlado por um LDR.

O exame do circuito mostrado na **Fig.15** indica que, embora a tensão produzida pelo LDR varie vagarosamente à medida que o ambiente escurece ou clareia, o disparador Schmitt se encarrega de chavear corretamente o relé que aciona a lâmpada.

FOTODIODO

O fotodiodo é constituído por um diodo especialmente encapsulado de forma a permitir a exposição da junção *pn* do dispositivo à luz ambiente. O encapsulamento é geralmente metálico e possui uma lente que concentra a luz sobre a região ativa do dispositivo, conforme ilustrado na **Fig.16**.

A indicação do ânodo ou cátodo do dispositivo varia entre diferentes tipos de encapsulamento, e a identificação dos terminais pode ser feita através do catálogo do fabricante ou do teste com multímetro.

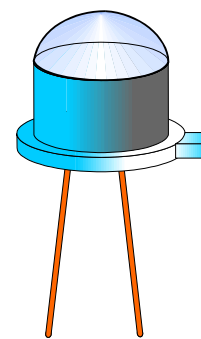


Fig.16 Fotodiodo típico.

O fotodiodo é configurado para operar com polarização inversa, conforme indicado na **Fig.17**. Na ausência de iluminação, flui uma pequena corrente de fuga através de seus terminais.

Quando o dispositivo é exposto à luz, pares elétron-lacuna são gerados na região de depleção da junção pn do dispositivo. Devido ao alto campo aí existente, os elétrons e lacunas são acelerados para fora da região de depleção, o que provoca um aumento na corrente inversa através do diodo. Nesse tipo de fotodetector, até um limite máximo de fluxo luminoso, a corrente inversa varia proporcionalmente com a intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

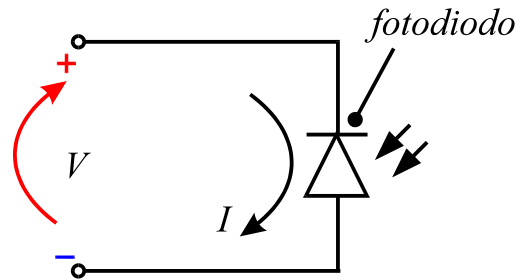


Fig.17 Forma de polarização de um fotodiodo.



Em um fotodiodo inversamente polarizado, a corrente inversa é proporcional à intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

A **Fig.18** mostra curvas características típicas de um fotodiodo na região de polarização inversa. Como pode ser aí observado, a localização de cada curva característica é dependente do nível de iluminação incidente sobre o dispositivo. A corrente de fuga do dispositivo, obtida na ausência de iluminação é muito pequena e recebe a denominação de **corrente de escuro**.

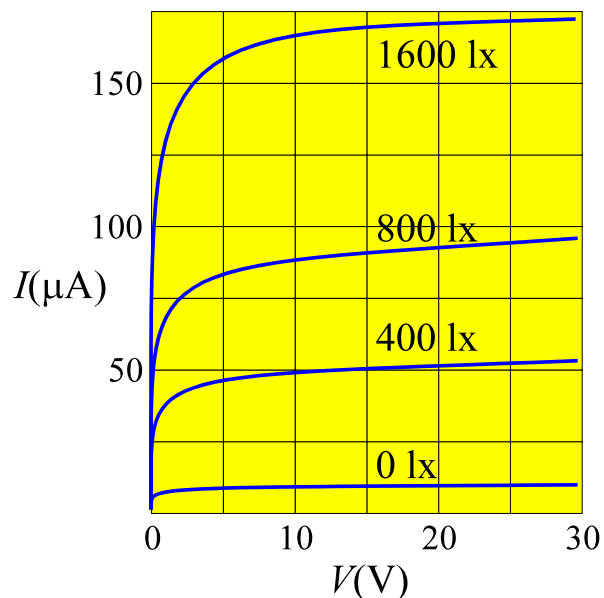


Fig.18 Curvas características de um fotodiodo.

A **Fig. 19a** mostra a forma de obtenção da corrente gerada no fotodiodo como função da intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo. Como pode ser aí observado, fixando-se o valor V_i da tensão de polarização inversa, obtém-se um conjunto de pontos sobre as curvas características, que ocorrem nas interseções dessas curvas com a reta $V=V_i$.

A representação gráfica da dependência da corrente com a intensidade luminosa está mostrada na **Fig.19b**, que mostra uma relação linear entre essas duas grandezas. É importante notar que essa relação linear é praticamente independente do valor da tensão inversa aplicada sobre o fotodiodo, uma vez que a corrente inversa varia muito pouco para um dado nível de iluminamento, como se pode observar a partir de um exame da **Fig.19a**.

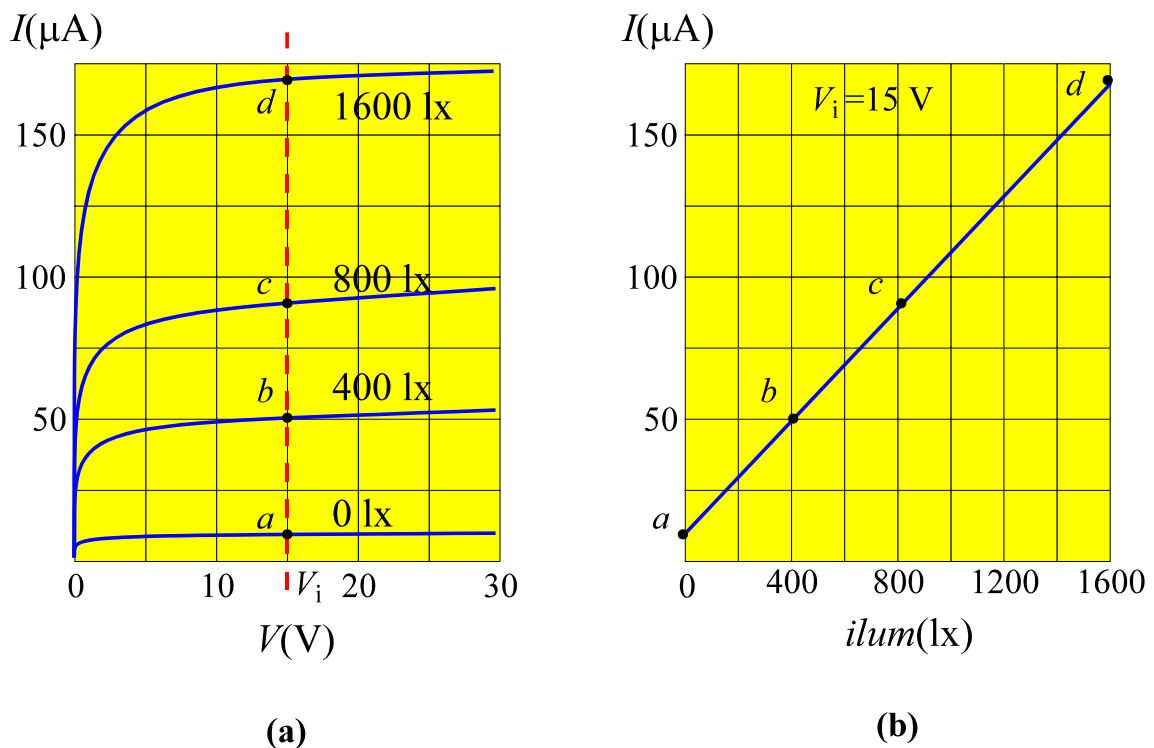


Fig.19 (a) Pontos de interseção da reta $V=V_i$ com as curvas características de um fotodiodo. **(b)** Gráfico da relação entre corrente gerada e intensidade luminosa para $V=V_i$.

Para o tipo de fotodiodo caracterizado pela curva mostrada na **Fig.19b** a corrente inversa se situa na faixa de microampères para os níveis de iluminamento aí indicados. Para que essa pequena variação de corrente possa dar origem a variações significantes de tensão, faz-se necessário utilizar o fotodiodo em série com resistores de resistência elevada, na faixa de dezenas a centenas de kilohms, conforme ilustrado na **Fig.20**.

Um aspecto importante a ser considerado é que a corrente de fuga também depende da temperatura do fotodiodo, o que pode causar erros na medição do nível de iluminação quando o dispositivo é utilizado em locais submetidos a variações significativas de temperatura.

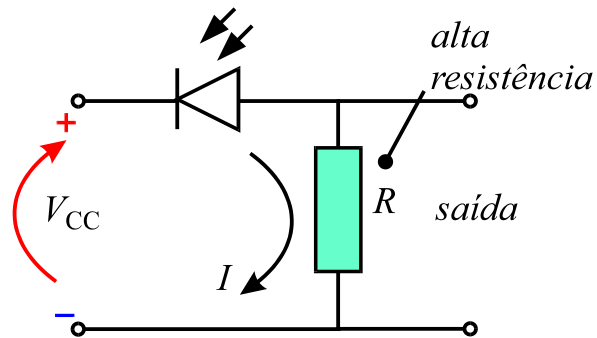


Fig.20 Circuito a fotodiodo cuja tensão de saída é proporcional ao iluminamento.

A **Fig.21** mostra a curva de sensibilidade espectral de um fotodiodo de germânio, que atinge sua máxima responsividade no comprimento de onda de 1.450 nm, situado no infravermelho próximo. Com o emprego de diversos tipos de materiais semicondutores, fotodiodos podem ser implementados para atingir máxima responsividade em diferentes regiões do espectro eletromagnético.

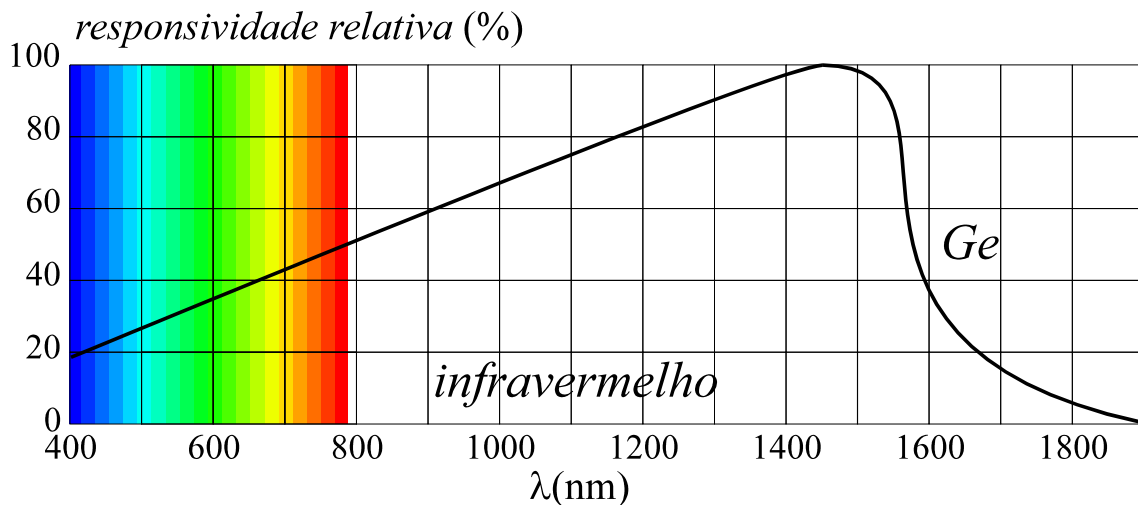


Fig.21 Curva de sensibilidade espectral de um fotodiodo de germânio.

FOTOTRANSISTOR

O fototransistor é constituído por um transistor especialmente encapsulado de forma a permitir a exposição da estrutura semicondutora do dispositivo à luz ambiente. A **Fig.22** ilustra um tipo comum de encapsulamento do fototransistor.

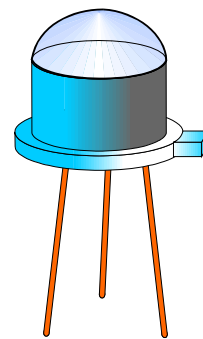


Fig.22 Fototransistor típico.

Conforme mostrado na Fig.23, a representação de circuito do fototransistor é semelhante àquela do transistor convencional, com exceção das setas indicativas da sensibilidade do dispositivo à luz nele incidente.

Conforme mostrado na Fig.24, em um fototransistor, geralmente o terminal base é desconectado do circuito. Nessas condições, e na ausência de iluminação, circula uma corrente de fuga I_{CEO} entre coletor e emissor, e a corrente de coletor pode ser obtida da relação

$$I_C = I_{CEO}$$

O terminal do coletor tem um potencial ligeiramente superior àquele do terminal da base, tornando a junção base-coletor inversamente polarizada. Quando luz incide na região próxima à junção base-coletor, os portadores agridados produzem uma corrente de fuga adicional I_l na junção base-coletor. Como qualquer corrente de fuga nessa junção é amplificada por um fator $(\beta+1)$, a corrente de coletor, sob iluminação, passa a ser

$$I_C = I_{CEO} + (\beta + 1)I_l \quad (3)$$

A Eq.(3) mostra que a corrente gerada na junção base-coletor é amplificada por um fator $(\beta+1)$ no terminal do coletor do transistor. Como a corrente I_l é proporcional à intensidade luminosa, uma relação de linearidade existe entre a corrente de coletor e a intensidade de luz incidente sobre o dispositivo, como indicado pela Eq.(3).



A corrente de coletor em um fototransistor varia linearmente com a intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

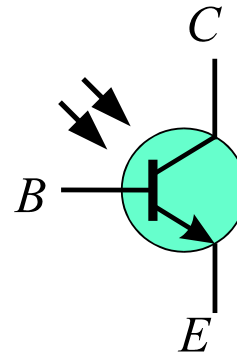


Fig.23 Representação de circuito do fototransistor.

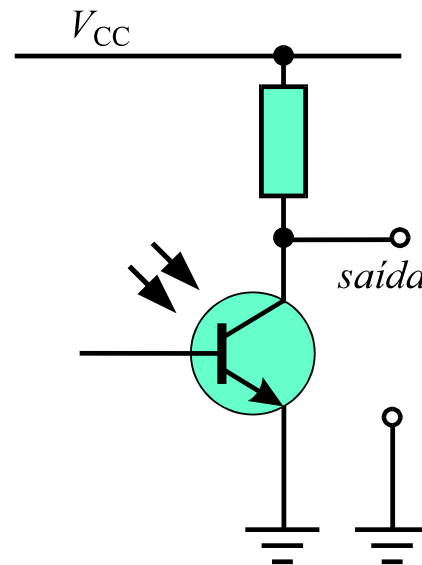


Fig.24 Fototransistor sob polarização externa.

A **Fig.25** mostra as curvas características de um fototransistor típico. Como pode ser aí observado, a intensidade luminosa influencia a relação $I_C \times V_{CE}$ de forma semelhante àquela exercida pela corrente de base no transistor convencional.

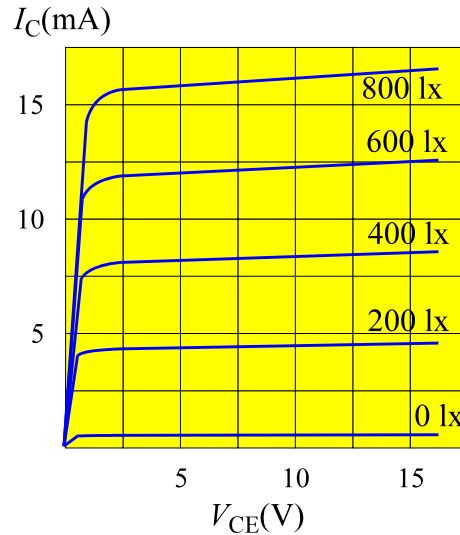


Fig.25 Curvas características típicas de um fototransistor.

Em alguns casos se torna necessário alterar a tensão V_{CE} para um determinado nível de iluminação. Isso pode ser realizado pela injeção de uma corrente de base no dispositivo através de um resistor conectado à fonte de alimentação, conforme indicado na **Fig.26**. Esse método, contudo, reduz a sensibilidade do circuito.

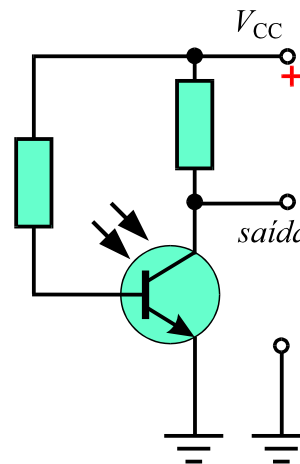


Fig.26 Circuito a fototransistor com base conectada à fonte através de um resistor.

Existem fototransistores fabricados especialmente para trabalhar em conjunto com os LEDs, na forma ilustrada na **Fig.27**. Esses dois componentes formam um par casado, e o comprimento de onda emitido pelo LED é escolhido no ponto de máxima sensibilidade do fototransistor. Esse tipo de aplicação permitiu a fabricação de dispositivos **optoacopladores**, encapsulados em um único circuito integrado.

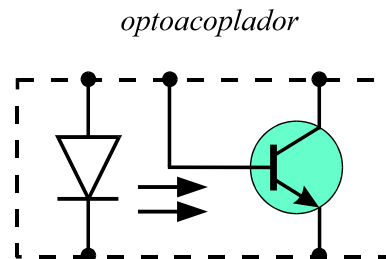


Fig.27 Diagrama de circuito de um optoacoplador.

A inexistência de conexão elétrica entre o LED e o fototransistor faz que o optoacoplador tenha uma altíssima isolamento elétrica. Isso permite o emprego desse tipo de componente no bloqueio de *cc* entre estágios amplificadores *ca* operando sob polarizações distintas.

TERMISTORES

A dependência com a temperatura da condutividade elétrica dos materiais semicondutores permite a fabricação do sensor de temperatura denominado de **termistor**. Neste tipo de dispositivo, uma variação de temperatura modifica sua resistência elétrica. Essa modificação pode ser detectada, por exemplo, como uma modificação da corrente através do dispositivo quando adequadamente polarizado por uma tensão externa.

Dependendo da forma como a resistência do dispositivo é alterada pela temperatura, os termistores podem ser do tipo PTC ou NTC. A **Fig.28** mostra o aspecto típico de um termistor e as representações de circuito geralmente utilizadas.

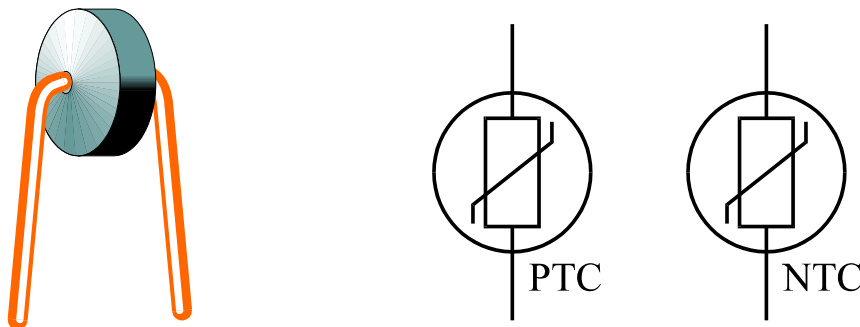


Fig.28 Aspecto típico de um termistor e representações de circuito.

TERMISTOR PTC

O termistor tipo PTC (*positive temperature coefficient*), exibe coeficiente de temperatura positivo, ou seja, sua resistência elétrica aumenta com a elevação de temperatura.

Para cada tipo de termistor PTC existe uma faixa de temperaturas de operação, onde existe grande variação da resistência elétrica do dispositivo.

A **Fig.29** ilustra a dependência com a temperatura da resistência elétrica de um termistor PTC típico. Como pode ser aí observado, para esse dispositivo a faixa de temperaturas de operação está situada entre 50°C e 120°C.

TERMISTOR NTC

O termistor tipo NTC (*negative temperature coefficient*), exibe coeficiente de temperatura negativo, ou seja, sua resistência elétrica diminui com a elevação de temperatura. A **Fig.30** ilustra a variação com a temperatura da resistência elétrica de um termistor NTC.

APLICAÇÕES

O termistor, tanto NTC como PTC, pode ser utilizado em um circuito ou equipamento, de duas formas distintas:

- Apenas como sensor da temperatura do equipamento.
- Como atuador sobre as condições de operação do equipamento.

O termistor NTC pode ser utilizado, por exemplo, para manter constante o ponto de operação de um transistor perante variações na temperatura de operação, conforme ilustrado na **Fig.31**. Nesse circuito um aumento de temperatura tende a provocar aumento na corrente de coletor, como resultado do acréscimo da corrente de fuga I_{CBO} . Por outro lado, o aumento de temperatura também provoca redução na resistência elétrica do termistor NTC, reduzindo

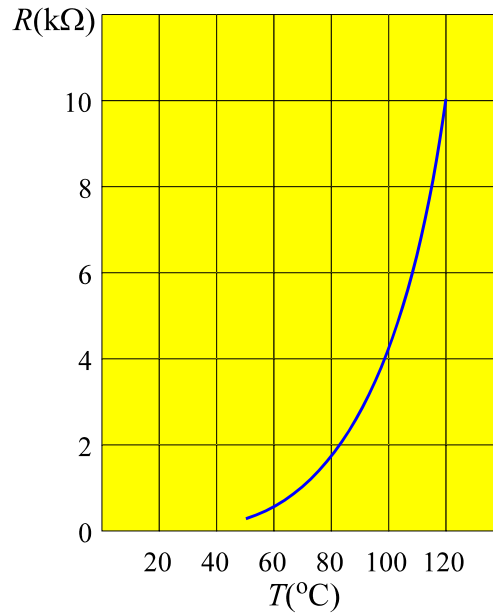


Fig.29 Dependência com a temperatura da resistência elétrica de um termistor PTC típico.

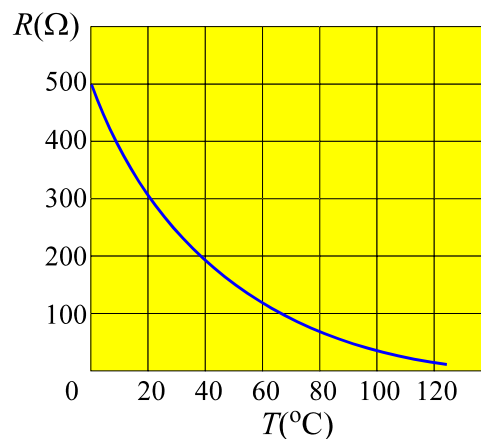


Fig.30 Dependência com a temperatura da resistência elétrica de um termistor NTC típico.

assim a tensão base-emissor do transistor. Com isso diminui a corrente de base e o ponto de operação volta ao seu estado original.

Uma outra aplicação importante dos termistores se refere aos circuitos de controle de temperatura. Um circuito de controle de temperatura típico está ilustrado na **Fig.32**. Um breve exame do circuito indica que qualquer variação na temperatura do termistor provoca variação na tensão aplicada à entrada do disparador Schmitt. Através do relé acoplado ao disparador se pode comandar resistências de aquecimento ou aparelhos de refrigeração.

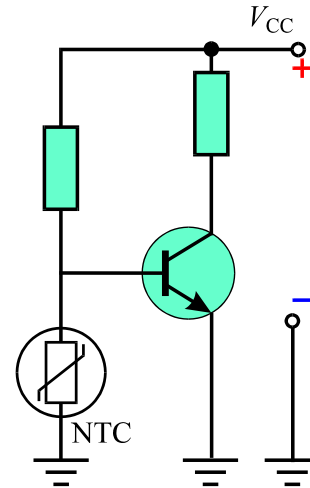


Fig.31 Emprego de um termistor NTC em um circuito transistorizado.

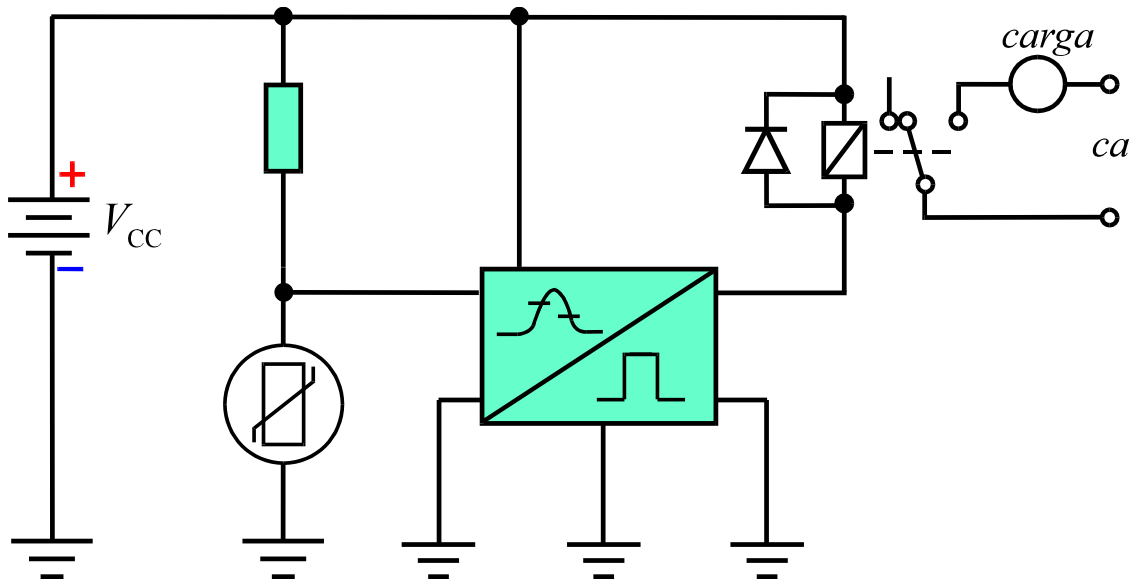


Fig.32 Circuito de controle baseado em um termistor acoplado a um disparador Schmitt para controle de temperatura.

Em algumas aplicações o termistor é utilizado de forma que a corrente de carga, ou parte dela, circule através do termistor. Nesse tipo de aplicação a própria dissipação de potência no termistor provoca seu aquecimento, resultando em uma variação na sua resistência.

Nos aparelhos de TV em cores, por exemplo, utiliza-se uma bobina para a desmagnetização do tubo de imagem. Ao ligar-se o aparelho, essa bobina deve produzir um campo magnético intenso que deve praticamente desaparecer **após alguns segundos**. Para que esse efeito seja obtido, a bobina de desmagnetização é conectada em série a um termistor PTC, conforme ilustrado na **Fig.33**.

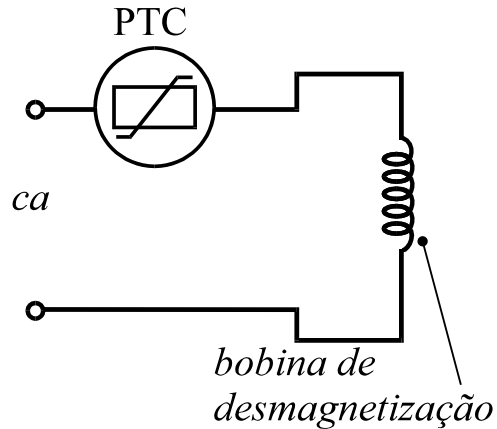


Fig.33 Diagrama simplificado do circuito de controle do campo magnético de uma bobina.

Com base na **Fig.33**, ao ligar-se a alimentação, o termistor está frio e com baixa resistência. Assim, a corrente circulante é intensa, produzindo o campo desmagnetizante. Durante o tempo de circulação da corrente no circuito, a dissipação de potência no termistor aumenta sua temperatura. Isso provoca o aumento na resistência elétrica do termistor, reduzindo a corrente, e por conseguinte, o campo magnético na bobina. Após alguns segundos, o sistema atinge o equilíbrio com o termistor exibindo alta resistência, o que praticamente elimina o campo desmagnetizante.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual é a velocidade de propagação da radiação eletromagnética produzida por uma fonte de microondas operando a uma frequência de 10 GHz?
2. Qual seria o resultado obtido na questão anterior, se a radiação fosse emitida em uma frequência de 1 kHz?
3. Determine os comprimentos de onda associados à radiação eletromagnética emitida nas seguintes frequências:
 - a) $f = 1$ kHz.
 - b) $f = 10$ GHz.
 - c) $f = 1$ THz.
4. Qual é a faixa de comprimentos de onda em que a radiação eletromagnética se torna visível ao olho humano?
5. Se o fluxo luminoso incidente em uma área de 10 cm^2 é 1.500 lm , qual é a intensidade luminosa sobre a área iluminada?
6. Faça uma pesquisa e tente descobrir qual é o valor típico do iluminamento produzido pelo sol na superfície da Terra. Tente caracterizar, por exemplo, valores típicos em diferentes regiões do país.
7. Como se define a responsividade de um fotodetector?
8. Descreva o princípio de operação de um LDR.
9. Descreva o princípio de operação de um fotodiodo.
10. Descreva o princípio de operação de um fototransistor.
11. Cite uma aplicação típica do fototransistor.

12. O que são termistores PTC e NTC?
13. Cite duas aplicações para os termistores.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANDT, Hans. O sinal e o seu uso na técnica de comando; componentes eletrônicos especiais. São Paulo, E.P.U., 1975. 46p. il. (Eletrônica Industrial, 3).

_____. Tiristores componentes fotoeletrônicos. São Paulo, E. P. U., 1975. 43p. il. (Eletrônica Industrial), 4)

MELLO, Hilton A. & INTRATOR, Edmond. Dispositivos semicondutores. 3ed. Rio de Janeiro, LTC, 1978. 283p. il.

BOLETIM TÉCNICO INFORMATIVO ICOTRON. s. 1. 6 (36) jun/jul, 1981.

REZENDE, Sérgio Machado, A física de materiais e dispositivos eletrônicos, Recife, Editora da UFPE, 1996.

CREDER, Hélio, Instalações elétricas, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1978.

SINGH, Jasprit, Semiconductor optoelectronics, Nova York, McGraw-Hill, Inc., 1995.