

# COMPONENTES FOTOELETRÔNICOS

Componentes fotoeletrônicos são dispositivos cujas propriedades elétricas modificam-se perante a incidência de luz.

Podemos dizer que a fotoeletricidade é o fenômeno no qual partículas de carga são liberadas de um material quando ele absorve energia radiante, muitas vezes ultrapassando os limites das radiações visíveis.

Definido comumente como a ejeção de elétrons da superfície de uma chapa metálica quando a luz incide sobre ela. Esse fenômeno foi observado em 1887 pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz<sup>1</sup>. Quando elétrons de tais elementos são excitados, algumas grandezas são modificadas, como por exemplo, a resistência.

Para isso deve-se fornecer aos elétrons energia em forma de radiações<sup>2</sup> de determinada frequência, para que estes se movam no material ou mesmo se afastem dele. Essa energia é absorvida em forma de fótons<sup>3</sup>.

## Natureza da luz

A luz é uma forma de oscilação eletromagnética que se dispersa no meio em que se encontra<sup>4</sup> a uma velocidade aproximada de  $3 \cdot 10^8$  m/s (300.000km/s). Em outras palavras, luz é a radiação eletromagnética, de comprimento de onda compreendido entre 4.000 e 7.800 angströms<sup>5</sup>, capaz de estimular o olho e produzir a sensação visual.

As ondas eletromagnéticas não deslocam partículas de matéria, como no caso das ondas de som, ocorrem sim, modificações periódicas de campos elétricos e magnéticos no ambiente em se encontram.

---

<sup>1</sup> Hertz, Heinrich Rudolf

Físico alemão. Contribuiu para o aprimoramento das técnicas de radio transmissão, com seus estudos sobre as ondas eletromagnéticas, que em sua homenagem se chamaram ondas hertzianas.

<sup>2</sup> Radiação

Designação genérica dos diferentes processos de emissão de energia ou matéria pelos corpos. Os principais tipos são o calor, a luz visível e a radiação eletromagnética.

<sup>3</sup> Fóton

Termo que designa, em física, a porção ou quantum de radiação eletromagnética que tem massa em repouso nula e energia igual ao produto da constante de Planck pela frequência do campo.

<sup>4</sup> A luz possui a capacidade de se dispersar no vácuo

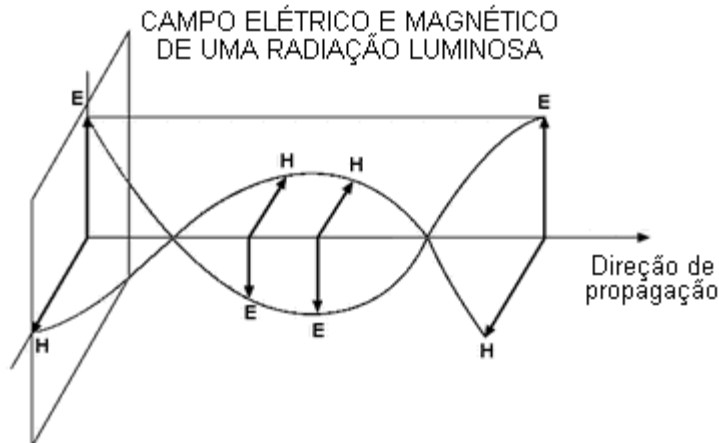
<sup>5</sup> Angström

Unidade de medida de comprimento para ondas luminosas e dimensões moleculares. Equivale a  $10^{-10}$ m. Símbolo: Å.

Ångström, Anders Jonas (1814 -1874).

Físico sueco, um dos fundadores da espectroscopia. Especialista também em termo condutividade, tem seu nome ligado à unidade de medida para ondas luminosas e dimensões moleculares.

A figura a seguir mostra o espectro de uma radiação luminosa, onde se observa o campo elétrico "E" e o campo magnético "H" que ao se cruzarem formam uma onda luminosa cujo comprimento corresponde a uma oscilação completa do fóton.

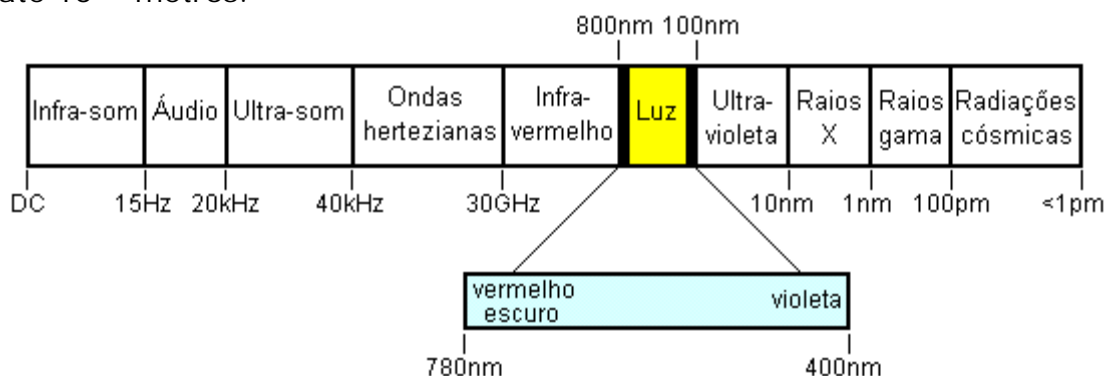


### Espectro eletromagnético

A luz visível ou espectro solar, capaz de impressionar a retina e de gerar imagens no cérebro, constitui apenas uma parte do total das radiações eletromagnéticas.

À medida que o instrumental científico ganhou mais precisão, o homem teve acesso a um universo novo, em que descobriu fenômenos até então ignorados, como os raios X, a radiação ultravioleta, as ondas de rádio e de televisão ou os raios cósmicos.

Entende-se por espectro eletromagnético o conjunto das várias radiações de natureza elétrica e magnética, com diferentes comprimentos de onda, desde  $10^7$  metros até  $10^{-14}$  metros.



Os fenômenos ondulatórios ocorrem quando uma determinada partícula vibra ou oscila a partir de uma posição de equilíbrio e seu movimento se transmite pelo espaço em um meio adequado.

A característica principal desse movimento denomina-se comprimento de onda, que é o espaço compreendido entre dois máximos ou mínimos de uma onda. O comprimento de onda mede uma oscilação completa, enquanto a frequência (número de oscilações por unidade de tempo), expressa o "ritmo", em que se produz a vibração.

Essas duas grandezas são inversamente proporcionais entre si.

De ambos os lados do espectro da luz visível, formado por radiações de diferentes comprimentos de onda que originam as cores (vermelho escuro, vermelho claro,

laranja, amarelo, verde, ciano, azul e violeta) registra-se uma série de fenômenos eletromagnéticos não captados pelos sentidos.

Como as frequências das ondas eletromagnéticas contidas no espectro da luz visível são muito elevadas, costuma-se representá-las através do seu comprimento de onda ( $\lambda$ ).

As unidades mais utilizadas são:

- angström ( $\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$ )
- micrometro ( $\mu = 10^{-6}\text{m}$ )
- nanometro ( $\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ).

Assim por exemplo, um comprimento de onda de  $4000\text{Å}$  equivale a  $400\text{nm}$ .

Abaixo do vermelho, com comprimentos de onda progressivamente crescentes, estão: os raios infravermelhos (que produzem a sensação de calor), as ondas de radar e as microondas; as ondas de televisão e as de rádio.

Acima do violeta, com comprimentos de onda cada vez menores e frequências crescentes estão: a radiação ultravioleta, os raios X, os raios gama e a radiação cósmica.

A maior parte dessas radiações tem múltiplas aplicações nos mais diversos campos e são o fundamento de grande número de aparelhos e invenções tecnológicas, desde a televisão e o rádio até o radar e os sistemas baseados no infravermelho, além de constituírem ferramenta imprescindível na análise química (espectrógrafos), na investigação astronômica (espectrometria, radioastronomia etc.) ou na pesquisa médica (radiologia) e análise de materiais.

Essas duas últimas aplicações utilizam a propriedade que têm os raios X de penetrar corpos opacos e impressionar chapas fotográficas.

Algumas dessas radiações, como a ultravioleta, afetam especialmente os seres vivos. Devido a sua alta frequência, interagem com a matéria biológica e nela podem acarretar alterações graves.

Grande parte dos raios ultravioleta é filtrada pela camada de ozônio que circunda a Terra, minimizando seus efeitos prejudiciais.

### **Percepção das cores e sensibilidade ótica**

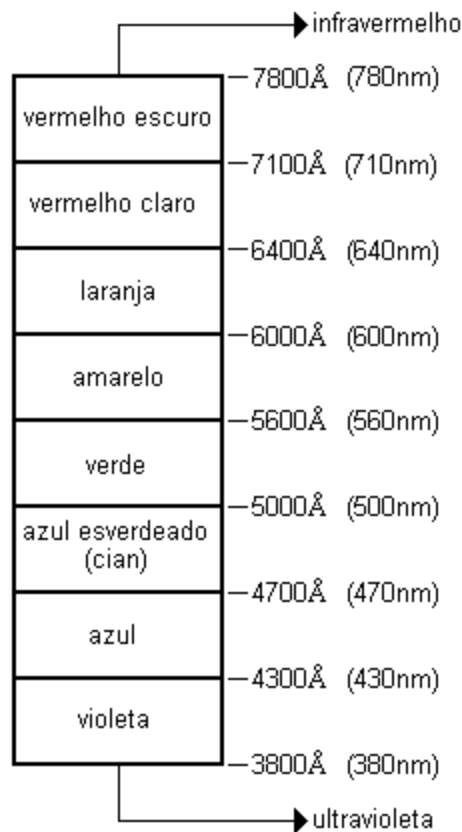
A faixa de radiações normalmente registradas pela vista humana situa-se entre  $400$  a  $800\text{nm}$  ( $4.000$  a  $8000\text{Å}$ ), sendo esses comprimentos de onda vistos sob a forma de cores diferentes.

Os extremos que representam a faixa de luz visível, indicam a temperatura da cor:

**Cor quente:** Designação genérica dos tons em que predominam o vermelho ou o amarelo no espectro visível.

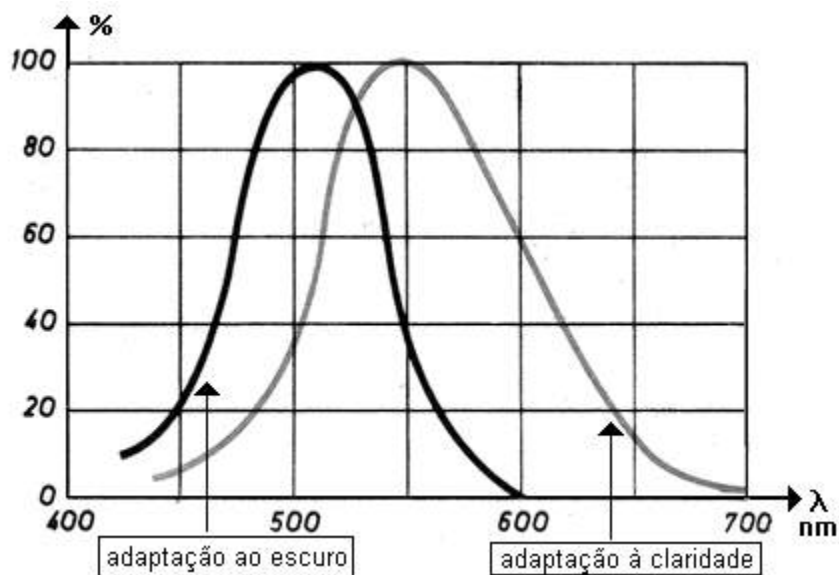
**Cor fria:** Designação genérica dos tons em que predominam o azul ou o verde no espectro visível.

A figura a seguir mostra a distribuição das cores dentro do espectro da luz visível:



A radiação luminosa excita a vista humana, transmitindo ao sistema nervoso do cérebro a sensação de intensidade e coloração luminosa.

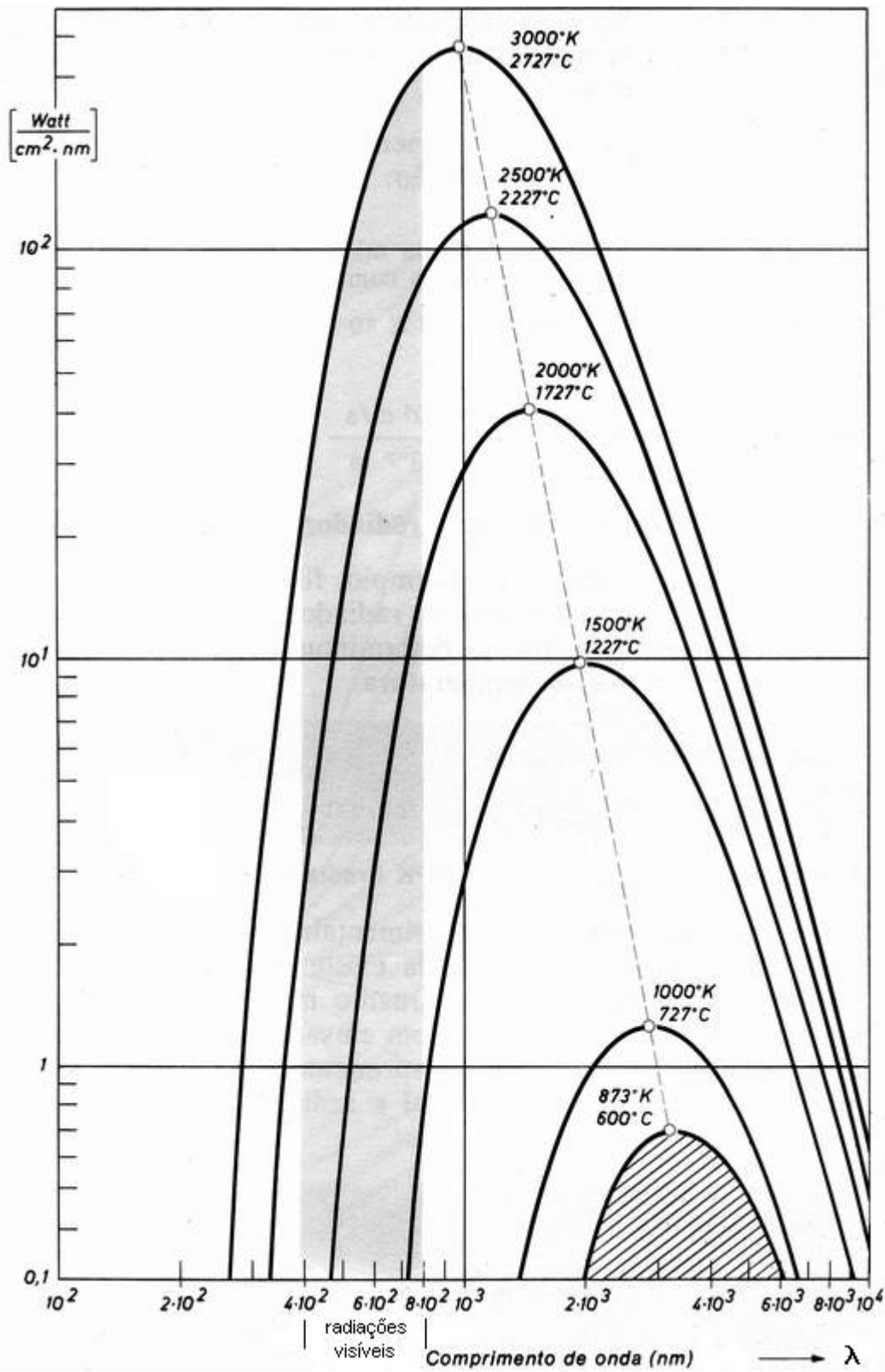
Para uma dada potência de luz emitida a grandeza de excitação depende comprimento de onda. O gráfico abaixo mostra a sensibilidade da vista humana em função do comprimento de onda, onde se observa que o olho humano é mais sensível durante o dia à cor amarela e a noite, à cor verde.



### Corpo negro

Conceito teórico que corresponde a um radiador ideal hipotético, capaz de absorver toda a radiação luminosa que sobre ele incide.

A figura abaixo mostra a densidade de radiação de um corpo negro.



### Oscilações eletromagnéticas

As oscilações eletromagnéticas são irradiadas<sup>6</sup> com a velocidade da luz. Tanto no ar como no vácuo a velocidade de radiação<sup>7</sup> da luz é de  $3 \cdot 10^8$  m/s, estabelecendo-se a seguinte relação:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$c$  = velocidade da luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

$f$  = frequência em hertz

Exemplo: Qual é a frequência atingida por oscilações eletromagnéticas num ambiente livre, sem reflexão, quando o comprimento de onda atinge 800nm?

Solução:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3,75 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

### Leis da radiação para radiadores de calor

Corpos sólidos aquecidos, como por exemplo filamentos de lâmpadas e eletrodos, bem como corpos radiadores de calor formam um espectro contínuo. Experimentalmente se determinou que a potência total irradiada (radiação de energia) depende da temperatura. Daí então, surgiram as leis básicas:

#### 1. Lei de Stefan-Boltzmann

Princípio físico segundo o qual o calor emitido por uma superfície corresponde a uma quarta parte de sua temperatura absoluta. Formulada pelo físico austríaco Josef Stefan<sup>8</sup> e aprofundada pelo também austríaco Ludwig Boltzmann<sup>9</sup>.

Por exemplo, um corpo com  $T = 1.000^\circ\text{K}$  irradia 16 vezes mais do que  $T = 500^\circ\text{K}$ , pois:

$$\frac{1.000}{500} = 2 \rightarrow 2^4 = 16$$

#### 2. Lei de Wien

Para cada temperatura irradiada existe um comprimento de onda que atende a condição de energia máxima.

Quanto mais curto for o comprimento da onda, tanto maior será a energia da radiação. Com a elevação da temperatura essa condição é atendida pelas ondas de menor comprimento (linha tracejada do gráfico da página 5).

---

<sup>6</sup> Irradiação: Ato ou efeito de irradiar(-se).  
Difundir-se, espalhar-se, propagar-se.

<sup>7</sup> Fís. Qualquer dos processos físicos de emissão e propagação de energia, seja por intermédio de fenômenos ondulatórios, seja por meio de partículas dotadas de energia cinética

<sup>8</sup> Stefan, Josef (1835-1893).

Físico austríaco. Famoso pela descoberta da lei sobre a radiação do corpo negro, em 1879. A teoria foi desenvolvida por Boltzmann, e ficou conhecida como lei de Stefan-Boltzmann.

<sup>9</sup> Boltzmann, Ludwig Eduard (1844-1906).

Físico austríaco. Elaborou a teoria cinética dos gases e introduziu a teoria das probabilidades na termodinâmica.

A lei de Wien (Wilhelm Wien<sup>10</sup>) especifica que o comprimento de onda da radiação máxima é inversamente proporcional a temperatura absoluta T.

$$\lambda_{\max} = \frac{a}{T(^{\circ}\text{K})} \text{ onde:}$$

a = constante que vale  $2,9 \cdot 10^6 \text{ nm } ^{\circ}\text{K}$

Exemplo:

$$\text{para } T = 500^{\circ}\text{K} \rightarrow \lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^6 \text{ nm } ^{\circ}\text{K}}{500^{\circ}\text{K}} = 5,8 \cdot 10^3 \text{ nm}$$

$$\text{para } T = 4.000^{\circ}\text{K} \rightarrow \lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^6 \text{ nm } ^{\circ}\text{K}}{4.000^{\circ}\text{K}} = 0,725 \cdot 10^3 \text{ nm}$$

Essa lei também explica porque a cor de um corpo superaquecido (em brasa), com a elevação da temperatura passa do vermelho escuro ao amarelo e ao branco. No caso das lâmpadas halógenas (família dos halogênios<sup>11</sup>), ao branco azulado.

### 3. Lei de Planck

As curvas observadas no gráfico da página 5, apresentam a lei fundamental da radiação formulada por Planck<sup>12</sup>, que mostram a distribuição das potências de radiação no espectro de um radiador ideal (corpo negro), em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e diversas temperaturas T( $^{\circ}\text{K}$ ).

*OBS: Enquanto as leis de Stefan-Boltzmann permitem o cálculo de toda a energia irradiada e as leis de Wien determinam os máximos valores das curvas, Planck obteve as leis que definem a variação dessas curvas.*

Ainda em relação as curvas do gráfico da página 5, a lei de Planck poderá ser melhor entendida se tomarmos como exemplo dois valores de temperatura T.

Consideremos inicialmente a área compreendida pela curva cuja temperatura é de  $873^{\circ}\text{K}$  (área tracejada).

Comparando com a área da curva de temperatura mais elevada, por exemplo,  $2.000^{\circ}\text{K}$  observa-se que a esta é bem maior. Unindo os dois valores máximos dessas curvas (linha tracejada) observa-se que os valores máximos tendem a inclinar-se para a esquerda em função de  $\lambda = \frac{a}{T}$ , fundamentando a lei de Wien.

---

<sup>10</sup> Wien, Wilhelm (1864-1928).

Físico alemão. Notável pelos descobrimentos relativos às leis da radiação térmica. Sua contribuição à radiação do corpo negro está contida nas três leis de Wien. Prêmio Nobel de 1911.

<sup>11</sup> Halogênios

Família de elementos químicos não metálicos que compõem o grupo VIIa da tabela periódica. Formada por flúor, cloro, bromo, iodo e astato.

<sup>12</sup> Planck, Max (1858-1947).

Físico alemão. Criou as bases da ciência moderna com o conceito de quantum e a teoria da descontinuidade da energia. Prêmio Nobel de 1918

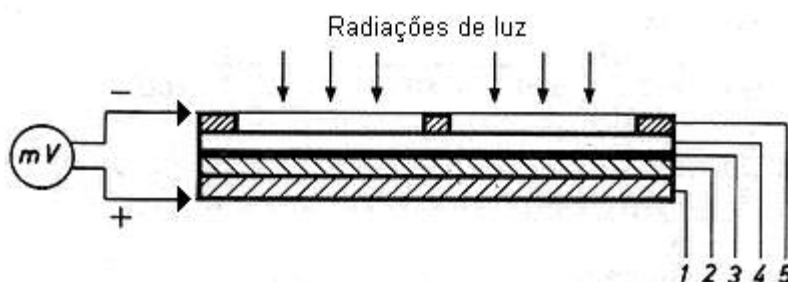
Conclui-se portanto, que com a elevação da temperatura, parte da energia irradiada alcança comprimentos de onda que estão dentro do espectro da luz visível.

Uma lâmpada incandescente por exemplo, é antieconômica para emitir luz, pois a maior parte das radiações presentes localizam-se na faixa das ondas invisíveis. Observe no gráfico da página 5 que o olho humano é sensível apenas aos comprimentos de onda contidos na área mais escura.

## FOTOELEMENTOS

Transformam energia luminosa em energia elétrica.

A figura abaixo representa o esquema de um fotoelemento (célula fotovoltaica) de selênio.



- 1 - placa base
- 2 - camada semicondutora P
- 3 - camada semicondutora N
- 4 - camada de bloqueio (óxido de cádmio<sup>13</sup>)
- 5 - anel metálico

As técnicas para a construção de fotoelementos são muito similares às empregadas na construção de semicondutores (transistores, diodos, etc.)

A princípio, sobre uma placa base é aplicada uma fina camada de material semicondutor como o selênio<sup>14</sup> ou o silício<sup>15</sup> que pode ter condutividade. A primeira camada é *p* onde existem abundância de lacunas.

Acima da primeira camada, aplica-se outra camada, também fina de material *n* onde existe abundância de elétrons.

Acima da camada *n* é fixado um eletrodo de oposição ou bloqueio constituído por uma camada metálica fina transparente à luz, geralmente óxido de cádmio.

Para acabamento é colocado um anel metálico. O efeito fotoelétrico aparece quando radiações luminosas passam pela camada metálica transparente à luz, fazendo com

<sup>13</sup> Cádmio.

Elemento químico pertencente ao grupo IIb da tabela periódica. Símbolo químico: Cd. Número atômico: 48. Peso atômico: 112,4.

<sup>14</sup> Selênio

Elemento químico pertencente ao grupo VIA da tabela periódica. Símbolo: Se. Número atômico: 34. Peso atômico: 78,96.

<sup>15</sup> Silício

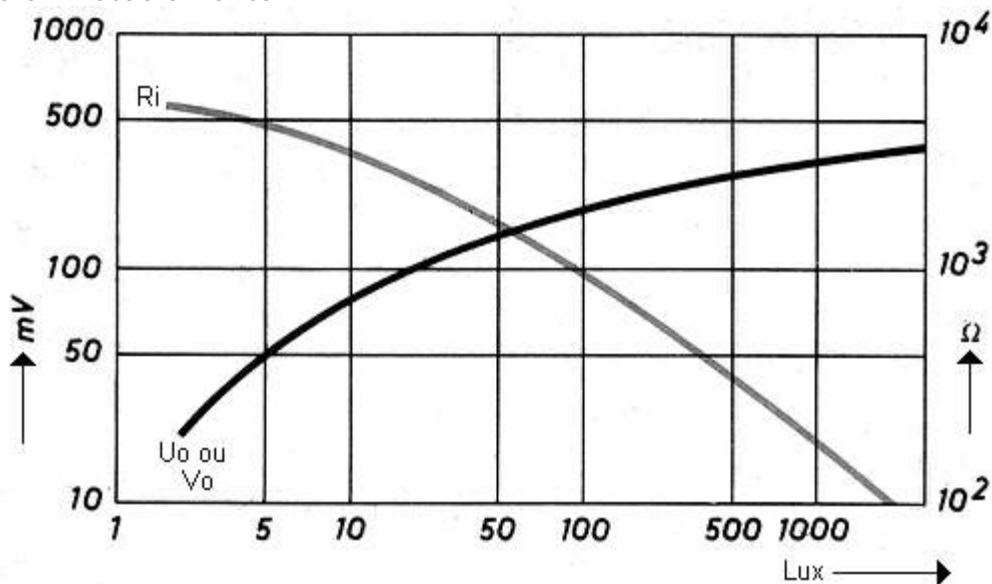
Elemento químico pertencente ao grupo IVA da tabela periódica. Símbolo: Si. Número atômico: 14. Peso atômico: 28,09.



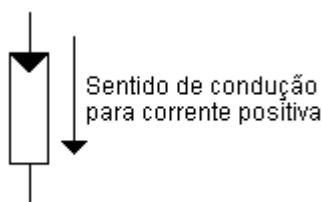
que os elétrons da camada semicondutora  $n$  sejam liberados e coletados pelo anel, tornando-o negativo.

A placa base torna-se então positiva e entre o anel e placa base desenvolve-se uma diferença de potencial denominada  $U_o$  ou  $V_o$ .

A figura abaixo mostra o gráfico da dependência da tensão  $V_o$  e da resistência interna  $R_i$  de um fotoelemento.



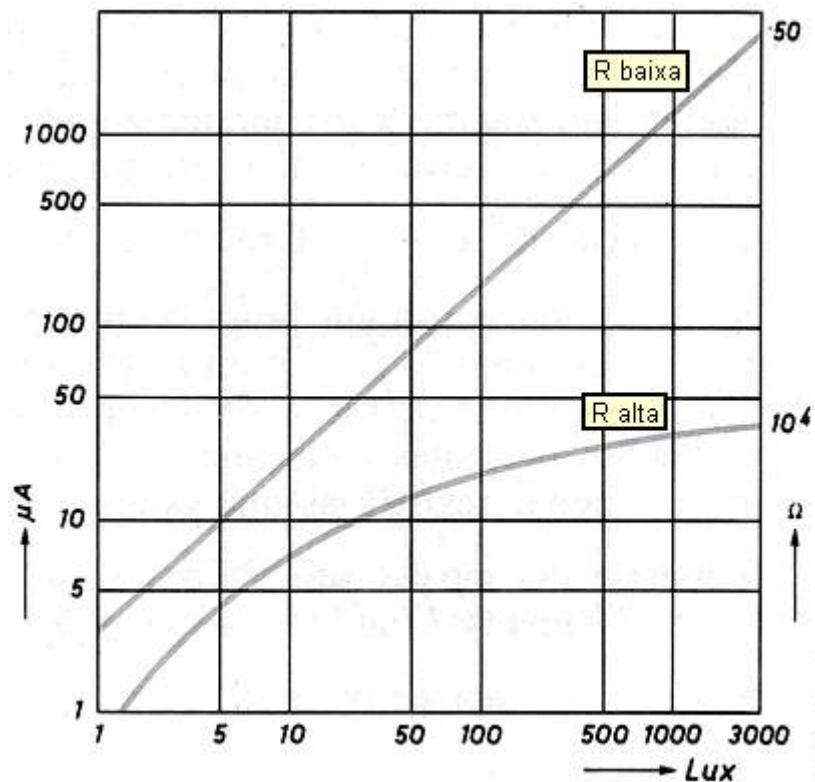
Observa-se que à medida que as radiações luminosas aumentam, cai a resistência interna ( $R_i$ ) e aumenta a tensão  $V_o$ .



A figura acima mostra o símbolo usado para representar um fotoelemento.

A tensão típica de saída ( $V_o$ ) para um elemento de selênio é da ordem de 0,3V enquanto que para fotoelementos de silício é da ordem de 0,7V, para máxima radiação luminosa.

A figura a seguir mostra a relação entre a corrente de emissão e a intensidade luminosa perante cargas com resistências altas e baixas.



Analisando a curva acima, a variação é tanto menos linear quanto maior for a carga, ou seja a variação é mais linear para cargas baixas ( $R_L + R_i$ ).

Os valores típicos de resistência interna são:

para células de selênio =  $100\Omega$  por  $\text{cm}^2$   
 para células de silício = 2 a  $10\Omega$  por  $\text{cm}^2$

temos então:  $R_i = \frac{V_o}{I_K}$ , onde  $I_K$  = corrente de curto

$I_o = \frac{V_o}{R_a + R_i}$ , onde  $R_a$  é a resistência externa;  $R_i$  a resistência interna e  $I_o$  é a corrente fotoelétrica

### Fotocélulas ou células fotoelétricas - Aplicações

Os fotoelementos na realidade podem ser definidos como fotocélulas ou células fotoelétricas.

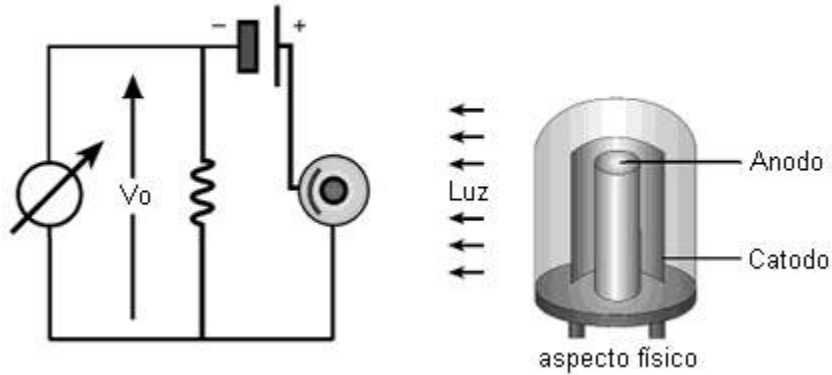
A fotocélula ou célula fotoelétrica pode ser comparada a um olho elétrico que, em muitas de suas aplicações, pode substituir o humano. A vantagem principal desse dispositivo é a sensibilidade a radiações que a retina do homem não consegue perceber.

Fotocélula é um transdutor fotoelétrico, dispositivo que favorece a transformação de um fenômeno luminoso em outro de natureza elétrica de magnitude proporcional.

Assim, quando a luz incide sobre ela, a fotocélula produz ou deixa passar corrente elétrica. Ao cessar a luz, cessa também a corrente. A fotocélula pode ser de três tipos:

fotoemissiva  
fotocondutora  
fotovoltaica

Célula fotoemissiva

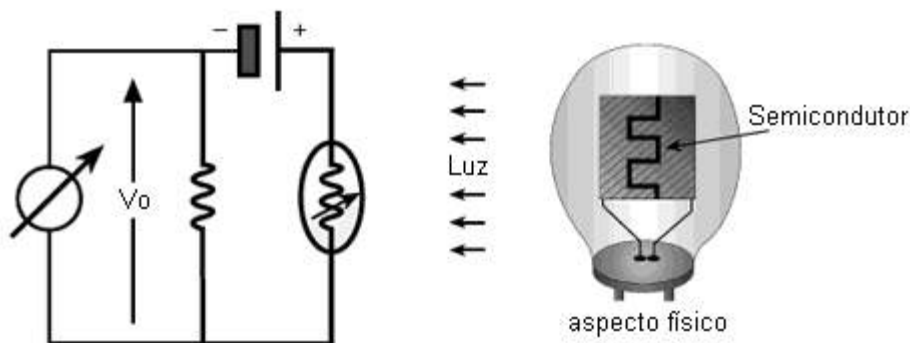


Nas células fotoemissivas ou fototubos, o fluxo luminoso determina a emissão de um feixe de elétrons por parte de um catodo ou eletrodo negativo, normalmente construído de prata, ouro ou cobre.

Os elétrons então, se aceleram mediante uma diferença de potencial e se recolhem num eletrodo positivo ou anodo.

Esse conjunto fica no interior de uma ampola submetida ao vácuo. Os fototubos de vácuo são empregados em medidas fotométricas de precisão e os de gás, na leitura da faixa sonora de filmes cinematográficos.

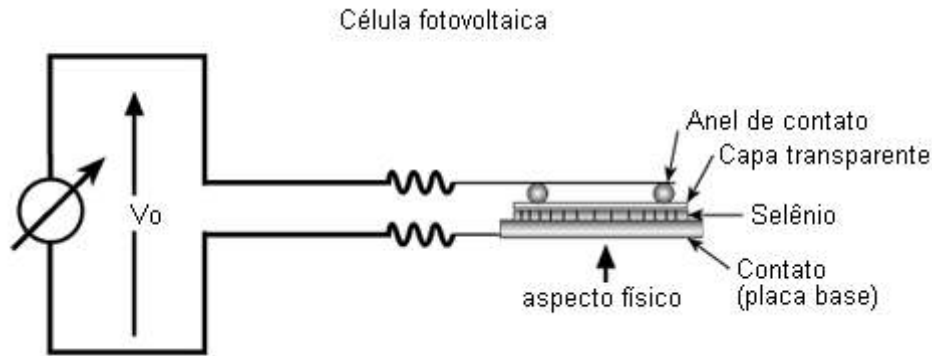
Célula fotocondutora



As células fotocondutoras utilizam as características dos elementos semicondutores, como o silício e o selênio, que modificam sua resistência em função da natureza do foco luminoso que incide sobre eles.

São sólidos cristalinos de condutividade situada entre a dos metais e a dos isolantes.

Quando se intercala uma célula fotocondutora num circuito formado por uma bateria e uma resistência, a corrente elétrica se modifica com o fluxo luminoso.



Por último, as células fotovoltaicas, sob a influência da luz, atuam como geradores elétricos e provocam uma corrente cuja intensidade é proporcional à do feixe luminoso incidente. Entre suas aplicações está a comutação para leitura de fitas magnéticas.

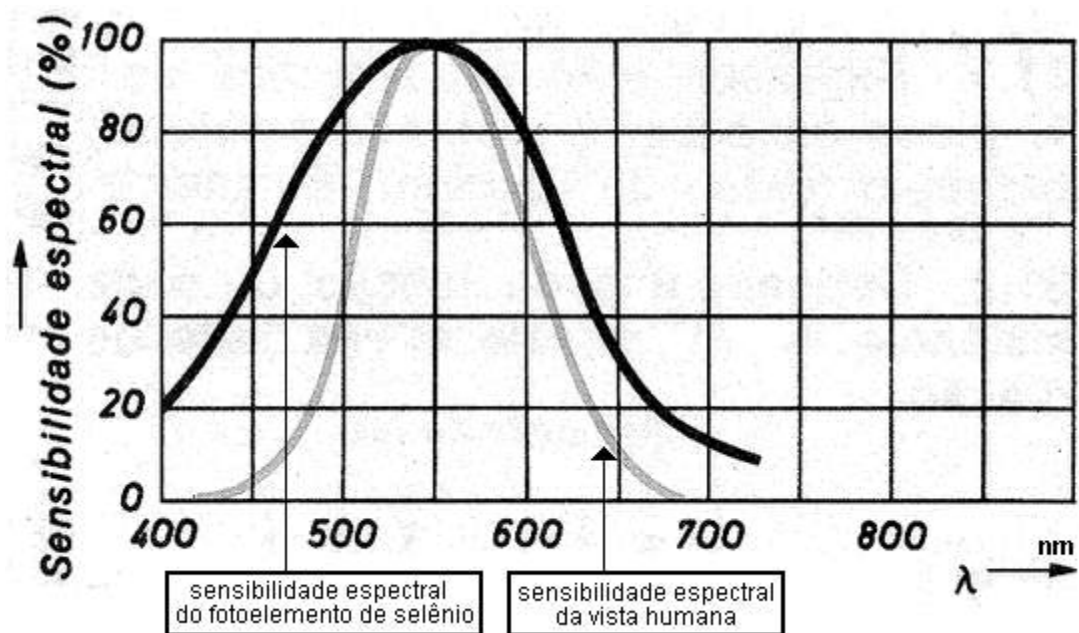
A utilização de determinado tipo de célula fotoelétrica depende da finalidade própria de cada caso. Quando se busca fidelidade e linearidade em alto grau, as células fotoemissivas de vácuo são mais funcionais.

As células fotocondutoras e fotoemissivas de gás apresentam menor fidelidade, porém são mais sensíveis. As fotovoltaicas são adequadas nos casos em que não se requer alta fidelidade nem sensibilidade e podem ser usadas como fonte de energia elétrica.

### Características dos fotoelementos de selênio e silício

#### 1. Células de selênio

A figura abaixo mostra o gráfico comparativo entre a sensibilidade do olho humano e de uma célula ou fotoelemento de selênio.



Observa-se que a largura da curva de sensibilidade espectral é maior para o fotoelemento de selênio em comparação a vista humana, mas, de forma geral é bem próxima à sensibilidade média da vista humana.

### Algumas aplicações:

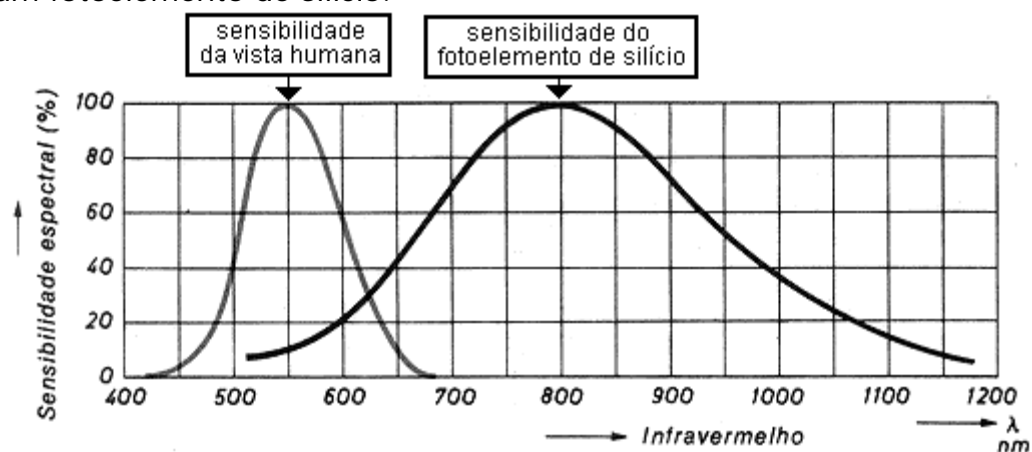
- 1 - medição de tempo de exposição em máquinas fotográficas (fotômetros<sup>16</sup>)
- 2 - como acionadores de chaves de iluminação pública (interruptor crepuscular)

Os fotoelementos de selênio possuem certa inércia, isto é, acompanha variações de luminosidade até o limite de 1kHz. Desta forma, aplicações que exijam repostas às variações de luminosidade acima dessa frequência, não devem utilizar células de selênio.

Uma grande desvantagem das células de selênio é sua dependência em relação a temperatura, pois um aumento da mesma provoca uma queda de  $V_o$ . Uma célula de selênio poderá danificar-se se for usada por longo período em temperaturas em torno de 60°C.

### 2. Células de silício

A figura abaixo mostra a comparação entre a sensibilidade da vista humana em relação a um fotoelemento de silício.



Observa-se que a célula de silício tem uma sensibilidade espectral máxima em 800nm (vermelho escuro). Desta forma é muito utilizada em aplicações que envolvam radiações infravermelhas.

Uma vantagem das células de silício em relação as de selênio, é que sua frequência limite é da ordem de 50kHz, permitindo aplicações que envolvam rápidas variações de luminosidade, além do que, sua temperatura de operação é bem superior, da ordem de 150°C.

Em condições idênticas, fotoelementos de silício fornecem corrente cerca de 10 vezes maior do que os fotoelementos de selênio.

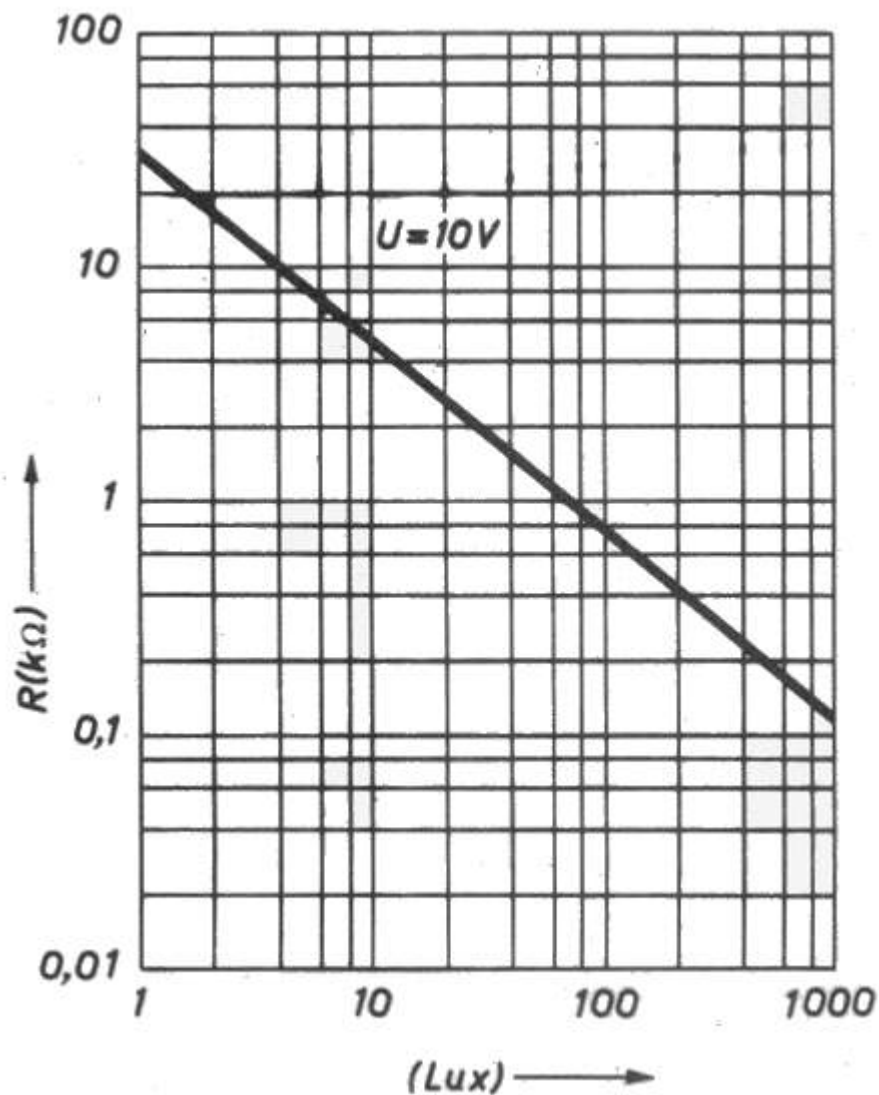
Por esse motivo as células de silício são muito utilizadas em sistemas de medição e comando bem como, em carga de baterias de satélites.

## FOTORRESISTORES

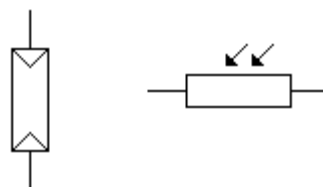
<sup>16</sup> Fotômetro

Instrumento utilizado para medir a energia de um feixe luminoso. Pode se basear em comparações efetuadas visualmente ou em comparações quantitativas realizadas por meio de dispositivos fotoelétricos.

O fotorresistor é um componente que tem sua resistência variada pela ação da luz, ou seja, à medida que aumenta a incidência luminosa sobre o mesmo, sua resistência cai, conforme ilustra o gráfico abaixo.



Símbolos



O fotorresistor é conhecido como LDR (do inglês Light Dependent Resistor) e ao contrário dos fotoelementos, não fornece energia; sua resistência varia pela ação da incidência luminosa. Na realidade, pode-se afirmar que o LDR é um resistor variável.

Como o LDR não tem condutividade assimétrica (circula corrente nos dois sentidos), é próprio para aplicações em CC e CA.

Fabricação:

Geralmente são utilizados dois tipos de materiais, dependendo do tipo de aplicação a que se destina.

- 1 - sulfeto de cádmio<sup>17</sup> (CdS): quando usado na faixa das radiações visíveis
- 2 - sulfeto de chumbo<sup>18</sup> (PbS): quando usado na faixa das radiações infravermelhas

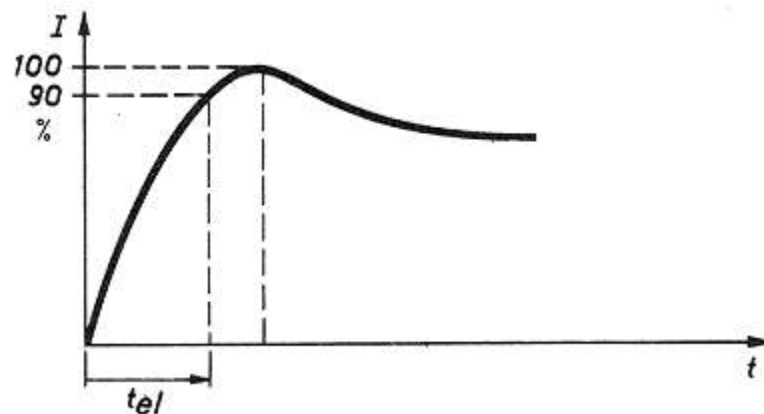
#### Análise da corrente no fotorresistor

1 - Corrente no claro ( $I$ ): é a corrente que circula pelo fotorresistor na incidência de luz. Seu valor depende da intensidade luminosa, da tensão aplicada, da temperatura da cor e das propriedades de uso fornecidas pelo fabricante.

2 - Corrente no escuro ( $I_0$ ): é a corrente que circula pelo fotorresistor na ausência total de luz. O valor de  $I_0$  depende da tensão aplicada, da temperatura e das propriedades de uso fornecidas pelo fabricante.

Um dos fatores que devem ser considerados nos fotorresistores é sua inércia em relação ao tempo de crescimento e redução da corrente.

A figura abaixo mostra a curva representativa do tempo de elevação ( $t_{el}$ ) ou crescimento.



O tempo de elevação ( $t_{el}$ ) é o tempo necessário para que a corrente varie de zero até a 90% de seu valor.

O tempo de redução ( $t_{re}$ ) é outro parâmetro que deve ser conhecido. É o tempo para que a corrente no fotorresistor seja reduzido a 10% do seu valor a partir do momento em que cessar a luz incidente. Veja o gráfico a seguir.

---

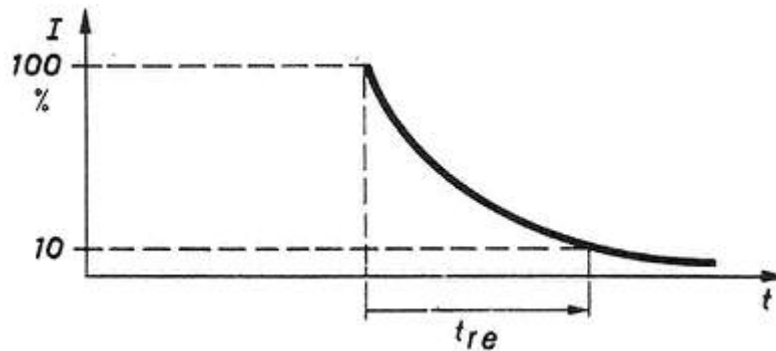
<sup>17</sup> Cádmio

Elemento químico pertencente ao grupo IIb da tabela periódica. Símbolo químico: Cd. Número atômico: 48. Peso atômico: 112,4.

<sup>18</sup> Chumbo

Elemento químico pertencente ao grupo IVa da tabela periódica. Símbolo: Pb. Número atômico: 82. Peso atômico: 207,21.





Analisando os dois gráficos, verifica-se que existe uma inércia relativamente alta em relação a variação da resistência com a variação de luminosidade. Para os fotorresistores fabricados a partir de CdS, esse valor está entre 10ms e 1s. Por esse motivo os fotorresistores de CdS são inadequados quando se exige uma rápida variação de resistência.

### Resistência do LDR

A resistência do LDR de CdS é dada pela fórmula:  $R = A.L^{-\alpha}$  onde:

A = constante que depende do material (área a ser iluminada)

R = resistência em ohms

L = fluxo em lux ou lúmen

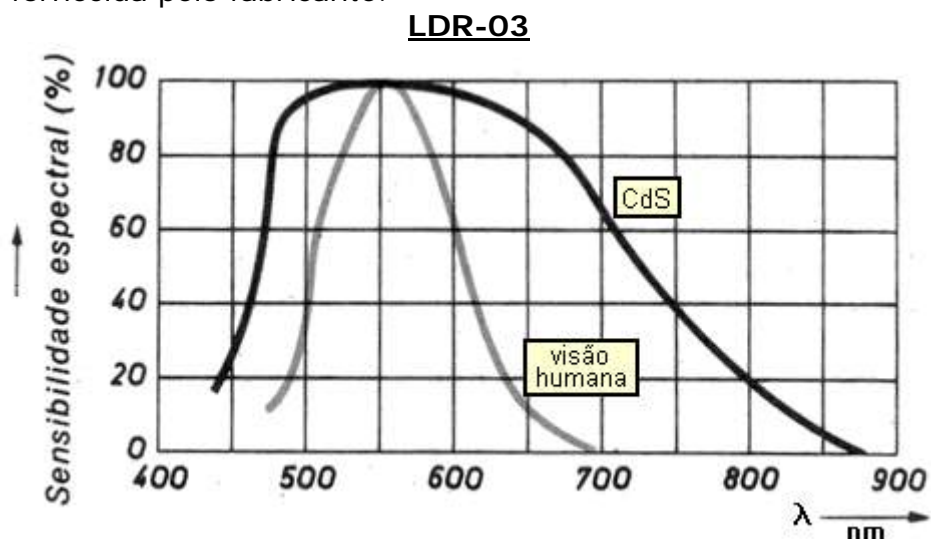
$\alpha$  = constante que varia em função do CdS (0,7 a 0,9)

**Taxa de recuperação:** é o tempo que o LDR leva para atingir a resistência máxima após ser levado bruscamente de um ambiente claro para um ambiente escuro. O crescimento da resistência (típico) é da ordem de 200k por segundo.

**Tempo de ataque:** é o tempo que a resistência do LDR leva para diminuir quando se leva o mesmo de um ambiente escuro para um ambiente iluminado, se o ambiente iluminado tiver um nível de 300 lux. Este tempo (típico) é da ordem de 30ms.

### LDRs de sulfeto de cádmio - aplicações

A figura abaixo representa a sensibilidade espectral de um fotorresistor construído a partir de CdS, fornecida pelo fabricante.



Verifica-se que a curva espectral do LDR de CdS abrange todo o espectro da luz visível, sendo portanto adequado para ser utilizado em fotômetros.



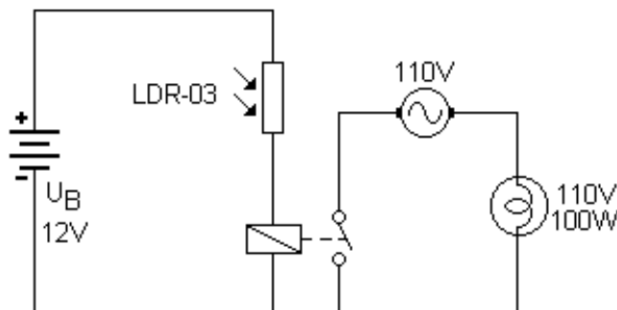
Notações importantes nos manuais:

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Tensão contínua ou tensão de pico alternada ( $U_B$ )                   | 75V                   |
| Potência de perda: temperatura ambiente até 25°C (P)                    | 150mW                 |
| Potência de perda: temperatura máxima de 75°C (P)                       | 40mW                  |
| Corrente passante pelo fotorresistor com $U = 10V / 50 \text{ lux}$ (I) | 8mA                   |
| Corrente no escuro, com $U_B = 75V$ ( $I_o$ )                           | $\leq 10\mu A$        |
| Tempo de elevação ( $t_{ei}$ )  | 50ms                  |
| Tempo de redução ( $t_{re}$ )   | 500ms                 |
| Valor da resistência com luminosidade zero ( $R_o$ )                    | $\leq 10M\Omega$      |
| Valor da resistência com 1.000 lux (R)                                  | $\geq 80...120\Omega$ |
| Sensibilidade espectral   | ver curva             |

### EXERCÍCIO RESOLVIDO:

Um LDR deve fazer funcionar um relê, para que este acenda remotamente uma lâmpada, conforme mostra o circuito abaixo. Determinar:

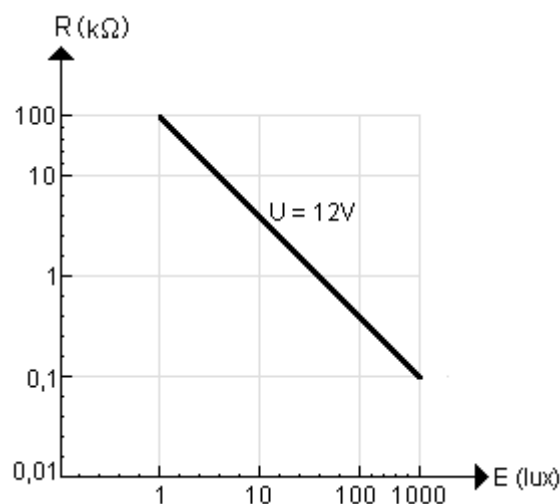
1. tensão que deve ser aplicada na bobina do relê
2. corrente do enrolamento do relê
3. resistência do enrolamento do relê



Dados:  
 $U_B = 12V$   
 $T_{amb} = 25^\circ C$   
 $E = 1.000 \text{ lux}$  (intensidade luminosa)  
 $P = 120 \text{ mW}$

abaixo:

A curva do LDR-03 é mostrada



Solução:

- Pela curva do LDR-03, em 1.000 lux a resistência é de 100Ω

- A potência de perda para esse LDR a 25°C deve ser no máximo de 120mW
- Com  $U_B = 12V$  podemos calcular a corrente:

$$I^2 = \frac{P}{R} = \frac{0,12W}{100\Omega} = \sqrt{0,0012} = 34,64mA$$

- Nestas condições, a queda de tensão no LDR será:

$$V_{LDR} = 34,64mA \cdot 100\Omega = 3,464V$$

- Pelo relê teremos então uma corrente de 34,64mA e uma queda de tensão:

$$12V - 3,464V = 8,536V$$

- A resistência da bobina do relê deverá ser:  $R_{RELE} = \frac{8,536V}{34,64mA} = 246,42\Omega$

Resposta:

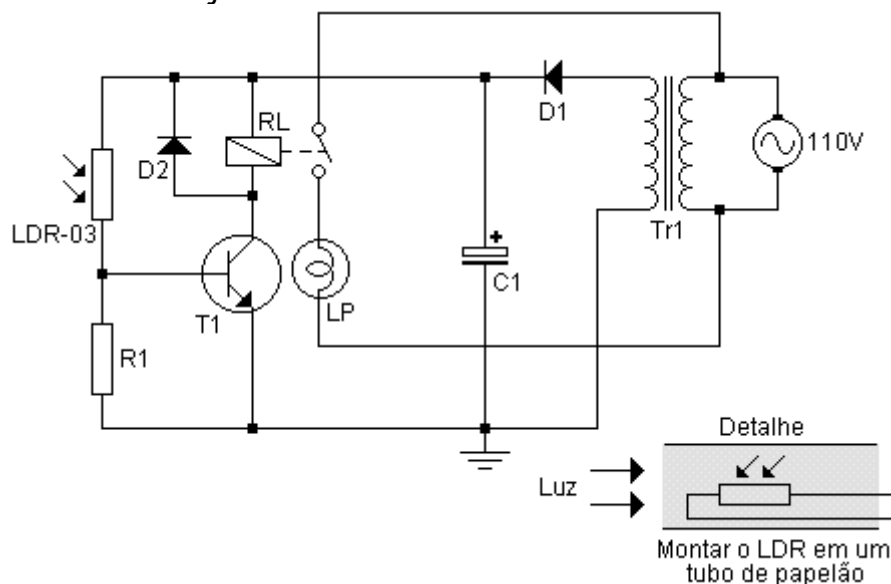
Tensão a ser aplicada na bobina do relê: 8,536V (adotar 9V)

Corrente no enrolamento do relê: 34,64mA (adotar 35mA)

Resistência da bobina (enrolamento do relê): 246,42Ω (adotar 250Ω)

**PROJETO: INDICADOR DE INTERRUPTÃO DE FEIXE LUMINOSO**

O presente projeto é um circuito bem simples, que tem por finalidade fazer acender uma lâmpada (ou acionar qualquer outro dispositivo) quando é interrompido o feixe de luz incidente sobre o LDR. Veja o circuito abaixo.



**Funcionamento:**

- o circuito é alimentado por corrente contínua, proveniente de uma retificação de meia onda com Tr1, D1 e C1.
- O LDR em série com R1 forma uma circuito de polarização da base do transistor, de tal forma que, com o LDR sem iluminação a tensão  $V_{BE}$  seja aproximadamente zero. Como o transistor nestas condições está operando em corte, o relê não liga.

c) Quando ocorrer uma incidência luminosa sobre o LDR, sua resistência diminuirá e o divisor de tensão deverá fornecer uma tensão de polarização  $V_{BE}$  suficiente para levar o transistor na condição de saturação, ligando o relê.

d) O diodo D2 em paralelo com a bobina do relê tem a função de proteger o transistor do efeito de auto-indução<sup>19</sup>, que ocorre quando do desligamento do relê. Nestas condições a auto-indução tendo um sentido contrário, polarizará o diodo diretamente absorvendo-a (lembrar que na polarização direta a resistência de junção do diodo é muito baixa).

Valores típicos do projeto para fins de orientação:

Tr1 = transformador 110V - 12V - 200mA

C1 = capacitor eletrolítico, 470 $\mu$ F / 25V

D1, D2 = diodos 1N4002

T1 = transistor BC547

LP = lâmpada 110V/60W

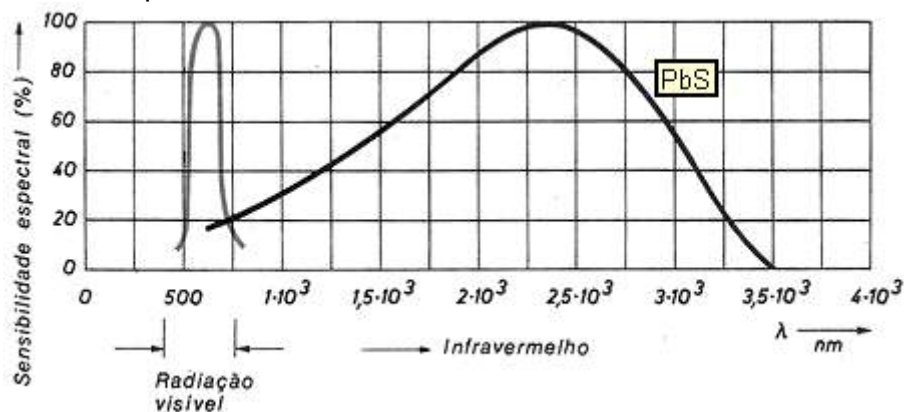
R1 = resistor de 1k $\Omega$  a 10k $\Omega$  (determinar experimentalmente com trimpot)

RL = relê para DC: bobina 330 a 500 $\Omega$  - contatos 5A - 12V

LDR-03 = LDR com resistência no escuro >10k $\Omega$  e resistência no claro (1.000lux) de 50 a 400 $\Omega$ .

### LDRs de sulfeto de chumbo - aplicações

A figura abaixo representa a sensibilidade espectral de um fotorresistor construído a partir de PbS, fornecida pelo fabricante.

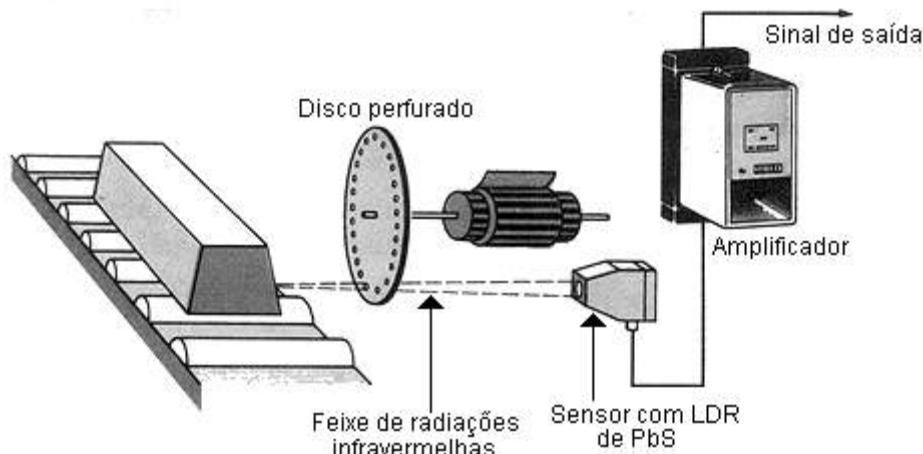


A figura mostra a elevada sensibilidade do componente às radiações infravermelhas, atuando com grande vantagem perante radiações invisíveis de calor.

Um fotorresistor de PbS é muito utilizado para informar o estado rubro do ferro ou aço em fusão, na faixa das radiações infravermelhas, uma vez que, uma material no estado de fusão emite luz contínua.

Uma aplicação para o LDR de PbS é ilustrada na figura abaixo.

<sup>19</sup> O fenômeno da indução eletromagnética em que o campo magnético indutor é gerado pelo próprio circuito onde se estabelece a força eletromotriz induzida.



Neste exemplo uma barra de aço no estado rubro desloca-se por uma esteira. A mesma emite então radiações luminosas muito próximas ao infravermelho que são captadas por um sensor contendo um LDR de PbS.

O sensor recebe essas informações em forma de pulsos provenientes de um cartão perfurado que gira em sincronia com um pequeno motor. Ao perceber os pulsos a presença da barra de aço é registrada e a velocidade da esteira controlada.

#### Controlando a velocidade da esteira:

Suponhamos que a esteira esteja movimentando a barra de aço a uma velocidade de 5 m/s e que a partir do momento em que a barra é registrada pelo sensor essa velocidade deva reduzir-se a 5 cm/s. Qual deve ser a frequência dos pulsos emitidos pelo cartão perfurado, supondo que o circuito atue somente após 3 pulsos claros e 3 pulsos escuros? (*Obs: os pulsos escuros ocorrem por causa da interrupção do feixe*)

Solução:

$$5\text{cm} = 0,05\text{m} \rightarrow 1 \text{ metro} = 100\text{cm}$$

como a velocidade da esteira é de 5m em 1 segundo, temos: 0,05m em  $\frac{1}{100}\text{s}$

Conclui-se então que o circuito deve atuar após  $\frac{1}{100}\text{s}$

Como nesse intervalo de tempo devem ocorrer 3 pulsos claros e 3 pulsos escuros a frequência dos pulsos será:  $\frac{1}{100}\text{s} = 3 \text{ pulsos}$

Portanto:  $s = 300 \text{ pulsos}$ , o que significa que a frequência do cartão perfurado deve ser de 300Hz.

Conclusão: O sensor formado pelo fotorresistor de PbS tem duas funções importantes:

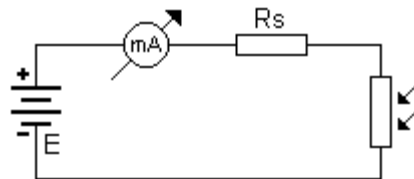
- a) registrar o comprimento do bloco
- b) registrar a temperatura, uma vez que para diferentes temperaturas a sensibilidade espectral é diferenciada.

Alguns valores característicos para LDRs de PbS (notação de manuais)

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| Tensão de alimentação ( $U_B$ )                           | 250V                              |
| Valor máximo da corrente ( $I$ )                          | 0,5mA                             |
| Valor máximo da sensibilidade espectral                   | $\cong 2,5 \cdot 10^3 \text{ nm}$ |
| Resistência no escuro                                     | $\cong 5M\Omega$                  |
| Frequência de impulsos ( $f$ )                            | 800Hz                             |
| Temperatura ambiente ( $t$ ) ou ( $T_{amb}$ )             | 60°C                              |
| Potência de radiação incidente sobre a superfície ( $P$ ) | $10 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ |
| Potência de perdas no fotoresistor ( $P_p$ )              | 100mW                             |
| Área total a ser iluminada ( $A$ )                        | $0,36\text{cm}^2$                 |
| Constante de tempo ( $\tau$ )                             | 75 $\mu\text{s}$                  |

### EXERCÍCIO RESOLVIDO

O circuito abaixo é um fotômetro básico, formado por um LDR de CdS, onde o miliamperímetro tem sua escala calibrada em lux.



Determinar o valor de  $R_s$ , sabendo-se que:

$$\begin{aligned}
 E &= 1,5V \\
 R_i \text{ do mA} &= 10\Omega \\
 R_{LDR} &= 10\Omega \text{ em } 1.000 \text{ lux} \\
 R_{LDR} &= 10k\Omega \text{ em } 10 \text{ lux} \\
 W_{MAX} \text{ (potência máxima do LDR)} &= 30mW
 \end{aligned}$$

Solução:

Devemos calcular a máxima corrente do LDR em 1.000 lux

$$P = R \cdot I^2$$

$$0,03 = 10 \cdot I^2$$

$$I_{LDR} = I_T = \sqrt{\frac{0,03}{10}} = 54,77\text{mA}$$

A resistência total em 1.000 lux deve ser:  $\frac{1,5V}{54,77\text{mA}} = 27,39\Omega$

Escrevendo a equação da malha:  $E - I(R_s + R_i + R_{LDR}) = 0$

Assim:  $R_s = 27,39\Omega - 20\Omega = 7,39\Omega$

Em 10 lux a corrente pelo LDR será:

$$I_{LDR} = \sqrt{\frac{0,03}{10.000 + 17,39}} = 1,73\text{mA}$$

## FOTODIODOS

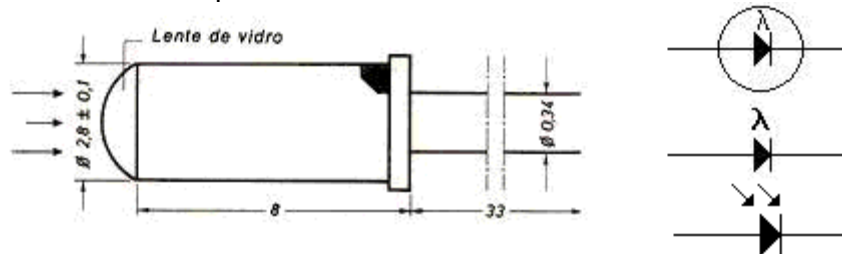
Os fotodiodos são fabricados a partir do germânio e do silício (atualmente o silício prevalece na fabricação desses dispositivos).

Sua sensibilidade luminosa baseia-se no efeito fotoelétrico que neles ocorre, no qual a camada semicondutora modifica o valor de sua resistência no sentido do bloqueio, dependendo da incidência luminosa.

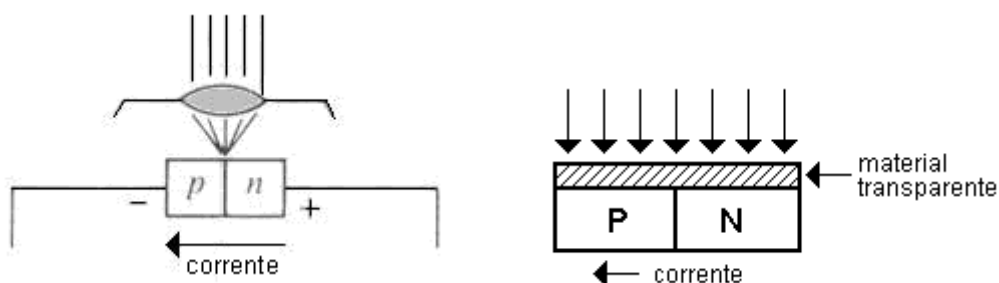
A corrente em um fotodiodo eleva-se diretamente à intensidade da incidência luminosa.

Para que o efeito fotoelétrico seja influenciado o menos possível por fontes externas de luz, o mesmo é envolto de tal forma que a luz atinge a parte fotossensível apenas através de uma pequena abertura. Geralmente são dotados de lentes para concentrar ainda mais o feixe luminoso.

A figura abaixo mostra o aspecto físico de um fotodiodo e símbolos mais utilizados.

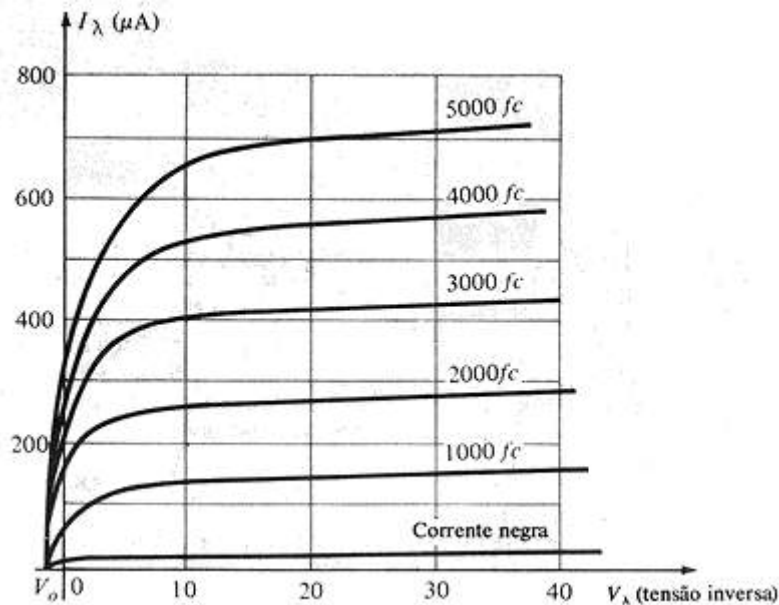


O fotodiodo é um dispositivo de junção *pn* cuja região de operação é limitada pela região de polarização reversa.

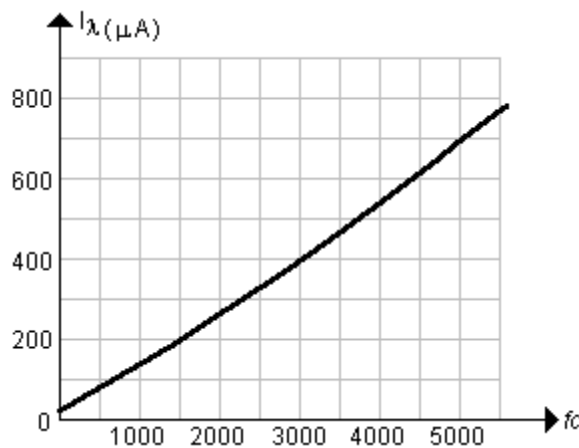


Para uma determinada tensão reversa ( $V_{\lambda}$ ) aplicada, a corrente ( $I_{\lambda}$ ) aumenta à medida que aumenta a intensidade luminosa.

A figura a seguir mostra as curvas características de um fotodiodo.



Para uma dada tensão reversa, observa-se que um incremento da intensidade luminosa aumenta em um incremento quase linear da corrente reversa. A figura abaixo ilustra o gráfico intensidade luminosa  $\times$  intensidade luminosa para uma tensão reversa de 30V.



Nos gráficos acima a intensidade luminosa é dada em *foot-candles* ( $fc$ ).

A intensidade do fluxo luminoso é normalmente medida em  $lm/ft^2$  (*foot-candles*) ou ainda em  $W/m^2$ . Desta forma:

$$lm/ft^2 = fc = 1,609 \cdot 10^{-12} W/m^2 \rightarrow 1 \text{ lúmen equivale a } 1,496 \cdot 10^{-10} W$$

A corrente negra é a corrente que existirá sem nenhuma iluminação aplicada. A corrente somente será zero, se for aplicada uma polarização positiva igual a  $V_0$ .

*Diferenças entre lúmen e lux.*

#### **Lux:**

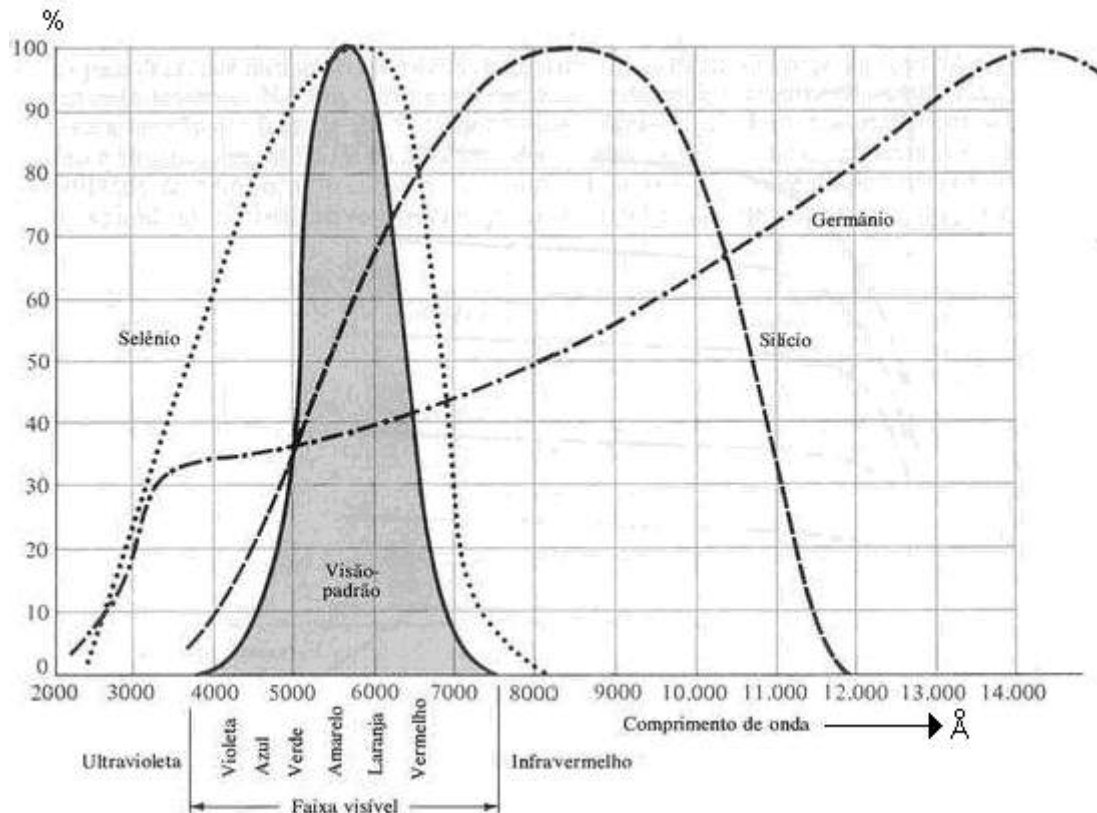
Unidade de medida de iluminamento no sistema internacional de medidas. Corresponde ao iluminamento de uma área igual a  $1m^2$  que recebe na direção normal um fluxo luminoso de um lúmen distribuído de modo uniforme (abrevia-se lx).

#### **Lúmen:**

Unidade de fluxo luminoso definida como uma emissão de uma fonte de intensidade igual a 1 candela<sup>20</sup> no interior de um ângulo sólido de um esferorradiano<sup>21</sup> (abrevia-se: lm).

Em outras palavras, enquanto a unidade de medida "lux" define o iluminamento de uma determinada área, "lúmen" define um fluxo luminoso incidente em uma superfície qualquer.

A figura abaixo ilustra a sensibilidade espectral dos elementos Ge (germânio<sup>22</sup>), Si (silício) e Se (selênio) em comparação à visão humana.



A grande vantagem dos fotodiodos de germânio e silício é que são adequados para locais com temperaturas ambientes elevadas (50°C para o Ge e 120°C para o Si), além de ter dimensões bem reduzidas.

A seguir, as principais características dos fotodiodos.

<sup>20</sup> Candela

Unidade física de intensidade luminosa, igual a 1/60 de centímetro quadrado, da superfície de um radiador perfeito, na temperatura da solidificação da platina, 1.772°C. Adotada em 1948, com base na X Conferência Internacional de Pesos e Medidas.

<sup>21</sup> Esferorradiano

Unidade de medida de ângulo sólido, igual ao ângulo sólido, com vértice no centro de uma esfera, que subtende na superfície desta esfera uma área medida pelo quadrado do raio da esfera.

<sup>22</sup> Germânio

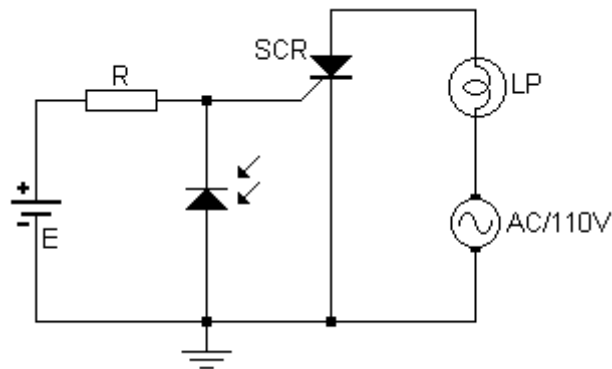
Elemento de número atômico 32, cristalino, cinza-metálico, semiconductor com importante emprego na manufatura de circuitos transistorizados [símb.: Ge].



| Tipo de fotodiodo | Temp. de operação (t) | Tensão de alimentação (U <sub>B</sub> ) | Frequência limite (f) | Corrente no escuro (I) | Potência de perda (P) | Máxima sensibilidade espectral |
|-------------------|-----------------------|---|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Ge                | 50°C                  | 30V                                     | 50kHz                 | 15μA                   | 30mW                  | 1,5 . 10 <sup>3</sup> nm       |
| Si                | 120°C                 | 30V                                     | 35kHz                 | 2μA                    | 100mW                 | 1,1 . 10 <sup>3</sup> nm       |

### Circuitos com fotodiodos

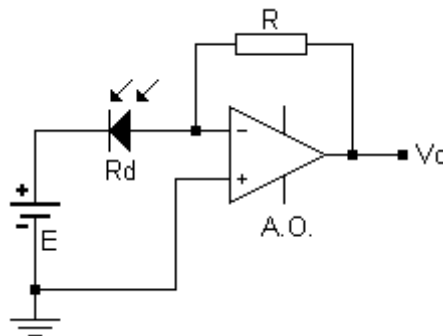
Embora existam uma infinidade de circuitos que empregam fotodiodos, uma das aplicações mais simples e muito utilizada é como uma chave eletrônica, conforme mostra o circuito abaixo.



A carga é uma lâmpada que deve acender quando o ambiente escurecer. Para isso um fotodiodo é utilizado na entrada de um circuito disparador com SCR<sup>23</sup>.

Enquanto o ambiente estiver claro, a resistência do fotodiodo é baixa e a tensão sobre os seus terminais não é suficiente para disparar o SCR. A partir do momento que o ambiente escurecer, a resistência do fotodiodo aumenta e a tensão nos seus terminais sobre, a ponto de disparar o SCR, acendendo a lâmpada.

Outra aplicação é mostrada na figura abaixo.



O ganho do A.O. (amplificador operacional) é dado por  $A = - \frac{R}{R_d}$ .

A cada nível de iluminação a resistência do dispositivo é diferente, ou seja, quando menor o nível de iluminação maior a resistência  $R_d$ , diminuindo o ganho do circuito e conseqüentemente, menor é a tensão de saída ( $V_o$ ). Quando aumenta o nível de iluminação,  $R_d$  diminui e ocorre um aumento do ganho e da tensão de saída.

<sup>23</sup> SCR - Retificador controlado de silício, muito utilizado como relê eletrônico.

Se na saída do A.O. for colocado um medidor com escala calibrada em lux, teremos construído um medidor de intensidade luminosa.

## DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs)

O diodo emissor de luz - LED (light emitting diode) emite luz quando devidamente energizado ou corretamente polarizado.

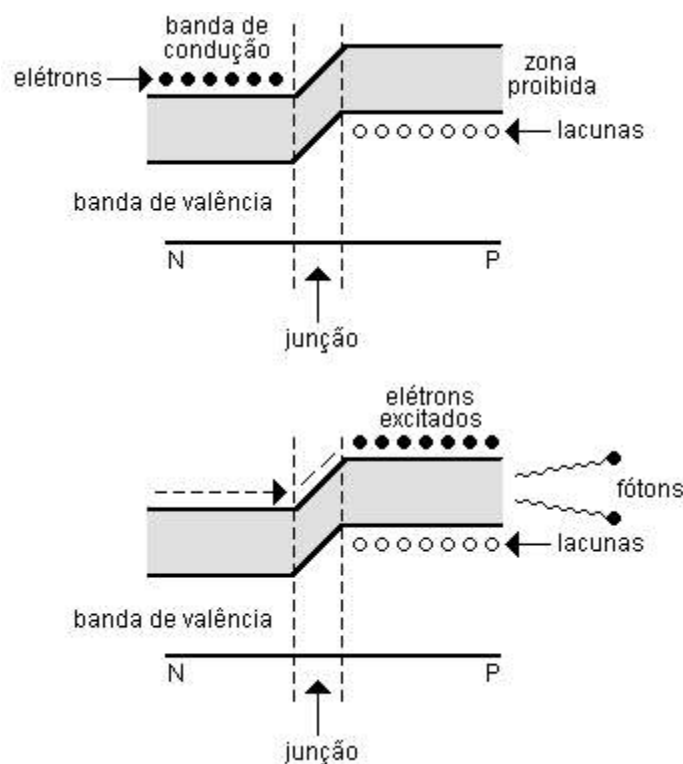
Funcionamento básico: Quando um diodo é diretamente polarizado, ocorre nas proximidades da junção uma recombinação de elétrons e lacunas, sendo que, esta recombinação exige que a energia possuída por um elétron livre seja transferida para outro estado.

Em todas as junções *pn* semicondutoras, uma parte da energia é emitida na forma de calor e outra na forma de fótons. Nas junções formadas por germânio e silício a maior parte da energia é emitida na forma de calor e uma parte insignificante na forma de luz.

Em outros materiais como o fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP), o fosfeto de gálio (GaP) ou simplesmente o arsenieto de gálio (GaAs) a luz emitida é suficiente de tal forma a tornar-se bastante visível.

O processo de emissão de luz por aplicação de uma fonte elétrica de energia em uma junção *pn* é chamado eletroluminescência.

Estrutura Básica: Basicamente a estrutura é idêntica a dos diodos de junção convencionais. A figura abaixo mostra o que ocorre numa estrutura formada por uma junção *pn* de GaAsP.

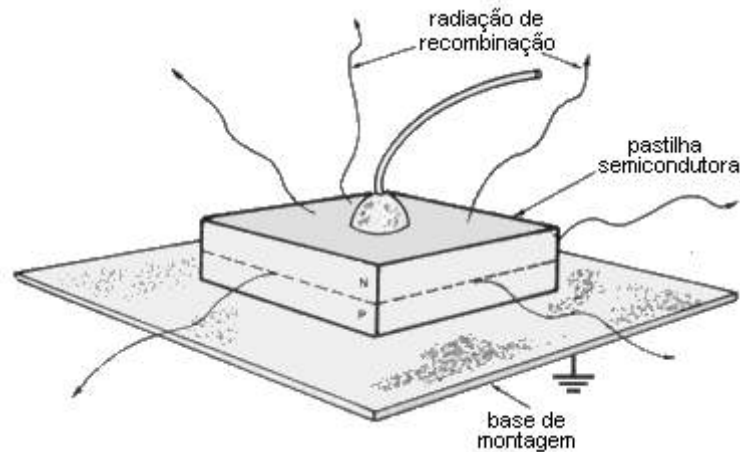


1 - Quando o LED é ligado a uma fonte de corrente os elétrons são introduzidos na região N.

2 - Para cruzar a barreira de potencial formada pela junção, eles são transferidos para a banda de condução.

3 - Após a passagem pela junção os elétrons caem de volta para as lacunas na banda de valência e liberam sua energia excedente na forma de fótons (radiação de recombinação).

A figura abaixo ilustra a estrutura básica de um diodo LED fabricado com tecnologia planar.

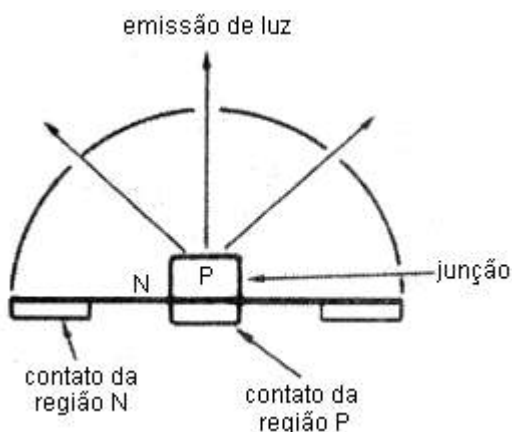


1 - Tipicamente consistem de uma pastilha semicondutora P, com uma camada difundida tipo N.

2 - A camada P geralmente é colocada na base metálica pois esta tende a ser menos transparente à radiação.

3 - A princípio pode-se imaginar que a emissão de luz se dá mais via camada N, no entanto, a radiação gerada na junção pode ser emitida por todas as partes do diodo não bloqueadas.

4 - Geralmente a base metálica é reflexiva para melhor aproveitamento da luz gerada pelo dispositivo.

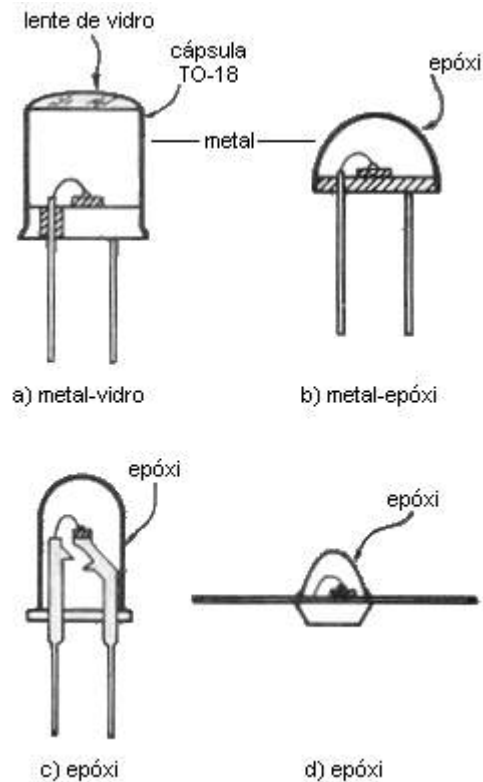


A figura ao lado ilustra a emissão de luz num LED de forma hemisférica.

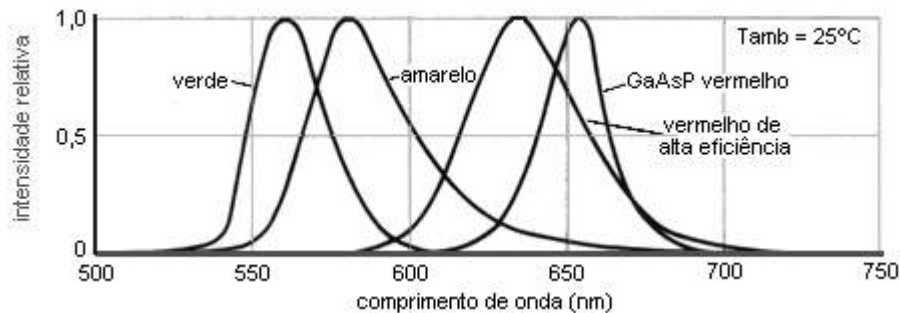
O aspecto físico dos LEDs varia bastante, sendo que a configuração ideal da pastilha semicondutora é a hemisférica, por não conter superfícies que causem perdas por reflexão. No entanto, são muito mais caros em relação às pastilhas fabricadas com tecnologia planar.

Para minimizar o problema as pastilhas "planar" são encapsuladas com material claro com índice de refração intermediário entre o do semicondutor e o ar. O material mais utilizado é o epóxi transparente, pois permite aumentar em quase três vezes a saída de luz se comparado a um diodo LED não encapsulado.

A figura abaixo ilustra algumas configurações físicas de LEDs.



A figura abaixo mostra as curvas de resposta espectral para LEDs de várias cores.



Observa-se no gráfico acima que a banda espectral a partir da intensidade relativa igual a 0,5 é bastante estreita. A largura de banda é uma característica muito importante nos LEDs, pois permite fabricar lâmpadas indicadoras que emitem luz nas cores amarela, âmbar, verde ou vermelha sem o uso de filtros.

Isto representa uma grande vantagem nas comunicações ópticas pelas razões:

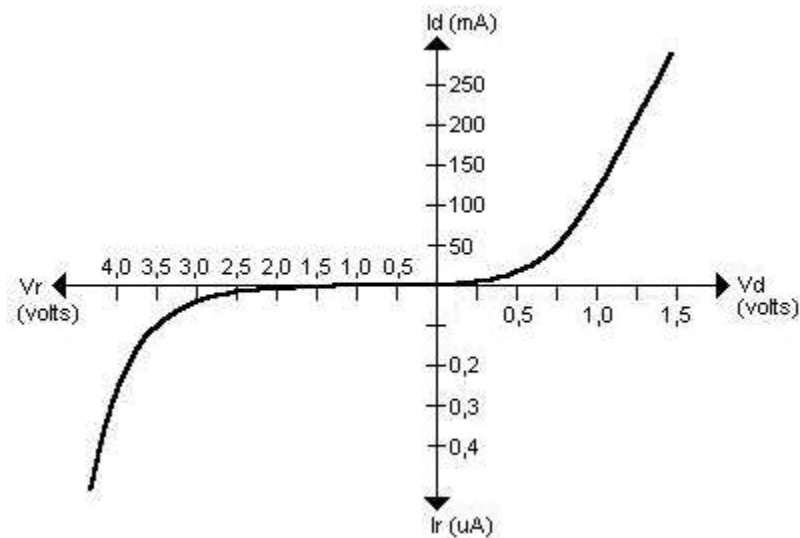
1 - Os LEDs podem ser programados para fornecer uma saída de pico correspondente à sensibilidade dos detectores disponíveis, tornando a detecção mais eficiente em relação aos dispositivos que usam banda larga.

2 - A banda estreita equivale a um filtro que transmite apenas os comprimentos de onda que interessam, ajudando a eliminar interferências externas de fontes de luz.

3 - Os LEDs de GaAsP e GaAs são ideais para comunicações em frequências altas, podendo ser modulados ao redor de 100MHz. Os LEDs fabricados com GaAs compensados com silício podem ser modulados ao redor de 1MHz.

#### **Relação entre tensão, corrente e a saída de luz**

A figura abaixo mostra a curva de tensão x corrente em um LED de GaAs.



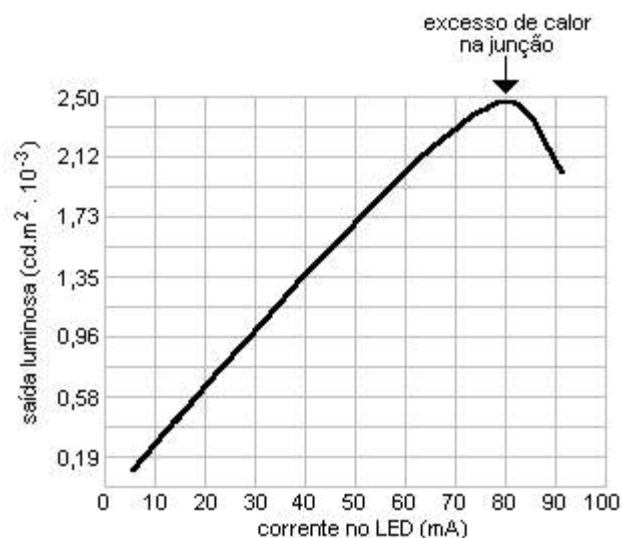
Existe um limite para a tensão reversa e a corrente direta em no LED sem que este seja danificado. O valor típico da corrente direta varia de 50 a 100mA, podendo operar com tensões reversas da ordem de 1,7 a 3,5V.

A saída de luz dos LEDs varia geralmente de forma linear, de acordo com a corrente que por ele circula.

A figura a seguir é típica de um LED emissor de luz vermelha de GaAsP, onde nota-se uma perfeita linearidade da emissão de luz até uma corrente de 80mA.

Acima dessa corrente a emissão começa a declinar em relação ao valor de pico, em virtude do sobreaquecimento da pastilha do mesmo.

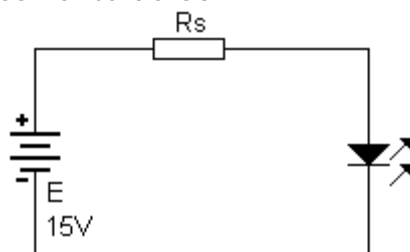
Para contornar esse problema o dispositivo deveria ser instalado num dissipador de calor, que em alguns casos é desaconselhável por fatores econômicos.



O relacionamento entre a corrente no LED e a saída de luz é interessante para algumas aplicações, como por exemplo comunicação por modulação de amplitude da voz humana e potenciômetros ópticos.

Exemplo:

No circuito abaixo deseja-se calcular o valor do resistor  $R_s$  e sua potência para que o LED opere em 1,8V sob uma corrente de 60mA.



Solução:

$$R_s = \frac{E - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{15V - 1,8V}{60mA} = 220\Omega$$

A potência no resistor  $R_s$  será:  $P_{RS} = R \cdot I^2 = 220 \cdot (0,06)^2 = 0,792W$

### Vida útil do LED

Uma grande vantagem dos LEDs é sua longa vida útil, por reunirem todas as vantagens inerentes aos semicondutores:

- 1 - são robustos
- 2 - sua fabricação é fácil e barata
- 3 - não exigem altas tensões de operação
- 4 - trabalham numa ampla faixa de temperaturas

Enquanto lâmpadas piloto incandescentes tem uma vida útil que raramente chega a 10.000 horas, os LEDs podem durar em operação contínua 100.000 horas ou mais.

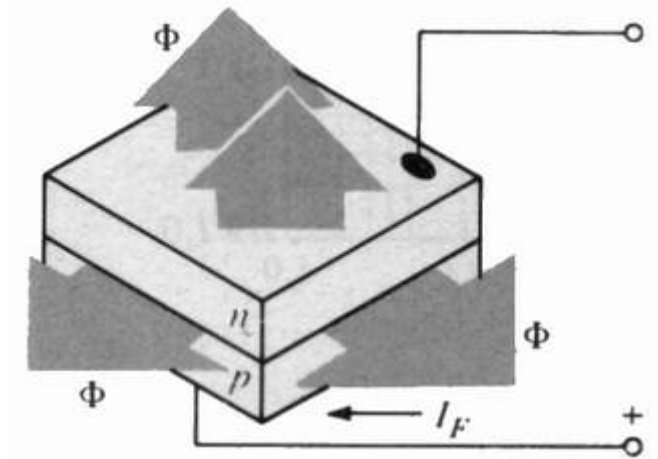
Alguns estudos de aceleração de vida útil indicaram que os LEDs podem operar até por 100 anos antes que sua luminosidade caia pela metade em relação ao valor inicial.

### DIODOS EMISSORES DE INFRAVERMELHO

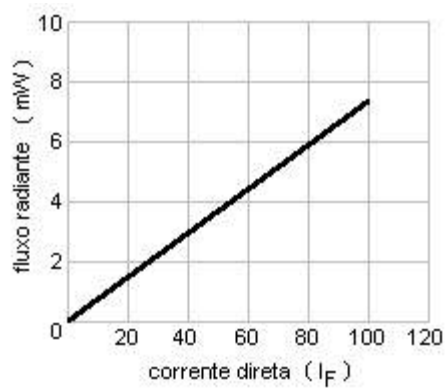
Os diodos emissores de infravermelho (IV) são construídos a partir do arsenieto de gálio (GaAs), que quando diretamente polarizados emitem um feixe de fluxo radiante.

A construção básica é mostrada na figura a seguir e funciona da seguinte forma:

- 1 - quando a junção  $pn$  é diretamente polarizada, os elétrons da região  $n$  se recombinam com as lacunas excedentes da região  $p$ .
- 2 - essa recombinação ocorre em uma região especialmente projetada para tal finalidade, que situa-se entre as regiões  $p$  e  $n$ .
- 3 - ocorre então a radiação de energia em forma de fótons.
- 4 - os fótons gerados são reabsorvidos pela estrutura ou abandonarão a superfície do dispositivo na forma de energia radiante, representada pela letra grega  $\Phi$ .

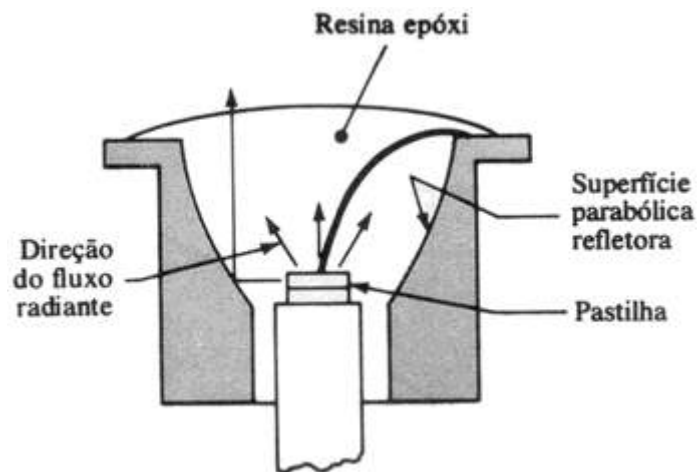


A relação entre a corrente direta e o fluxo radiante é praticamente linear, conforme mostra o gráfico abaixo.

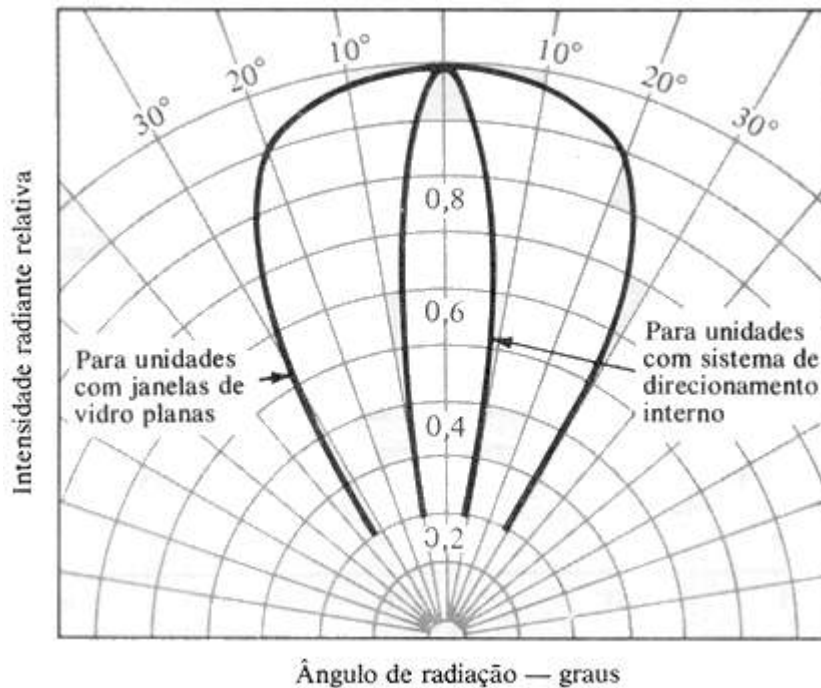


O fluxo radiante é dado em mW e a corrente direta é representada por  $I_F$ .

A construção interna de um dispositivo emissor de IV é mais sofisticada, pois deve ser levado em consideração o ângulo de radiação.



Quando o dispositivo é construído com direcionamento interno o ângulo de radiação é bastante estreito em comparação aos dispositivos construídos sem direcionamento interno, conforme ilustra o gráfico abaixo.



Símbolo



Algumas aplicações:

- leitores de cartões e fitas perfuradas
- codificadores para perfuradores de cartões e fitas de papel
- sistemas de transmissão de dados
- alarmes

#### Referências bibliográficas:

- ELETRÔNICA vols. 1 e 2 - Malvino, Ed. McGraw-Hill - SP  
 MICROELETRÔNICA E DISPOSITIVOS - Horenstein, Ed. Prentice-Hall do Brasil - RJ  
 DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS TEORIA E CIRCUITOS - Boylestad, Nashelsky, Ed. Prentice-Hall do Brasil - RJ  
 ELETRÔNICA APLICADA - L.W. Turner, Hemus Editora Ltda. - SP  
 ELECTRONIC CIRCUITS AND APPLICATIONS - Grobb, Ed. Mc Graw-Hill International