

3 DISPOSITIVOS OPTOELETRÔNICOS

3.1. Dispositivos Optoeletrônicos Básicos

O campo moderno da optoeletrônica é extremamente vasto, abrangendo o estudo dos dispositivos cujo funcionamento envolve fenômenos ópticos e elétricos, como os diversos tipos de células fotossensíveis, geradores de luz, moduladores, displays, etc. Nos restringiremos ao estudo dos dispositivos emissores e detectores de luz.

- **Dispositivos Emissores:**

Estes dispositivos transformam a energia elétrica em energia luminosa. Emitem luz ao serem ativados pela energia elétrica. Nesta classe estão os diodos LED (Light Emitter Diode) e os LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

- **Dispositivos Detectores:**

Estes dispositivos geram um pequeno sinal elétrico ao serem iluminados, transformando, assim, a energia luminosa em energia elétrica.

3.2. Diodo Emissor de Luz (LED)

Os diodos emissores de luz (LED) são aqueles que são disponíveis sob a forma de luzes pequenas coloridas que se vêem nos equipamentos optoeletrônicos, dispositivos de casa, brinquedos, e em muitos outros lugares. Os diodos emissores de luz são diferentes dos bulbos ordinários porque não têm um filamento a quebrar ou se queimar, pelo qual geram pouco calor. (*Rezende, 1996*).

Os diodos emissores de luz são diodos que têm o efeito de produzir luz quando a eletricidade flui através dele. Os diodos têm a propriedade que deixam fluir a corrente (eletricidade) somente em um sentido e não no outro. Nos termos mais simples, um diodo emissor de luz é uma junção de dois tipos diferentes de

materiais semicondutores, esta junção é chamada *junção n-p*. Tanto o material tipo *n* quanto o do tipo *p* são formados pela adição de um número predeterminado de átomos de impureza no material semicondutor alterando significativamente as características do material semicondutor. (Boylestad, 1994).

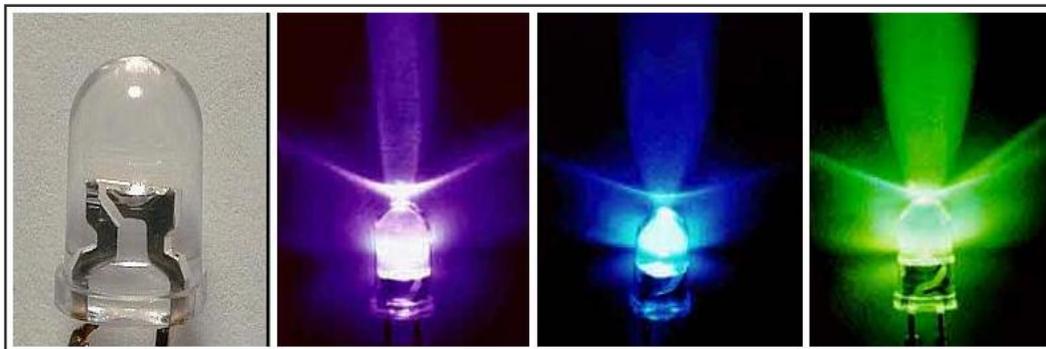


Figura 11- Diodos emissores de luz (LED).

O material tipo *n* contém impurezas dispersas com cinco elétrons de valência, como o antimônio, o arsênio e o fósforo. Estas impurezas são chamadas de átomos doadores, porque contribui com um elétron relativamente “livre” para a estrutura. O material tipo *p* contém impurezas com três elétrons de valência, como o boro, o gálio e o índio. Estas impurezas são chamadas de átomos aceitadores, porque o número de elétrons é insuficiente para completar as ligações covalentes da rede, resultando um buraco que irá aceitar rapidamente um elétron. Os elétrons e os buracos podem se deslocar sob efeito de um campo elétrico e, ao se recombinarem, um fóton ou partícula de luz é produzido. (Boylestad, 1994).

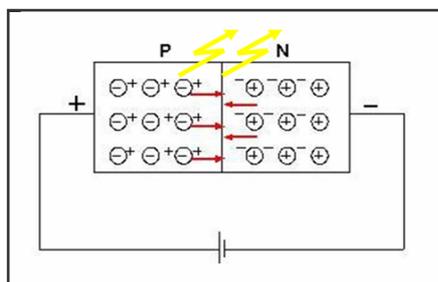


Figura 12- Junção p-n – Polarização direta.

Então o LED é um diodo que emite luz quando energizado. Em qualquer junção *p-n* polarizada diretamente, existe, dentro da estrutura e próximo principalmente da junção, uma recombinação de elétrons e buracos. Esta recombinação exige que a energia do elétron livre não ligado seja transferida

para um outro estado. Em todas as junções *p-n* do semiconductor, parte desta energia será emitida na forma de calor e parte na forma de fótons. No silício e germânio, a maior parte é na forma de calor, e a luz emitida é insignificante. Em outros materiais, como fosfeto de arsenieto de gálio (GaAsP) ou fosfeto de gálio (GaP), o numero de fótons da energia luminosa é suficiente para criar uma fonte de luz bem visível.

Em função do tipo de energia que é liberada podem se distinguir dois tipos de recombinação:

- **Recombinação não radiante:** A maioria da energia de recombinação se libera como energia térmica.
- **Recombinação radiante:** A maioria da energia de recombinação se libera em forma de luz.

3.2.1. Eficácia Quântica Interna (Q_s)

A eficácia quântica interna (Q_s) determina a relação entre o número de *fótons gerados* e o número de portadores (elétrons e buracos) que atravessam a junção *p-n* e que conseguem se recombinar.

$$Q_s = \frac{\textit{fótons gerados}}{\textit{elétrons e buracos recombinados}}$$

Este parâmetro deve ser próximo ao valor 1, porque o número de elétrons e buracos recombinados deve produzir o mesmo número de fótons. O valor da eficácia quântica interna depende das probabilidades relativas dos processos de recombinação radiante e recombinação não radiante, que por sua vez dependem da estrutura da união, do tipo de impurezas, e principalmente do material semiconductor.

3.2.2. Eficácia Quântica Externa (Q_{ext})

No entanto, a obtenção de uma alta eficácia quântica interna não garante que a emissão de fótons do LED seja alta. A radiação gerada na junção é radiada em todas as direções. É essencial que esta radiação gerada no interior do material possa sair dele. Chama-se eficácia quântica externa (Q_{ext}), à relação

entre o número de *fótons emitidos* e o número de portadores (elétrons e buracos) que atravessam a junção *p-n* e conseguem se recombinar.

$$Q_{ext} = \frac{\textit{fótons emitidos}}{\textit{elétrons e buracos recombinados}}$$

As causas para que Q_{ext} seja menor que Q_s são três:

- Somente é útil a luz emitida em direção da superfície.
- Entre a superfície do semicondutor e do ar podem-se dar os fenômenos de reflexão, ficando os fótons presos no interior do material.
- Os fótons podem ser absorvidos pelo material para voltar a formar um par elétron-buraco.

3.2.3. Materiais utilizados nos LED

A cor da luz emitida pelo LED depende unicamente do material e do processo de fabricação (principalmente da dopagem de impurezas).

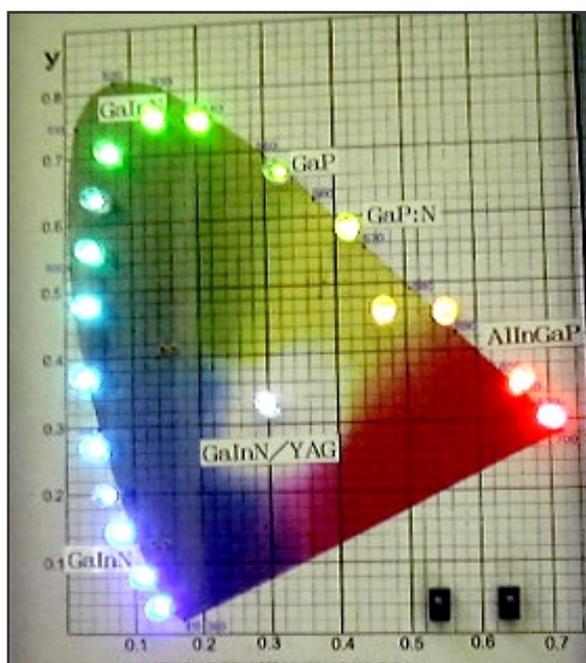


Figura 13- Gama de cores segundo o material semicondutor do LED.

Na tabela adjunta aparecem alguns exemplos de materiais utilizados junto com as cores conseguidas:

Tabela 1 Materiais utilizados na fabricação de alguns LED, comprimento de onda da luz emitida.

MATERIAL	COMPRIMENTO DE ONDA	COR
AsGa	904 nm	Infravermelho
InGaAsP	1300 nm	Infravermelho
AsGaAl	750-850 nm	Vermelho
AsGaP	590 nm	Amarelo
InGaAlP	560 nm	Verde
CSi	480 nm	Azul

3.2.4. Padrões fotométricos do Diodo Emissor de Luz (LED)

Conforme as informações que o NIST (National Institute of Standards and Technology) apresenta na sua página web (www.nist.com), a aplicação dos diodos emissores de luz (LED) está se expandindo rapidamente desde que os LED de intensidade elevada em uma ampla faixa de cores têm sido desenvolvidos e se tornam disponíveis recentemente, e que permitiram a aplicação dos diodos emissores de luz em uma ampla variedade de áreas tais como displays de cor, sinais de tráfego, sinais da estrada (luzes de barricadas), sinalizações e iluminações dos aeroportos, etc.

Devido à aplicação do diodo emissor de luz se está incrementando nestes últimos tempos, as especificações exatas das características do diodo emissor de luz são cada vez mais importantes. Entretanto, existem grandes discrepâncias nas medidas que são relatadas entre fabricantes e usuários do diodo emissor de luz. Os diodos emissores de luz são fontes de luz peculiares e são muito diferentes das lâmpadas comuns nos termos do tamanho físico, da luminosidade, do espectro e da distribuição espacial da intensidade. Assim, uma transferência para o uso das escalas fotométricas das lâmpadas padrões de intensidade luminosa tradicional aos diodos emissores de luz não é uma tarefa

trivial, e grandes incertezas são envolvidas. As características dependentes da temperatura e de uma variedade grande de desenhos ópticos dos diodos emissores de luz fazem mais difícil de reproduzir medidas. Assim, a fim de resolver este problema, o NIST foi solicitado a fornecer diodos emissores de luz padrões calibrados para a intensidade luminosa e o fluxo luminoso e que deve melhorar drasticamente a exatidão das medidas no nível da indústria.

O NIST tem um projeto de desenvolver a tecnologia e os padrões para medir a intensidade luminosa e o fluxo luminoso do diodo emissor de luz, e estabelecer serviços de calibração para os diodos emissores de luz, desse modo melhorando a exatidão e a uniformidade das medidas do diodo emissor.

3.3. Diodos LASER

LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). As aplicações destes diodos são muito diversas e abrangem desde o corte de materiais com feixes de grande energia até a transmissão de dados por fibra óptica.

Os diodos laser são construtivamente diferentes aos diodos LED normais. As características de um diodo laser são:

- **A emissão de luz é dirigida em uma direção só:** Um diodo LED emite fótons em muitas direções. Um diodo laser, ao invés, consegue emitir um feixe guiado da luz, preferencialmente em uma só direção.
- **A emissão de luz laser é monocromática:** Os fótons emitidos por um laser têm comprimentos de onda muito próximos. No entanto, na luz emitida pelos diodos LED, existem fótons com maiores dispersões, o que depende do comprimento de onda.

Devido a estas duas propriedades, com o laser se podem conseguir raios de luz monocromática dirigidos em uma direção determinada. Além disso, também se pode controlar a potência emitida. O laser é um dispositivo ideal para aquelas operações nas que seja necessário emitir energia com precisão.

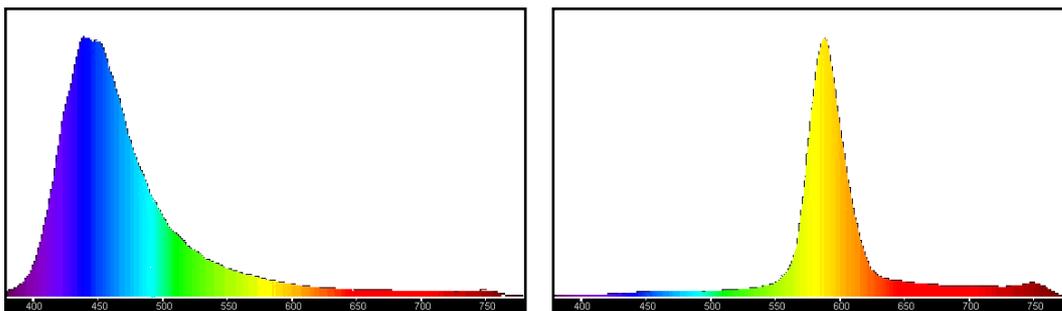


Figura 14- Intensidade da luz em função do comprimento de onda para diodos LED.

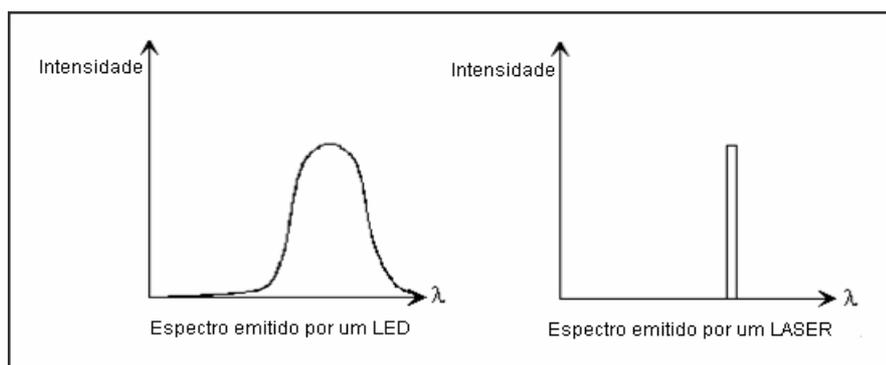


Figura 15- Espectro emitido por um LED e espectro emitido por um LASER.

3.4. Fotodetectores

Os fotodetectores são dispositivos que convertem luz num sinal elétrico. Quando o fluxo luminoso incide sobre o material semicondutor, os fótons podem fornecer aos elétrons da superfície do material energia suficiente para produzir a ruptura das ligações covalentes. Por tanto a ação dos fótons ocasiona a produção de pares elétron-buraco, o que provoca o aumento da condutividade do semicondutor. Este fenômeno é conhecido como fotocondutividade. Entre os dispositivos que funcionam baseados no fenômeno da fotocondutividade temos os fotorresistores, os fotodiodos e os fototransistores. (*Intrator & Mello, 1983*).

Os fotodetectores mais utilizados, atualmente, nas regiões visíveis e infravermelhas próximo são os fotodiodos e os fotorresistores. Estes dispositivos não operam no infravermelho médio ou distante, pois os fótons não têm energia suficiente para produzir pares elétron-buraco. Nessas regiões utilizam-se fotodetectores térmicos, nos quais a absorção da luz produz um aquecimento no elemento sensor e varia sua resistência elétrica (*Rezende, 1996*).

3.4.1. Fotorresistores

Os fotorresistores são constituídos simplesmente pelo material semicondutor: quando o fluxo luminoso incide sobre os mesmos, sua condutividade aumenta ou, falando em termos de resistência, a sua resistividade diminui.

É muito utilizada a caracterização dos fotorresistores pelas iniciais do seu nome em inglês: Light Dependent Resistors. Daí serem chamados os mesmos de LDR, ou fotocondutores ou células fotocondutoras. (*Intrator & Mello, 1983*).

O material da fotorresistência responderá a alguns comprimentos de onda determinados. Por assim dizer, a variação da resistência será máxima para um comprimento de onda determinado. As especificações são dadas pelo fornecedor. Em geral, a variação da resistência está em função do comprimento de onda, pode-se observar na figura seguinte. (*Intrator & Mello, 1983*).

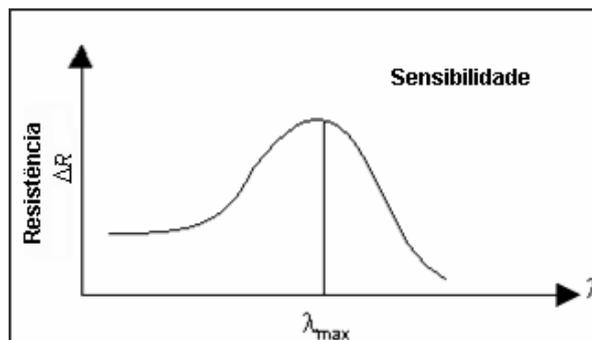


Figura 16- Variação da resistência em função do comprimento de onda da radiação.

3.4.2. Fotodiodos

Os fotodiodos são diodos de junção *p-n*. As características elétricas dos fotodiodos dependem da quantidade de luz que incide sobre a junção, por este motivo precisam de uma janela transparente à luz para que possam entrar os raios luminosos e incidir na junção *p-n*. Os fotodiodos são mais rápidos que as fotorresistências, o que significa que têm um tempo de resposta menor. (*Intrator & Mello, 1983*).

Uma característica importante no funcionamento do fotodiodo denomina-se **corrente escura** (*dark current*), que é a corrente que gera o fotodiodo quando não existe luz incidente.

3.4.3. Fototransistores

Os fototransistores são constituídos basicamente de duas junções havendo uma janela que permite a incidência de luz sobre a junção base-emissor. Isto aumenta a condutividade deste diodo base-emissor, com o conseqüente aumento da corrente do coletor. (Intrator & Mello, 1983).

A sensibilidade de um fototransistor é superior à de um fotodiodo, já que a pequena corrente fotogerada é multiplicada pelo ganho do transistor. (Intrator & Mello, 1983; Millman, 1981).

3.5. Características dos dispositivos fotossensíveis

Os dispositivos fotossensíveis apresentam três importantes características, que são a resposta espectral, a sensibilidade e a resposta em frequência. (Intrator & Mello, 1983).

3.5.1. Resposta Espectral

Resposta espectral é o comportamento que apresenta o dispositivo quando um fluxo de energia radiante de diferentes frequências incide sobre um dispositivo fotossensível. Esta informação é fornecida pelo fabricante que, na maioria dos casos, fornece uma curva relacionando a sensibilidade relativa com o comprimento de onda de luz utilizada.

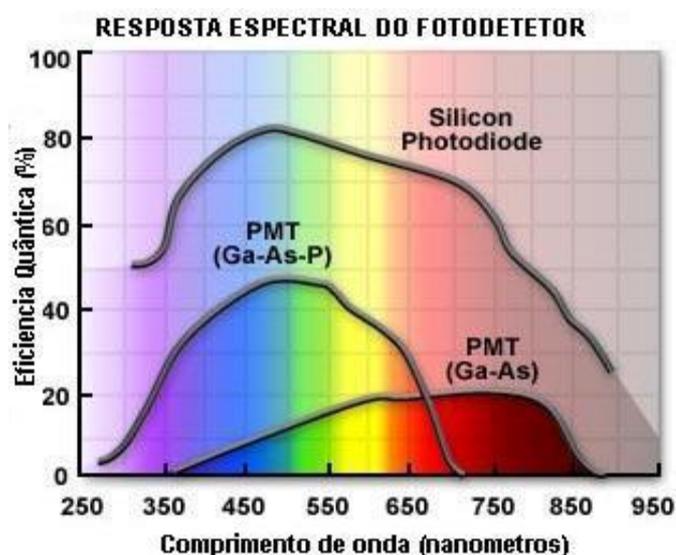


Figura 17- Resposta espectral do fotodetector. Comprimento de onda x Eficiência quântica.

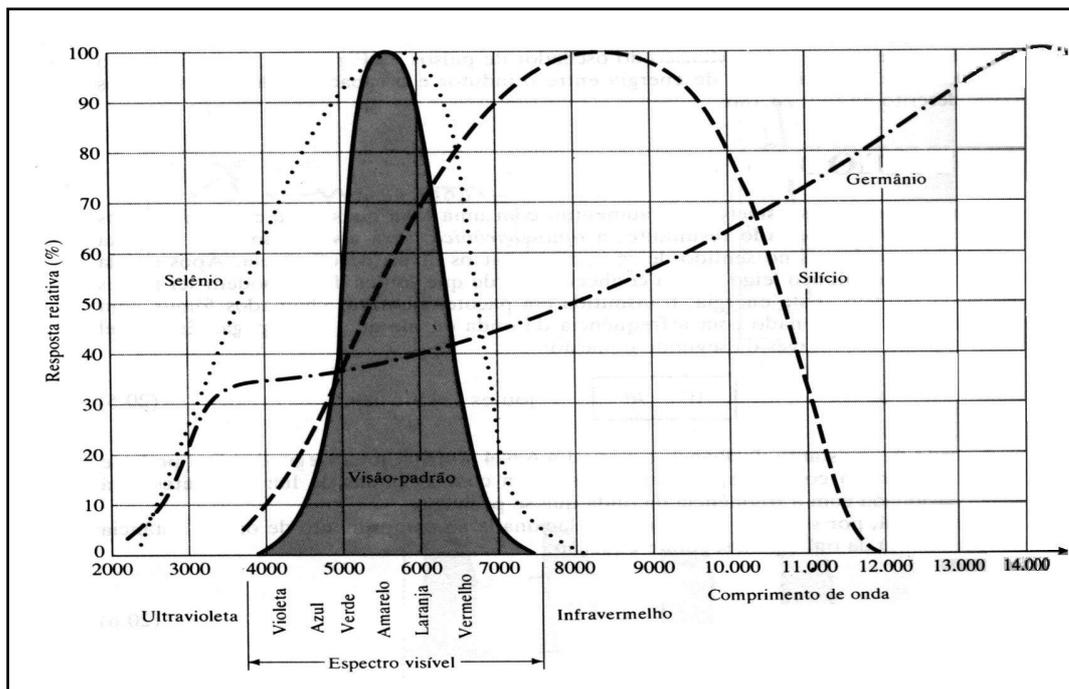


Figura 18- Resposta espectral relativa para Si, Ge e Se, comparada ao olho humano.

3.5.2. Sensibilidade

Entende-se por sensibilidade do dispositivo fotossensível a resposta que apresentará se um fluxo luminoso (com uma frequência determinada) incidir no dispositivo fotossensível e se faz variar o iluminamento. Por exemplo, ao se dizer que a sensibilidade de um fotodiodo é de 10microampères/lux, estamos dizendo que a variação de 1lux no iluminamento produz uma variação de 10microampères na corrente de saturação do diodo.

O fluxo luminoso é expresso em lúmens. A grandeza iluminamento é medida em termos da sua unidade que se chama lux. Iluminamento é o fluxo luminoso que incide em uma área de $1m^2$, assim $1lux=lúmen/m^2$.

Todo corpo que está emitindo radiações o faz numa gama de comprimentos de onda e, portanto, na hora de medir a sensibilidade do dispositivo é importante saber que comprimentos de onda a lâmpada utilizada está emitindo, pois as radiações emitidas vão sensibilizar o dispositivo fotossensível, com maior ou menor intensidade.

O único meio de caracterizar a fonte utilizada é indicar a sua temperatura de cor, isso significa que, na temperatura de cor, o corpo emite aproximadamente as mesmas radiações e com as mesmas intensidades que o corpo negro a esta temperatura. Portanto se alguém tenta medir a sensibilidade

de um dispositivo fotossensível, pode encontrar resultados diferentes apenas por estar usando uma fonte de diferente temperatura de cor que a utilizada pelo fabricante quando realizou o teste.

Assim temos como exemplo:

- Diodo OAP12- sensibilidade medida por meio de uma lâmpada incandescente de tungstênio de temperatura de cor de 2500K: maior que 5 microampères para 100 lux ($5\mu\text{A}/100\text{lux}$).
- Transistor OCP70 sensibilidade medida por meio de uma fonte de luz de temperatura de cor igual a 2700K: maior que 130mA/lúmen para uma área sensível de 7mm^2 .

A sensibilidade pode ser indicada em termos do iluminamento, isto é, expressar a variação da corrente para uma variação determinada do iluminamento (exemplo $5\mu\text{A}$ para cada 100 lux). A sensibilidade também pode ser expressa, em termos do fluxo luminoso (lúmen); entretanto, sempre que é utilizado o fluxo luminoso, é indicada a área sensível (no caso 7mm^2).

3.5.3.

Resposta em freqüência

Se incidir o fluxo luminoso ϕ_A ou o fluxo luminoso ϕ_B sobre um dispositivo fotossensível, à medida que a freqüência aumenta, a sensibilidade do dispositivo vai diminuindo, existindo uma freqüência em que a sensibilidade cai 3db comparada com a sensibilidade para baixas freqüências. Esta freqüência é chamada de freqüência de corte do dispositivo fotossensível.

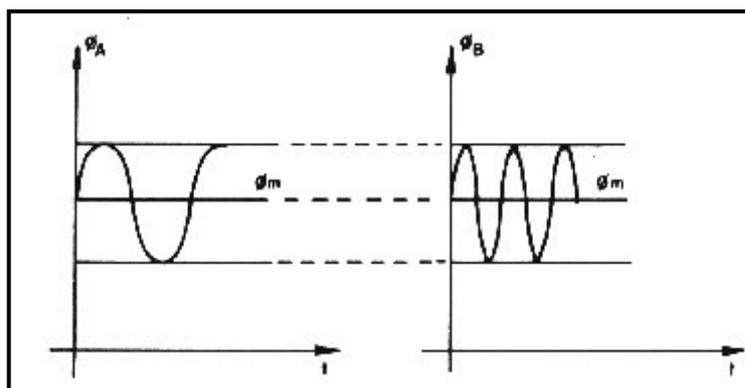


Figura 19- Resposta em freqüência.

3.6. Unidades Ópticas

As seguintes definições de algumas unidades ópticas foram extraídas do quadro Geral de Unidades de Medida do INMETRO.

Tabela 2- Unidades ópticas

Grandeza	Nome	Símbolo	Definição
Intensidade Luminosa	candela	cd	Intensidade luminosa, numa direção dada e de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} hertz e cuja intensidade energética naquela direção é 1/683 watt por esterradiano
Fluxo luminoso	lúmen	lm	Fluxo luminoso emitido por uma fonte puntiforme em invariável de uma candela, de mesmo valor em todas direções, no interior de um ângulo sólido de 1 esterradiano.
Iluminamento	lux	lx	Iluminamento de uma superfície plana de 1 metro quadrado de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de 1 lúmen, uniformemente distribuído.
Luminância	Candela por metro quadrado	cd/m ²	Luminância de uma fonte com 1 metro quadrado de área e com intensidade luminosa de 1 candela
Eficiência luminosa	Lúmen por watt	lm/W	Eficiência luminosa de uma fonte que consome 1 watt para cada lúmen emitido

O Fluxo luminoso é em geral, medido em lumens (lm) ou watts (W). As duas unidades são relacionadas por

$$1lm = 1,496 \times 10^{-10} W$$