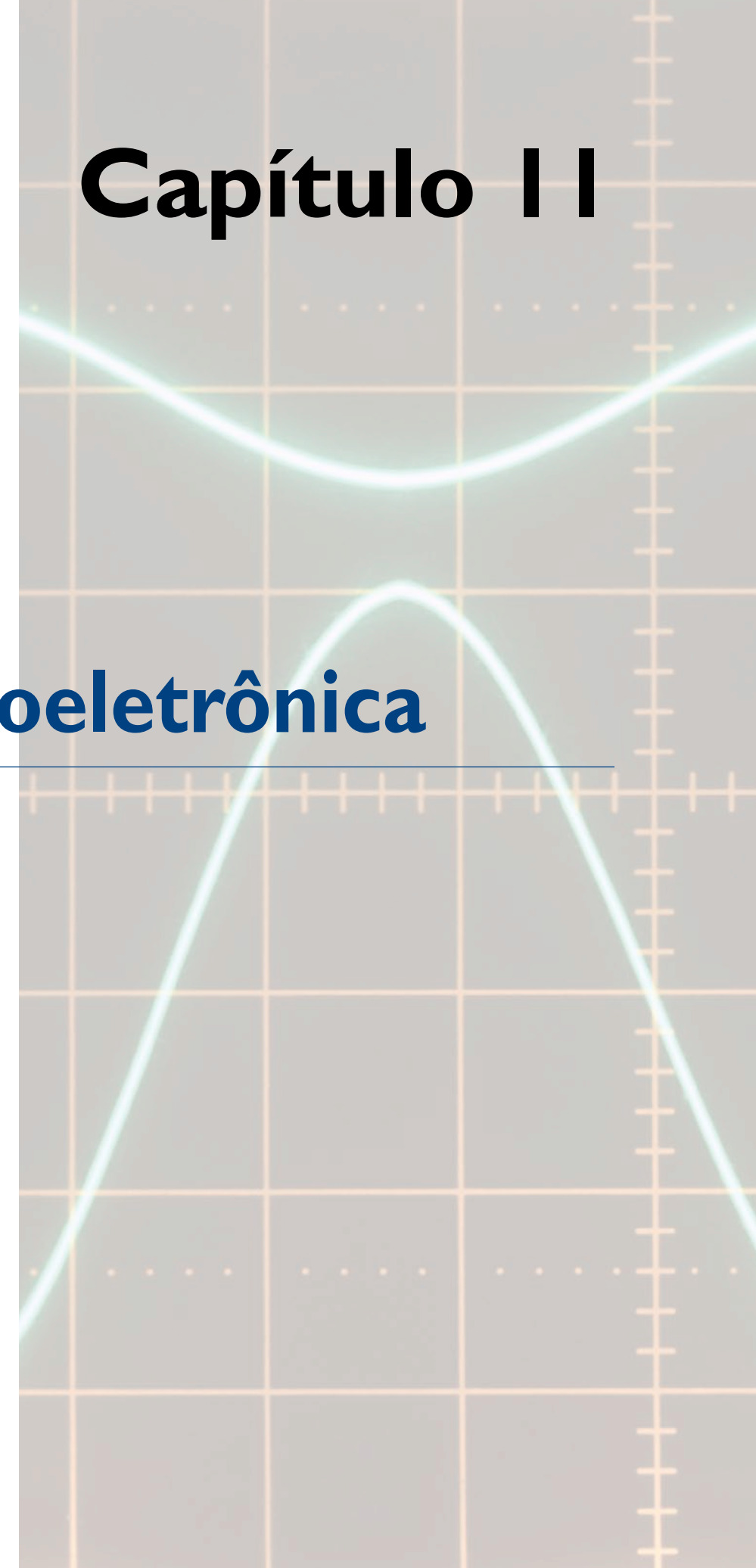


Capítulo I I

Optoeletrônica



Este capítulo apresenta conceitos básicos dos dispositivos semicondutores usados em optoeletrônica. De modo geral, os dispositivos optoeletrônicos podem ser divididos em duas grandes áreas: os sensores e os emissores (há também dispositivos de acoplamento, que são o resultado da combinação de sensores e emissores).

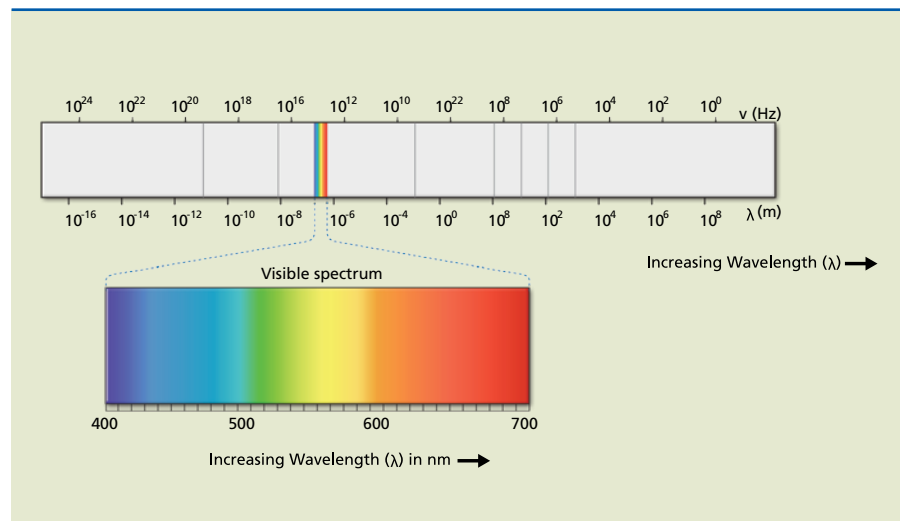
Um dispositivo optoeletrônico:

1. Detecta e/ou responde a um sinal de luz.
2. Emite ou modifica luz coerente ou não coerente.
3. Utiliza luz para seu funcionamento interno.

A palavra “optoeletrônica” é a união de “óptica” e “eletrônica”, ou seja, refere-se a dispositivos eletrônicos sensíveis à ação da luz. Mas qual é a definição física de luz? Luz é a energia radiante transmitida através de ondas eletromagnéticas de comprimento entre 0,3 μm e 30 μm. Nessa faixa, chamada de espectro eletromagnético, encontra-se a luz visível ao olho humano (0,38 μm a 0,78 μm), e as radiações ultravioleta (UV) e infravermelha (IR) ocupam as extremidades.

Figura 11.1

Espectro eletromagnético com destaque para a parte visível.



A figura 11.1 mostra o espectro eletromagnético para todos os tipos de onda, com destaque para a radiação luminosa visível. Em uma extremidade localiza-se o vermelho, com 700 nm de comprimento de onda, e na outra, o violeta, com

400 nm. Radiação com comprimento logo acima de 700 nm é chamada de infravermelha (*infrared*, IR) e com comprimento abaixo de 400 nm, ultravioleta, não mais visível.

11.1 Sensores

Sensor é um dispositivo que apresenta uma variação (reversível) – por exemplo, em sua resistência – ao ser exposto à radiação luminosa.

11.1.1 Fotorresistor

É um sensor de luz que altera sua resistência ao ser exposto à luz. O LDR, estudado no capítulo anterior, é o dispositivo mais conhecido.

A figura 11.2 mostra o aspecto físico, os símbolos e a curva de resposta espectral de um LDR padrão. Observe que a sensibilidade é mais alta ao redor do comprimento de onda 550 nm.

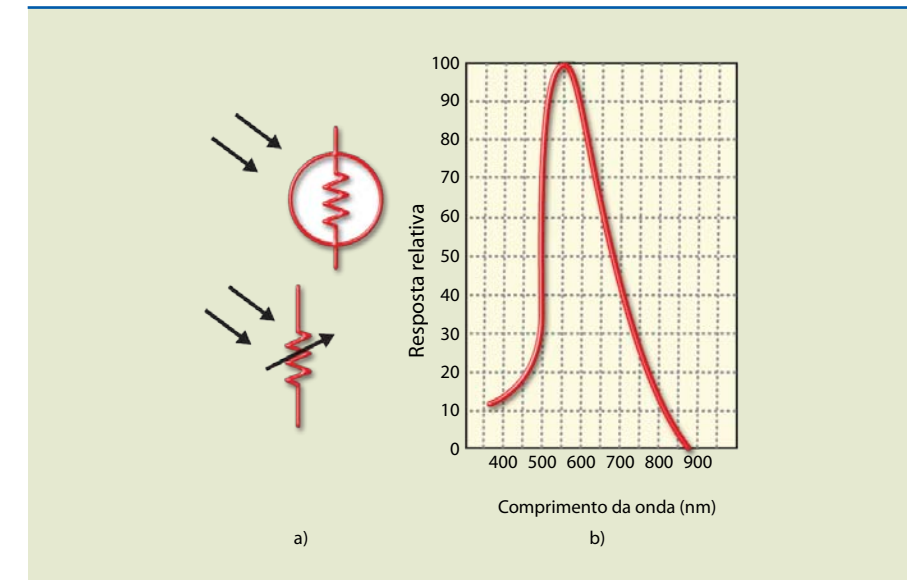


Figura 11.2

LDR:
a) símbolos e
b) curva de resposta espectral.

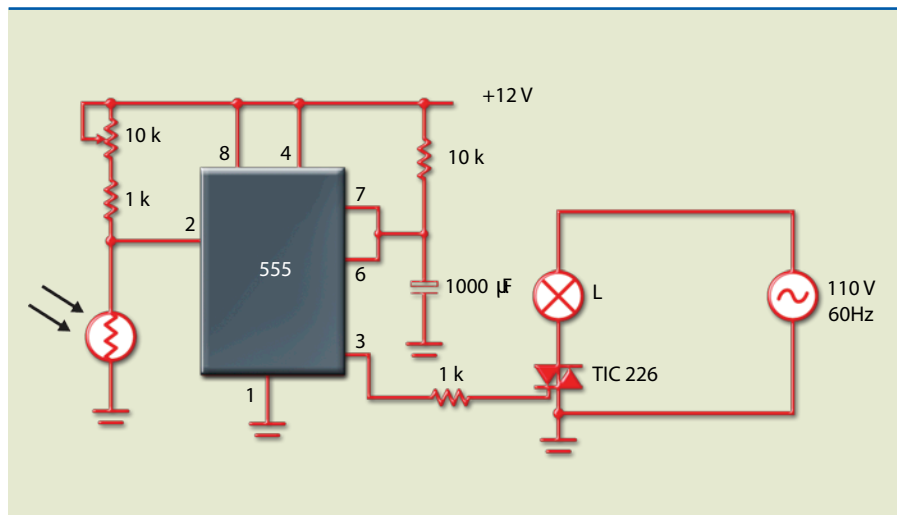
O LDR é usado em circuitos de proteção, alarmes, instrumentos de medida de luminosidade e nas situações em que for necessário detectar variação ou presença de luz no espectro visível ou fora dele.

As figuras a seguir apresentam alguns exemplos de circuitos com aplicação de LDR. A figura 11.3 mostra um sensor de presença de luz com temporizador. Na ausência de luz, a resistência do dispositivo é elevada e, portanto, a tensão no pino 2 deve ser maior que 4 V (um terço de 12 V), valor que pode ser obtido com a regulagem do potenciômetro. Quando a luz incide no LDR, sua resistência diminui e a tensão no pino 2 reduz para abaixo de 4 V, disparando o LM555, que, por estar configurado como monoestável, liga a lâmpada durante determinado tempo, por meio do capacitor de 1 000 μF e do resistor de 10 kΩ.



Figura 11.3

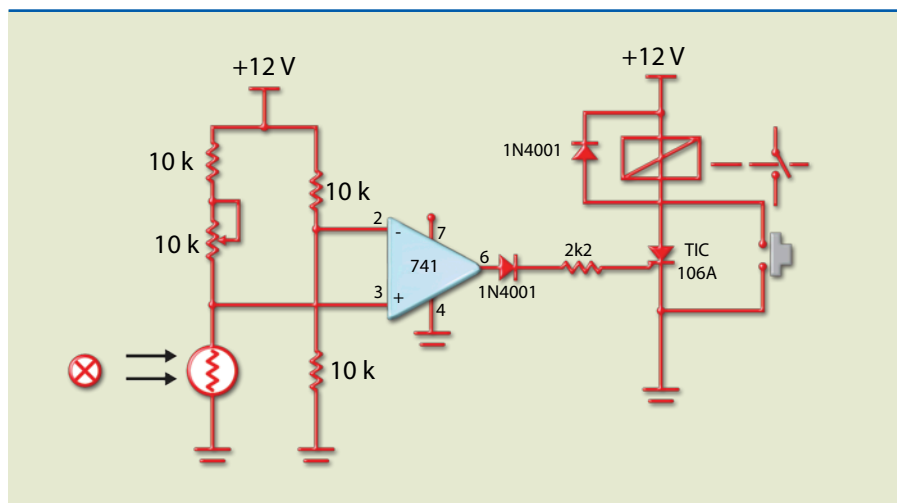
Sensor de presença de luz com temporizador.



O circuito da figura 11.4 é de um alarme com trava. Sua base é um amplificador operacional usado como comparador de nível, que, por causa de seu altíssimo ganho, torna o circuito extremamente sensível. Nesse circuito, o LDR é iluminado por uma fonte de luz. Se o potenciômetro estiver ajustado para valores de tensão na entrada não inversora menores que 6 V, a saída do AO é baixa (próxima de zero), mantendo o SCR cortado. Quando a iluminação sobre o LDR é interrompida, mesmo que rapidamente, a tensão no pino 3 fica maior que no pino 2 e a saída do AO eleva próximo a 12 V, disparando o SCR e ligando o relé e o alarme. Mesmo que a luz volte a atingir o LDR, o SCR continuará conduzindo.

Figura 11.4

Alarme com trava.



11.1.2 Fotodiodo

Quando uma junção PN é criada, elétrons livres se deslocam, por difusão, do lado N para o P, e lacunas, do lado P para o N. Na condição de equilíbrio (sem tensão externa), no lado P próximo à junção existem íons negativos, e no lado N, íons positivos (figura 11.5a). O campo elétrico resultante impede que o processo de difusão continue.

Se for aplicada uma tensão externa de maneira a polarizar reversamente a junção, a largura da região de carga espacial (r.c.e.) ou região de depleção aumentará (figura 11.5b).

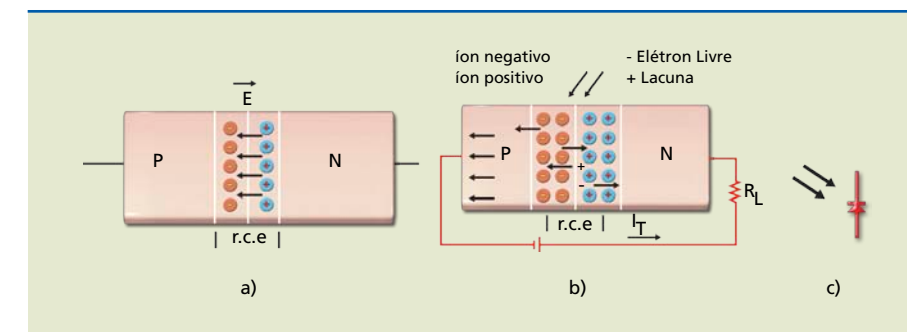


Figura 11.5

Junção PN:
a) em aberto,
b) polarizada reversamente e iluminada,
c) símbolo.

Se a região de carga espacial for iluminada com radiação de comprimento de onda adequada, ligações covalentes serão quebradas (na região de carga espacial existem íons da impureza e átomos de silício), gerando pares elétron-lacuna. O campo elétrico acelerará os elétrons para a região N e as lacunas para a região P, e externamente aparecerá uma corrente I_T igual a:

$$I_T = I_L + I_D \quad (11.1)$$

em que I_L é a corrente gerada pela luz e I_D a corrente reversa de saturação ou corrente no escuro (*dark*).

Tipicamente, os valores para dispositivos construídos de silício são I_L da ordem de 10 μ A e I_D da ordem de 1 nA.

A figura 11.6a mostra o circuito com o fotodiodo polarizado reversamente e a figura 11.6b, as curvas características em função da intensidade luminosa e a reta de carga. As interseções da reta com as curvas de intensidade luminosa determinam os pontos de operação. Em intensidade luminosa alta, o fotodiodo é praticamente um curto-circuito (o ponto de operação está localizado na parte superior da reta). Em luminosidade baixa (ambiente escuro), a corrente é praticamente zero; toda a tensão da fonte estará no diodo.

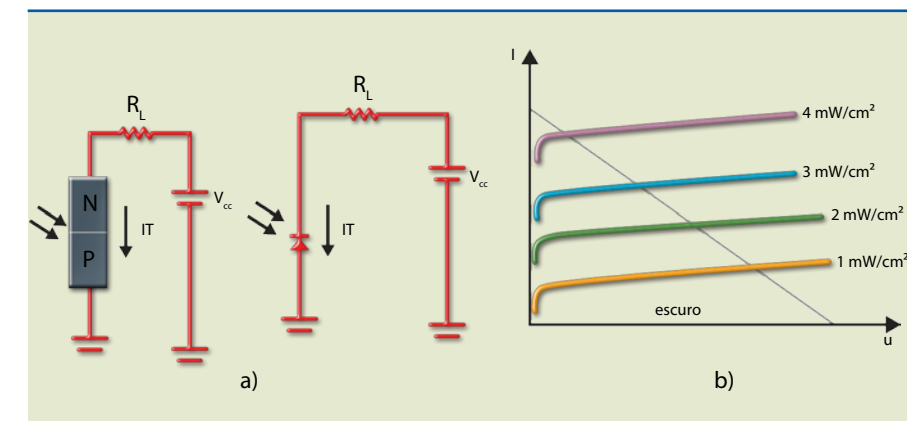


Figura 11.6

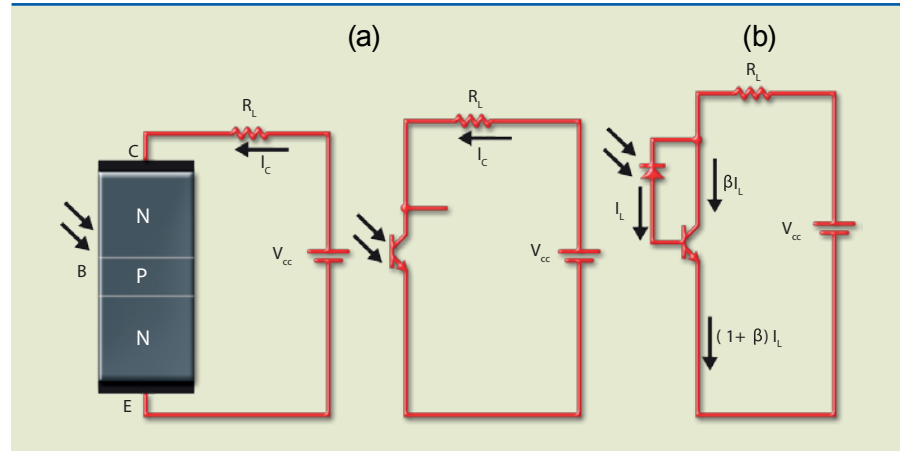
a) Circuito com fotodiodo polarizado reversamente e
b) curva característica.



11.1.3 Fototransistor

O fototransistor funciona exatamente como um transistor, porém sua base não é excitada por corrente externa, e sim por luz (figura 11.7a) – existem fototransistores que permitem a injeção de corrente na base além da luz. Do ponto de vista funcional, um fototransistor pode ser entendido como um transistor comum em cuja base foi colocado um fotodiodo (figura 11.7b).

Figura 11.7
a) Fototransistor e
b) circuito equivalente.



A corrente de coletor é β vezes maior que a corrente de base, isto é, a sensibilidade é β vezes maior, porém a máxima frequência de operação é β vezes menor que a do fotodiodo. A expressão a seguir determina a corrente de coletor:

$$I_c = \beta \cdot I_L = \beta \cdot (I_L + I_D) \quad (11.2)$$

A figura 11.8 mostra o aspecto físico de um fototransistor; observe que é muito semelhante ao fotodiodo.

Figura 11.8
Fototransistor:
aspecto físico.



O fotodarlington é basicamente um transistor comum ligado a um fototransistor na configuração Darlington (figura 11.9). Apresenta ganho elevado, porém a resposta em frequência é bem menor que do fototransistor.

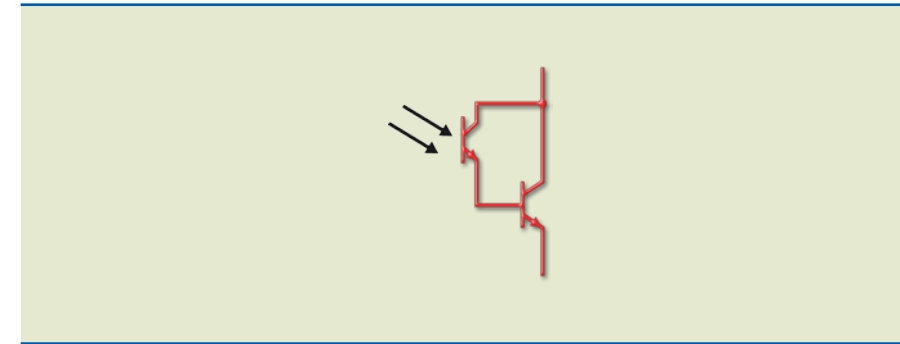


Figura 11.9
Fotodarlington: símbolo.

11.1.4 Célula solar

Como vimos, a incidência de luz sobre uma junção PN gera pares elétron-lacuna; então, os elétrons movimentam-se para o lado P e as lacunas, para o lado N, aparecendo entre as extremidades da junção uma tensão. Se não existir circuito externo, a tensão terá valor V_{OC} (*open circuit*, tensão em vazio). Se ligarmos uma resistência aos terminais do dispositivo, uma corrente será fornecida ao circuito externo.

O dispositivo assim construído chama-se célula fotovoltaica, quando não se especifica a radiação incidente; quando a radiação incidente é a solar, o dispositivo recebe o nome de célula solar (figura 11.10).

O material básico usado na construção de uma célula fotovoltaica é o silício em uma das três formas: monocristalino, policristalino ou amorfo.

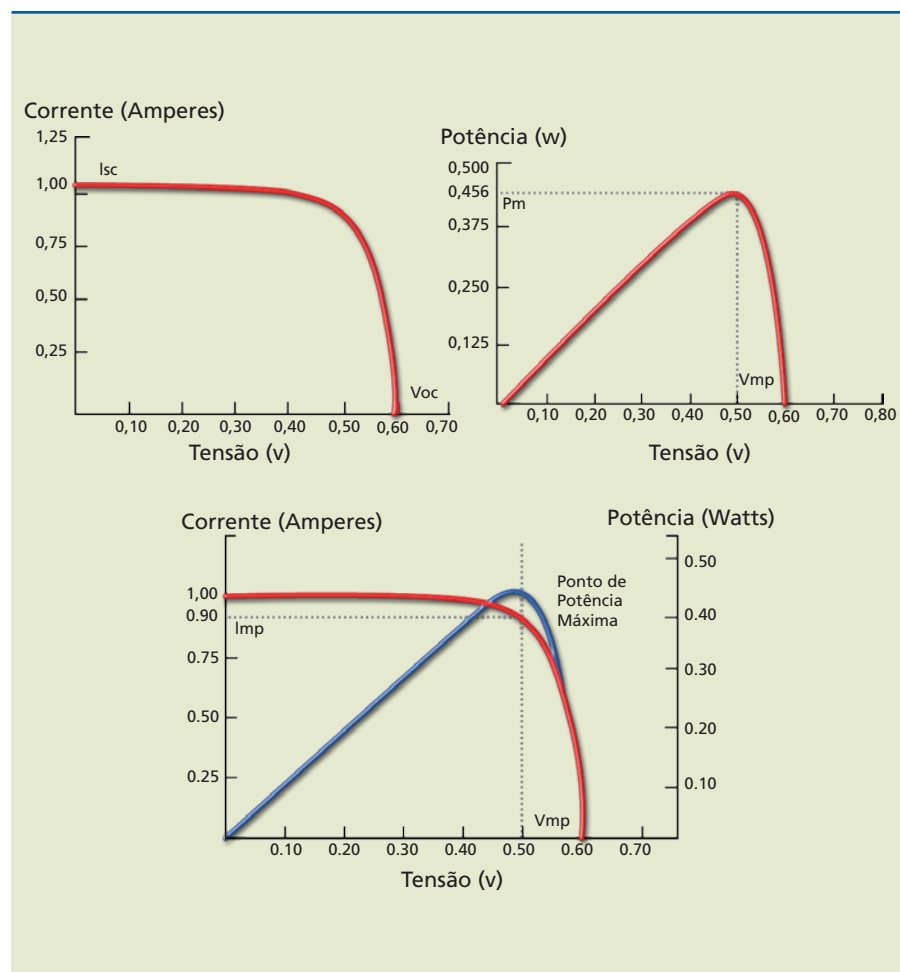
Figura 11.10
Célula solar.



A figura 11.11 apresenta gráficos referentes à potência e à corrente em função da tensão. Neles podemos observar as curvas características de uma célula solar e identificar alguns valores, como a corrente de curto-circuito (I_{SC}) e a tensão em vazio (V_{OC}).

Figura 11.11

Curvas características de uma célula solar – radiação incidente de $1\,000\text{ W/m}^2$.



As células solares são usadas para transformar a energia solar em energia elétrica. Como a tensão que uma única célula pode produzir é muito baixa (tipicamente $V_{OC} = 0,6\text{ V}$), as células são associadas em série e em paralelo para aumentar a capacidade de corrente. Por esse motivo, um painel solar é constituído de várias células.

As principais aplicações dos painéis solares são:

- Equipamentos eletrônicos de estações remotas de transmissão.
- Carregadores de bateria.
- Iluminação residencial e pública.
- Alimentação de relógios e calculadoras.
- Satélites de comunicação.
- Bombas hidráulicas para irrigação.
- Locais de difícil acesso à rede elétrica.



Figura 11.12

Exemplos de painéis solares.

11.2 Emissores

São dispositivos que emitem luz ao serem percorridos por uma corrente elétrica. Isso ocorre quando uma junção PN, polarizada diretamente, é percorrida por uma corrente de valor adequado e uma radiação luminosa é emitida. O dispositivo assim construído é chamado de LED (*light emitting diode*, diodo emissor de luz).

O LED é uma junção PN; portanto, tem algumas características elétricas do diodo, como: apresenta queda de tensão quando está conduzindo (de $1,5\text{ V}$ a 2 V , dependendo da cor da radiação), possui máxima tensão reversa (em geral, pequena) e conduz corrente em apenas um sentido. A figura 11.13 mostra o símbolo e exemplos de LEDs comerciais. A identificação dos terminais (ânodo e cátodo) costuma ser feita de duas maneiras: pela diferença de tamanho entre os terminais, sendo o ânodo maior, ou por meio de um chanfro, que identifica o cátodo.

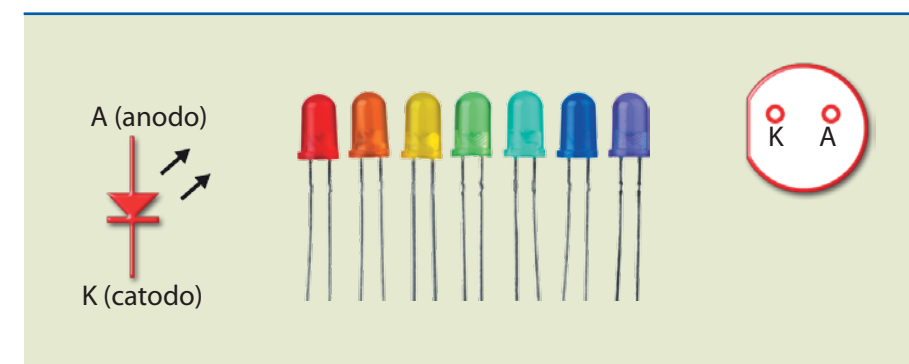


Figura 11.13

Símbolo e exemplos de diodos emissores de luz.

O tamanho do LED (os maiores têm 10 mm de diâmetro e os menores, 3 mm) e a cor determinam a intensidade da corrente que ele deve consumir. Quanto maior a corrente, maior a luminosidade; excesso de corrente pode danificar ou diminuir a vida útil do componente.



Quando os LEDs surgiram, eram usados basicamente em *displays* e como indicadores de ligado/desligado. Hoje, o *display* de LCD os substituiu com vantagens, porém têm sido utilizados em lâmpadas e TVs de alta definição.

A polarização de um LED consiste basicamente em estabelecer uma corrente em seus terminais. Como a queda de tensão pode variar de 1,5 V a 2 V para LEDs da mesma família, se o LED precisar ser trocado, a intensidade da corrente pode sofrer alterações e, conseqüentemente, alterar a luminosidade.

Entre os vários circuitos que polarizam o LED, o da figura 11.14a é o mais usado, por sua simplicidade. Para calcular o valor de R, basta conhecer a corrente e a queda de tensão. Por exemplo, se $V_{LED} = 2\text{ V}$ e a intensidade da corrente é de 20 mA, então o valor de R deve ser de:

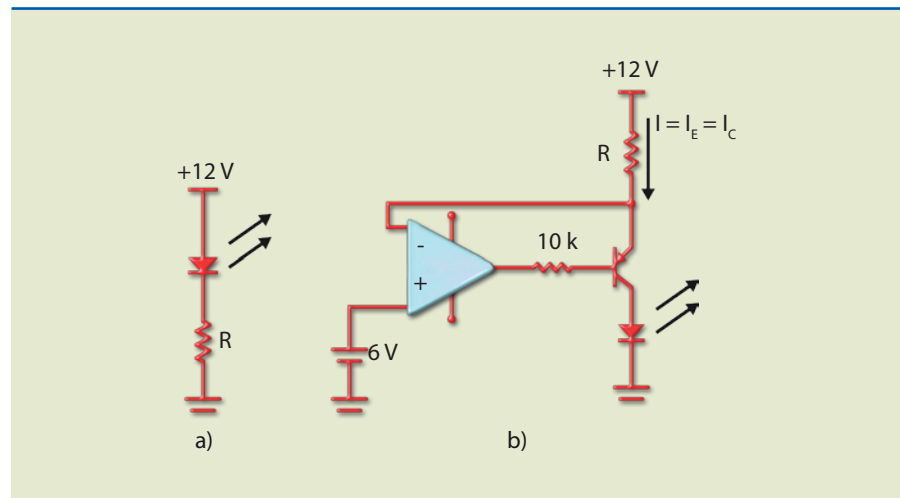
$$R = \frac{12 - 2}{20\text{ mA}} = \frac{10\text{ V}}{20\text{ mA}} = 0,5\text{ k} = 500\ \Omega$$

O circuito da figura 11.14b é mais elaborado e fornece corrente constante para o LED. A resistência do resistor R determina o valor da corrente independentemente da queda de tensão. Supondo que a corrente no LED seja de 20 mA, o valor de R será dado por:

$$R = \frac{12 - 6}{20\text{ mA}} = \frac{6\text{ V}}{20\text{ mA}} = 0,3\text{ k} = 300\ \Omega$$

Figura 11.14

Circuitos de polarização do LED:
a) simplificado e
b) corrente constante.



11.3 Acoplador óptico

O acoplador óptico ou isolador óptico (figura 11.15) é um bloco que tem internamente um diodo emissor infravermelho e um sensor óptico (fotodiodo, fototransistor, fotoSCR, fototriac, fotodarlington etc.). Sua aplicação mais importante é isolar eletricamente os circuitos de controle e de potência.

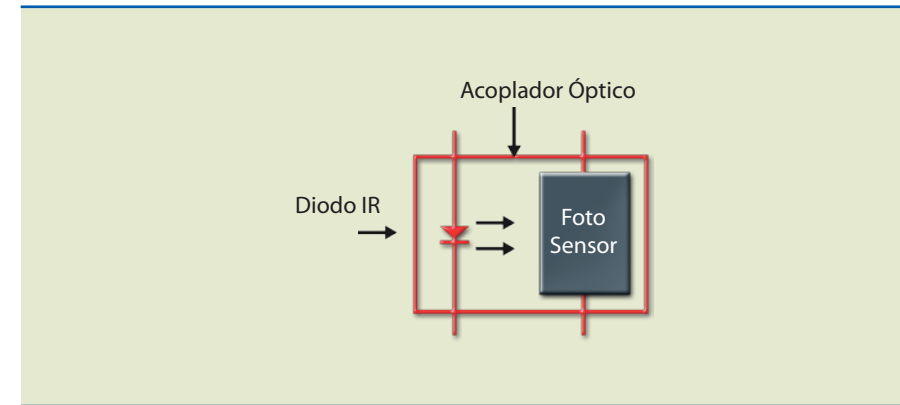


Figura 11.15
Acoplador óptico.

As principais características de um acoplador óptico são:

- **Máxima tensão de isolamento** – É a máxima tensão que pode ser aplicada entre a entrada e a saída. Os valores podem ser da ordem de 5 kV.
- **Máxima resistência de isolamento** – É a resistência entre a entrada e a saída. Pode atingir valores da ordem de $10^{11}\ \Omega$.
- **Capacitância de isolamento** – Como a entrada e a saída são condutores e estão separadas por um meio isolante, há uma capacitância parasita associada. Essa capacitância limita a frequência de operação, pois em frequências elevadas passará a existir uma corrente entre a entrada e a saída mesmo que os valores de tensão sejam baixos.
- **Relação de transferência (CTR)** – É determinada pela relação entre a corrente da saída (I_s) e a da entrada (I_e):

$$CTR\% = \frac{I_s}{I_e} \cdot 100$$

O acoplador óptico mais usado é o que tem como sensor de saída um fototransistor. Um exemplo é o 4N25 (figura 11.16), que apresenta relação de transferência maior que 20% e tensão de isolamento entre a entrada e a saída de $5\ 300\ V_{RMS}$.

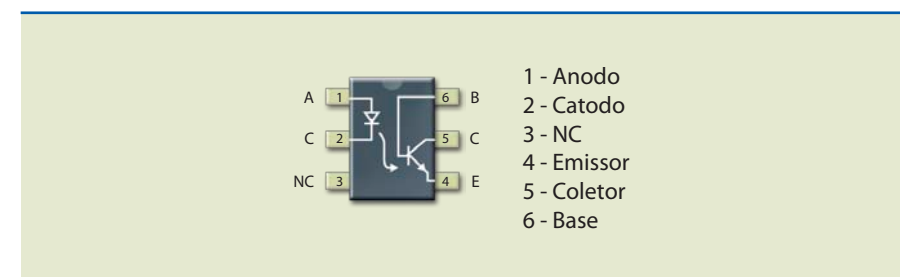


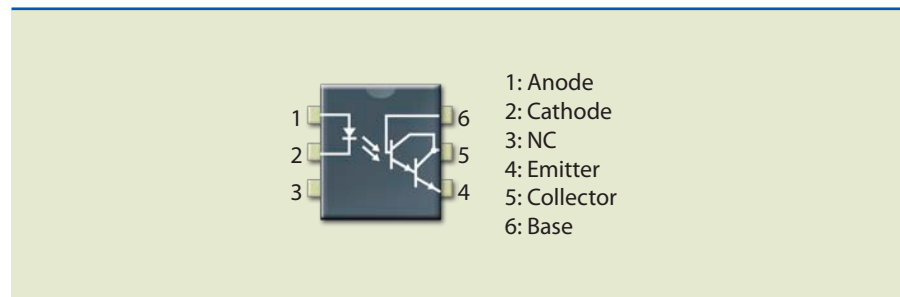
Figura 11.16
Acoplador óptico com fototransistor 4N25.

A figura 11.17 mostra o acoplador óptico 4N29, com fotodarlington como sensor de saída. A relação de transferência é de 500% e a tensão de isolamento de $2\ 500\ V_{RMS}$.



Figura 11.17

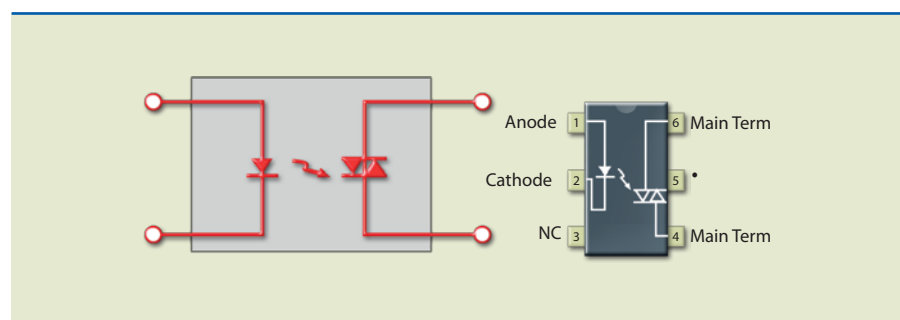
Acoplador óptico com fotodarlington 4N29: pinagem e dados.



Um acoplador muito utilizado em potência é o da família MOC30XX, que é *driver* de TRIAC, sem ZVS, apresentando isolação de 7,5 kV entre a entrada e a saída (figura 11.18).

Figura 11.18

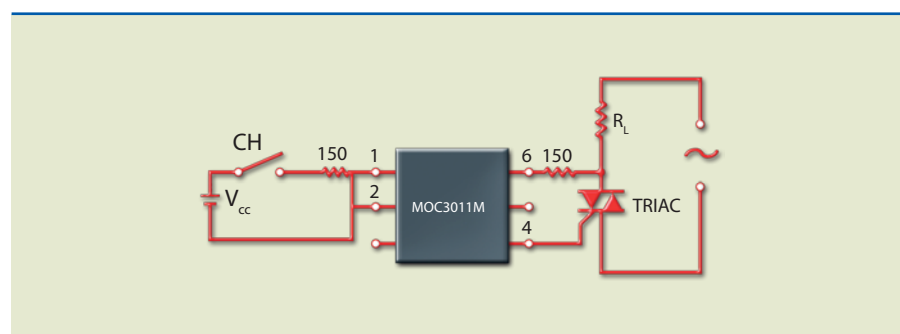
Acoplador óptico com fototriac.



A figura 11.19 apresenta uma aplicação típica do MOC3011 como *driver* de TRIAC que funciona como chave de estado sólido. A isolação é total entre o circuito de controle e o de potência. A corrente no LED de entrada deve ser no mínimo 10 mA e no máximo 50 mA. Observe que não existe sincronismo entre a chave CH e o TRIAC. Isso significa que, se a chave for fechada no instante em que a tensão da rede estiver passando pelo pico, pode ocorrer um pico de corrente (*surge*).

Figura 11.19

Aplicação de acoplador óptico com fototriac.



Se for necessário inserir controle de disparo em zero, pode-se usar isolador óptico com TRIAC e chaveamento em zero (figura 11.20). Ao ser aplicada uma corrente de entrada (I_F), o TRIAC somente conduzirá quando a tensão estiver próxima de zero; com isso, não ocorrerá ruído de alta frequência nem *surge* de corrente (*inrush current*).

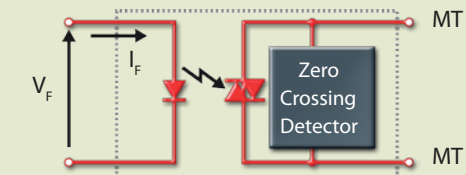


Figura 11.20

Esquema simplificado de um acoplador óptico com TRIAC e ZVS.

A figura 11.21 mostra um acoplador óptico com TRIAC e ZVS, e a figura 11.22, um exemplo de aplicação.

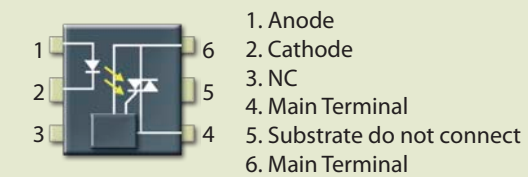


Figura 11.21

Acoplador óptico com TRIAC e ZVS MOC2061.

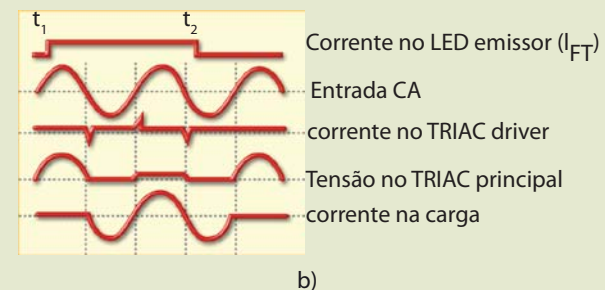
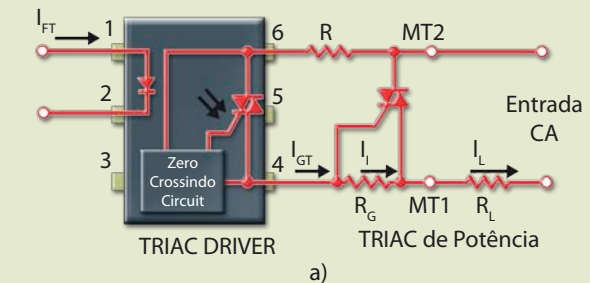


Figura 11.22

Acoplador óptico com TRIAC e ZVS:
a) circuito e
b) formas de onda.

No circuito apresentado na figura 11.22, podemos observar que no instante t_1 é injetada uma corrente na entrada do acoplador óptico e o TRIAC *driver* não dispara. No entanto, quando a tensão está passando próxima de zero, ou seja, no instante em que a rede vai do semiciclo positivo para o negativo, o TRIAC *driver* dispara, fornecendo um pulso de corrente para o TRIAC de potência, que



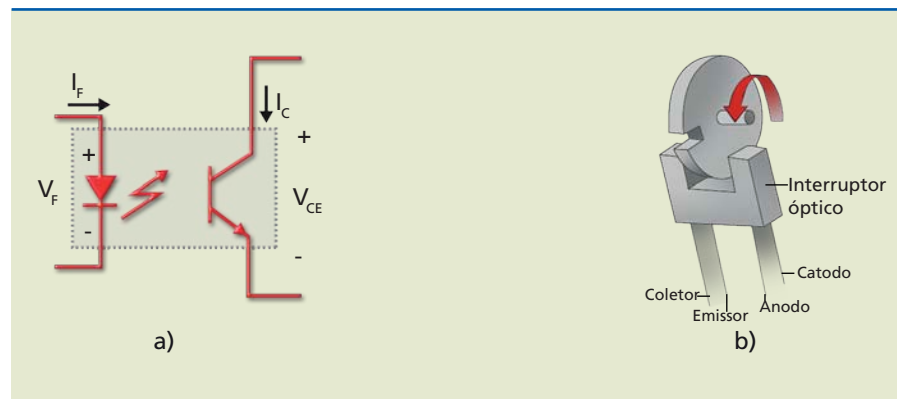
também dispara, ligando a carga. Se o sinal de corrente é mantido na entrada, o processo volta a ocorrer toda vez que a tensão passar pelo zero. Quando o sinal é retirado no instante t_2 , o TRIAC não corta imediatamente, e sim quando a tensão da rede passar por zero.

11.4 Interruptor óptico

Esse dispositivo possui um emissor e um receptor ópticos em um mesmo bloco, exatamente como o acoplador óptico, porém com uma abertura, na qual um anteparo pode ser colocado para impedir que o feixe luminoso atinja o receptor (figura 11.23).

Figura 11.23

Interruptor óptico:
a) esquema elétrico, e
b) aplicação.

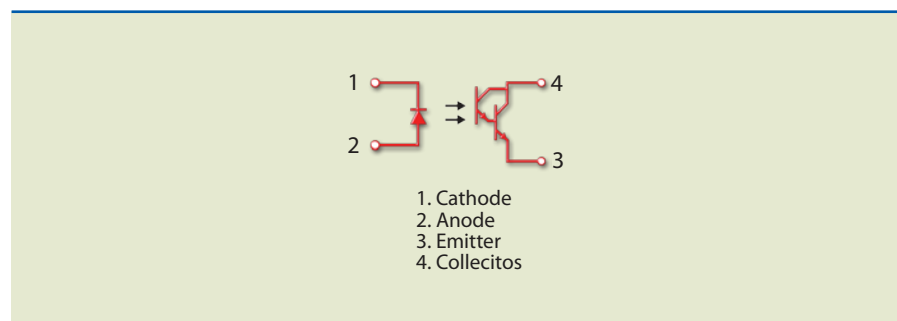


O interruptor óptico é utilizado principalmente para monitorar a posição de um eixo e medir sua rotação.

A figura 11.24 mostra o interruptor óptico TLP 507A, seus pinos, algumas características elétricas e limites. O modelo apresentado é um sensor fotodarlington.

Figura 11.24

Interruptor óptico
TLP 507A.

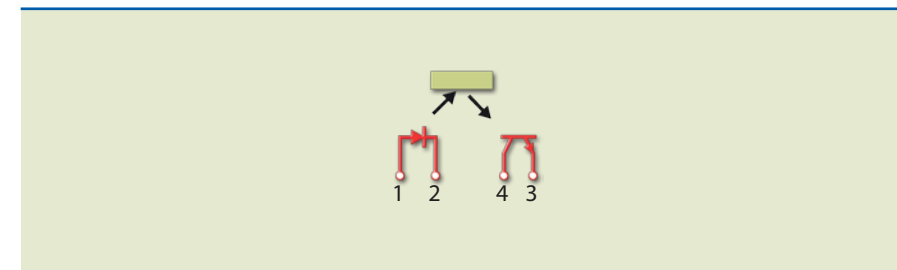


11.5 Refletor óptico

O refletor óptico tem funcionamento semelhante ao do interruptor, pois possui o emissor e o receptor em um mesmo conjunto, assim como um anteparo externo que pode influenciar a transmissão do feixe. A grande diferença está na maneira como é feita essa intervenção: em vez de ficar entre o emissor e o receptor, o feixe é apontado para o anteparo, que pode ser refletivo ou não.

Figura 11.25

Refletor óptico.



A figura 11.25 apresenta um exemplo de refletor óptico, o QRE00034. Esse refletor consiste de um diodo infravermelho e um transistor NPN montados lado a lado, sem contato com a superfície e com filtragem para a luz do dia. A distância entre sensor e refletor deve ser de 4 mm.





Referências

bibliográficas

ALBUQUERQUE, R. O.; SEABRA, A. C. *Utilizando eletrônica com AO, SCR, TRIAC, UJT, PUT, CI 555, LDR, LED, FET*. São Paulo: Érica, 2009.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. 8ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2006.

CAPUANO, F. G.; MARINO, M. A. P. *Laboratório de eletricidade e eletrônica*. 22ª ed. São Paulo: Érica, 2002.

CIPELLI, M. V.; SANDRINI, W. J. *Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos*. 14ª ed. São Paulo: Érica, 1991.

CRESESB. *Tutorial de energia solar: princípios e aplicações*. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: nov. 2009.

FAIRCHILD SEMICONDUCTORS. *Application note AN-3003: applications of random phase crossing TRIAC drivers*. Disponível em: <<http://www.fairchild-semi.com>>. Acesso em: nov. 2010.

GENERAL ELECTRIC CORPORATION. *SCR manual*. 6ª ed. New York: Prentice Hall, 1979.

LILEN, H. *Tiristores y TRIACs*. Barcelona: Marcombo Boixareu, 1978.

MALVINO, A. P. *Eletrônica*. 4ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1997. v. 1.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. *Microeletrônica*. 5ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS SERIES. *Digital integrated circuits and operational: amplifier and optoelectronic circuit design*. New York: McGraw-Hill, 1976.



CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO





Excelência no ensino profissional

Administrador da maior rede estadual de educação profissional do país, o Centro Paula Souza tem papel de destaque entre as estratégias do Governo de São Paulo para promover o desenvolvimento econômico e a inclusão social no Estado, na medida em que capta as demandas das diferentes regiões paulistas. Suas Escolas Técnicas (Etecs) e Faculdades de Tecnologia (Fatecs) formam profissionais capacitados para atuar na gestão ou na linha de frente de operações nos diversos segmentos da economia.

Um indicador dessa competência é o índice de inserção dos profissionais no mercado de trabalho. Oito entre dez alunos formados pelas Etecs e Fatecs estão empregados um ano após concluírem o curso. Além da excelência, a instituição mantém o compromisso permanente de democratizar a educação gratuita e de qualidade. O Sistema de Pontuação Acrescida beneficia candidatos afrodescendentes e oriundos da Rede Pública. Mais de 70% dos aprovados nos processos seletivos das Etecs e Fatecs vêm do ensino público.

O Centro Paula Souza atua também na qualificação e requalificação de trabalhadores, por meio do Programa de Formação Inicial e Educação Continuada. E ainda oferece o Programa de Mestrado em Tecnologia, recomendado pela Capes e reconhecido pelo MEC, que tem como área de concentração a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável.