

**PROFESSOR ANGELO ANTONIO LEITHOLD**

**ELETRONICA INDUSTRIAL**

**INSTITUTO DE FÍSICA ASTRONOMIA E CIÊNCIAS DO ESPAÇO  
CURITIBA 2008**

## **OBJETIVO**

Esta publicação tem a finalidade de ensinar Eletrônica Industrial – Nível Técnico através de atividades teóricas via Internet, em sala de aulas e práticas de laboratório. A leitura do texto e interpretação dos dados laborais têm por objetivo a fixação das informações apreendidas e aprendidas no decorrer do bimestre letivo.

## **INTRODUÇÃO**

A Eletrônica Industrial estuda o uso de circuitos formados por componentes elétricos e eletrônicos utilizados nas indústrias em geral. Seu objetivo principal é representar, armazenar, transmitir ou processar informações e praticar ações, automatizadas ou manuais, de variadas potências. Os circuitos podem ser usados para que outros circuitos, providos de sensores, transdutores e interfaces humanas, ou não, possam comparar os dados obtidos e executar procedimentos que, a partir do controle de processos e servo mecanismos, sejam capazes de transformar, transmitir, processar e armazenar energia ou matéria, utilizando a Eletrônica de Potência, a Eletrotécnica e a Mecânica.

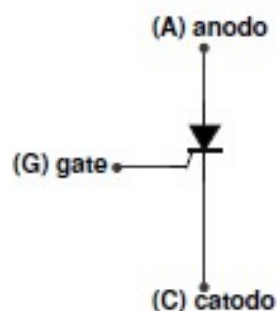
Sob o prisma acima, as usinas hidrelétricas, termoelétricas, eólicas, fotovoltaicas dentre muitas, as linhas de transmissão, os transformadores, retificadores, inversores e acumuladores, além dos mais diversos processador de transformação e manipulação da matéria estão, todos, dentro da área de interesse da Eletrônica Industrial. Esta é considerada um ramo da Eletrônica, que por sua vez pertence a outro ramo, da Eletricidade que, finalmente é ligada à Física. Desta forma, é necessário o conhecimento generalizado dos mais diversos componentes eletrônicos utilizados desde a manipulação da energia até a atividade fabril.

É necessário assim, o aprofundamento dos conhecimentos de componentes como os transistores bipolares de porta isolada (IGBT) cujo principal destaque é a baixa queda de tensão no estado ligado, dos Transistores Bipolares de Junção (BJT) com suas características de chaveamento, dos Mosfet's, SCR's, Triac's, Diac's, dentre outros componentes que serão vistos passo a passo.

# 1. TIRISTORES

## 1.1. SCR

O SCR foi desenvolvido em 1965 pelo laboratório Bell Telephone (USA). E por sua versatilidade e robustez é utilizado como interruptores para elevadas tensões e potências. Porém é utilizado em baixas frequências ( $f_T < 50\text{KHz}$ ). Seu símbolo esquemático é ilustrado a seguir:



Basicamente é um diodo retificador, a diferença é que existe um terminal (gate), que fará o disparo do dispositivo. Para efetuarmos o disparo do SCR usamos algumas técnicas:

- Aplicação de uma tensão positiva no terminal gate. Desta forma o dispositivo passa do estado de desligado para ligado. Ficando nesta condição indefinidamente. Após efetuarmos o disparo, podemos retirar a tensão de disparo do terminal do gate, que ainda assim o componente continuará no estado ligado.
- Por luz. Quando uma luz incidir sobre a camada de semicondutor do dispositivo também provocamos o disparo do componente.
- Por aumento significativo da temperatura.
- Elevando-se o valor da tensão Anodo-catodo para o valor de ruptura

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

O SCR possui resistências e tensões de condução muito reduzidas, o que torna o componente muito robusto, podendo interromper potências da ordem de 10MW. Com valores individuais de até 2000A em 1800V.

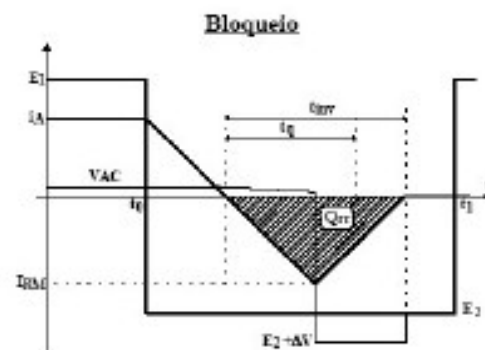
## TÉCNICAS DE INTERRUPTÃO

Uma vez efetuado o disparo do componente não é possível efetuarmos o desligamento através do terminal de gate.

Para efetuarmos o desligamento do SCR, existem algumas técnicas:

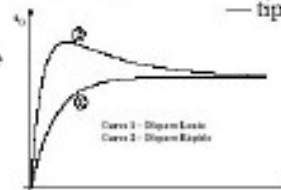
- Colocar em curto os terminais anodo e catodo
- Inversão de polaridade
- Redução da corrente de anodo até a mínima corrente de manutenção.
- Reduzirmos a tensão de catodo ate a mínima tensão de manutenção
- Desligarmos a fonte de alimentação

Nos gráficas abaixo algumas formas de onda do SCR em condução (ligado) e em bloqueio (desligado).



- $t_d$  : Tempo de retardo
- $t_r$  : Tempo de descida de  $V_{AC}$
- $t_{on}$  : Tempo de entrada em condução
- $t_d$  é a maior parcela e depende da amplitude e velocidade de crescimento de  $i_C$ .
- $t_r$  independe de  $i_C$ .
- $t_{on}$  (tipicamente entre  $1\mu s$ -  $5\mu s$ )

### Característica Comando

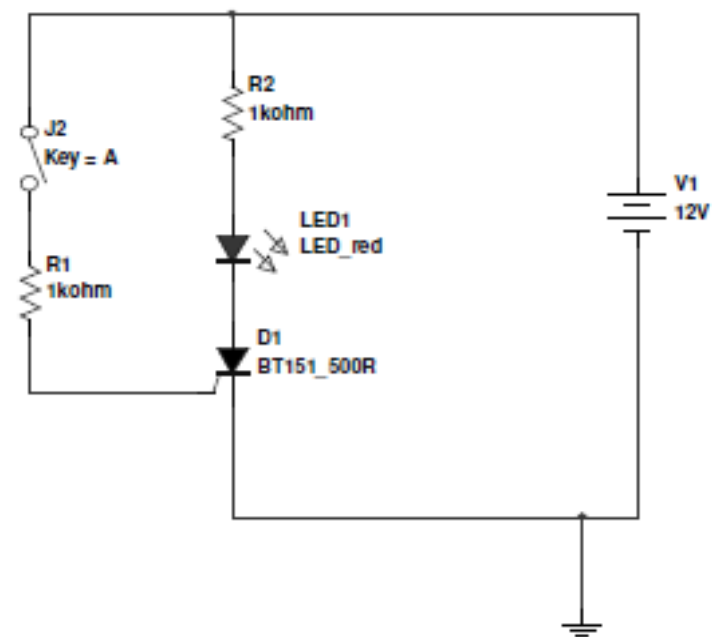


- $t_q$  : Tempo mínimo de aplicação de tensão reversa durante o processo de bloqueio — tipicamente : ( $10\mu s < t_q < 200\mu s$ ).

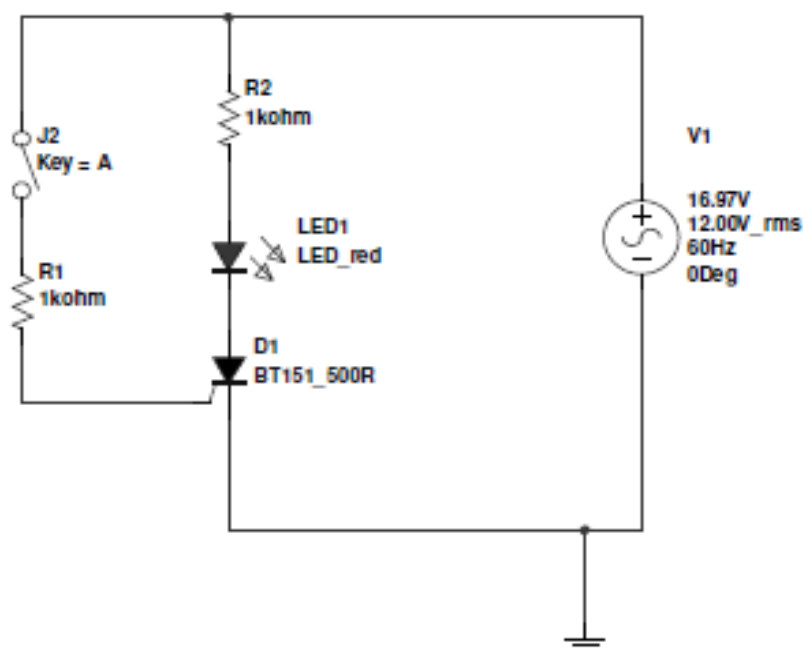
■ Portanto, o SCR é um dispositivo para operação em baixas frequências.

## EXEMPLOS

1. Fazer montagem do circuito abaixo no proto board e comprovar o funcionamento do SCR.



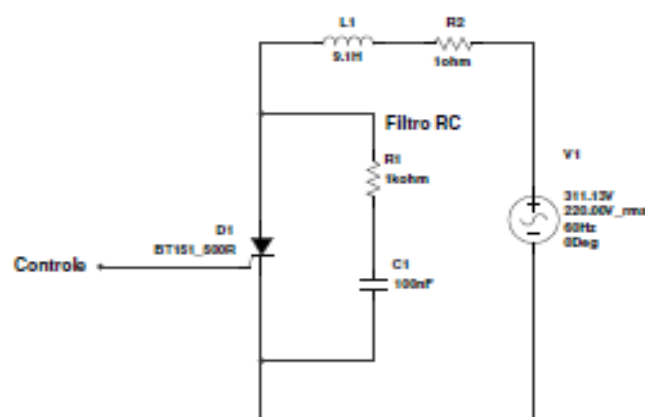
2. Fazer montagem do circuito abaixo no proto board e comprovar o funcionamento do SCR.



## SCR EM CARGAS INDUTIVAS

Apesar de conduzir corrente em apenas um sentido, o SCR é largamente utilizado em CA, em manobras com cargas indutivas. Porém é necessário observar que é preciso alguns circuitos de apoio de maneira que o SCR possa efetuar a manobra corretamente. Estes circuitos são filtros ou redes supressoras que vão minimizar os efeitos da FCEM (força contra eletromotriz). Também são utilizados diodos ligados de tal forma que possam ser um caminho fácil para estas transientes (picos de tensão gerados pela FCEM).

Veja um circuito deste tipo.

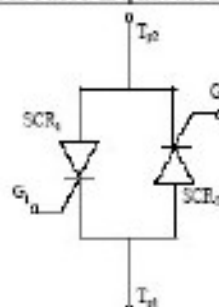


Quando o SCR entra em bloqueio, a carga armazenada em L1 encontra em R1 um caminho fácil para carregar C1. Quando no próximo semiciclo o SCR entrar em condução o capacitor C1 que esta carregado, vai se descarregar pelo diodo D1 (SCR) através de R1. Desta forma o circuito RC desvia a corrente que fica armazenada em L1, protegendo o diodo D1.

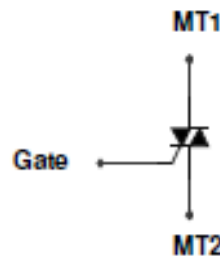
## 1.2. TRIAC

O TRIAC pode ser representado como sendo dois SCR ligados em antiparalelo. Conforme figura abaixo. Por possuir esta configuração ele pode conduzir os dois semiciclos da corrente alternada.

Circuito Equivalente



O símbolo do Triac é mostrado abaixo:

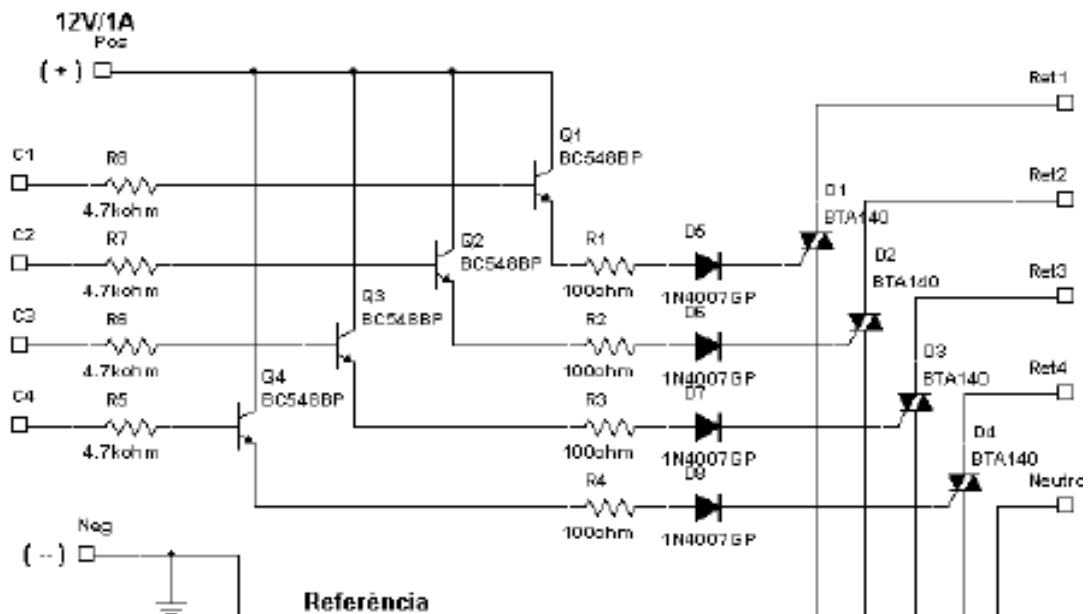


O funcionamento é análogo ao SCR, com a diferença que existe a condução dos dois semiciclos. Cada SCR conduzirá um ciclo da onda.

## Características técnicas

Diferentemente dos SCR's os TRIAC'S não são componentes adequados para trabalharem em altas potencias. Sendo que seu uso esta limitado a potencias medias (em torno de 10KW). Porem são componentes bastante versáteis, sendo muito encontrados em circuitos domésticos e circuitos industriais de médio porte.

1. Montar o circuito abaixo. Fazer o circuito de comando com o circuito integrado CD4017.





## **TRIAC EM CARGAS INDUTIVAS**

Semelhantemente como no caso dos SCR's estes componentes também precisam ser protegidos com transientes devidos ao chaveamento de cargas indutivas. Os circuitos porem, são os mesmos utilizados para o caso dos SCR's. Vale lembrar também que no caso de chaveamento de motores deve se levar em conta a corrente de partida destes e que se deve usar componentes bem dimensionados de maneira a executar o chaveamento sem danificar nosso componente. Existe outra técnica e componente que executam este trabalho mais eficazmente.

### **1.3. CIRCUITOS DE DISPARO**

Tanto no caso do SCR's como no caso dos TRIAC's, se faz necessário um circuito de disparo que fará que o dispositivo entre no estado ligado ou desligado. Esta operação pode ser de varias maneiras e técnicas, veremos algumas:

#### **DISPARO ATRAVÉS DE FONTE CC**

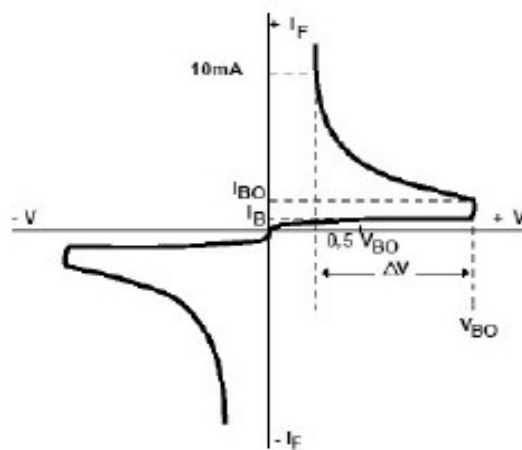
O circuito anterior usa esta técnica, que utiliza um transistor NPN do tipo BC548, um resistor e um diodo. O circuito de irá um fornecer uma corrente no terminal gate do TRIAC que fará o disparo do dispositivo. Portanto para que isso aconteça é necessário polarizar a base do transistor de maneira que ele entre em saturação, o que é facilmente implementado com um circuito lógico. Esta montagem é muito interessante quando queremos controlar uma carga de alta potencia com circuitos lógicos (microcontrolador, por exemplo). A desvantagem desta técnica é que não existe isolamento entre os circuitos de baixa e alta potencia. Esta montagem requer alguns cuidados neste sentido.

É interessante observar que o terminal (-) \_GND; tem que ser conectado no terminal MT2 do TRIAC. Este procedimento é a referencia entre os dois circuitos, de maneira que o TRIAC possa ser disparado pela etapa de baixa potencia.

#### **DIAC**

O DIAC é um dispositivo de quatro camadas bidirecional disparado por tensão. A tensão de disparo pode variar de 20 a 42V. Por ser um dispositivo bidirecional pode conduzir a corrente elétrica em dois sentidos. O gráfico a seguir mostra as características de funcionamento do DIAC.





Conforme vemos pela figura quando a tensão  $V_{BO}$  atinge valor especificado (depende do modelo usado) a corrente  $I_F$  cresce rapidamente atingindo valores altos. Ficando nessa situação até que fique abaixo da tensão de manutenção mínima ( $V_{BO} - \Delta V$ ). O mesmo acontece no sentido oposto da tensão. Resumindo: o DIAC se comporta como um circuito aberto até que a tensão em seus terminais atinja a tensão de disparo  $V_{BO}$ . Quando isso ocorrer, o dispositivo se comporta como um caminho de baixa resistência.

Esta característica é aproveitada em muitas aplicações, por exemplo, no disparo de tiristores.

O símbolo DIAC é mostrado abaixo, assim como seu aspecto físico;

MT1

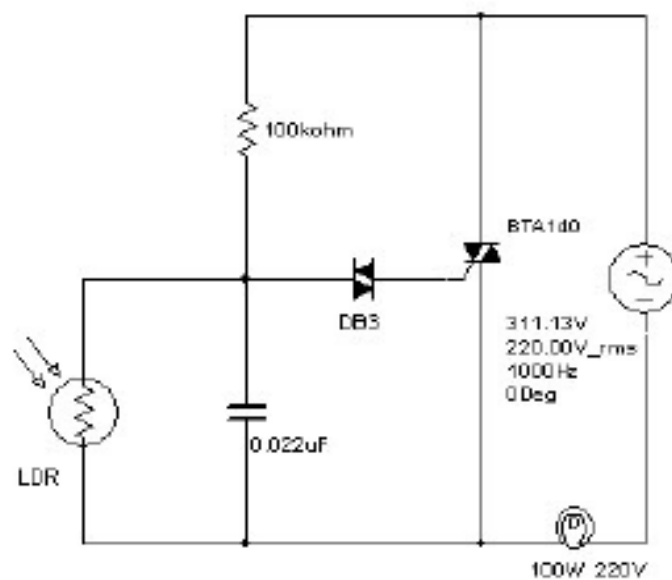
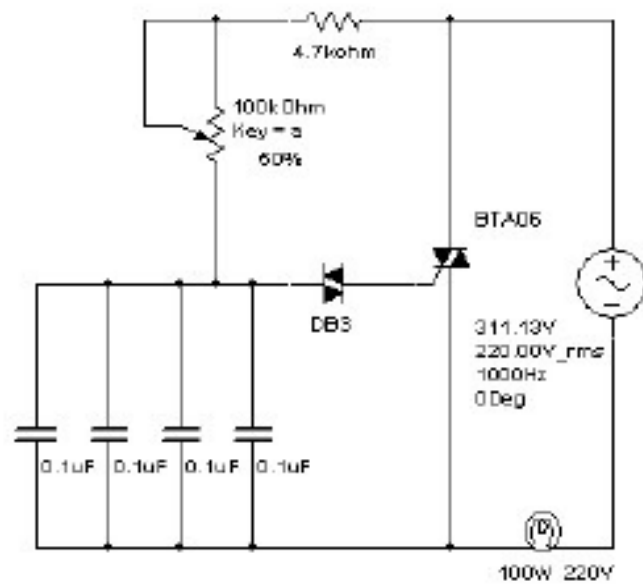


MT2



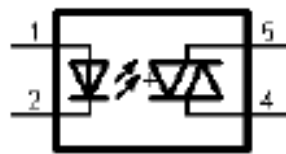
DO 35  
(Glass)

Montar os circuitos a seguir. Trata-se de dois circuitos que utilizam o DIAC como elemento de disparo. Estes circuitos são muito usados no controle de lâmpadas incandescentes.



## FOTO ACOPLADOR

Outro dispositivo usado em disparo de tiristores é o fotoacoplador OPTOTRIAC. O símbolo é mostrado abaixo:

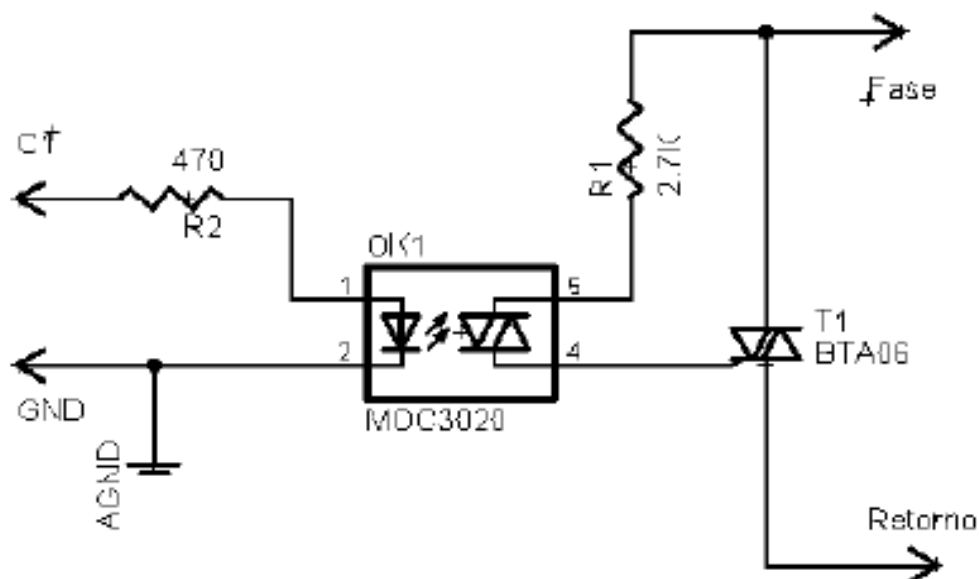


O funcionamento é simples: dentro de um único encapsulamento temos um led infravermelho e um TRIAC sensível à luz. Todas as vezes que polarizarmos o LED IV diretamente, este emitirá uma luz IV que será sentida pelo TRIAC, que será disparado, ficando nessa situação (ligado) até interrompermos a corrente do Led.

A grande vantagem neste tipo de dispositivo está na tensão de isolamento. Isto é, o circuito de comando (baixa tensão) está isolado do circuito de disparo. Alguns dispositivos como o MOC 3020 tem um a tensão de isolamento de 7500V.

## LABORATÓRIO

1. Montar o circuito abaixo e comprovar o funcionamento do fotoacoplador.



## TRANSISTOR DE UNIJUNÇÃO

O transistor de unijunção consiste num dispositivo eletrônico de estado sólido, com características elétricas que permitem sua aplicação basicamente em circuitos de temporização, osciladores de baixas frequências e disparadores.

A estrutura básica do UJT é muito simples, possuindo uma única junção semicondutora, como o próprio nome sugere. Apresente três terminais, emissor (E), base 1 e base 2.

O unijunção é formado por uma única barra de silício do tipo N levemente dopada. Em seus extremos estão ligados os terminais referentes à base 1 (B1) e base 2 (B2). E numa região central, altamente dopada, constituída de material tipo P, é conectado o terminal de emissor.

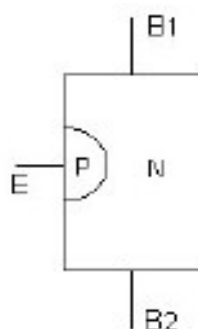


Fig. 45 – Camadas do Transistor de Unijunção

### Simbologia

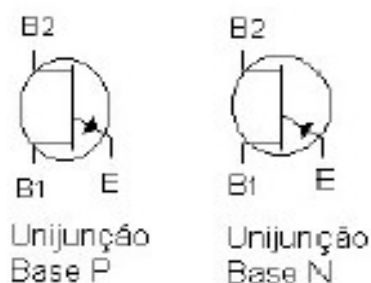


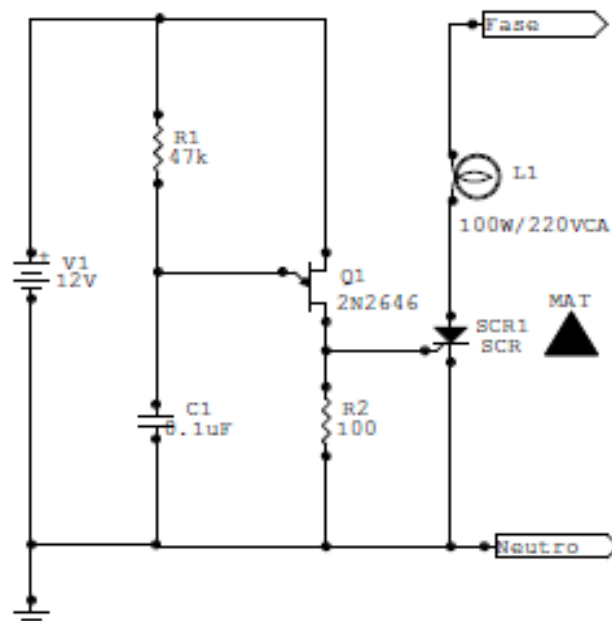
Fig. 46 – Simbologia

## FUNCIONAMENTO

Ao aplicarmos uma tensão nos terminais de base uma pequena corrente  $I_s$  irá circular pelo componente, uma vez que esses terminais estão ligados por uma barra semicondutora. Assim que uma tensão de valor apropriado ( $V_p$ ) é aplicada no terminal de emissor, polariza diretamente o diodo formado entre este e barra semicondutora, a resistência ôhmica da barra cai drasticamente, permitindo o surgimento de uma corrente ( $I_S$ ) muito alta na junção, diz-se que nesta situação o transistor foi disparado.

A corrente  $I_s$  se manterá enquanto a tensão aplicada ao emissor existir.

## CIRCUITO DE DISPARO COM UJT



OBS: Circuito didático apenas para exemplo

Os componentes R e C1 formam o circuito de tempo que vai determinar a frequência de operação do oscilador. R2 polariza a base do transistor determinando seu ponto de disparo, ou seja, as características do sinal gerado.

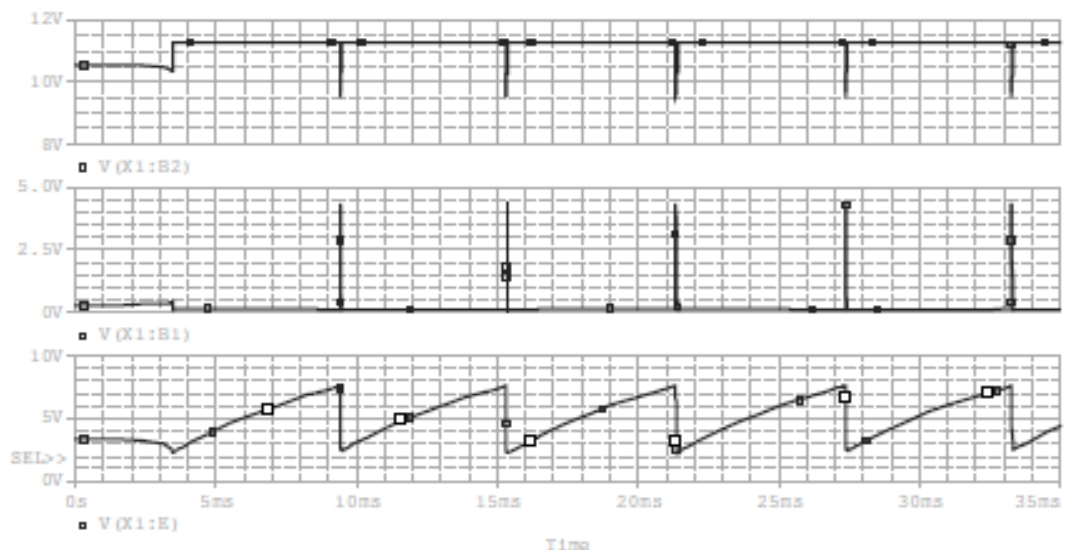
A frequência de oscilação é dada pela fórmula matemática:

$$f = \frac{1}{R.C}$$

Onde:

- f - frequência da oscilação em hertz (Hz);
- R - resistência de  $R_e$  em ohms (ohm);
- C - capacitância de C1 em farads (frequência).

O sinal poderá ser retirado tanto no emissor como nas duas bases, sendo que cada um terá sua forma de onda específica conforme é visto abaixo.



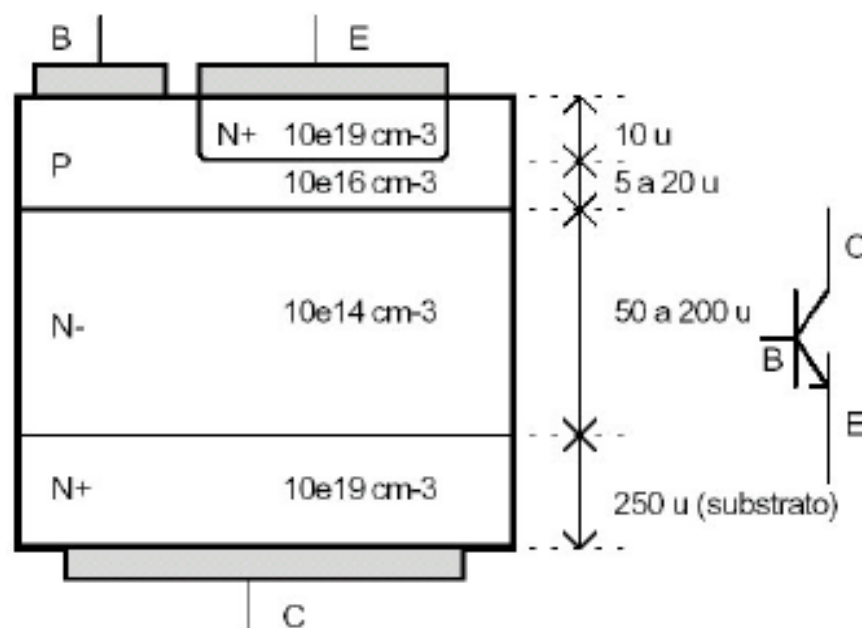
## 2. TRANSISTORES DE POTENCIA

Os transistores vem sendo largamente usados no controles de equipamentos de potencia em CC. A idéia é projetar equipamentos que possam substituir os contactores. Hoje já são muitos os equipamentos que usam estes componentes, e a tendência é crescente já que o mercado brasileiro esta em expansão.

O papel dos transistores é funcionar como um chaveador, de maneira que possamos ter o controle do sistema. Um exemplo são as fontes chaveadas, que possuem uma tecnologia de funcionamento bastante complexa. Por outro lado os transistores de potencia também podem ser usados em baixas potencias, dando solução a diversos projetos. Uma grande vantagem destes componentes é que eles podem ser controlados por microcontroladores, que estão presentes em uma enorme quantidade de equipamentos com tendência de um aumento incrível nos próximos anos, já que a industria brasileira passa por uma modernização de seus equipamentos. Portanto um estudo destes componentes se faz necessário. Veremos alguns tipos a seguir.

### 2.1. TRANSISTOR BIPOLAR DE POTENCIA (BPT)

Foram os primeiros a serem introduzidos no disparo e no desligamento nos equipamentos de elevada potencia. Trata-se, portanto, de um transistor normal modificado para aumentar a velocidade de chaveamento e suportar alta potencias. Com relação à construção, o transistor de potencia tem diferença veja a seguir.



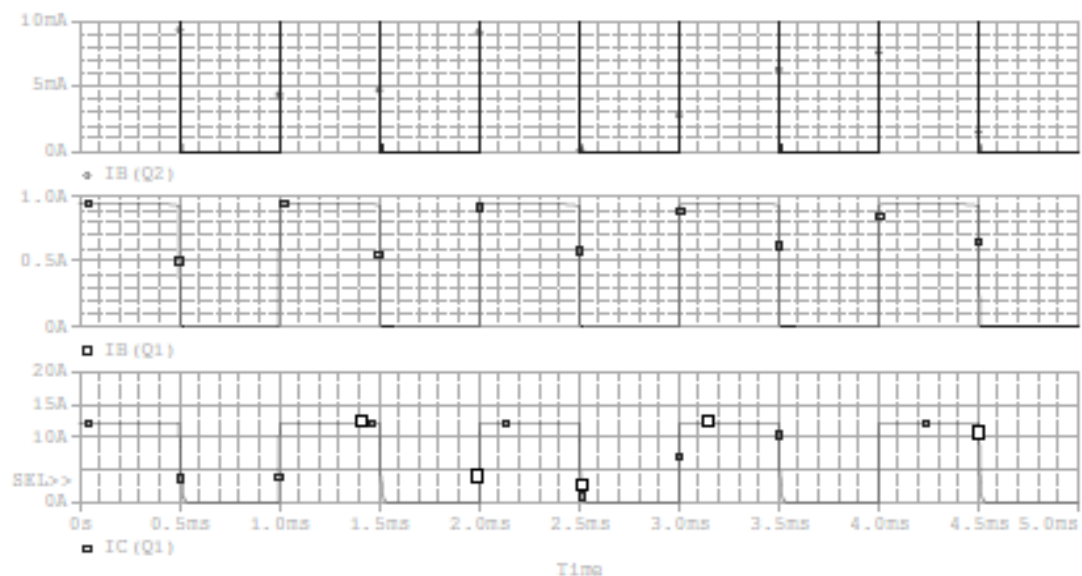
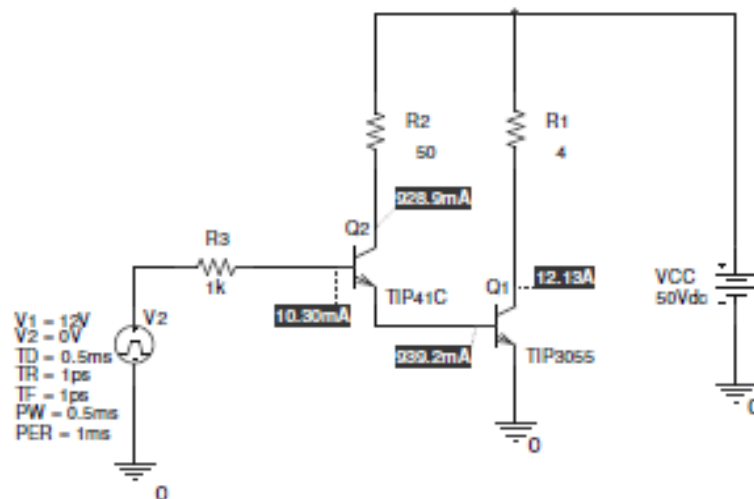


Para suportar tensões elevadas, existe uma camada intermediária do coletor, com baixa dopagem, a qual define a tensão de bloqueio do componente.

O funcionamento é análogo aos TBJ's normais.

## CHAVEAMENTO DO BPT

Vamos analisar o circuito abaixo



## 2.2. TRANSISTOR MOSFET

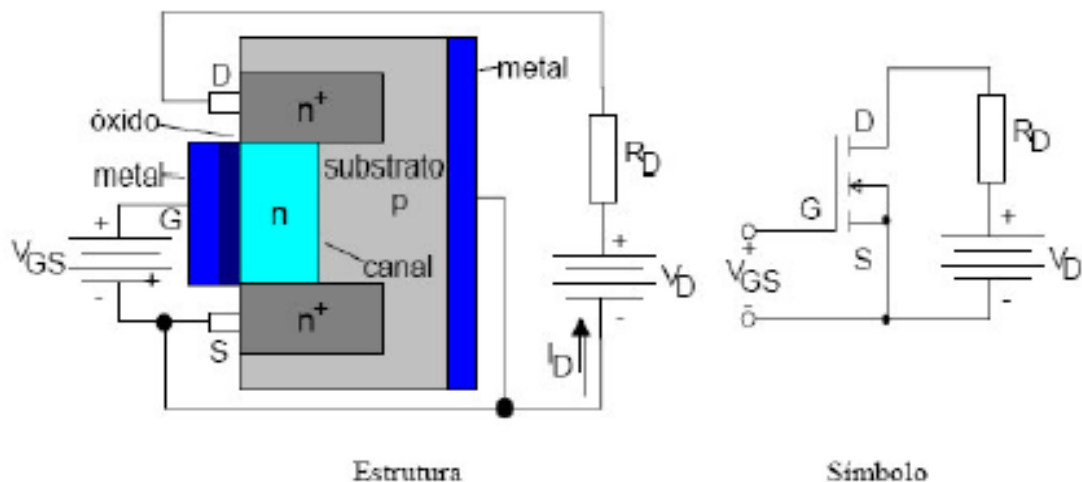
O transistor de potência MOSFET é um dispositivo controlado por tensão, isto é, necessitamos aplicar uma tensão no gate para controlarmos a corrente de dreno. A velocidade de chaveamento é muito alta (nanossegundos). MOSFET's de potência são utilizados em conversores de baixa potência e alta frequência.

Devido às características construtivas estes transistores apresentam problemas de descargas eletrostáticas, necessitando de cuidados especiais. Por exemplo, usando pulseiras antiestáticas e bancadas equipadas com mantas aterradas. Alguns componentes principalmente os de potencia são equipados com diodos internos de proteção.

Os MOSFET's podem ser divididos em dois tipos:

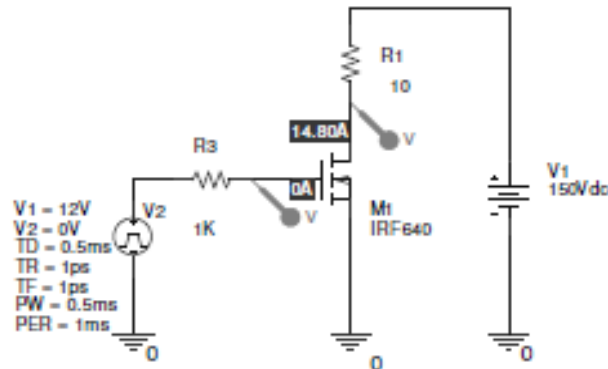
- a) - MOSFET de Depleção;
- b) - MOSFET de Intensificação.

O MOSFET pode ser de canal n ou p. O canal n é formado por um substrato de silício tipo p, com duas regiões altamente dopadas de silício tipo n+ com baixa resistência de conexão. O gate é isolado do canal n por uma fina camada de Óxido de Silício. Os três terminais são: gate (G); dreno (D) e fonte (S). O substrato é normalmente ligado à fonte (S). A tensão entre gate e fonte ( $V_{GS}$ ) pode ser, também, positiva ou negativa. A figura abaixo mostra a estrutura básica de um com canal tipo N, e seu respectivo símbolo.

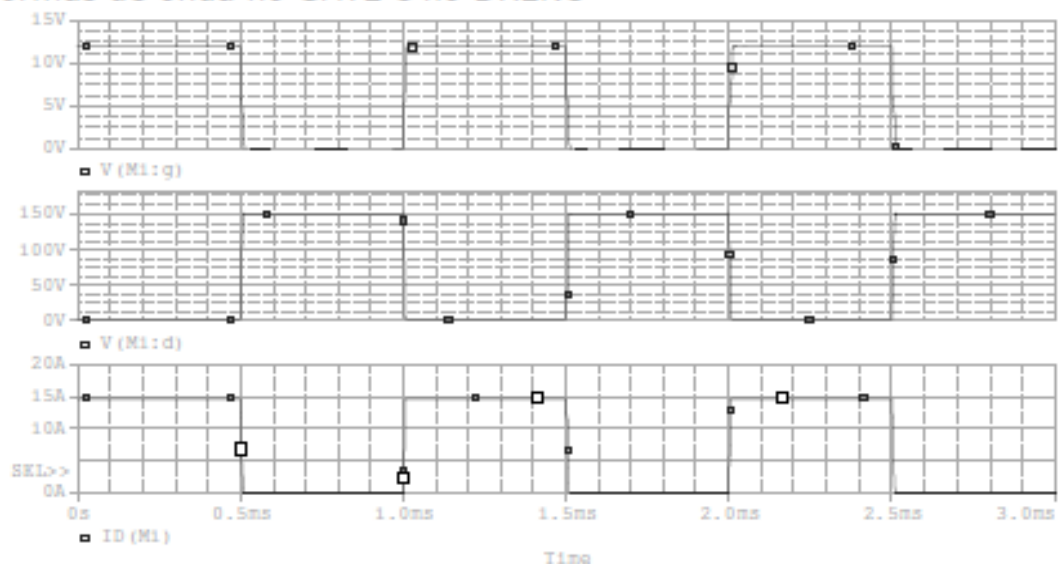


## CHAVEAMENTO DO MOSFET

Vamos analisar o circuito abaixo, verificando também as formas de onda.



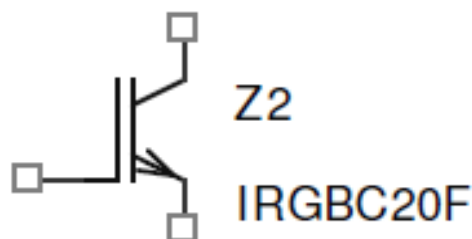
### Formas de onda no GATE e no DRENO



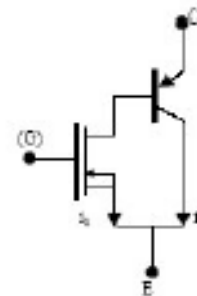
Observe que para polarizarmos o MOSFET canal N temos que aplicar uma tensão positiva no gate do transistor, com isso a tensão VGS cai. Quando polarizado corretamente a resistência entre dreno (d) e fonte (s) cai para valores muito baixos. Em alguns tipos esta resistência pode chegar a 77mΩ.

### 2.3. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Este componente associa as vantagens do transistor bipolar (baixa perda durante a condução), com as do MOSFET (alta impedância de entrada). Devido a sua estrutura, a resistência entre dreno e fonte (RDS) do IGBT é controlada de forma que o mesmo se comporte como um transistor bipolar. O símbolo do IGBT é mostrado na figura abaixo



Circuito Equivalente

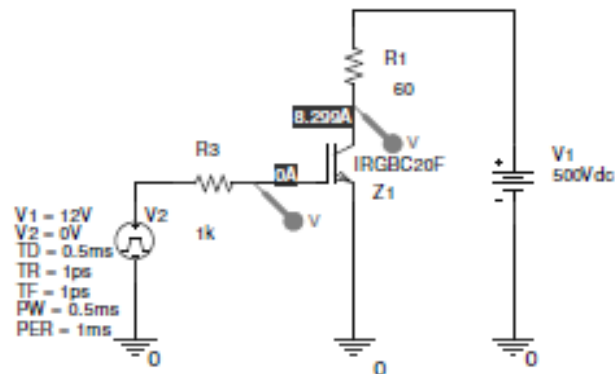


O IGBT é um componente controlado por tensão, semelhante ao MOSFET. Apresenta baixas perdas tanto no chaveamento quanto durante a condução, apresentando características semelhantes ao MOSFET como a facilidade de acionamento. Em termos de velocidade, o IGBT é mais rápido que o transistor bipolar e mais lento que o MOSFET.

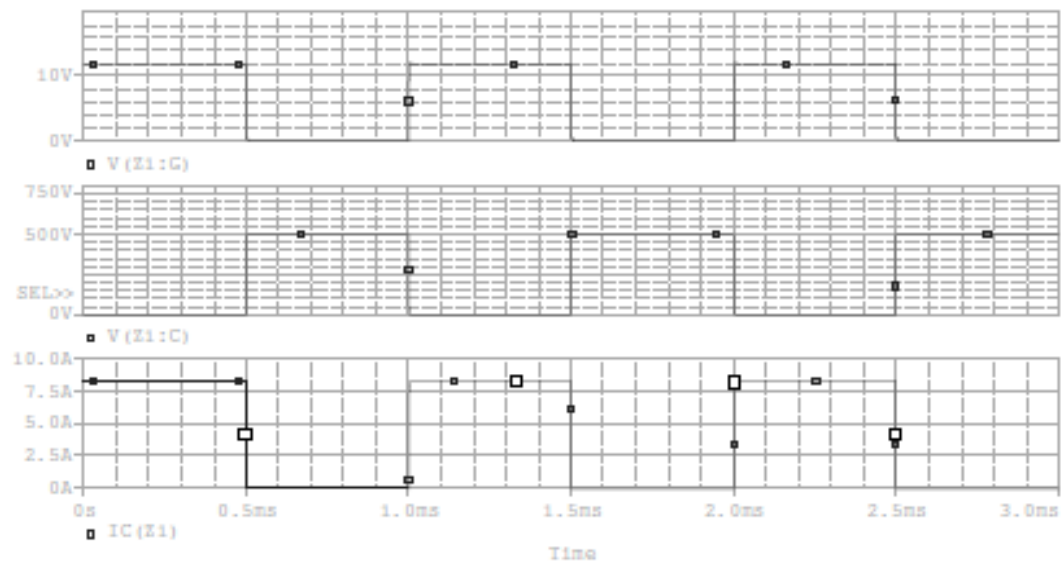
A especificação de corrente máxima para um IGBT é alta tendo unidades que comportam 400A em 1200V em CC. Sua frequência de chaveamento pode ser superior a 20kHz. Os IGBT's são utilizados em aplicações de média potência: acionamento de motores CA e CC; fontes de potência; relês estáticos; etc.

# CHAVEAMENTO DO IGBT

Vamos analisar o circuito abaixo;



Formas de onda



### **3 . COMPONENTES DE PROTEÇÃO E CONTROLE**

#### **TERMISTORES**

Este é um dispositivo muito importante para os circuitos que trabalham em locais de grande amplitude térmica.

O termistor é um resistor dependente da temperatura, ou seja, seu valor de resistência varia com a temperatura a que está submetido. Esta variação não é linear.

Na fabricação dos termistores é difícil conseguir uniformidade. As características de um termistor podem variar com o tempo e com a temperatura. Se a temperatura for elevada aumenta o processo de difusão, portanto, não é fácil utilizar um termistor como transdutor de precisão.

Os termistores não podem suportar temperaturas muito elevadas, por isso seu emprego é muito limitado. Geralmente, a temperatura máxima que um termistor pode suportar é, aproximadamente, 400°C.

Os termistores podem ser de dois tipos: PTC e NTC.

#### **PTC (Positive Temperature Coeficient)**

Os PTCs são resistores cuja resistência elétrica aumenta com o aumento da temperatura.

Dados que devem acompanhar todo termistor:

- \* A resistência (W) a 25 °C;
- \* A máxima tensão admissível;
- \* A corrente máxima suportável.

Os dados para se reconhecer um termistor são fornecidos pelo fabricante.

Ex: P50/80/30/01

onde:

- P = Termistor PTC;
- 50 = Sigla da nomenclatura de fabricação;
- 80 = Corrente máxima em mA;
- 30 = Coeficiente de variação (30%<sup>°C</sup>);
- 01 = Sigla da nomenclatura de fabricação.

O teste deste componente é feito da seguinte forma: com um ohmímetro mede-se a resistência do componente a temperatura ambiente, em seguida aproxima-se do componente uma fonte de calor e deverá ser notado um acréscimo na resistência ôhmica do mesmo.

Os termistores PTC são utilizados mais freqüentemente em:

- \* Termostatos;
- \* Proteção de bobinados de motores;
- \* Estabilização de temperatura de um líquido.

## Simbologia

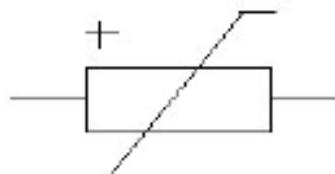


Fig. 60 - Simbologia do termistor PTC

## NTC (Negative Temperature Coeficient)

Os NTCs são resistores formados por semicondutores cerâmicos feitos de óxidos metálicos, cuja resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura. Os NTCs são usados em faixas de temperatura que estão entre 0<sup>°C</sup> e 400 <sup>°C</sup>.



Estes componentes se destacam nas aplicações tais como:

- \* Medidores de temperatura;
- \* Proteção de circuitos;
- \* Circuitos de alarme.

Para testá-los deve-se medir a sua resistência à temperatura ambiente, em seguida, aproximar o componente de uma fonte qualquer de calor. Observar no multímetro que o valor da resistência diminui, com o aumento da temperatura.

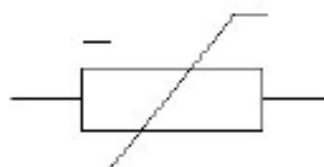


Fig. 61 Simbologia do termistor NTC

## LDR

O LDR (Light Dependent Resistor - Resistor Dependente de Luz), é o um resistor cuja resistência elétrica diminui com o aumento da luz incidente na sua superfície sensível.

Este efeito fotoelétrico (fotocondutividade) se baseia no seguinte princípio: quando um semicondutor recebe a luz, incide sobre ele fótons com energia suficiente para arrancar elétrons da banda de valência e passar a banda de condução. A resistência de uma célula LDR depende do número de fótons incidentes e, portanto, da intensidade luminosa.

Por não necessitarem de amplificadores os LDRs simplificam em muito os circuitos de controle industriais, uma vez que podem atuar diretamente sobre os relés de comutação.

Para testar este componente, usa-se o multímetro em ohms. Primeiramente mede-se sua resistência na presença de luz em seguida tapa-se a região sensível e deverá se observar que a resistência aumenta sensivelmente.

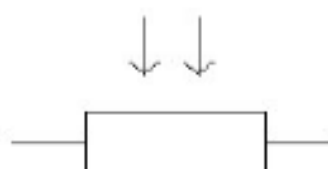


Fig. 62 - Simbologia do LDR

## FOTODIODO

Trata-se de uma junção P-N, com uma abertura, com lente, para a entrada dos raios de luz. Quando polarizado inversamente, a luz libera mais portadores minoritários e conseqüentemente há um aumento da corrente de fuga.

Para testar este componente, coloca-se o multímetro em uma alta escala de resistência e mede-se com e sem luz incidente sobre a abertura. A medida efetuada com luz deve ter valor consideravelmente inferior à medida sem luz.



Fig. 63 - Simbologia do foto-diodo

## FOTOTRANSISTOR.

Componente com a mesma estrutura do transistor bipolar convencional, porém é deixada uma abertura com lente, na região da junção base-coletor. Com a incidência de luz, diminui consideravelmente a resistência desta junção.

A principal diferença entre um fotodiodo e um fototransistor reside no fato de que no fototransistor a corrente é mais intensa, uma vez que o transistor já fornece uma amplificação deste sinal.

Para testar este componente, mede-se o valor da resistência entre coletor-emissor, com e sem luz. A medida efetuada com luz deve apresentar valor bem mais baixo do que a medida efetuada com a superfície sensível escurecida.

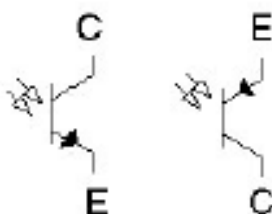


Fig. 64 - Simbologia do fototransistor

## VARISTOR

Os varistores de óxido de zinco ou SIOV são componentes bipolares passivos, destinados a proteger circuitos de surtos ou transientes de tensão.

A resistência dos varistores diminui sempre que a tensão aplicada aos seus terminais atinge um valor limite, fazendo com que o componente passe a conduzir corrente e conseqüentemente mantendo a um nível mais baixo o valor da tensão.

É muito utilizado na proteção de contatos de interruptores para evitar as sobretensões, em circuitos retificadores com diodos de silício e na entrada de equipamentos eletrônicos com a finalidade de protegê-los de possíveis sobretensões.

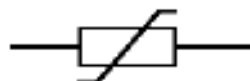


Fig. 66 - Símbolo do varistor

#### **4 . REFERÊNCIAS**

BOGART, T.F. Dispositivos e circuitos eletrônicos. v. 2. ed. Makron Books, 3ª ed.

BOYLESTAD, R. E NASHELSKY, L., Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos, Rio de Janeiro - Rj, Prentice-Hall, 2004.

FIGINI, GIANFRANCO. Eletrônica industrial - Circuitos e aplicações. ed. Hemus, 1982.

MALVINO, a.p. Eletrônica - v. 2. ed. Makron Books.

MILLMAN, J. E HALKIAS, c.c. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Ed. Makron Books.

ALMEIDA, JOSÉ LUIZ ANTUNES DE. Dispositivos semicondutores: tiristores: controle de potência em CC e CA. São Paulo: Érica, 1996.

LANDER, CYRIL W. Eletrônica industrial: teoria e aplicação / cyril w. lander, Mc Graw HILL, 1998.