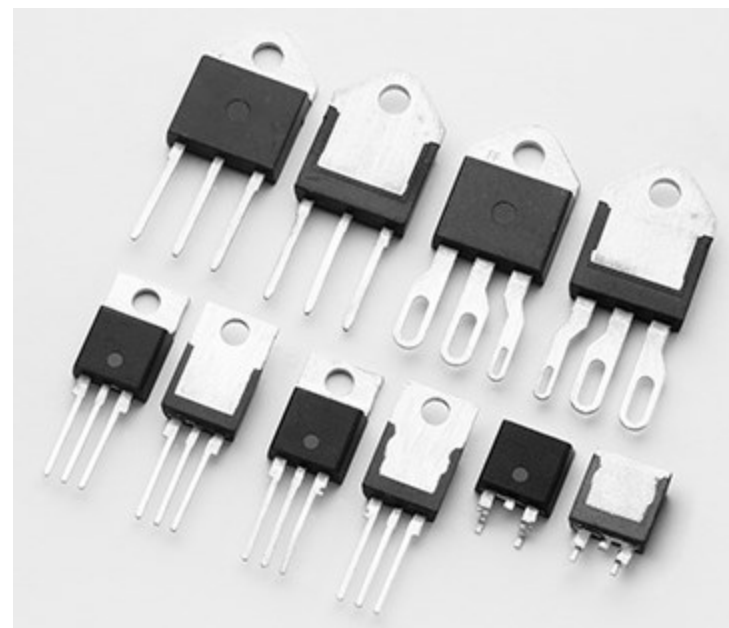
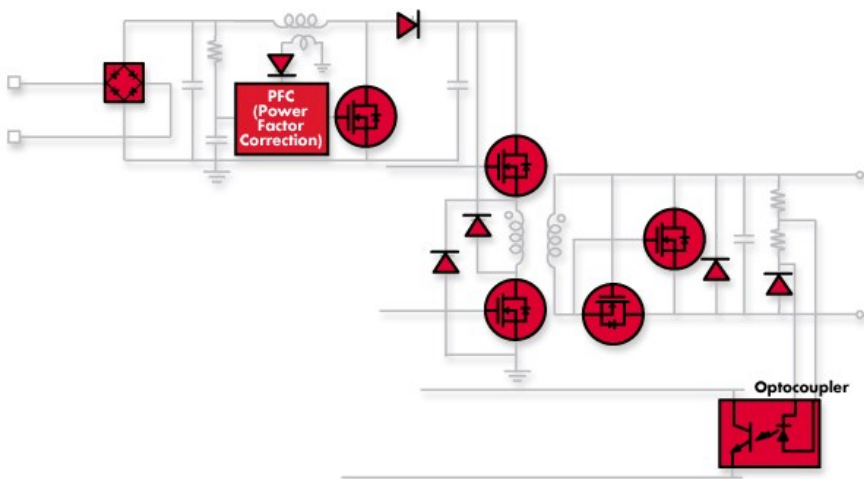


Dispositivos Tiristores



5.0 TIRISTORES

Os Tiristores são dispositivos semicondutores de potência com quatro camadas PNPN, usados como chaves eletrônicas. A principal vantagem destes dispositivos é de controlar grandes quantidades de potência em sistemas AC e DC, utilizando apenas uma pequena potência de controle.

Os Tiristores podem ser divididos em:

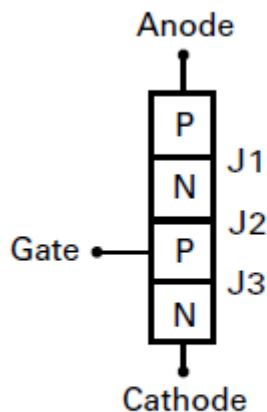
- SCR, Retificador controlado de silício;
- GTO, Tiristor de desligamento por porta;
- TRIAC;
- DIAC;
- MCT, Tiristor controlado MOS;
- SCS, Chave controlada de silício.

5.1 Retificador Controlado de Silício (SCR)

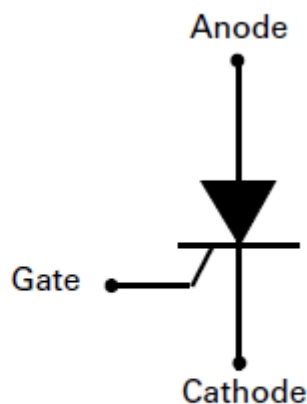
O SCR é um controlador elétrico de potência bem difundido, em função do seu chaveamento rápido, pequeno porte e altos valores nominais de tensão e corrente.

5.1.1 Descrição

O SCR possui três terminais: o **ânodo (A)** e o **cátodo (K)** são os de potência e a **porta (G)** é o de controle. Quando o SCR é diretamente polarizado (ânodo positivo em relação ao cátodo) e uma tensão positiva na porta é aplicada o SCR passa para o estado LIGADO e somente DESLIGA quando a corrente do ânodo for ZERO.



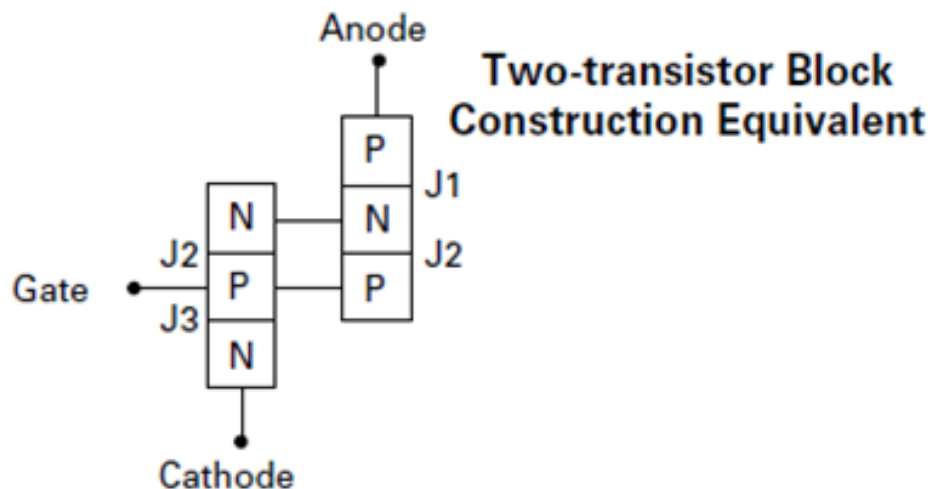
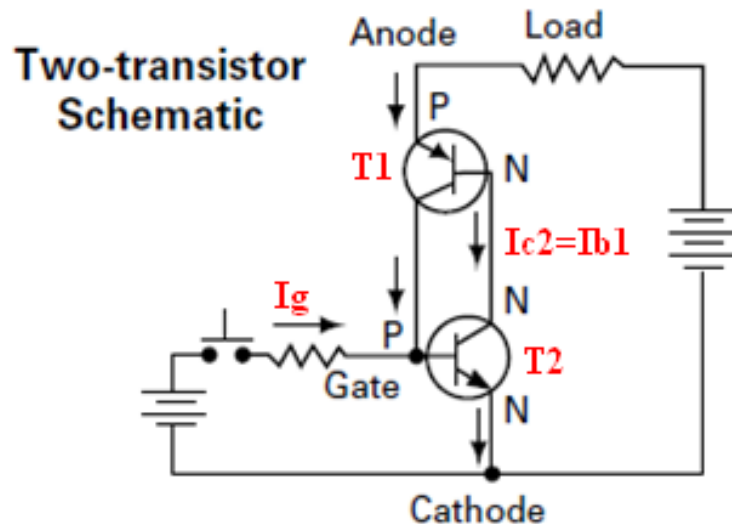
Block Construction



Schematic Symbol

5.1.2 Modelo do SCR

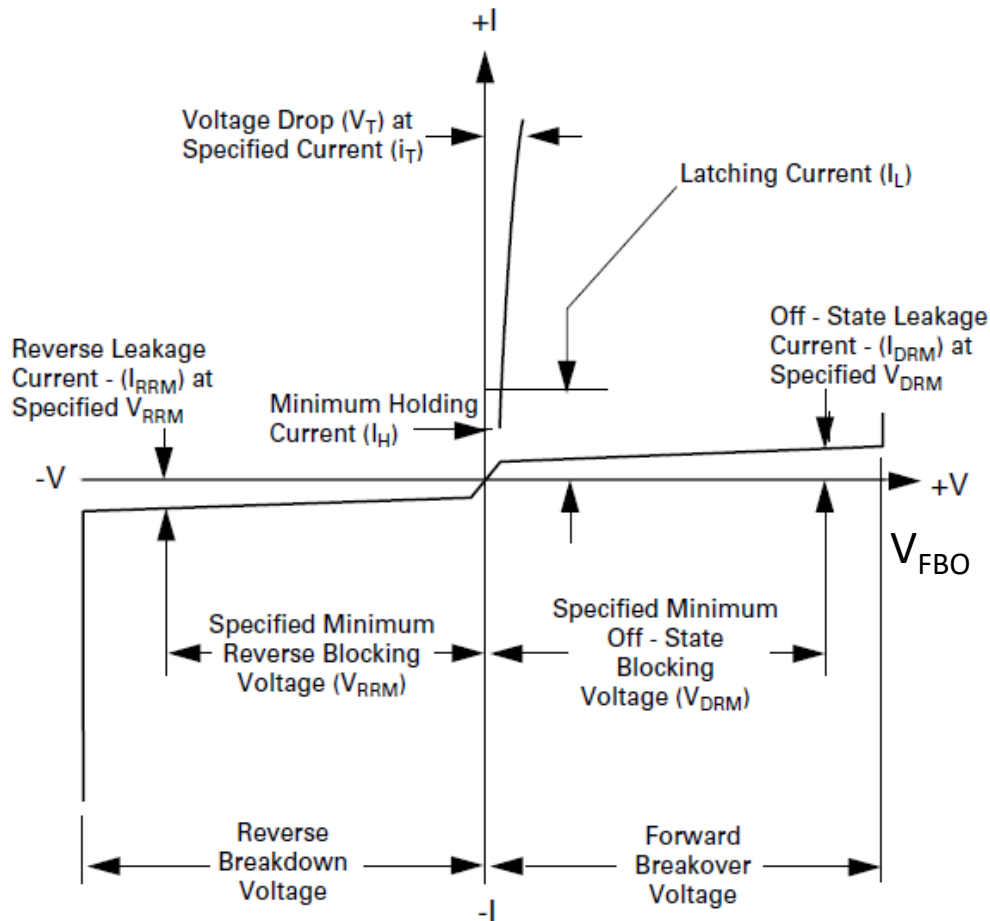
A ação da realimentação positiva do SCR, que ocorre em virtude da mudança de estado, pode ser melhor visualizada fazendo-se uma analogia a uma estrutura de dois transistores interligados. Quando uma corrente positiva I_g é aplicada, I_{c2} e I_k irão crescer. Como $I_{c2} = I_{b1}$, T1 conduzirá e teremos $I_{b2} = I_{c1} + I_g$, que aumentará I_{c2} e assim o dispositivo evoluirá até a saturação dos transistores.



Fonte: Teccor AN1001, 2008.

Para o SCR passar para o estado de LIGADO é necessário somente a aplicação de um pulso positivo por um pequeno período de tempo na porta.

5.1.3 Característica Volt - Ampère



Fonte: Teccor AN1001, 2008.

➤ Quando o SCR estiver polarizado diretamente, uma pequena corrente flui no estado desligado;

➤ Se a tensão V_{AK} for aumentada até V_{FBO} o SCR passa para o estado ligado;

➤ Se um sinal positivo for aplicado na porta o SCR passará para o estado ligado;

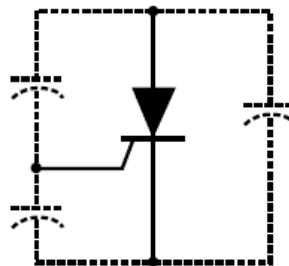
➤ O SCR permanecerá no estado ligado enquanto sua corrente I_{ANODO} ficar acima do valor de corrente de sustentação (I_H);

➤ Se a fonte for AC, o SCR passará para o estado desligado naturalmente, no semiciclo negativo.

5.1.4 Modos de Acionamento dos SCRs

Existem diversas formas de se levar um SCR a condução, tais como:

- **Tensão elevada ou sobre-tensão:** Se V_{AK} for aumentada, chegar um ponto em que a corrente de fuga será suficiente para causar o chaveamento do dispositivo;
- **Ação da corrente positiva de gatilho:** Se o tiristor estiver diretamente polarizado, a injeção de corrente de gatilho pela aplicação de tensão positiva entre os terminais e gatilho e catodo irá dispará-lo.
- **Variação de Tensão (dV/dt):** Qualquer junção p-n apresenta uma capacitância. Se uma alta variação de tensão for aplicada aos terminais de ânodo e cátodo de um dispositivo SCR, circulará uma corrente fuga entre os terminais gerada pelo “efeito dV/dt ” podendo ser suficiente para levar o SCR a condução;



Capacitores internos a um SCR (LittelFuse, 2008)

5.2 Modos de Acionamento dos SCRs

Existem diversas formas de se levar um SCR a condução, tais como:

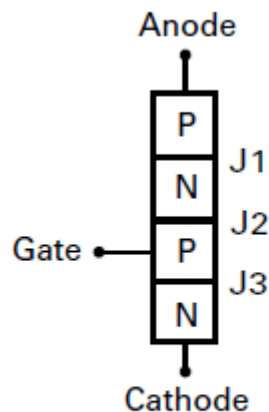
- **Temperatura:** Em altas temperaturas, a corrente reversa duplica a cada 8°C na temperatura de junção. Sendo que tal corrente pode levar o componente a condução;
- **Ação de transistor:** A corrente de coletor é aumentada num transistor injetando temporariamente maior corrente de base (gatilho no caso). Este é o mecanismo utilizado normalmente para “engatilhar” os dispositivos com gatilho como SCR’s e os TRIAC’s.
- **Energia Radiante (Luz):** A incidência de energia radiante dentro da faixa espectral do silício, penetrando nos cristais de silício, libera uma energia que se transforma em um corrente de fuga levando o engatilhamento do componente. Tal mecanismo tornou possíveis os SCR’s acionados por luz LASCR’s (*Light Activated Silicon Controlled Rectifiers*).

5.3 Tipos de Tiristores

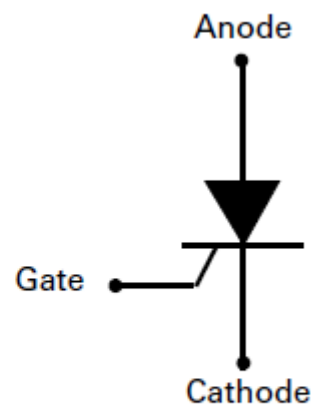
a) Tiristor de Controle de Fase (SCR)

Este tipo de tiristor geralmente opera na frequência da rede e é desligado por comutação natural. O tempo de desligamento t_q é da ordem de 50 a 100 μs . Este é o tiristor mais adequado para aplicações de comutação em baixa frequência.

A queda de tensão em condução varia tipicamente de 1,15V para dispositivos de 600V a 2,5V para os tiristores de 4000V.



Block Construction

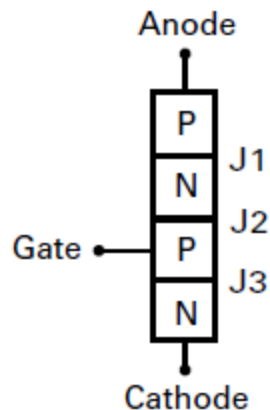


Schematic Symbol

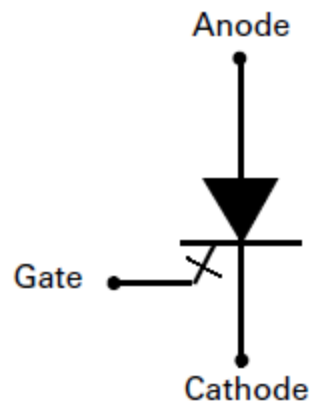
b) Tiristor de Desligamento pelo Gatilho (GTO)

Um tiristor de desligamento pelo gatilho (*Gate Turn-Off - GTO*) pode ser disparado pela aplicação de um sinal positivo de gatilho e pode ser desligado por um sinal negativo de gatilho.

Um GTO é um dispositivo de retenção e pode ser construído para faixa de tensão e corrente similares àsquelas de um SCR. São utilizados em circuitos para acionamento de motores, fontes de alimentação de funcionamento contínuo (UPS).



Block Construction



Schematic Symbol

As principais vantagens do GTO em relação ao SCR são:

- A eliminação dos componentes de comutação forçada, para aplicações onde a comutação natural não pode ser efetuada, resultando em redução dos custos, do peso e do volume do circuito; e,
- Desligamento mais rápido permitindo operação do circuito em frequências mais Elevadas.

Em aplicações de baixas potências, os GTOs têm como principais vantagens quando comparado aos BJTs:

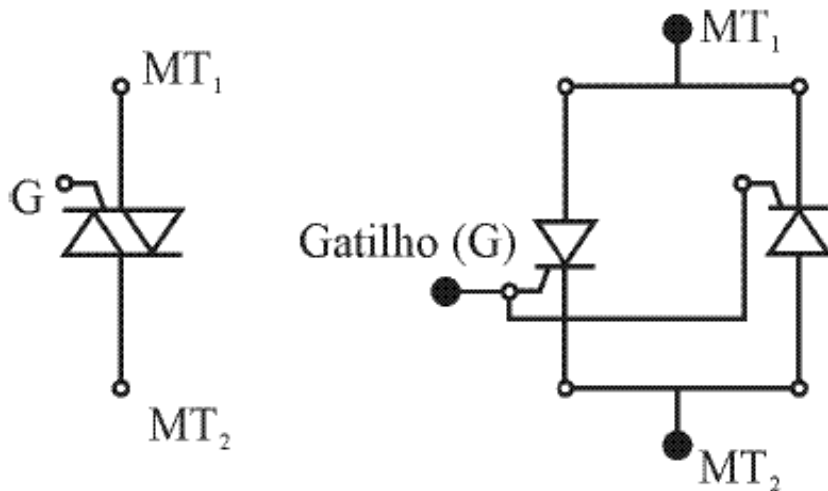
- Capacidade de bloqueio de tensões mais elevadas;
- Alto ganho em estado de condução.

Desvantagens em relação aos SCRs e BJTs:

- Um GTO tem baixo ganho durante o seu bloqueio, e requer um pulso de corrente negativo relativamente alto para desligá-lo.
- Ele possui quedas de tensão em condução mais altas do que os SCRs.

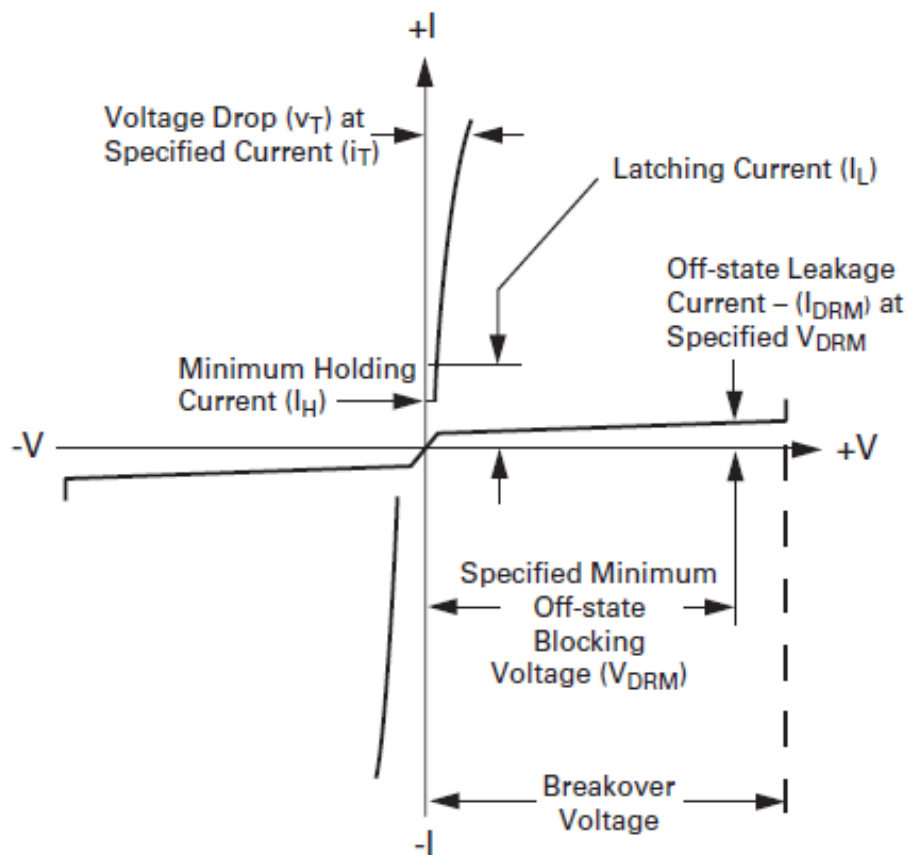
c) Tiristor de Triodos Bidirecionais (TRIAC)

Um TRIAC é capaz de conduzir corrente em ambas as direções direta e inversa. E pode ser controlado por um sinal na porta, positivo ou negativo. Isso o torna útil para o controle de potência AC. O TRIAC possui três terminais principais: MT1, MT2 e porta ou gatilho e também pode ser denominado SCR bidirecional, já que pode ser considerado como dois SCRs ligados em anti-paralelo.

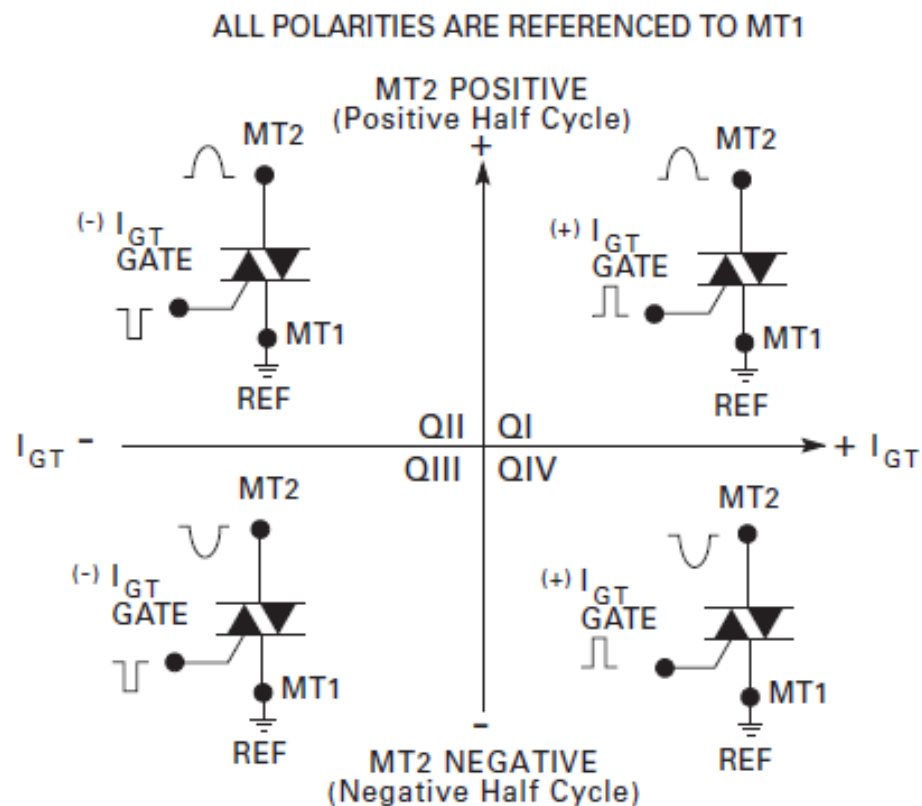


- O TRIAC é mais econômico e fácil de controlar. Caso a potência a ser regulada seja maior do que as nominais do dispositivo, dois SCRs de alta potência podem ser empregados.
- Uma das limitações dos TRIACs é a baixa velocidade (centenas de Hertz). Portanto, os TRIAC são utilizados para controle de velocidade de motores e de aquecimento e em relés de AC . Ou seja, aplicações em 60Hz.

Curva característica V x I



Modos de Operação do TRIAC



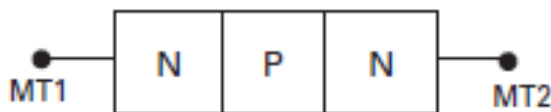
Os TRIACs normalmente são operados no quadrante I (tensão e corrente no gatilho positivas) ou no quadrante III (tensão e corrente no gatilho negativas).

d) DIAC

O DIAC é uma chave condutora de três camadas e dois terminais. A única forma do dispositivo passar para o estado de ligado é excedendo a tensão de disparo. Ele pode ser chaveado de desligado para ligado em qualquer das polaridades de tensão, o que torna útil a aplicações AC.



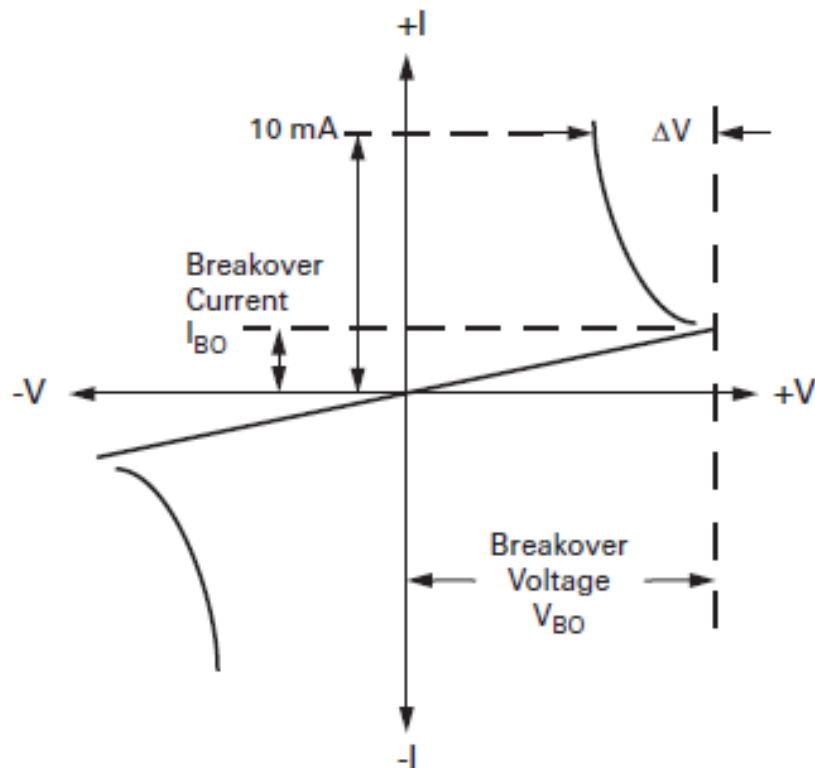
Schematic Symbol



Block Construction

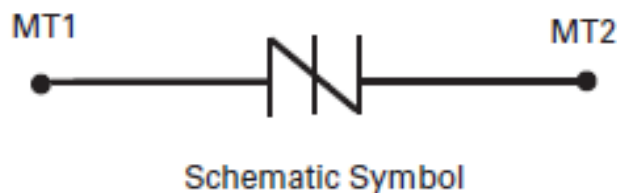
Os diacs são muito utilizados para o acionamento de dispositivos maiores, como SCRs e TRIACs.

Curva V x I



e) SIDAC

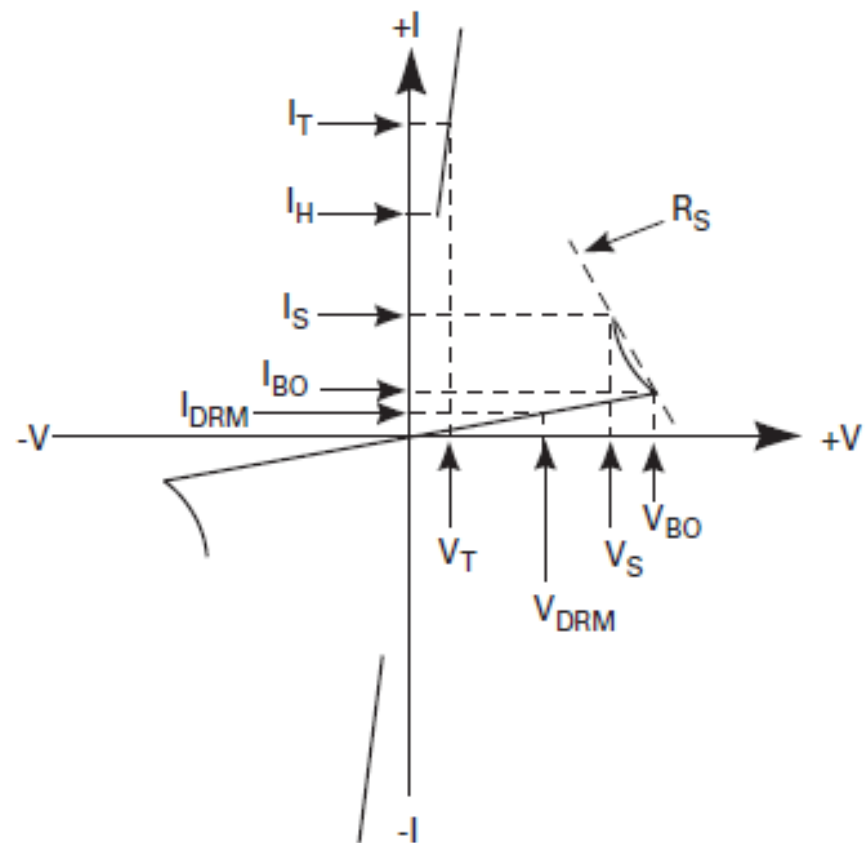
O SIDAC é uma chave semicondutora de silício multi-layer, formada por dois diodos Shockley conectados em anti-paralelo. O SIDAC opera como uma chave bidirecional ativada pela tensão.



No estado de desligado o SIDAC apresenta uma corrente de fuga menor que 5 μA . No estado ligado apresenta queda de tensão inferior a 5V e suporta a circulação de corrente de 10A à 100A.

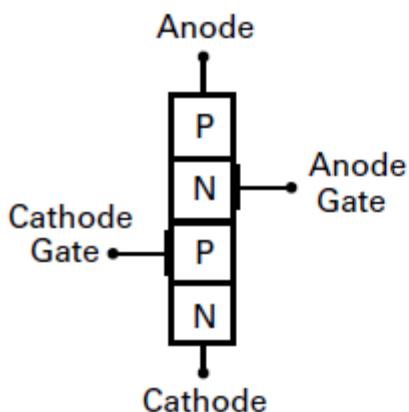
As principais aplicações dos SIDACs são em circuitos de ignição e fontes de alimentação de alta tensão.

Curva V x I

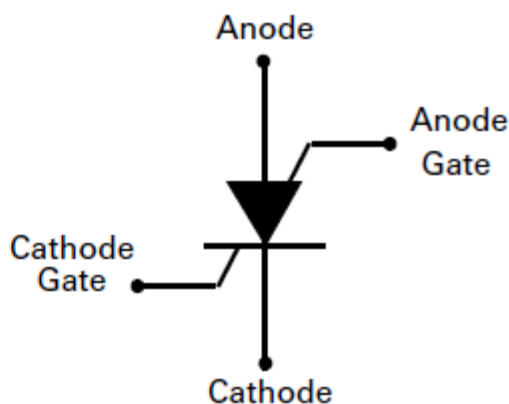


f) Chave Controlada de Silício (SCS)

A chave controlada de silício é um dispositivo com quatro camadas PNP, com duas portas uma para o ânodo e outra para o cátodo. Como em um SCR o SCS pode passar para o estado *ligado* se uma corrente positiva for aplicado na porta do cátodo ou um pulso negativo na porta do ânodo.



Block Construction



Schematic Symbol

Para passar para o estado de *desligado* é necessário aplicar um pulso positivo na porta do ânodo ou um pulso negativo na porta do cátodo.

O SCS é basicamente um SCR com duas portas de controle, sendo que podem ser utilizadas para comutação forçada (controle de desligamento).

g) Tiristor Controlado MOS (MCT)

O MCT é um dispositivo que combina características dos MOSFET e do SCR.

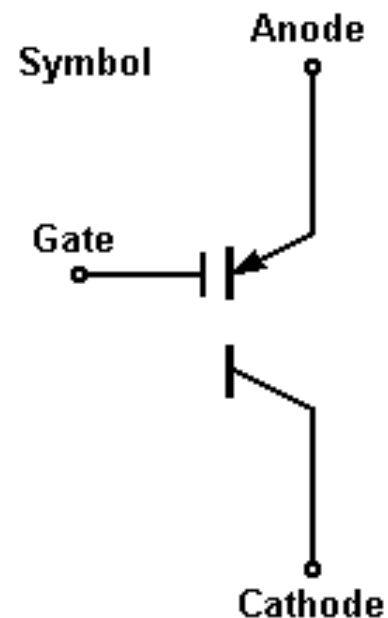
- Possuem uma queda de tensão baixa, no estado ligado ($\sim 1\text{V}$);
- Possui baixo tempo de desligamento;
- É similar em funcionalidade aos GTOs mas, exigem uma corrente de porta menor para o desligamento;
- Sua principal desvantagem é a baixa capacidade de bloqueio de tensão inversa.

Condução do MCT (estado ligado)

- Em polarização direta (ânodo positivo em relação ao catodo), aplica-se uma tensão negativa no gate ($\sim -5\text{V}$);

Bloqueio do MCT (estado desligado)

- Uma vez o dispositivo ligado, a retirada de tensão na porta não fará que o MCT desligue;
- Uma tensão positiva na porta ($\sim +10\text{V}$) levará o dispositivo ao estado de desligado.



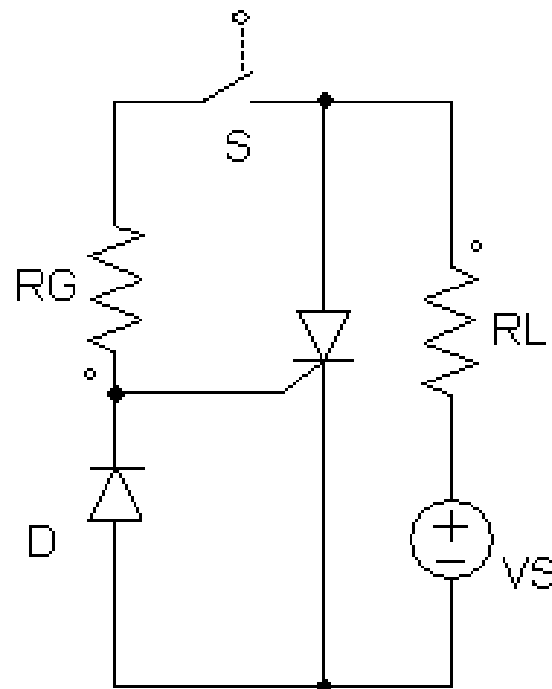
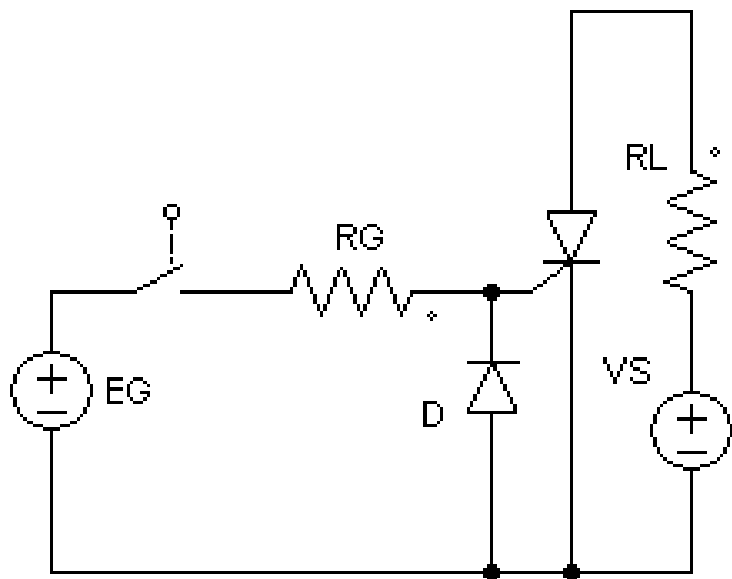
5.4 Circuitos de Acionamento de Porta dos SCRs

Em geral o circuito de disparo, para levar o SCR do estado de desligado ao estado de ligado, deve atender aos seguintes critérios:

- Produzir um sinal na porta de amplitude adequada e tempo de subida suficientemente curto;
- Produzir um sinal na porta com duração adequada;
- Fornecer um disparo preciso na faixa requerida;
- Garantir que o acionamento não ocorra em decorrência de sinais falsos, de ruído;
- Em aplicações AC, garantir que o sinal da porta seja aplicado quando o SCR estiver diretamente polarizado;

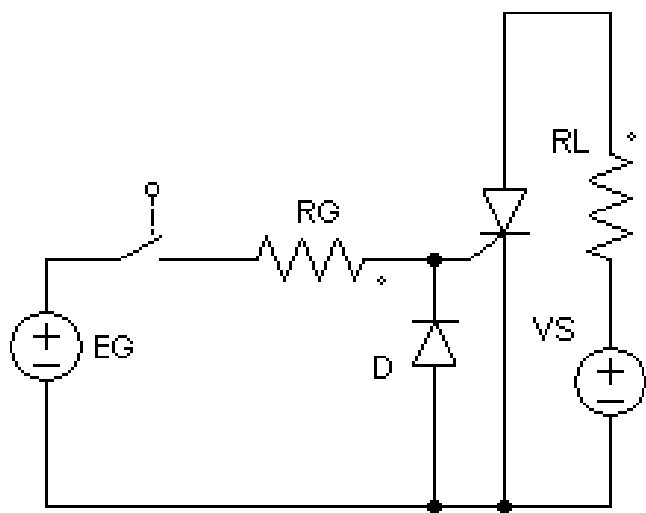
Três tipos básicos de disparo de SCR costumam ser usados: sinais DC, sinais pulsados e sinais AC.

A) Sinais DC



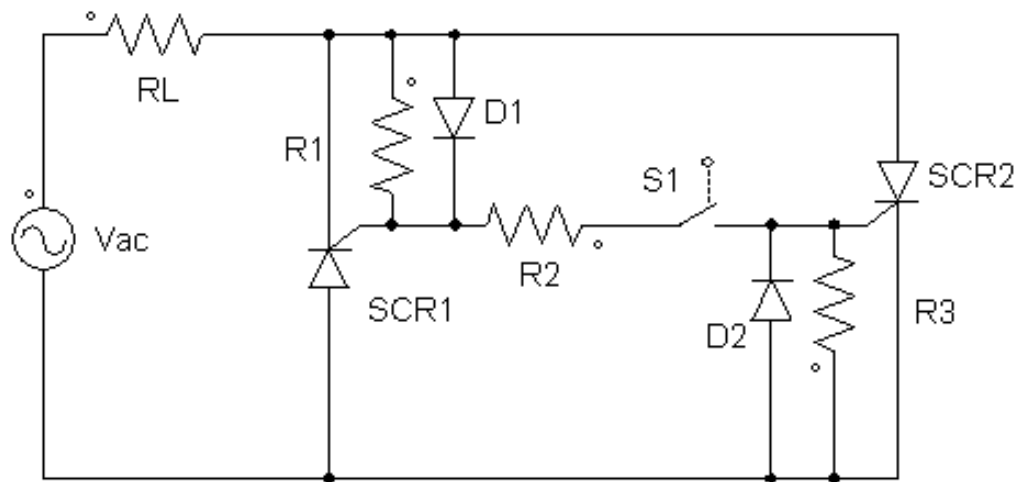
- A aplicação de um sinal DC constante na porta não é desejado por aumentar a dissipação de potência durante todo o tempo;
- Aplicação de um controle de sinal DC não é recomendável em circuitos AC, porque a presença de um sinal positivo durante o semiciclo negativo aumentaria a corrente inversa do ânodo, o que poderia danificar o dispositivo.

Ex. 01) O SCR abaixo possui uma corrente máxima de porta de 100mA e um valor máximo de V_{GK} de 2V. Se E_G for igual a 15V, determine o valor de R_G que fornecerá corrente suficiente para a passagem para o estado ligado e a potência dissipada pela porta.



B) Sinais AC

B.1) Circuito básico de gatilho

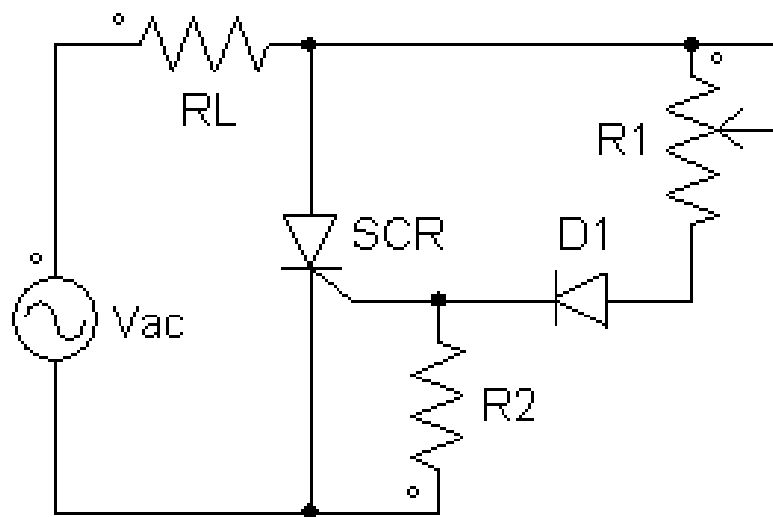


Vantagens destes circuitos são:

- Eliminam sobre-tensões no desligamento de cargas indutivas, pois sempre desligam com corrente nula.
- Não apresentam desgastes de contatos.
- Não tem inércia de ligamento ou desligamento.

B) Sinais AC

B.2) Circuito básico de gatilho com resistor variável

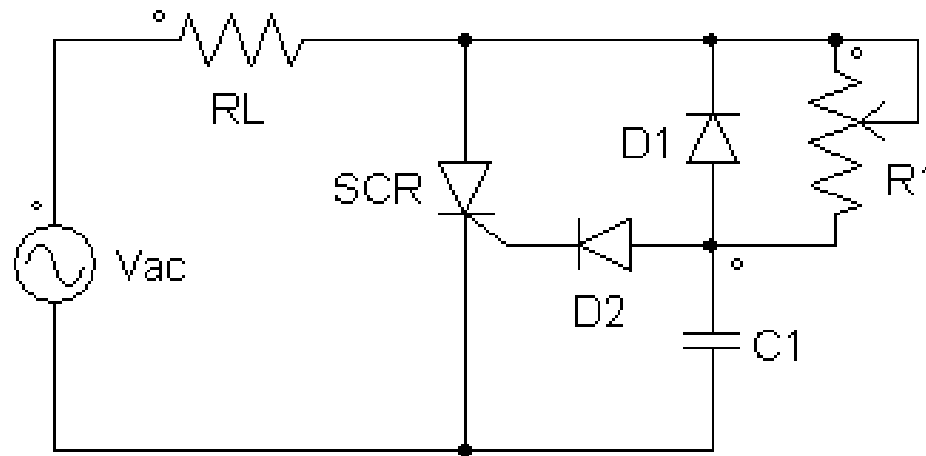


Neste circuito é possível disparar o SCR nos ângulos de disparos de **0° até 90°** através da variação do resistor R_1 . Neste caso a tensão mínima para o disparo do SCR V_G ocorrerá quando:

$$V_G = \sqrt{2} \cdot V_{RMS} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

B) Sinais AC

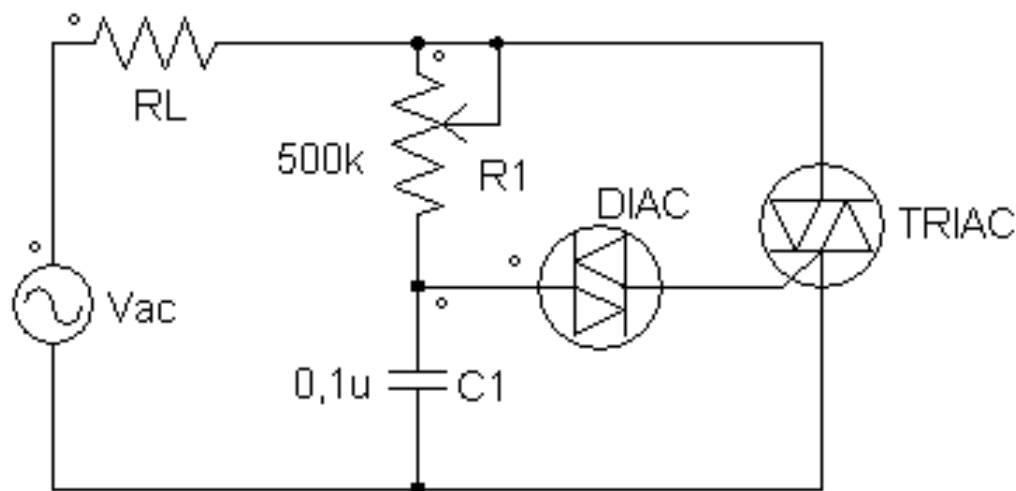
B.3) Circuito básico de gatilho com resistor variável e capacitor de gatilho



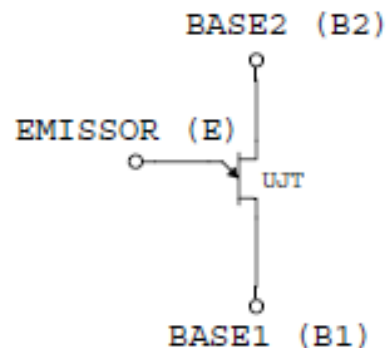
Com a inclusão de um capacitor e do diodo D_1 permitimos a geração de pulsos entre os ângulos **0° ate 180°** . Neste caso o capacitor se carrega com a tensão negativa até o valor de pico. No ciclo positivo o capacitor se descarrega no resistor R_1 e se carrega no sentido positivo até o disparo do SCR.

B) Sinais AC

B.4) Circuito de gatilho utilizando DIAC



O circuito com DIAC apresenta uma vantagem se comparado aos circuitos estudados, que é o pulso de corrente injetado no gatilho do TRIAC que facilita a entrada em condução e diminui as perdas de chaveamento.

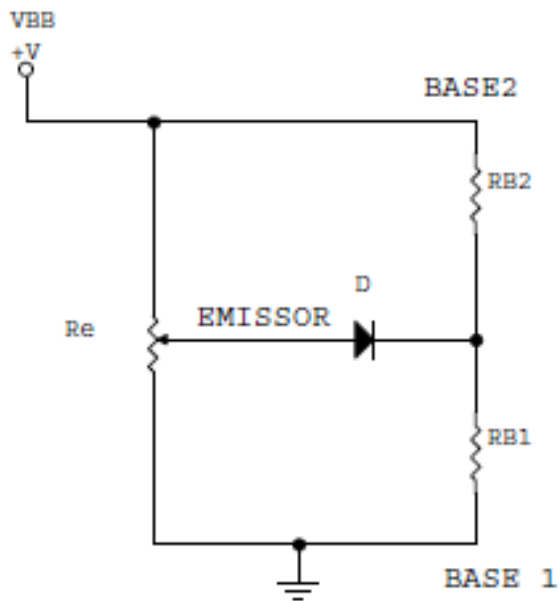


C) Sinais Pulsados

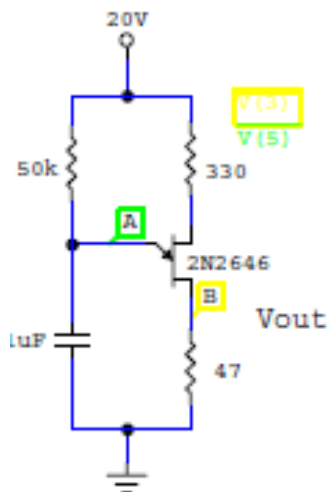
B.1) Circuito com Unijunção (UJT)

O UJT é um dispositivo com três terminais sendo que um deles é o emissor (E) e duas bases (B1 e B2). O UJT é utilizado para gerar pulsos de acionamento para dispositivos maiores (SCR).

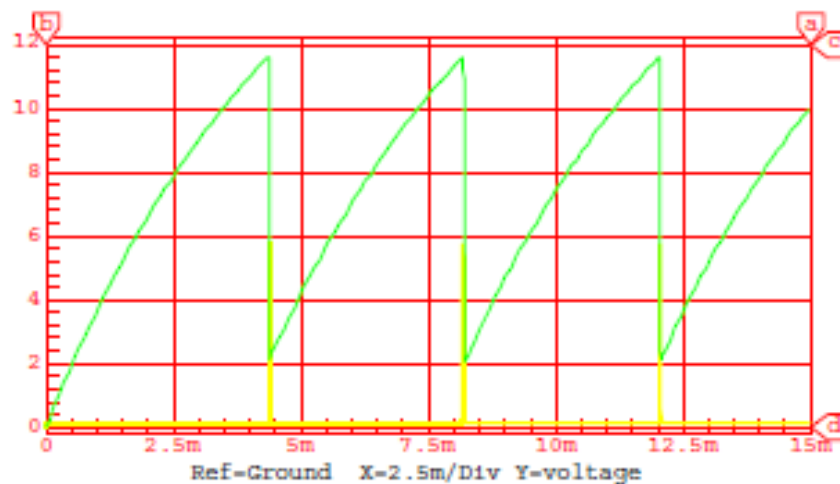
Circuito Equivalente

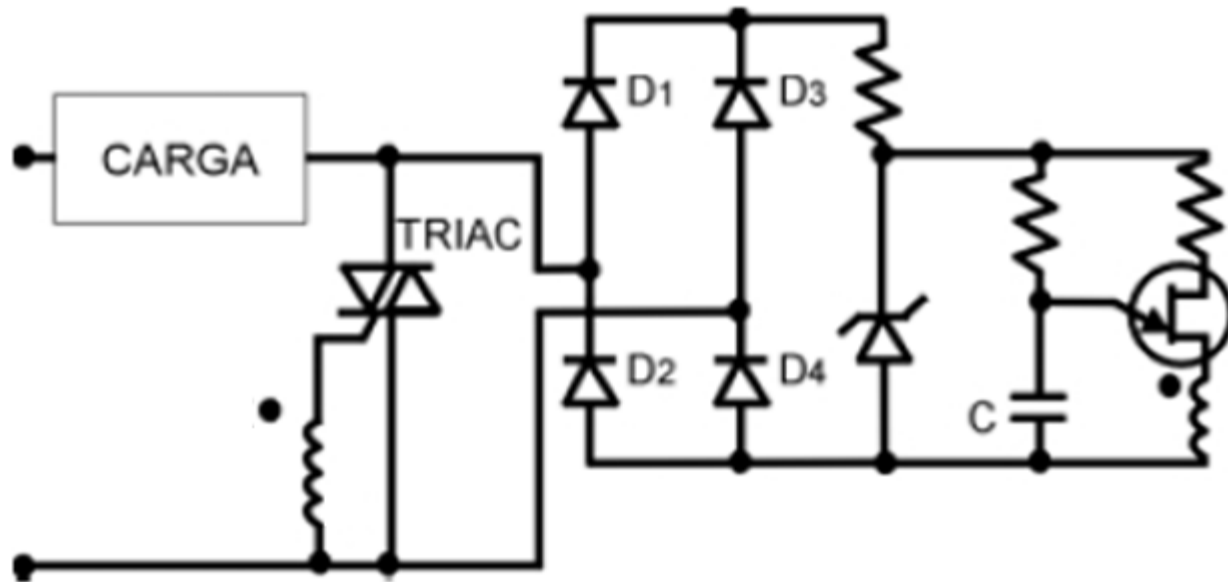


Princípio de Funcionamento



Xa: 15.00m Xb: 0.000 a-b: 15.00m freq: 66.67
Yc: 12.00 Yd: 0.000 c-d: 12.00
Offsets X: 0.000 Y: 0.000



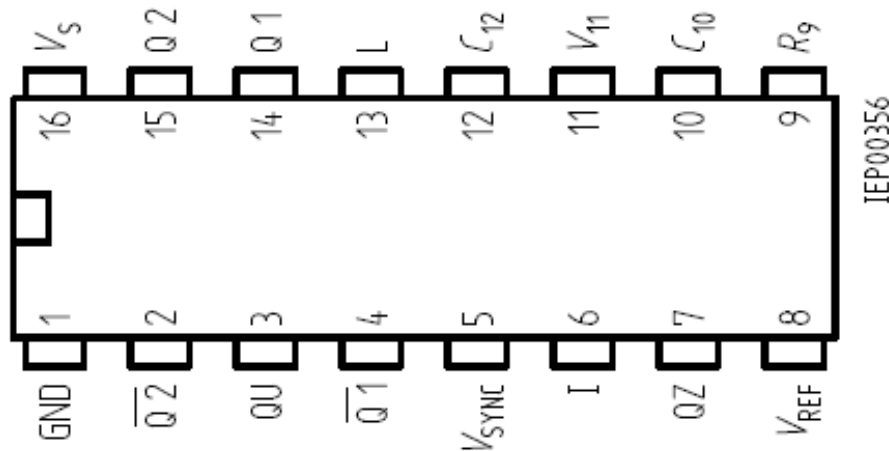


C) Sinais Pulsados

B.2) Circuito de Gatilho com Circuito Integrado de Controle de Fase TCA785

O TCA785 é um circuito integrado controlador de fase que encontra sua principal aplicação no controle do ângulo de disparo de tiristores (SCRs e TRIACs). O ângulo de disparo pode variar de **0° à 180°** através da regulagem de componentes externos.

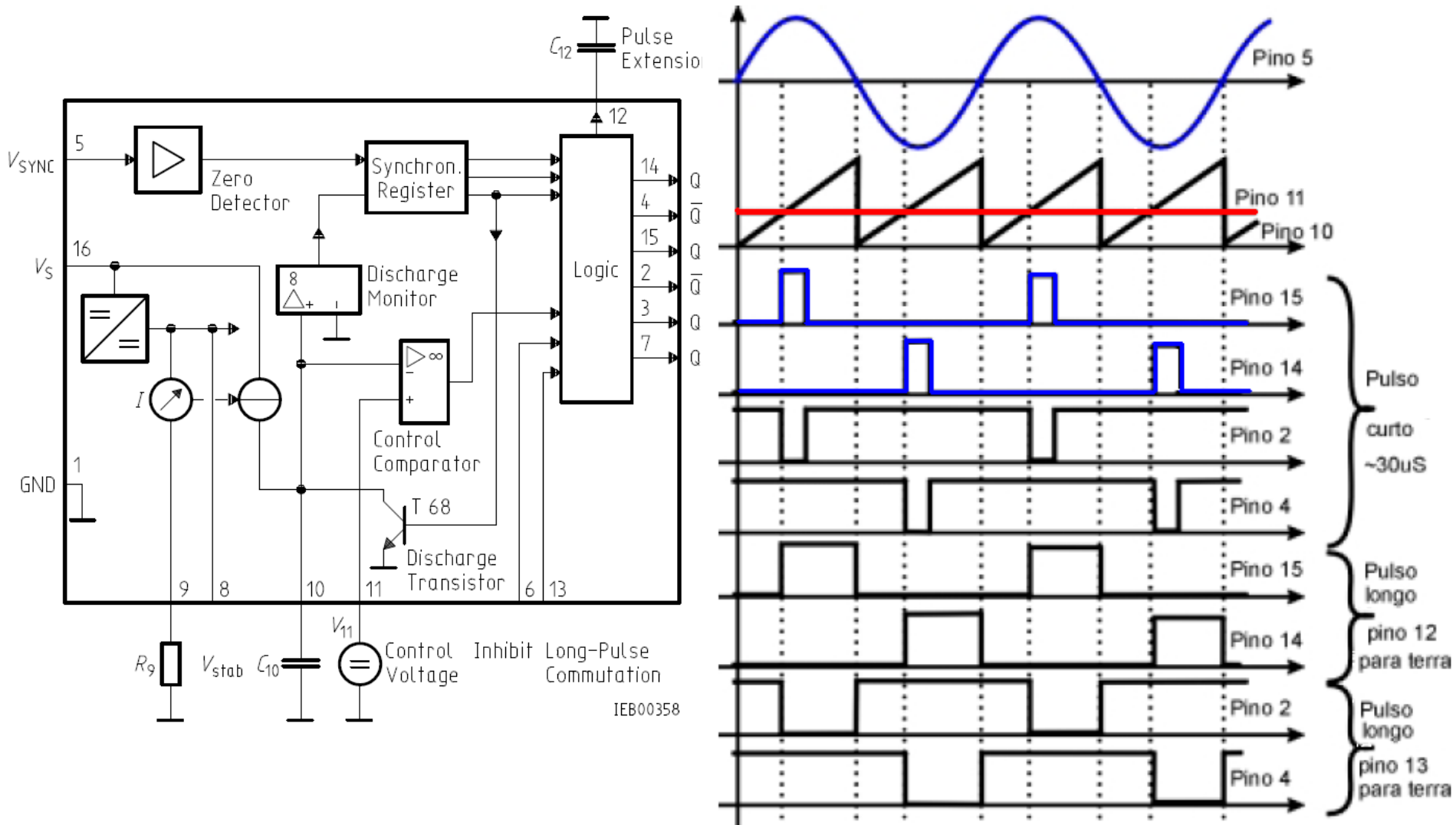
Sua aplicação típica encontra-se em controladores AC e controle de corrente trifásicos.

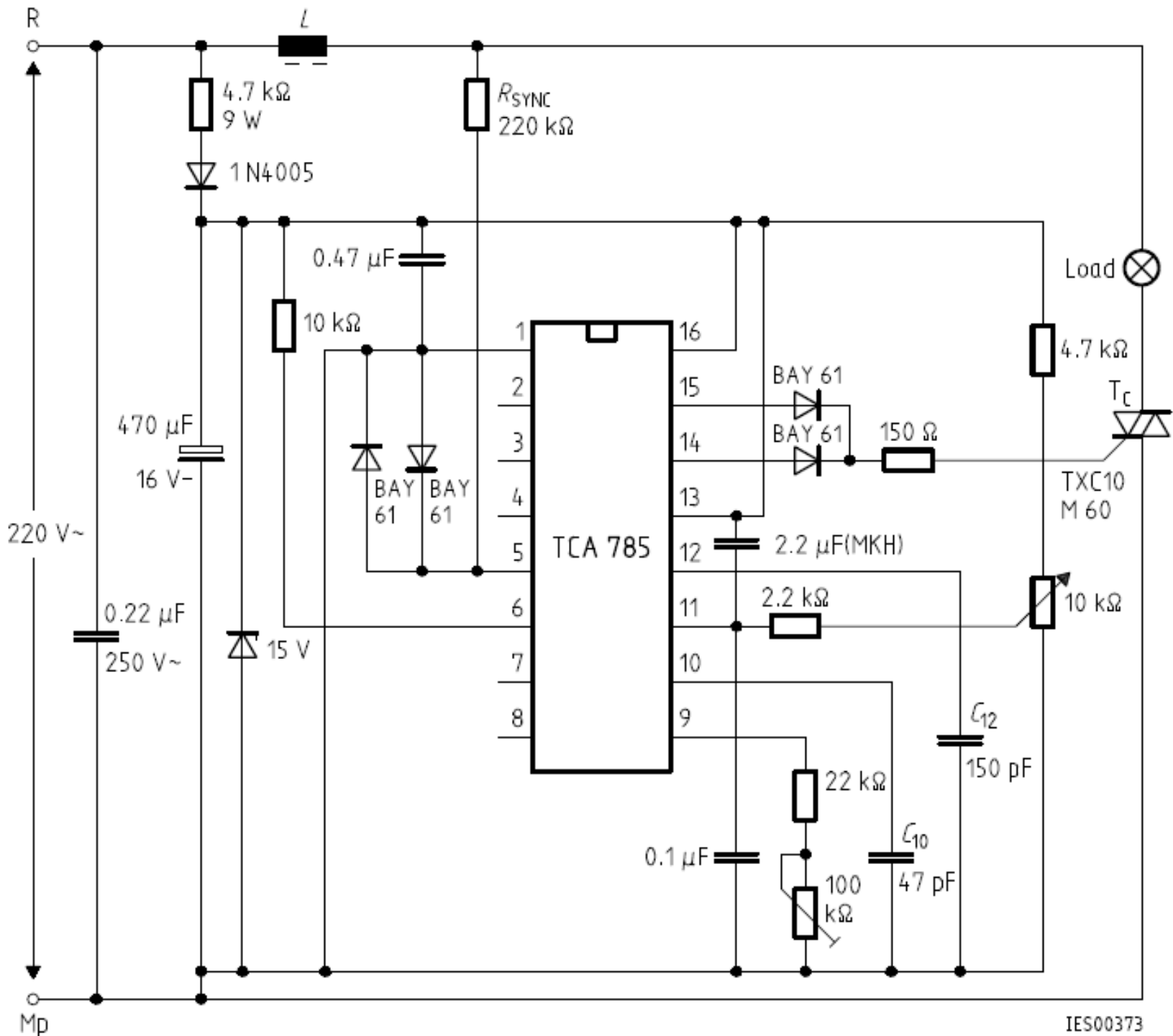


Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q2}$	Output 2 inverted
3	$\overline{Q U}$	Output U
4	$\overline{Q2}$	Output 1 inverted
5	V_{SYNC}	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	Q Z	Output Z
8	V_{REF}	Stabilized voltage
9	R_9	Ramp resistance
10	C_{10}	Ramp capacitance
11	V_{11}	Control voltage
12	C_{12}	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2
16	V_s	Supply voltage

Princípio de Funcionamento





5.5 Circuitos de Comutação dos SCRs

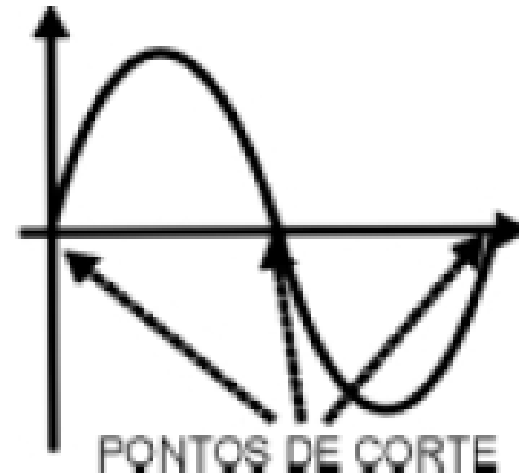
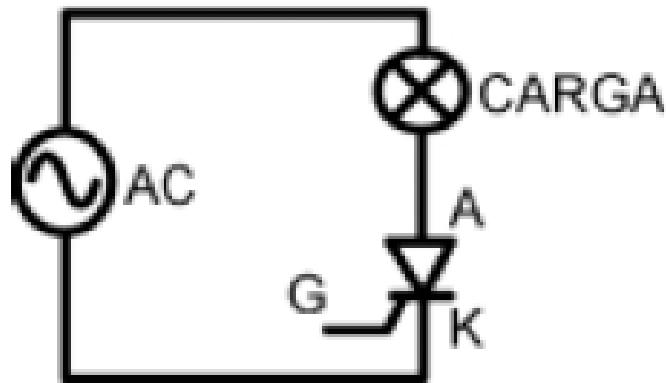
Se por um lado, é fácil a entrada em condução de um tiristor, o mesmo não se pode dizer de seu desligamento.

Lembrando que a condição de desligamento é que a corrente de ânodo fique abaixo do valor de I_{Hold} . Não existe maneira de se desligar o tiristor através de seu terminal de controle, sendo necessário algum arranjo no circuito principal para reduzir esta corrente.

- Comutação natural (Comutação em rede AC);
- Comutação com chave auxiliar em série;
- Comutação com resistor em série;
- Comutação com chave auxiliar em paralelo;
- Comutação por polarização Reversa;
- Comutação por pulso de corrente (GTO, SCS, MCT).

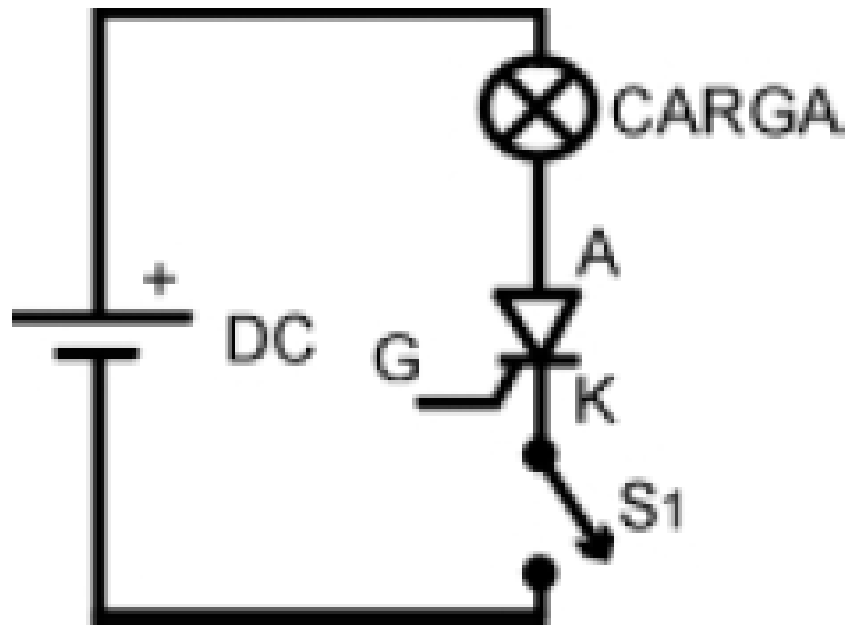
a) Comutação em rede AC

Toda a vez que a rede passa pelo zero, a corrente cai para um valor menor que I_{HOLD} e o tiristor corta.



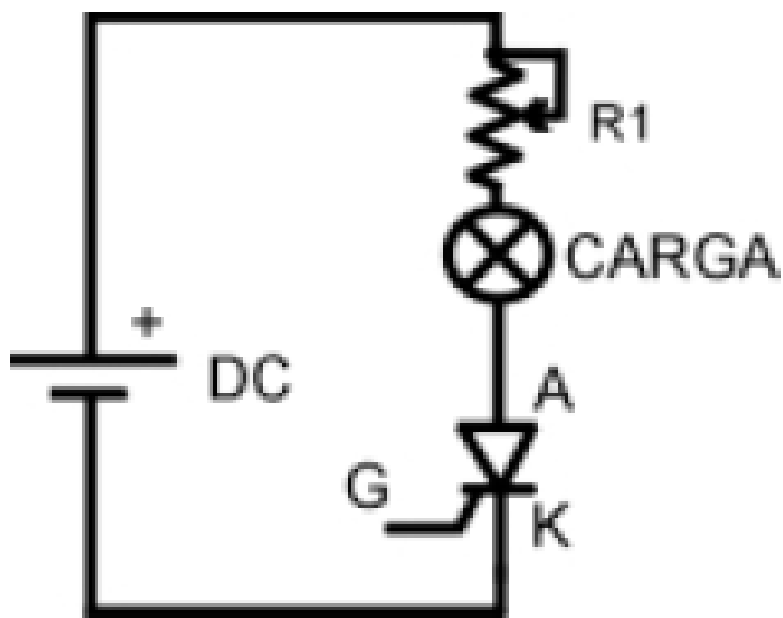
b) Comutação com chave auxiliar em série

Como não há passagem por zero, é necessário abrir a chave S1 para que a corrente caia para valores menores que I_H .



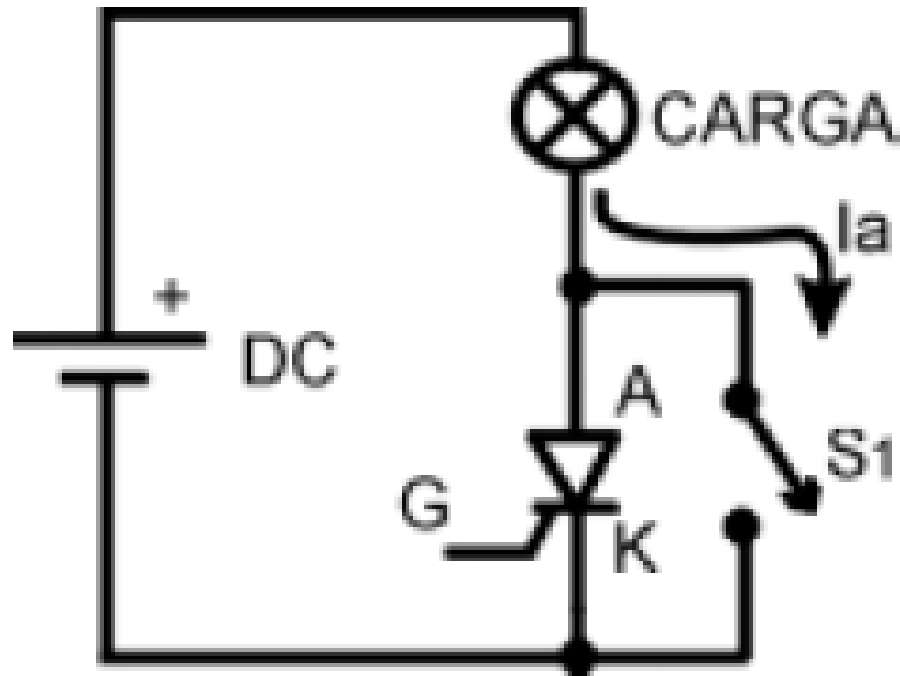
c) Comutação com resistor em série

Neste caso aumentando-se a resistência de R1 até que a corrente fique menor que a corrente de holding e então o tiristor corta.



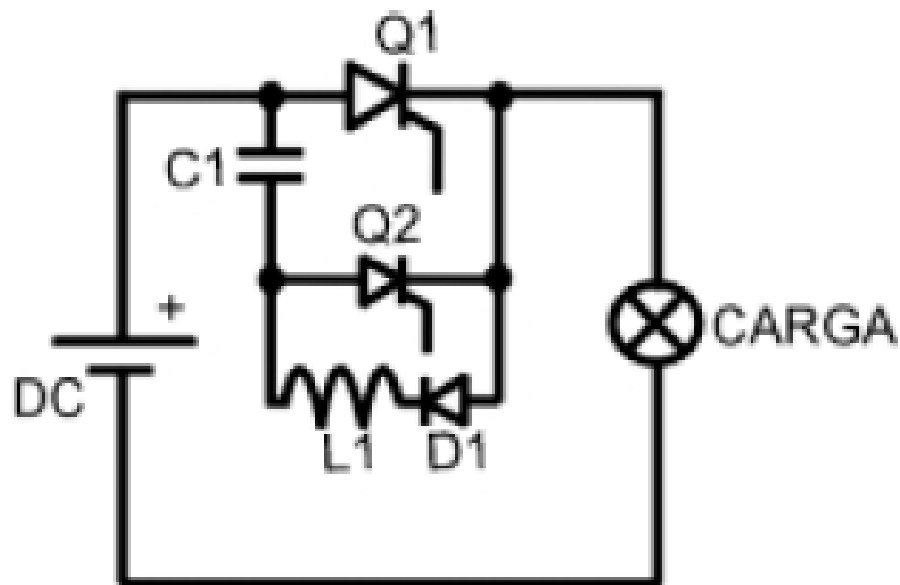
d) Comutação com chave auxiliar em paralelo

Quando acionamos a chave S2 a corrente circula por ela e o tiristor corta.



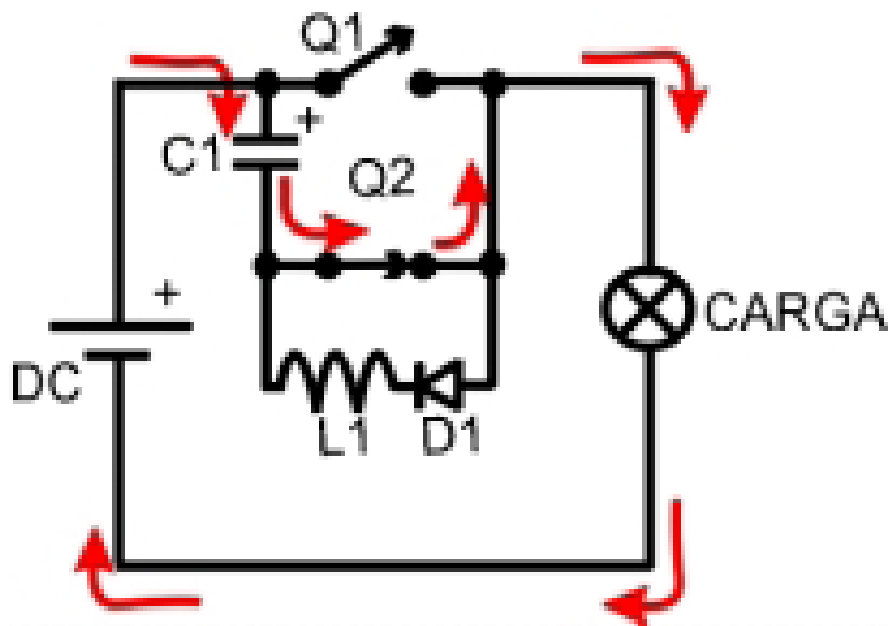
e) Comutação por polarização reversa

Utilizada em circuitos de corrente contínua onde se tem que aplicar uma tensão reversa nos terminais do dispositivo para levar o dispositivo ao corte.

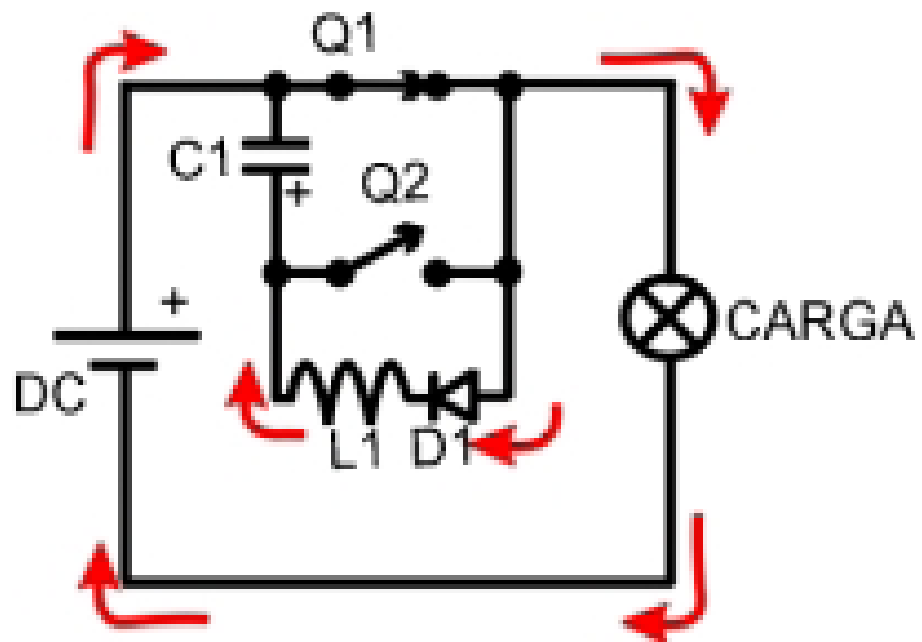


O circuito auxiliar é composto pelos componentes C1, Q2, L1 e D1 ele será utilizado para desligar o tiristor principal Q1.

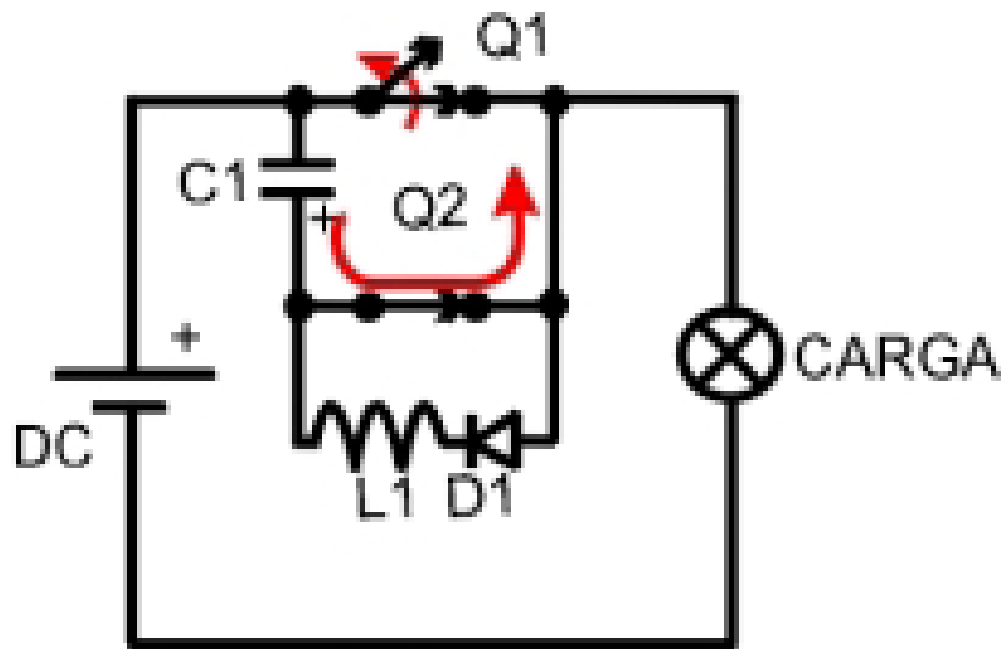
**1ª. Etapa – Carga do capacitor C1
antes do chaveamento de Q1**



**2ª. Etapa – Tiristor Q1 é ligado,
invertendo a tensão no capacitor C1**



3ª. Etapa – Carga do capacitor C1 é utilizada para aplicar uma tensão negativa em Q1 e possibilitar a abertura do tiristor



6 Referência Bibliográfica

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. Editora Prentice Hall, 2000.

RASHID, Muhammad. **Eletrônica de Potência, Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. Makron Books, 1999.

TOSS, Marcelo. **Apostila de Eletrônica de Potência I**. Universidade de Caxias do Sul 2007.

SCHUCH, Luciano. **Apostila de Eletrônica Industrial III**. Universidade de Caxias do Sul 2008.