

CIRCUITOS MONOESTÁVEIS E ESTÁVEIS COM CI 555

Resumo

Basicamente existem dois tipos de multivibradores: os monoestáveis e os estáveis ou osciladores.

Como o próprio nome indica, um monoestável tem somente um estado estável (geralmente 0) e, quando sofre um pulso de disparo, sua saída vai para o estado quase estável (1), permanecendo neste estado por um tempo fixo (tempo este definido normalmente por resistores e capacitores).

Os monoestáveis dividem-se em dois tipos: regatilháveis e não regatilháveis. No primeiro, ocorrendo um pulso de disparo enquanto a saída está no estado quase-estável, o tempo sofre um reset e a saída ainda permanece neste estado pelo tempo definido pelo resistor e capacitor. Já para os não regatilháveis isto não acontece, ou seja, aplicando-se um disparo quando o monoestável está no estado quase-estável, este pulso de disparo será ineficaz.

Quando se trabalha com monoestáveis não regatilháveis deve-se levar em conta o ciclo de trabalho ligado, o qual não pode ser ultrapassado, sob pena de ocorrer Jitter (oscilação na duração do pulso de saída). Entende-se como ciclo de trabalho ligado a relação:

$$\text{Ciclo de trabalho ligado} = \frac{\text{tempo ligado}}{\text{tempo ligado} + \text{tempo desligado}}$$

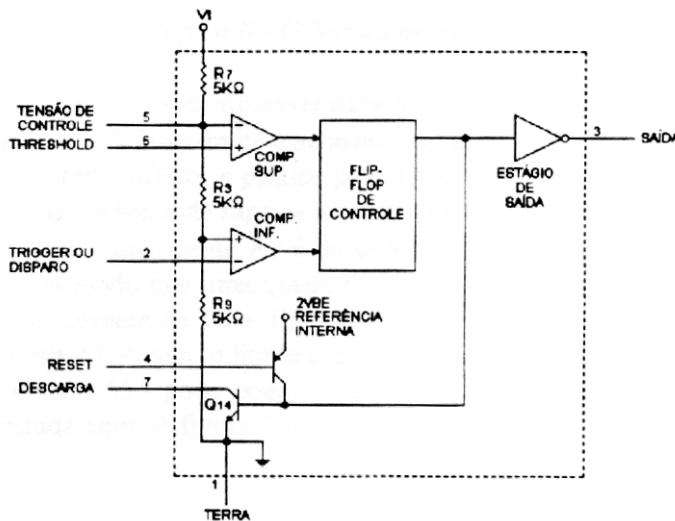
Os monoestáveis são usados para determinação de tempo e controle de seqüência de eventos, e os estáveis (osciladores) são utilizados para gerar pulsos de clock, necessários para controlar a temporização de circuitos digitais. Existem comercialmente osciladores de cristal com alta estabilidade, na forma de circuitos integrados e com saída compatível com TTL. Se a tolerância em uma determinada frequência não for extremamente crítica, pode-se construir

osciladores usando-se circuitos TTL; circuitos estes que podem ser os monoestáveis.

O 555

O 555 é um circuito integrado que serve a vários propósitos. Aqui ele será analisado atuando como monoestável e posteriormente como astável. Este CI pode ter sua fonte de alimentação variando desde 0 até 15V e quando $V_{cc} = 5V$ ele é plenamente compatível com TTL.

O diagrama funcional do 555 está mostrado na figura.

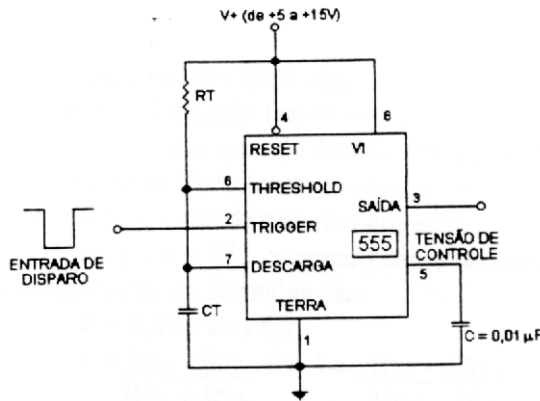


O 555 opera do seguinte modo:

- A) Toda vez que a tensão no pino 2 (trigger) cai abaixo da tensão na entrada positiva do comparador inferior, a saída vai para o nível alto (1);
- B) Toda vez que a tensão do pino 6 (threshold) vai a um valor além da tensão no pino 5 (tensão de controle), a saída vai para nível baixo (0);
- C) A entrada reset é ativa quando seu nível é baixo (0);
- D) Quando não se usa o pino 5 (tensão de controle), este deve ser ligado para a terra através de um capacitor de $0,01 \mu F$, para imunidade de ruído;

E) O comparador inferior possui um storage time de ordem de $10 \mu\text{F}$, e isto significa que a largura mínima de pulso será desta ordem ($10 \mu\text{s}$).

A figura a seguir ilustra o 555 ligado como monoestável. Deve-se observar que o pulso de disparo deve ser negativo, e que também, deve ter uma duração menor que o tempo de pulso de saída.



O 555 como monoestável

Para a configuração mostrada na figura, a duração do tempo de saída é:

$$T = 1,1 \times R_T \times C_T$$

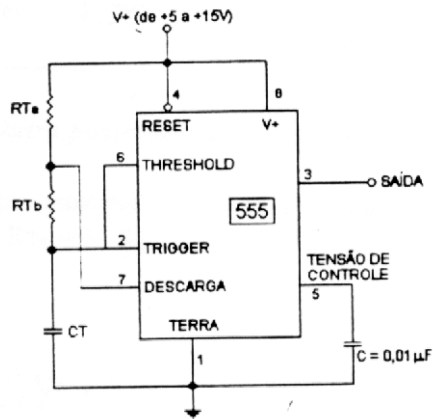
Lembrando que o limite de T é de $10 \mu\text{s}$.

Um limite inferior razoável para R_T é de $10\text{K}\Omega$, embora R_T possa ser menor que $10\text{K}\Omega$ (este limite é aconselhável devido aos aspectos econômico).

Um limite inferior e prático para C_T é de 100 pF , pois abaixo disto os efeitos de capacitância de fuga se tornam apreciáveis, limitando a precisão.

O limite superior de R_T é de ordem de $13 \text{ M}\Omega$, pois é boa prática selecionar R_T de modo que uma queda de tensão maior que $1/3 V_{CC}$ seja provocada por uma corrente de fuga mais a corrente threshold. Assim, o limite superior de C_T dependerá de sua corrente de fuga.

Como o 555 pode operar sozinho como astável, esta sua aplicação já será tratada aqui. A figura abaixo mostra o 555 ligado como astável ou oscilador.



O 555 como astável

As restrições de operação de 555 como astável são poucas e similares a operação monoestável. O limite superior da frequência é de ordem de 100 KHz (devido ao storage time), e o limite inferior é imposto, praticamente, pelas limitações de R e C. Os limites de C_T são idênticos ao do monoestável. O máximo valor $R_{Ta} + R_{Tb}$ é o mesmo que o R_T do monoestável, ou seja da ordem de $13M\Omega$.

As fórmulas para o 555 como multivibrador astável na configuração da figura anterior são:

$$T = 0,693 (R_{Ta} + R_{Tb}) \cdot C_T$$

$$T = 0,693 \cdot R_{Tb} \cdot C_T$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2}$$

$$f = \frac{1,44}{(R_{Ta} + 2R_{Tb}) \cdot C_T}$$

onde:

T1 é o tempo ligado (saída alta)

T2 é o tempo desligado (saída baixa)

Neste caso, observa-se que, quando R_{Tb} se torna maior do que R_{Ta} , o ciclo de trabalho se aproxima de 50% (onda quadrada). Por outro lado, quando R_{Ta} se torna maior que R_{Tb} , o ciclo de trabalho aumenta, no sentido de 100%.

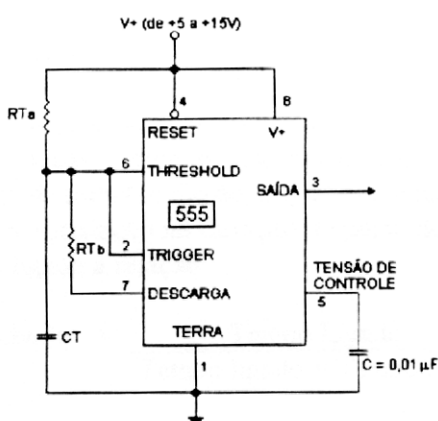
Outra configuração para o 555 operando como estável é a mostrada na figura a seguir. Nesta configuração, as fórmulas são:

$$T = 0,693 R_{Ta} C_T$$

$$T = \frac{R_{Ta} R_{Tb} C_T}{R_{Ta} + R_{Tb}} \ln \frac{R_{Tb} - 2R_{Ta}}{2R_{Tb} - R_{Ta}}$$

E R_{Tb} deve ser menor que $\frac{R_{Ta}}{2}$ pois caso contrário a

tensão no pino 2 permanecerá acima de $\frac{1}{3} V_{cc}$, não disparando o CI.



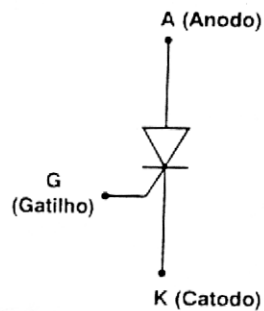
Outra possibilidade do 555 como astável

Com a configuração mostrada na figura anterior é possível obter-se onda quadrada com o 555 (exemplo: $R_{Ta} = 51K\Omega$ e $R_{Tb} = 22K\Omega$).

SCR

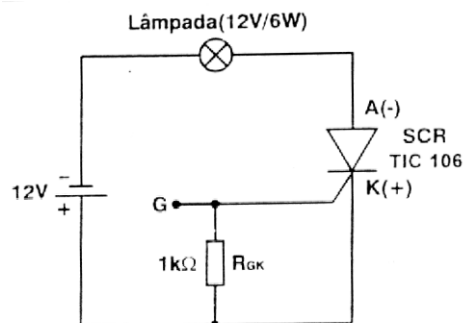
Introdução

O SCR (Silicon Controlled Rectifier ou retificador Controlado de Silício) é um dispositivo de três terminais, chamados ânodo (A), cátodo (K) e gatilho (G), como mostra a figura abaixo. Os nomes ânodo (positivo) e cátodo (negativo) vieram acompanhando a evolução dos dispositivos eletrônicos, desde as válvulas, e estão relacionados com o sentido de condução de corrente no SCR. Já, o terminal de gatilho será melhor entendido quando for explicado o funcionamento detalhado desse dispositivo.



Símbolo do SCR

Na verdade o SCR é mesmo um diodo, só que controlado. Se for aplicada uma tensão negativa no ânodo e positiva no cátodo, o SCR não vai conduzir. No circuito da figura a seguir, a lâmpada L permanece apagada.



SCR Polarizado Reversamente

O resistor de 1 K serve para garantir que o SCR não dispare.

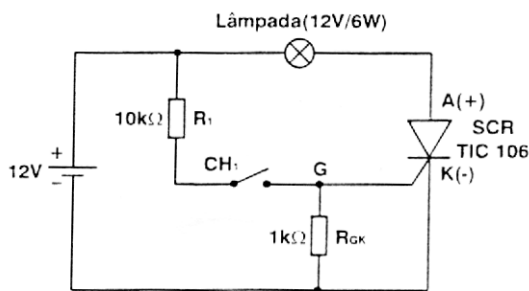
No caso da figura acima, o SCR comporta-se como um diodo reversamente polarizado, não conduzindo e deixando a lâmpada L apagada.

E agora, se a fonte de 12V fosse invertida? A lâmpada acenderia?

A resposta é não! Aqui é que aparece a diferença em relação a um diodo. Mesmo, polarizado diretamente, ou seja, ânodo positivo em relação ao cátodo, o SCR ainda não conduz. É necessário algo mais!

O gatilho

Este algo mais é um pulso ou tensão positiva aplicada no gatilho, conforme pode ser visto na figura.



SCR Polarizado Diretamente

Estando a chave CH₁ aberta, ainda que a fonte de 12V tenha sido invertida, o SCR bloqueia a condução de corrente e a lâmpada L fica apagada. Isto é que dá a característica de controle. Quando for desejado, a lâmpada pode ser acesa, fechando CH₁.

Após acender a lâmpada, ou seja, após disparar o SCR e, posteriormente, a chave CH₁ pode ser aberta sem fazer com que a lâmpada se apague.

Essa é uma característica de destaque dos tiristores, em geral.

O gatilho serve só para disparar o SCR e, posteriormente, perde função. Para bloquear o SCR, é necessário que a corrente que ele conduz entre ânodo e cátodo seja anulada. No circuito da figura anterior isso só é possível se a fonte de 12V for desligada.

Exemplo

O SCR TIC 106B tem as seguintes características básicas.

Tensão de Pico Reversa	$V_{RRM} = 200V$
Corrente Média (até $T_C=80^\circ C$)	$I_{T(AV)} = 5A$ para corrente contínua $I_{T(AV)} = 3,2A$ para senóide retificada (180° de condução)
Queda de Tensão em Condução	$V_{TM} = 1,7V @ I_{TM} = 5A$

Verificar se este SCR pode ser aplicado nas condições dos circuitos das figuras anteriores.

No circuito SCR Polarizado Reversamente, como não há corrente, a tensão sobre a lâmpada é nula. Assim, toda a tensão da fonte de 12V aparece como tensão reversa sobre o SCR. Como o mesmo suporta até 200V de tensão reversa (V_{RRM}), não há problema.

Uma lâmpada de 12V e 6W tem uma corrente nominal de:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{6}{12} = 0,5A$$

No circuito da figura anterior, quando o SCR conduz a lâmpada acende, o SCR apresenta uma queda de tensão de 1,7V (V_{TM}). Desta forma, sobram 10,3V para a lâmpada, que terá, portanto, uma corrente menor que 0,5A. Como o SCR suporta até 5A (I_{TM}), não haverá problema.

Solucionando Problemas

1. Quais são as semelhanças e diferenças básicas entre um diodo e um SCR, quando polarizados direta e reversamente?

.....

.....

.....

.....

.....

2. Qual o significado dos parâmetros do SCR: V_{RRM} , $I_{T(AV)}$, V_{TM} e I_{TM} ?

.....

.....

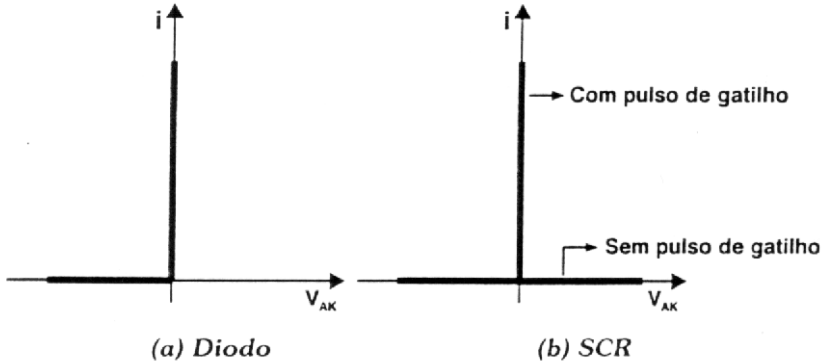
.....

.....

.....

Curva ideal do SCR

As curvas idealizadas do diodo e do SCR são mostradas respectivamente pelas figuras (a) e (b).



Curvas Idealizadas do diodo e do SCR

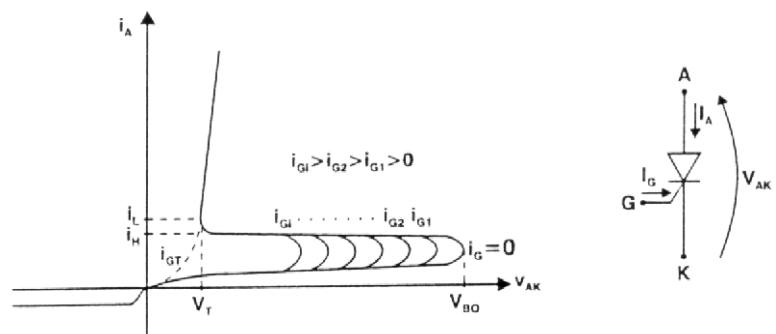
Tanto no diodo como no SCR, quando a tensão é negativa (polarização reversa), ocorre o bloqueio e a corrente é nula para qualquer tensão.

No diodo, quando a tensão tende a ficar positiva, o diodo entra em condução e a corrente aumenta. O diodo polarizado diretamente é equivalente a curto circuito, sendo a tensão sempre zero e a corrente limitada apenas pela carga colocada em série.

No SCR, apesar da tensão ser positiva, o mesmo ainda permanece bloqueado (corrente nula). Só quando for aplicado um pulso no gatilho, é que o SCR passará a conduzir corrente, comportando-se como um curto-circuito.

Curva real do SCR

A curva real do SCR é mostrada na figura. Na verdade, são várias curvas que dependem da corrente do gatilho aplicada.



Curva real do SCR

Observando-se a curva real, pode-se distinguir três regiões de **polarização reversa**, de **polarização direta em bloqueio** e de **polarização direta em condução**.

Na região da polarização **reversa** para $V_{AK} < 0$, praticamente não há condução. A corrente, que na curva ideal é nula, aqui tem um valor muito baixo, que depende do tipo de SCR. Nos SCRs de baixa corrente, a corrente reversa é de ordem de dezenas a centenas de μA . Nos de alta corrente, a corrente reversa pode chegar a centenas de mA.

Na região de **polarização direta em bloqueio**, há várias curvas parametrizadas pela corrente de gatilho I_G . Quando $I_G = 0$, o SCR permanece bloqueado, desde que a tensão seja inferior a V_{BO} (breakover voltage ou tensão de disparo). Quando $V_{AK} = V_{BO}$, o SCR **dispara** e a corrente cresce, sendo limitada pela resistência de carga, colocada em série com o SCR.

Esta é a região de **polarização direta em condução**. Para que o SCR permaneça em condução, é necessário que a corrente de ânodo atinja um valor **mínimo de disparo** I_L (latching current ou corrente de disparo). Caso esse valor não seja atingido, após o disparo, o SCR volta ao estado de bloqueio.

Pela figura anterior, vê-se que, quanto maior o valor da corrente de gatilho, tanto menor a tensão V_{AK} necessária para disparar o SCR. Isso é verdade até o limite de $I_G = I_{GT}$ (gate trigger current ou corrente de gatilho com disparo). A curva correspondente a I_{GT} está desenhada tracejada na figura citada. I_{GT} é a mínima corrente de gatilho que garante o disparo do SCR com tensão direta de condução V_T . Com I_{GT} aplicada, é como se SCR fosse um diodo.

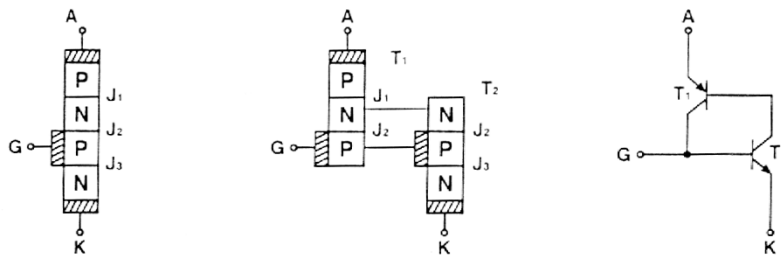
Na região de **polarização direta em condução**, a queda de tensão no SCR é igual a V_T . Esta tensão tem um valor típico de 1,5V.

Após o disparo, sendo estabelecida a condução ($i_A > I_L$), a corrente de gatilho poderá ser **removida**, que o SCR

permanecerá em condução. O SCR só voltará ao bloqueio se a corrente i_A cair abaixo de I_H (holding current ou corrente de manutenção), ou se $V_{AK} < 0$ (ânodo negativo em relação ao cátodo).

Analogia com dois transistores

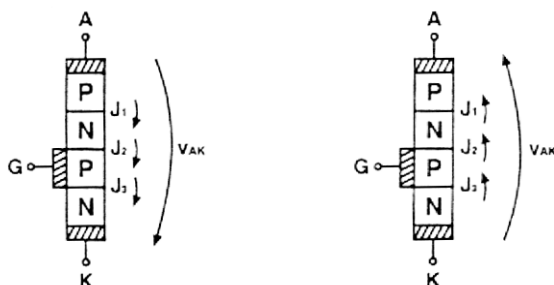
Um recurso muito utilizado para explicar o processo de disparo do SCR é a analogia com dois transistores complementares (PNP e NPN), mostrada na figura.



Analogia entre as estruturas de um SCR e de dois transistores interligados como SCR

Com $V_{AK} < 0$, o SCR está polarizado reversamente. Vê-se na figura anterior que isto ocorre porque há duas junções polarizadas reversamente (J_1 e J_3) e uma junção polarizada diretamente (J_2). A corrente é nula em toda a faixa útil da tensão reversa.

A figura a seguir mostra a distribuição de tensões na polarização reversa.



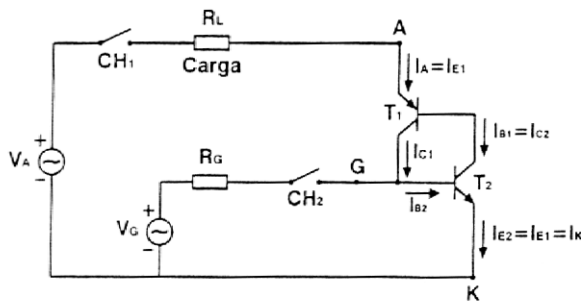
Distribuição das tensões nas junções do SCR

Na **polarização reversa**, não adianta aplicar pulso do gatilho. Isso nem é aconselhável, pois faria fluir uma corrente de fuga do ânodo de valor aproximadamente igual ao da corrente de gatilho, causando um superaquecimento da junção. Como conseqüência, pode-se danificar o componente.

Na **polarização direta**, como é ilustrada na figura, existem duas junções polarizadas diretamente (J_1 e J_3). Entretanto, ainda não é possível fluir corretamente pelo SCR, pois a junção J_2 está polarizada reversamente. Há, apenas, uma corrente de fuga de baixo valor.

Porém, se for aplicado um **pulso de corrente no gatilho**, os portadores injetados causarão um fenômeno de avalanche na junção J_2 , levando o SCR ao **disparo**.

Para entender melhor o processo de disparo de um SCR, a analogia com dois transistores está desenhada na figura a seguir, incluindo a fontes externas e detalhando as correntes nos transistores.



Analogia com dois transistores incluindo fontes externas e correntes

Quando não há pulso no gatilho, só uma corrente pequena pelo SCR. Isso que os valores de I_C de T_1 e T_2 são baixos e, portanto, o produto $\beta_1 \cdot \beta_2$ é pequeno e bem menor do que 1.

Quando for aplicado o pulso no gatilho, após fechar CH_2 a corrente na base de T_2 (I_{B2}) aumentará. Isso fará com que I_{C2} também aumente ($I_{C2} = \beta \cdot I_B$), o mesmo ocorrendo com I_{B1} . Aumentando I_{B1} , aumenta I_{C1} , o que torna aumentar I_{B2} , e assim sucessivamente.

Esse processo é uma realimentação positiva e as correntes vão aumentando até os dois transistores saturarem.

Ocorrendo a saturação, os terminais dos transistores ficam curto circuitados e toda tensão V_A da fonte recai sobre a carga R_L .

Esta analogia é boa também para mostrar como o SCR continua conduzindo, mesmo sem pulso no gatilho. Após a saturação, a corrente de um transistor mantém o outro saturado. Assim, qualquer aumento de corrente de gatilho não irá alterar as correntes dos transistores. Apenas I_{E2} vai absorver esse aumento.

Dessa forma, a corrente de gatilho pode ser retirada, sem que o SCR pare de conduzir.

Outros métodos de disparo do SCR

Além da aplicação do pulso do gatilho, o SCR pode ser disparado de outras formas. Normalmente, esses disparos são indesejados pois, em alguns casos, podem destruir o dispositivo.

Disparo por sobretensão

O aumento de tensão V_{AK} , quando o SCR está polarizado diretamente, reflete diretamente na junção J_2 que se encontra polarizada reversamente, pois J_1 e J_3 estão polarizados diretamente.

A corrente do SCR é muito pequena e formada pelos portadores minoritários, já que trata-se de uma corrente de fuga de junção polarizada reversamente. Com o aumento de V_{AK} , esses portadores são acelerados na junção J_2 , podendo atingir uma energia tão grande que provocarão o fenômeno de avalanche.

Esse fenômeno faz com que muitos elétrons choquem-se e saiam das órbitas dos átomos da rede. Estando

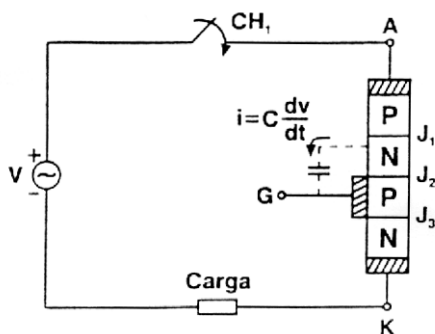
disponíveis para condução, esses elétrons permitem que a corrente de ânodo cresça.

Aumentando a corrente de ânodo., estabelece-se a realimentação entre T_1 e T_2 , mantendo o SCR disparado.

Esse processo de disparo, nem sempre destrutivo, raramente é utilizado na prática. Para o gatilho aberto, ou seja, $I_G = 0$, a tensão na qual o SCR passa ao estado de condução é chamado tensão de breakover (V_{BO}).

Disparo para variação de tensão (dv/dt)

Em um SCR polarizado diretamente, a junção J_2 está reversamente polarizada. Nessa junção, existe carga armazenada: íons positivos de um lado e íons negativos do outro. Isso é como um capacitor carregado. Veja a representação simbólica na figura.

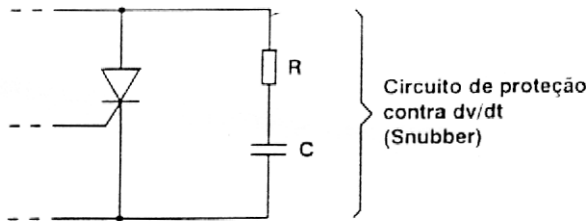


Capacitância da junção J2

Assim, mesmo não havendo pulso no gatilho, fechando-se a chave CH_1 , a capacitância da junção J_2 fará com que circule uma corrente de gatilho. Como a variação é muito grande (de zero para V), a corrente resultante será muito grande. Essa corrente poderá ser suficiente para estabelecer o processo de realimentação da analogia com dois transistores, que mantém T_1 e T_2 saturados, fazendo com que o SCR entre em condução.

Esse disparo, normalmente indesejado, pode ser evitado pela ação de um circuito de proteção chamado snubber. Esse

circuito é formado por um resistor em série com um capacitor, colocados em paralelo com o SCR, como mostra a figura.



Proteção contra dv/dt

Disparo por aumento de temperatura

Conforme já comentado, a corrente que circula por uma junção polarizada reversamente é extremamente dependente da temperatura. Ela é composta por portadores minoritários gerados termicamente.

Na expressão da corrente de ânodo, na analogia com dois transistores, aparece um termo $(I_{CBO1} + I_{CBO2})$. Quando houver um aumento considerável na temperatura, haverá um aumento também em I_{CBO1} e I_{CBO2} . Isso possibilita o estabelecimento da realimentação, que faz com que produto $\beta_1 \cdot \beta_2$ tenda a 1 e leve o SCR ao estado de condução.

Um dispositivo com esse modo de disparo é chamado LASCR (Light Activated Silicon Controlled Rectifier). Além do disparo por luz, esse dispositivo também pode ser acionado pelo gatilho, uma vez que o dispositivo tem um terminal com essa finalidade.

Métodos de comutação de um SCR

Bloquear ou comutar um SCR, significa contar a corrente que ele conduz e impedir que ele retome à condução. Ou seja, a comutação estará completa, quando a corrente no sentido direto for anulada e a reaplicação de tensão direta, entre ânodo e cátodo, não provocar o retorno do SCR ao estado de condução.

Naturalmente, leva um certo tempo para que o SCR possa assumir essa condição de bloqueio. Isso pode ser explicado, ainda, através de analogia com dois transistores.

Com o SCR em condução, os dois transistores estão saturados. Dessa forma, haverá muitos portadores armazenados na base de cada um deles. Para que o SCR bloqueie, é necessário que ambos os transistores cortem.

Para levar um transistor ao corte, é preciso remover toda a carga armazenada na base. A reaplicação de uma tensão positiva, entre ânodo e cátodo, antes de se completar esse processo de descarga dos transistores, permite que se reinicie o processo de realimentação, que mantém os transistores saturados e, conseqüentemente, o SCR em condução.

Existem três formas principais de bloqueio de um SCR, analisadas a seguir.

Comutação natural

Quando se reduz a corrente de ânodo a um valor abaixo de I_H , chamada corrente de manutenção (holding current), o SCR é bloqueado.

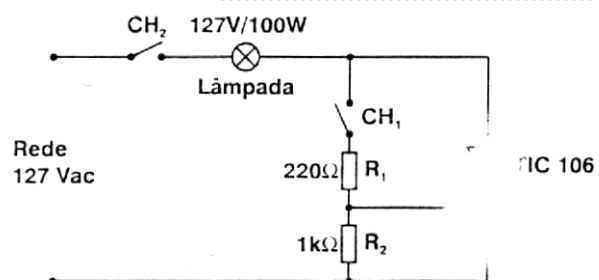
A corrente de manutenção tem um valor baixo, normalmente cerca de 1000 vezes menor do que a corrente nominal do dispositivo.

Em um circuito CA, a corrente passa pelo zero em algum ponto do ciclo. Isso já leva o SCR ao bloqueio.

Exemplo: Bloqueio pelo zero da rede

No circuito da figura ao lado, o SCR atua como chave para ligar e desligar uma lâmpada.

Comutação Natural do SCR



Com CH₁ aberta, mesmo com CH₂ fechada, o SCR está bloqueado, pois não há corrente de gatilho.

Fechando o CH₁, pelo resistor R₁ (220Ω) circula uma corrente de gatilho, que é suficiente para disparar o SCR no semiciclo positivo da tensão de rede.

Quando a tensão da rede passa por zero, a corrente da lâmpada anula-se e o SCR bloqueia. Só haverá novo disparo no próximo semiciclo.

Comutação forçada

Em circuitos CC, uma vez que a tensão entre ânodo e cátodo permanece positiva, deve-se fazer um "truque" para zerar a corrente de ânodo.

Em vez de aguardar a corrente passar por zero (o que não acontece neste caso), pode-se provocar o bloqueio através dos métodos de comutação forçada.

Desviando-se a corrente por um caminho de menor impedância, a corrente que passa pelo SCR irá cair abaixo de I_H, provocando o bloqueio.

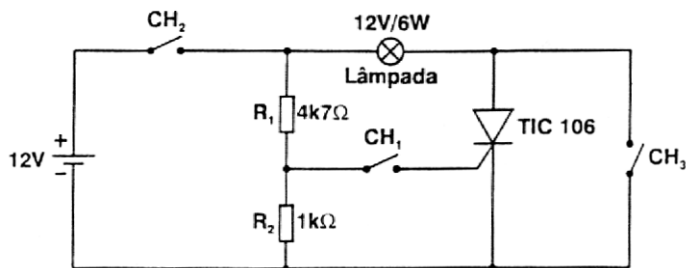
Pode-se, também, aplicar tensão reversa nos terminais do SCR, forçando-o a operar na região de polarização reversa de sua curva característica. Com isso, a corrente no SCR torna-se baixa e o SCR ficará bloqueado.

Após o bloqueio, deve-se garantir que a tensão não seja reaplicada no SCR imediatamente. Isto restabeleceria o processo de realimentação necessário para o disparo do SCR. A tensão reaplicada deve aumentar segundo um parâmetro dv/dt, definido nas folhas de dados do SCR.

Tudo isso ficará mais claro com os exemplos a seguir:

Exemplo: Bloqueio por chave

No circuito da figura abaixo, como se explica o bloqueio do SCR?



Bloqueio do SCR por chave em um circuito de corrente contínua

Com todas as chaves abertas, o SCR está bloqueado e a lâmpada, apagada. Fechando-se CH_2 , o circuito da lâmpada e do SCR estará energizado. Como não há corrente de gatilho, o SCR continuará bloqueado e a lâmpada apagada.

Quando CH_1 fechar, circulará pelo resistor R_1 ($4k7\Omega$) uma corrente suficiente para alimentar o gatilho do SCR, que disparará e acenderá a lâmpada.

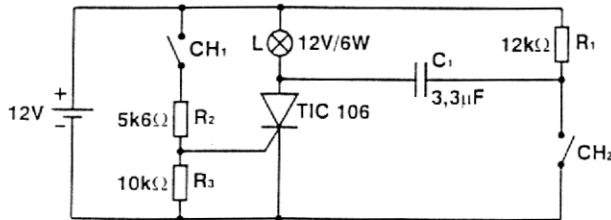
Com a lâmpada acesa, CH_1 pode ser novamente aberta, sem que o SCR bloqueie e a lâmpada se apague.

Fechando-se o CH_3 , naturalmente a lâmpada não se apagará, pois a chave curto circuitará o SCR ficando a lâmpada alimentada diretamente pela tensão da fonte. Como o SCR real não é exatamente um curto-circuito, toda a corrente de lâmpada irá passar pela chave CH_3 e a corrente do SCR cairá a zero. O SCR, então, irá bloquear.

Com o SCR bloqueado, abrindo-se a chave CH_3 , a lâmpada apagará. Assim, só será outra vez acesa se CH_1 for novamente fechada, provocando a corrente de gatilho no SCR.

Exemplo: Bloqueio por capacitor

O circuito da figura abaixo utiliza um processo de bloqueio por capacitor.

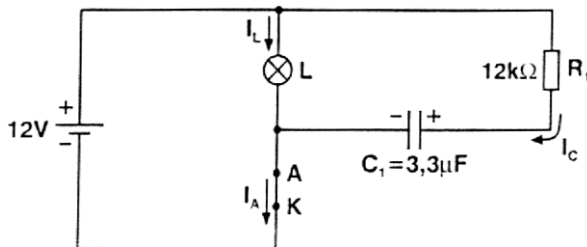


Bloqueio do SCR por capacitor em um circuito de corrente comum

Com CH_1 e CH_2 abertas, o SCR está bloqueado, a lâmpada está apagada e o capacitor descarregado.

Fechando-se o CH_1 , alimenta-se o circuito do gatilho. O SCR dispara e a lâmpada acende.

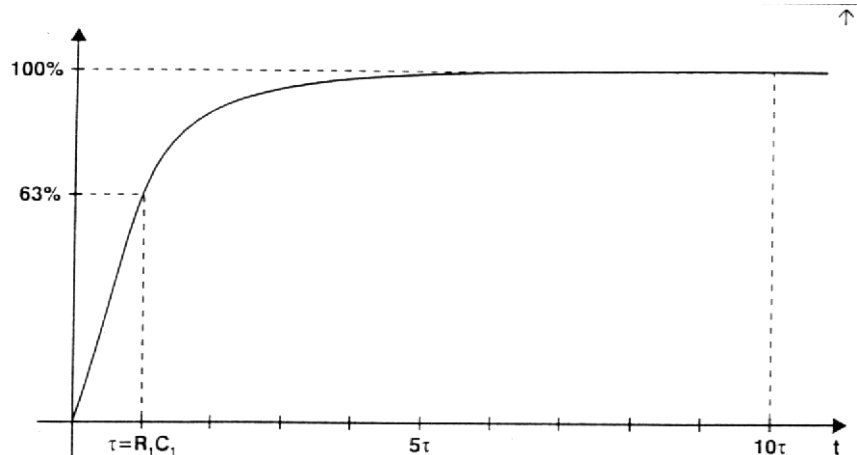
Além de corrente da lâmpada, o SCR conduz também a corrente de carga do capacitor C_1 , conforme ilustra a figura seguinte.



Correntes no SCR em condução e de carga do capacitor

O capacitor C_1 carrega-se de forma exponencial, com uma constante de tempo $t = R_1 \cdot C_1$, conforme ilustra a figura seguinte.

Carga exponencial do capacitor



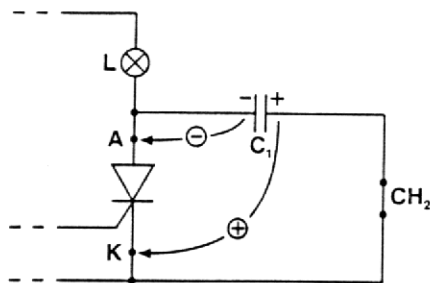
Ou seja, passado o período correspondente a uma constante de tempo t , o capacitor carrega-se, aproximadamente, com 63% da tensão final de 12V.

Passadas duas constantes de tempo ($t = 2t$), o capacitor carrega-se com cerca de 86% da tensão final. Assim, após $t = 10t$, pode-se considerar o capacitor totalmente carregado. Dessa forma, a chave CH_1 poderá ser aberta sem que o SCR bloqueie e a lâmpada apague, mas o circuito estará preparado para o bloqueio do SCR.

Leitor (a). Como isso é possível?

Pode-se ver que a placa do capacitor carregada negativamente, está ligada ao terminal de ânodo (A) do SCR.

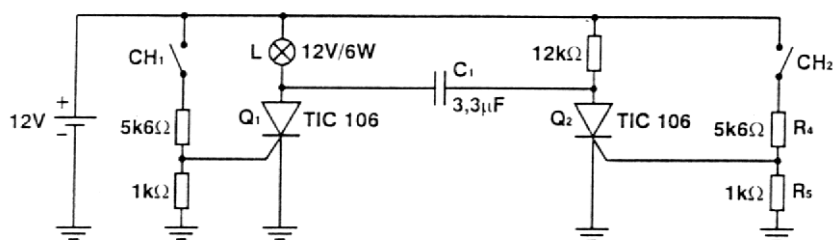
Quando CH_2 for fechada, o terminal positivo do capacitor será aterrado. Como o cátodo (K) do SCR também está aterrado, o capacitor fica em paralelo com o SCR e aplica uma tensão reversa ao mesmo, bloqueando-o, como mostra a figura a seguir.



Bloqueio do SRC por aplicação de tensão reversa pelo capacitor

Desafio 2:

O circuito da figura “Bloqueio do SCR por capacitor em um circuito de corrente contínua” foi modificado, substituindo-se CH_2 por um outro SCR, com o circuito de disparo correspondente. A figura a seguir mostra o resultado.



Circuito alternativo de bloqueio do SCR por capacitor

Mostre a que o circuito da figura apresentada tem funcionamento idêntico ao da figura “Bloqueio do SCR por capacitor em um circuito de corrente contínua”. Comece com todas as chaves abertas e, em seguida:

- a) Feche CH_1 , e veja que a lâmpada acende;
- b) Torne a abrir CH_1 e veja que a lâmpada permanece acesa;
- c) Feche CH_2 e observe que a lâmpada apaga (lembre-se que quando o capacitor estiver carregado com 12 V, a corrente que o atravessa será nula).

Desafio 3

Substitua o resistor de $12k\Omega$ do circuito da figura anterior por uma lâmpada de 12V / 6W, igual a L_1 . Explique porque esse circuito biestável é uma réplica de um flip-flop.

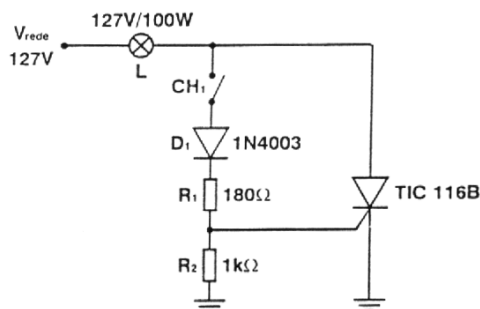
Leitor (a) – Se o SCR é um retificador, por que a maioria dos exemplos dados foram para corrente contínua?

Autor – Vamos ver quais as aplicações do SCR em corrente alternada.

O SCR em corrente alternada

Exemplo de aplicação: SCR como retificador de meia-onda

A figura representa um circuito retificador de meia-onda por SCR.



Características do TIC 116B:
 $I_{GT} = 20mA$ @ $V_{AK} = 6,0Vdc$

Retificador de meia-onda por SCR

Naturalmente, com CH₁ aberta, a lâmpada estará apagada.

Pelas características dadas pelo fabricante, o SCR TIC116B precisa de 20mA de corrente de gatilho para disparar garantidamente, quando V_{AK} for de 6 VCC.

A junção gatilho-cátodo não deixa de ser um diodo que aparece em paralelo com o resistor R₂ (1kΩ). Dessa forma, logo no início de semiciclo positivo, a junção gatilho-cátodo curto-circuita R₂ e a tensão da rede atinge um valor suficiente para o disparo do SCR, que conduzirá e acenderá a lâmpada.

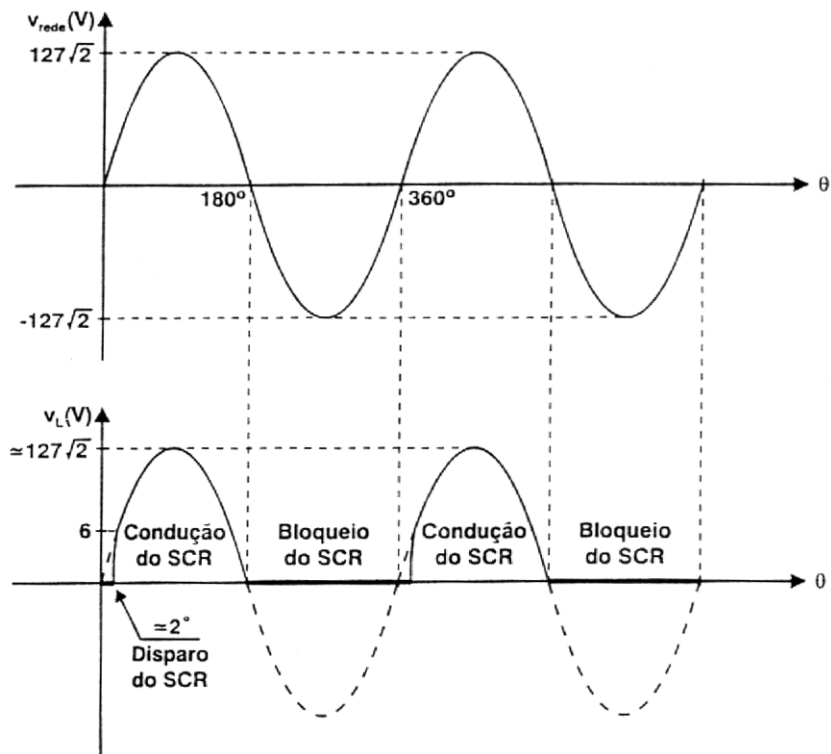
A tensão da rede em que o disparo ocorre pode ser calculada como segue:

$$I_G \cong V_{rede} / R_1 \rightarrow 20 \times 10^3 = V_{rede} / 180 \rightarrow V_{rede} = 3,6V$$

Como as condições de disparo fixam dois valores (V_{AK} = 6V e I_{GT} = 20mA), com certeza, entre 3,6V e 6V, a corrente necessária será atingida para garantir o disparo do SCR.

Uma vez que o valor de 6V é atingido logo no início do semiciclo positivo, aproximadamente 2° (dois graus) para tensão eficaz da rede igual a 127V, praticamente todo o semiciclo positivo é aplicado à lâmpada, como mostra a figura seguinte.

Formas de onda no circuito retificador de meia-onda com SCR



No semiciclo negativo, o SCR não conduzirá e o diodo em série com o resistor R_1 (180Ω), estando reversamente polarizado, evitará que circule corrente no gatilho. Além de desnecessária, essa corrente produziria dissipação no gatilho.

Desta forma, a tensão na lâmpada estará retificada em meia-onda, ou seja, ela conduzirá corrente somente nos semiciclos positivos.

Neste circuito, qual a real potência fornecida à lâmpada?

Normalmente, com tensão alternada, a potência da lâmpada seria:

$$P_L = \frac{V^2}{R}$$

onde:

V é o valor eficaz de tensão da rede que é aplicada totalmente à lâmpada.

R é a resistência elétrica da lâmpada.

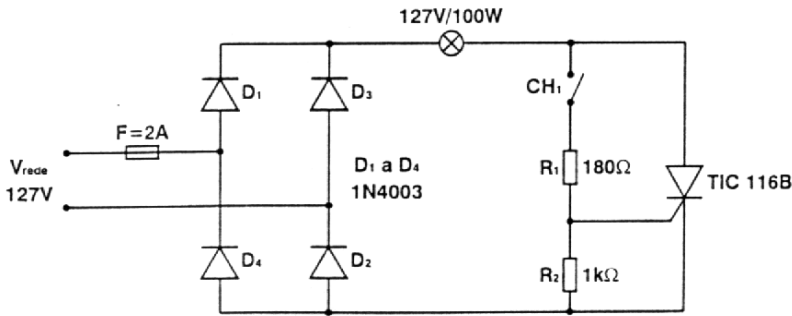
Com apenas meia-onda, o quadrado do valor eficaz da tensão aplicada à carga cai à metade e, portanto, a expressão da potência é:

$$P_L = \frac{V^2}{2.R}$$

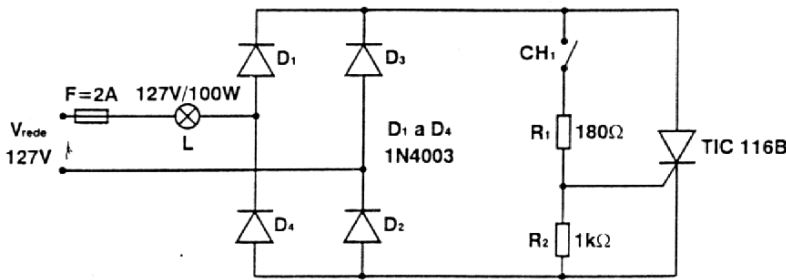
Como a lâmpada é de 100W, a potência real fornecida à lâmpada é de, aproximadamente, 50W.

Exemplo de aplicação: retificador de onda completa com SCR

Para fornecer potência total à lâmpada, podem ser utilizados os circuitos das figuras seguintes.



Controle liga-desliga com SCR em onda-completa com carga no lado CC

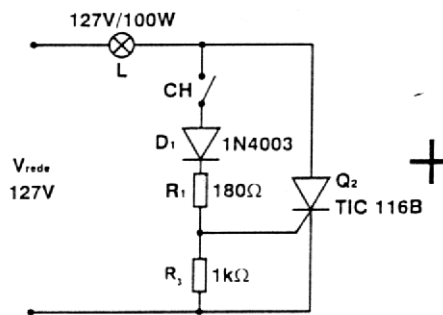


Controle liga-desliga com SCR em onda-completa com carga no lado CA

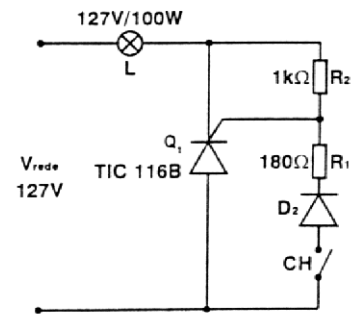
Tanto no circuito da primeira figura, como no da segunda figura apresentadas acima, o SCR atua como chave. A diferença é que no circuito da segunda figura, a corrente da lâmpada é alternada.

Para controle de corrente alternada, pode-se também associar dois SCRs, como mostra a figura seguinte.

Controle em onda completa com SCR



(a) Semiciclo Positivo



(b) Semiciclo Negativo

Solucionando Problemas

1) Explique de forma objetiva a curva ideal de um SCR.

.....
.....
.....
.....

2) Quais são as três regiões que podem ser destacadas na curva real de um SCR?

.....
.....
.....
.....

3) Qual o significado dos parâmetros do SCR: I_{GT} , I_H , I_L , V_T e V_{BO} ?

.....
.....
.....
.....

4) Descreva, de forma objetiva, os vários métodos de disparo, do SCR que não utilizam corrente de gatilho.

.....
.....
.....
.....

Solucionando Problemas

5) No circuito da figura (Página 1174), usado para explicar a comutação natural, quando o SCR dispara e quando ele bloqueia?

.....

.....

.....

.....

6) No circuito da figura (Página 176), usado para explicar a comutação forçada com bloqueio por chave, qual a função de CH_3 e em que condições o SCR dispara e bloqueia?

.....

.....

.....

.....

7) No circuito da figura (Página 177) usado para explicar a comutação forçada com bloqueio por capacitor, de que forma o capacitor atua no SCR?

.....

.....

.....

.....

Solucionando Problemas

8) No circuito da figura (Página 179) (SCR como retificador de meia-onda), qual o maior valor de R_1 que garante o disparo do SCR no semiciclo positivo?

.....
.....
.....
.....

9) Desenhe as formas de onda das tensões na lâmpada nos circuitos retificadores de onda completa com SCR das figuras (Página 182)

.....
.....
.....
.....

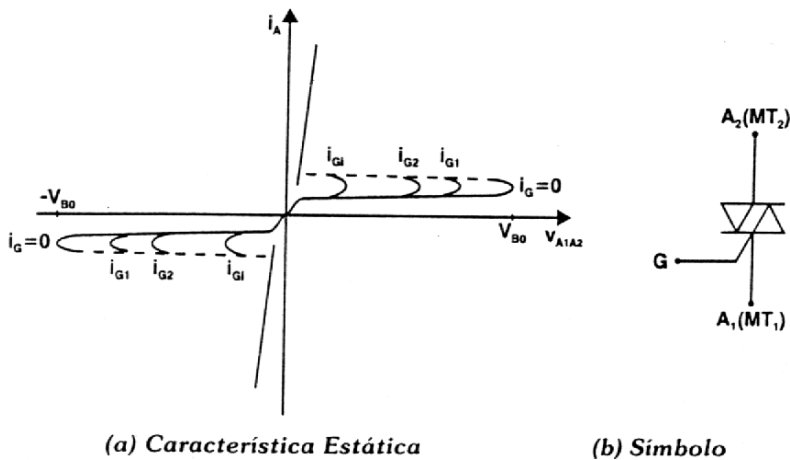
TRIAC

- Características gerais
- Modos de disparo do TRIAC
- TRIAC em corrente alternada
- Exercícios propostos

Características gerais

Para evitar a necessidade de utilização de dois SCRs em antiparalelo, foi desenvolvido um dispositivo, chamado TRIAC.

O nome vem de TRI (Triode ou Triodo, de três terminais) e AC (Alternate current ou Corrente alternada.). Ou seja, o TRIAC é um triodo que permite o controle de corrente alternada. Sua característica estática e seu símbolo podem ser vistos na figura abaixo.



Curva característica e símbolo do TRIAC

Como pode ser visto na sua curva característica, o TRIAC pode conduzir nos dois sentidos de polarização. Ele entra em condução de modo análogo ao SCR, isto é, quando for ultrapassada a tensão de breakover (V_{B0}) sem pulso no gatilho ou quando for aplicada uma corrente de gatilho. Em condução do TRIAC apresenta-se quase como um curto circuito. A queda de tensão entre ânodo e cátodo situa-se entre 1 e 2V.

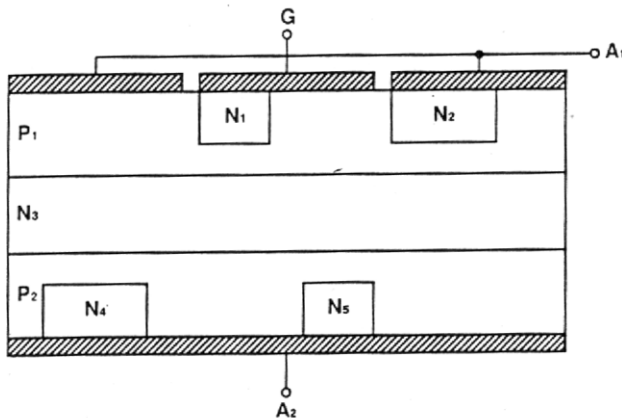
Leitor (a) – Mas, e o pulso de gatilho? É negativo ou positivo?

Autor – Bem lembrado! Essa é uma grande característica do TRIAC.

Além de conduzir em ambos os sentidos, o TRIAC pode ser disparado tanto por pulso positivo quanto por pulso negativo.

Uma visão simplista do TRIAC é a de uma associação em antiparalelo de dois SCRs. Isso, porém, não consegue explicar por que o TRIAC dispara com um pulso negativo.

A figura mostra a estrutura de um TRIAC, adequado para a explicação dada a seguir.



Estrutura de um TRIAC

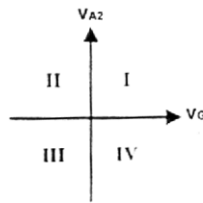
Como o TRIAC é bidirecional, as palavras ânodo e cátodo ficam sem sentido. Os terminais de TRIAC são chamados ânodo 1 (A_1), ânodo 2 (A_2) e gatilho (G). A terminologia terminal principal 1 (MT_1) e terminal principal 2 (MT_2) também é utilizada para os ânodos.

Modos de disparo do TRIAC

Costuma-se dizer que o TRIAC opera em quatro quadrantes. Tomando-se o terminal A_1 como referência, os

quatro quadrantes são definidos pelas polaridades de A_2 e G , segundo o gráfico e a tabela da figura abaixo.

Quadrante	A_2	G
I	>0	>0
II	>0	<0
III	<0	<0
IV	<0	>0

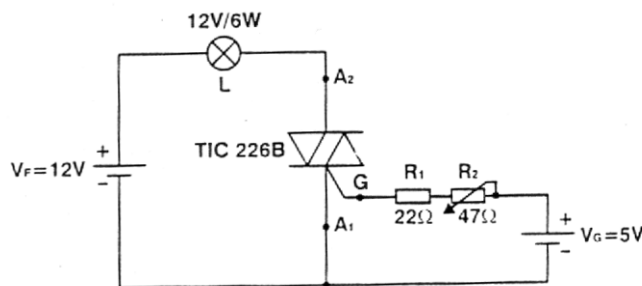


Quadrantes de operação do TRIAC

A sensibilidade ao disparo varia de quadrante para quadrante, em função das diferenças nos ganhos de amplificação, em cada caso.

Exemplo:

Para observar o disparo do TRIAC nos diversos quadrantes, considera-se o circuito de figura seguinte.



Circuito para verificação dos quadrantes de disparo do TRIAC

O disparo em cada quadrante depende do valor de R_2 e das características do TRIAC.

Ao lado, tem-se as características do TRIAC utilizado:

Tensão da Fonte (V)	Tensão de Gate (V)	Quadrante (mA)	I_{GTM} Típico (mA)	I_{GTM} Máximo (mA)
+12	+5	I	+15	+50
+12	-5	II	-25	-50
-12	-5	III	-30	-50
-12	+5	IV	+75	
Tensão da Fonte (V)	Tensão de Gate (V)	Quadrante (V)	V_{GA1} Típico (V)	V_{GA1} Máximo (V)
+12	+5	I	+0,9	+2,5
+12	-5	II	-1,2	-2,5
-12	-5	III	-1,2	-2,5
-12	+5	IV	+1,2	
$I_{TRMS} = 8A @ T_C = 85^{\circ}C \quad T_C = 85^{\circ}C$				
$R_L = 10\Omega, \quad tp(g) \geq 20\mu s$				
Tensões medidas em relação ao terminal A_1 (MT ₁)				

Leitor (a) – Não entendi! Na tabela consta que o valor máximo de IGTM é, por exemplo, de 50mA no quadrante I. Por que foi dito que essa corrente era mínima?

Autor – Claro! A dúvida é normal.

O valor I_{GTM} é o mínimo valor de corrente que deve ser aplicado no gatilho, para garantir o disparo do TRIAC.

Porém, esse valor varia de uma amostra para a outra de TRIACs do mesmo tipo. Considerando-se um lote de TRIACs TIC226B, o valor típico I_{GTM} é 15mA (no quadrante I). Pode ser que, neste lote, haja TRIACs que precisam de 20mA para disparar, entretanto, não haverá nenhum que precise de mais do que 50mA, que é o valor máximo dado pelo fabricante. Desta forma, garantindo 50mA, é certeza que todos os TRIACs dispararão.

Voltando ao exemplo, deve-se calcular o valor de R_2 para o disparo do TRIAC nos quatro quadrantes:

a) Para o primeiro quadrante, considerando $V_{GA1} = 2,5V$, tem-se:

$$I_G = \frac{V_G - V_{GA1}}{R_1 + R_2}$$

$$I_G = \frac{5 - 2,5}{22 + R_2}$$

$$I_G = \frac{2,5}{22 + R_2}$$

A corrente mínima, que garante o disparo a 50mA. Assim:

$$50 \text{ m} = \frac{2,5}{22 + R_2}$$

$$R_2 = \frac{2,5}{50\text{m} - 22}$$

$$R_2 = 28\Omega$$

Solucionando Problemas

a) Monte o circuito da figura anterior. Instale um miliamperímetro no circuito de gatilho. Varie o valor de R_2 , até obter o disparo (lâmpada acende). Anote o valor da corrente de gatilho no instante do disparo.

.....
.....
.....
.....

b) Para cada quadrante, observe a polaridade necessária para as fontes de 12V e 5V. inverte-as, quando necessário, para determinar o quadrante desejado.

.....
.....
.....
.....

c) Em cada caso, desligue o circuito após o disparo e meça o valor de R_2 . Compare-os com os valores calculados no exemplo anterior.

.....
.....
.....
.....

Observe que poderá haver divergências, em função das discrepâncias observadas e pelo fato da corrente de disparo variar de componente para componente. O fabricante dá o valor de I_{GT} apenas como um parâmetro de referência. A corrente I_{GT} é o mínimo valor de corrente de gatilho que garante, a 25°C neste caso, o disparo de qualquer componente do tipo TIC226B.

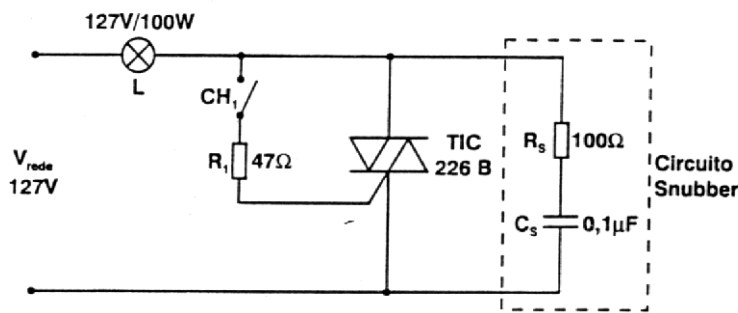
Leitor (a) – Mas, o que é isso! De novo falou-se apenas em corrente contínua. O TRIAC não é para a corrente alternada?

Autor – Calma, amigo (a). Veja os exemplos a seguir.

O TRIAC em corrente alternada

Exemplo de aplicação: controle em onda-completa com TRIAC

O circuito da figura (Página 111183), estudado no capítulo anterior, que utiliza dois SCRs para o controle da tensão na carga nos dois semiciclos da tensão de rede, pode ser implementado utilizando um único TRIAC, como mostra figura seguinte.



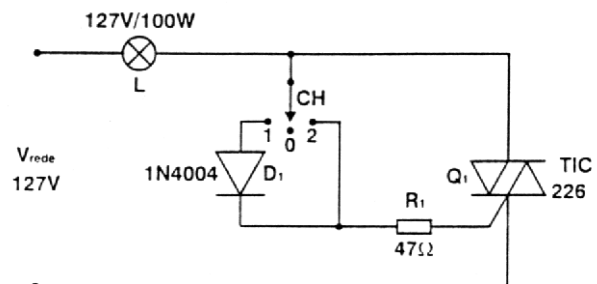
Circuito de controle de onda-completa com TRIAC

Este circuito mostra, adicionalmente, o circuito snubber de proteção contra dv/dt. Normalmente, a ordem de grandeza Rs e Cs é esta apresentada no circuito. Quando o fabricante fornece maiores dados, é possível calcular o valor de Rs e Cs por fórmulas e gráficos.

Exemplo de aplicação. Controle de potência numa carga

O circuito da figura ao lado possui uma chave rotativa CH de três posições:

Circuito de controle de potência com TRIAC



a) Na posição contra (0), o circuito de gatilho fica sem
tensão. Neste caso, o TRIAC encontra-se bloqueado
e a lâmpada apagada.

b) Mudando-se a chave para a posição (1), o diodo
permite aplicar a corrente de gatilho no semiciclo
positivo na rede. Entretanto, o mesmo diodo abre o
circuito no semiciclo negativo da rede. Assim, a
lâmpada é acionada somente nos semiciclos
positivos, funcionando como meia potência.

c) Com a chave na posição (2), haverá corrente de
gatilho em ambos os semiciclos, aplicando plena
potência à lâmpada.

Solucionando Problemas

1) Qual a vantagem do TRIAC em relação ao SCR quanto ao sentido de condução?

.....
.....
.....
.....

2) Qual a vantagem do TRIAC em relação ao SCR quanto ao disparo pelo gatilho?

.....
.....
.....
.....

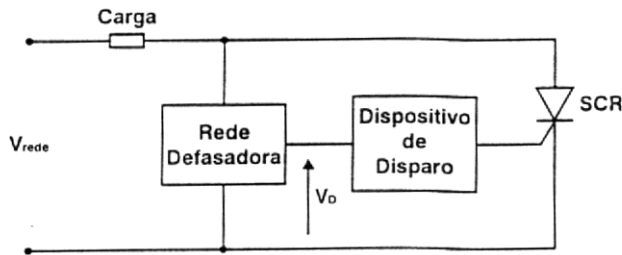
3) Esboçar as formas de onda de tensão na lâmpada do circuito da figura anterior com a chave rotativa nas posições 0, 1 e 2.

.....
.....
.....
.....

DISPOSITIVOS DE DISPARO

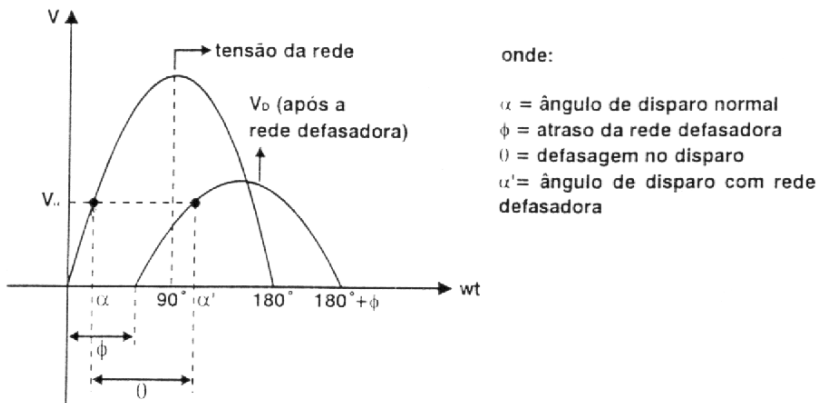
Disparo por rede defasadora

Uma maneira de resolver o problema de limitação no ângulo de disparo ($\alpha \leq 90^\circ$) é mostrando na figura.



Disparo por rede defasadora

A idéia consiste em atrasar a tensão que irá comandar o disparo do tiristor. Desta forma, a tensão de disparo irá ocorrer mais tarde no semiciclo. A figura a seguir ajuda a entender melhor este método.

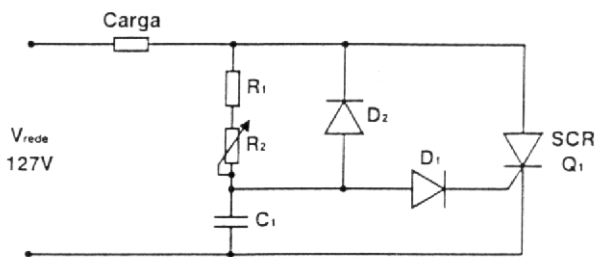


Tensão de disparo com rede defasadora

Pelo gráfico, observa-se que o ângulo normal do disparo deverá ser α , que é menor que 90° . Com a rede defasadora, esse sinal foi atrasado de um ângulo ϕ , fazendo com que o ângulo do disparo seja $\alpha' = \alpha + \phi$, ou seja, maior que 90° em relação à tensão da rede.

Exemplo

Uma forma de se obter um circuito de disparo com rede defasadora é mostrada na figura abaixo.



Circuito de disparo com rede defasadora

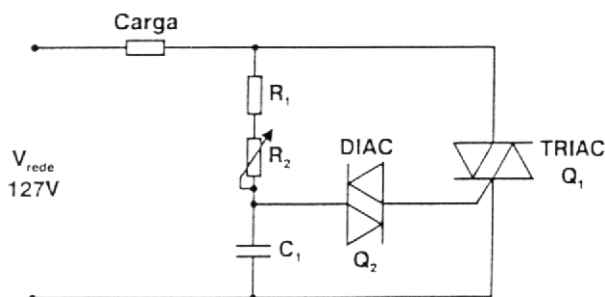
A tensão de disparo, tomada sobre o capacitor, está atrasada em relação à tensão da rede, por um ângulo ϕ . O valor dessa defasagem depende do valor da constante de tempo $t = (R_1 + R_2) \cdot C_1$. Variando-se R_2 , consegue variar o ângulo de defasagem ϕ e, portanto, o ângulo α' de disparo do SCR.

O diodo D_1 garante que só haverá corrente de gatilho no semiciclo positivo da tensão da rede, evitando perdas desnecessárias no gatilho do SCR quando este estiver bloqueado.

O diodo D_2 conduz no semiciclo negativo carregando C_1 com tensão negativa. Isso garante que, em cada semiciclo positivo, o capacitor comece sempre a se carregar a partir de uma tensão fixa, mantendo a regularidade do disparo.

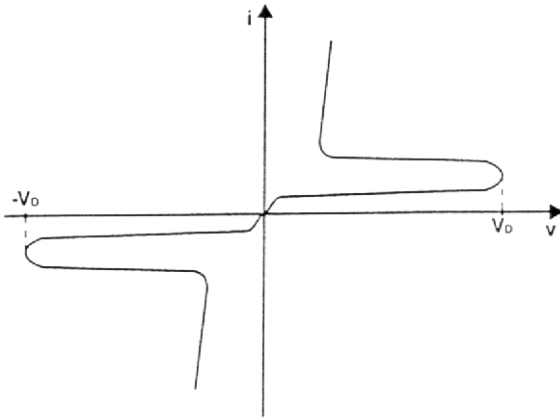
DIAC

Quando o TRIAC é usado como dispositivo de controle, é freqüentemente utilizado um DIAC como dispositivo de disparo, conforme pode ser visto na figura.

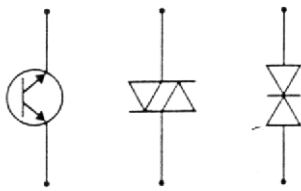


Circuito de controle com TRIAC disparado por DIAC com rede defasadora

O DIAC (Diode Alternative Current) é uma chave bidirecional disparada por tensão. Normalmente, a tensão do disparo dos DIACs ocorre entre 20 e 40V. A sua curva característica está mostrada na figura (a) e os símbolos mais usados estão mostradas na figura (b).



(a) Curva Característica



(b) Símbolos

Chave bidirecional – DIAC

Com a curva característica do DIAC, é fácil entender o funcionamento do circuito da figura (Página 197). A rede R_1 , R_2 e C_1 defasa a tensão sobre C_1 . O capacitor carrega-se até atingir a tensão V_D de disparo do DIAC. Quando isso ocorre, o DIAC entra em condução e cria um caminho de baixa impedância para o capacitor descarregar-se sobre o gatilho do TRIAC. A corrente de descarga do capacitor é suficientemente elevada para conseguir disparar TRIACs de baixa potência, mesmo com valores relativamente baixos de capacitância.

Um inconveniente prático do circuito da figura (Página 197) é o chamado efeito de histerese. Esse efeito ocorre para baixos valores de ângulo de condução e se traduz por uma descontinuidade de controle. Isso faz com que um pequeno

ajuste em R_2 , para mais ou para menos, provoque uma variação brusca de tensão na carga.

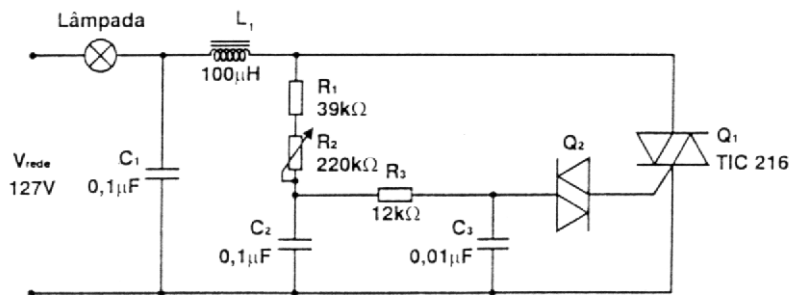
No caso de um dimmer (regulador de luminosidade), este pequeno ajuste provocaria uma variação muito grande na luminosidade da lâmpada da carga. Isto significa que, para uma mesma potência na lâmpada, o ajuste do potenciômetro deve ser diferente, dependendo se esteja sendo reduzido ou aumentada a sua luminosidade.

O efeito histerese ocorre quando se utiliza apenas um capacitor, porque este não tem tempo hábil para carregar-se após o disparo. Assim, as condições de carga se alteram de um semiciclo para outro, fazendo com que no semiciclo seguinte o capacitor atinja o limiar do disparo num instante diferente em relação ao semiciclo anterior.

Esse efeito pode ser corrigido com um circuito de dupla constante de tempo, como será visto a seguir.

Exemplo de aplicação: Dimmer

A figura seguinte mostra o circuito de um dimmer controlado por TRIAC, disparado por DIAC e com rede defasadora de dupla constante de tempo.



Circuito de um Dimmer

Quando C_3 atingir a tensão de disparo do DIAC, C_2 irá descarregar-se sobre C_3 , repondo parcialmente a carga perdida no disparo do TRIAC. Isto faz com que, a cada semiciclo, a carga inicial de C_3 seja sempre a mesma. Assim, o TRIAC disparará sempre no mesmo ponto da senóide da rede.

O funcionamento é praticamente o mesmo do circuito de disparo com SUS. Neste caso, não aparece o diodo, pois o controle do disparo é feito em ambos os semiciclos, já que o tiristor controlado é um TRIAC.

A função de R_2 e R_3 é diminuir a tensão de disparo para minimizar o efeito de histerese, já citado.

Solucionando Problemas

- 1) Quais as funções de R_2 , C_1 , D_1 e D_2 no circuito de disparo com rede de defasadora da figura (Página 197)?

.....
.....
.....
.....

- 2) Explique a função do DIAC e o efeito histerese no circuito de controle com TRIAC da figura (Página 197)

.....
.....
.....
.....

COMPONENTES E CIRCUITOS ESPECIAIS DE DISPARO

Isolação dos pulsos de disparo

Os SCRs e TRIACs são dispositivos para **controle de potência**, que trabalham com tensões e correntes **elevadas**, quando comparadas com os circuitos de sinal.

Os circuitos de sinal são os circuitos analógicos ou digitais que operam com até dezenas de volt e até centenas de miliampère

Para que os dispositivos de sinal, utilizados nos circuitos de disparo, não sejam afetados pelas tensões e correntes dos circuitos de potência, é necessário isolá-los galvanicamente.

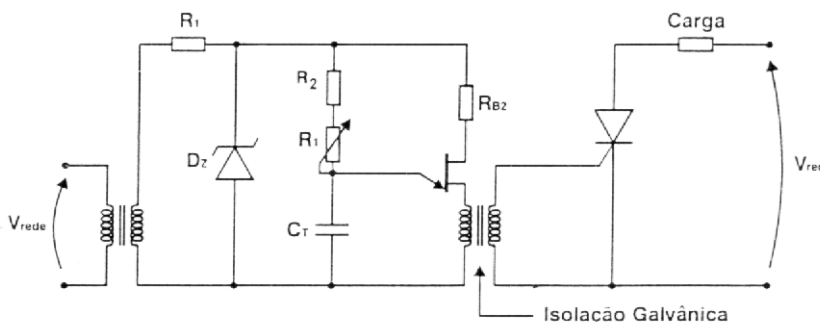
Isolação galvânica significa que não há percurso para a corrente de um lado para outro do circuito.

Quem garante a isolação da parte de sinal é o transformador de pulso e os acopladores ópticos.

Transformadores de pulso

Os **transformadores de pulso** são especialmente projetados para transmitir os pulsos de disparo aos SCRs e TRIACs.

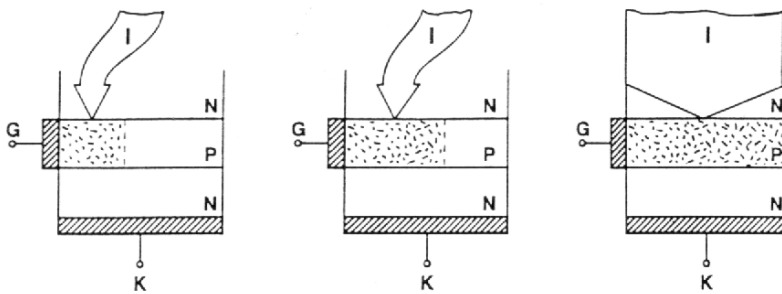
A figura abaixo dá um exemplo de utilização do transformador de pulso num circuito de disparo com UJT.



Aplicação do transformador de pulso

O projeto de transformadores de pulso deve atender a algumas condições, entre as quais a de que o **acoplamento** entre primário e secundário deve ser o **mais perfeito possível**.

E que no disparo, a corrente injetada no gatilho propaga-se transversalmente no material semiconductor do SCR. Durante essa propagação as áreas já atingidas vão se tornando condutoras, deixando circular a corrente de ânodo. A figura abaixo simboliza a propagação da área condutora.



(a) Início do Espalhamento (b) Espalhamento Parcial (c) Espalhamento Total

Espalhamento da área de condução do SCR durante o disparo

Se o acoplamento não for adequado, durante o disparo, a área condutora pode não se espalhar rapidamente, fazendo com que a corrente de ânodo se concentre toda em uma área pequena. É o que se chama de **ponto quente**. Isso tende a queimar o SCR.

Uma outra característica desejada para transformadores de pulso que a **isolação** entre os enrolamentos seja **elevada** (tipicamente da ordem de kV) para evitar que tensões desenvolvidas nos enrolamentos, em função da operação normal do conversor, possam causar-lhes danos.

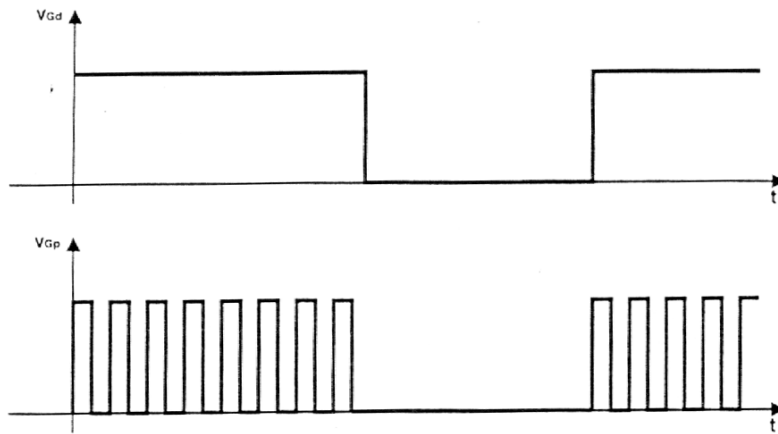
As condições de acoplamento e isolação são, portanto, conflitantes entre si. É necessário, assim, encontrar uma solução de compromisso entre a isolação requerida e o tempo de subida do pulso de disparo.

Em conversores com mais de um tiristor, os tiristores alternam-se em condução, isto é, ora conduz um, ora conduz outro. Quando a carga for resistiva, esta transição será imediata. Neste caso não existe problema.

Quando a carga for **indutiva**, haverá um intervalo entre o instante de disparo e o momento em que realmente o SCR entrará em condução. Desta forma, deve-se manter o pulso aplicado por um intervalo de tempo razoável, para garantir que o SCR esteja em condições de disparo no momento adequado.

Isso resulta em pulsos **largos**, que tendem a saturar o núcleo do transformador de pulso.

Para evitar essa saturação, usa-se um esquema chamado de **disparo por pulsos de alta freqüência**. O pulso largo é transformado em um **trem de pulsos de alta freqüência**, conforme ilustrado abaixo.



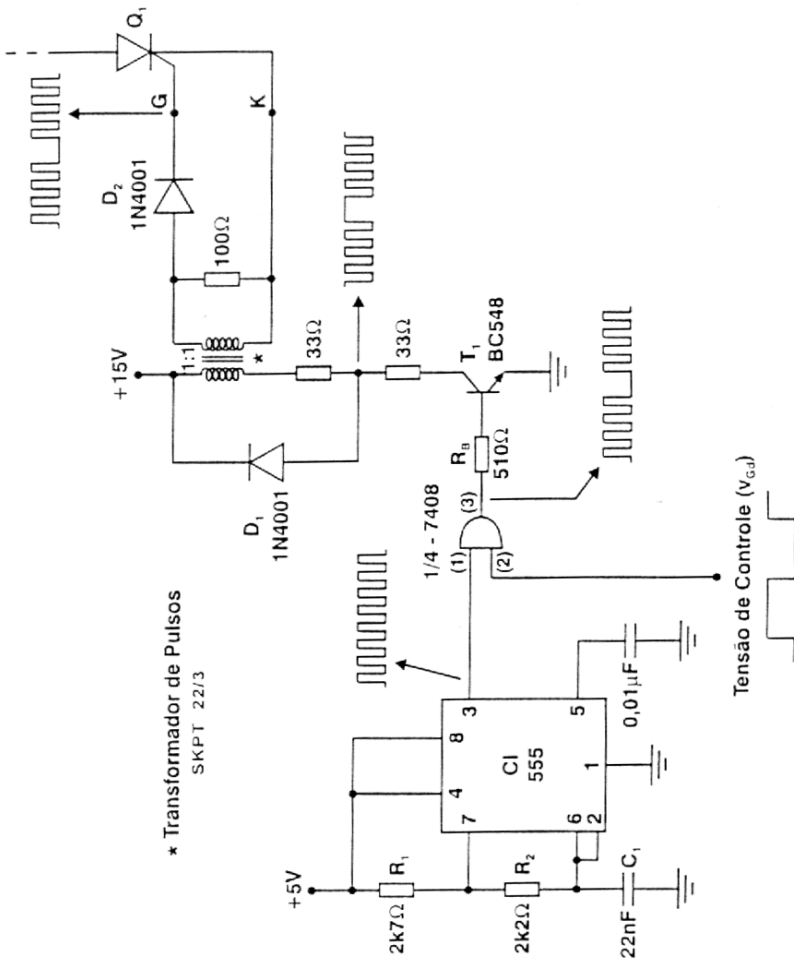
(a) Pulso de Gatilho Desejado (b) Pulso Modulado em Alta Freqüência

Disparo por trem de pulsos de alta freqüência

A tensão V_{Gd} é o pulso de tensão do gatilho desejada. Trata-se de uma tensão de baixa freqüência, que tenderia a saturar o transformador e distorcer a tensão aplicada ao gatilho.

A V_{Gp} é uma tensão com envoltória V_{Gd} e possui alta freqüência quando há necessidade de se aplicar pulso no gatilho.

O circuito da figura abaixo faz exatamente o desejado no disparo por trem de pulsos.



Circuito de disparo por trem de pulsos

O conhecido circuito integrado 555, montado na configuração astável, gera um sinal de alta frequência (5 a 10kHz) em sua saída (pino 3), cujo valor depende de R_1 , R_2 e C_1 . Após passar pela porta lógica AND, o sinal é amplificado pelo transistor e acoplado ao SCR através do transformador de pulso.

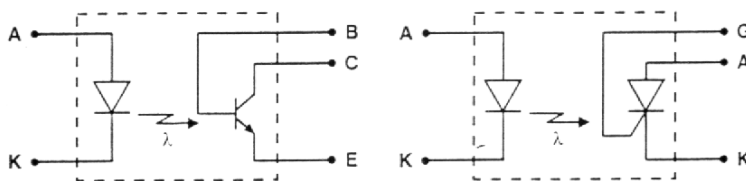
O diodo D_1 evita que apareçam sobretensões no transistor, quando este cortar. Neste instante, a energia armazenada no núcleo do transformador é dissipada pelo resistor de 33Ω .

No secundário do transformador, D_2 retifica os pulsos, impedindo que seja aplicada tensão negativa ao gatilho do SCR.

Acopladores óticos

Outra maneira de isolar pulsos de disparo é através de **acopladores óticos**.

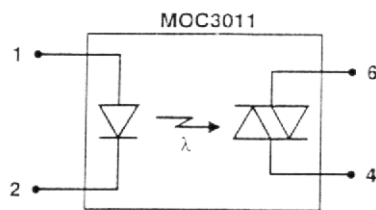
Basicamente, um acoplador ótico é constituído de um **LED** (diodo emissor de luz) infravermelho e um **fotodetector**. O fotodetector pode ser um transistor ou até um SCR ou TRIAC, arrançados num mesmo invólucro. A figura seguinte ilustra suas possibilidades.



Acopladores Óticos

O inconveniente em usar acopladores óticos com transistor é a necessidade de uma fonte adicional, para polarizar o circuito de coletor do transistor e fornecer a corrente de gatilho.

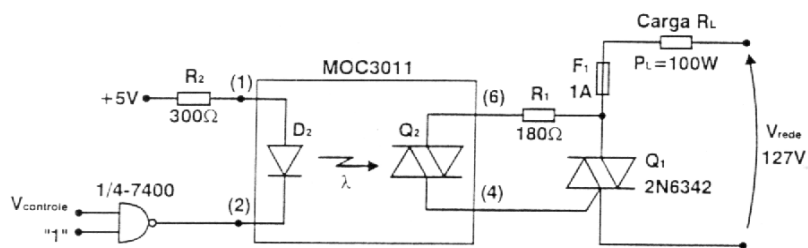
Uma solução interessante é usar acopladores óticos com tiristores, como o MOC3011 da Motorola, que usa um TRIAC como fotodetector, que vemos na figura.



Circuito Integrado MOC3011

Com o MOC3011 é possível acionar um outro TRIAC diretamente a partir de um sistema digital, como se vê na figura.

Circuito de Disparo com
MOC3011



Desejando acionar o TRIAC Q_1 , o sistema digital deve fornecer nível lógico “1”

à entrada de controle da porta NAND. Assim, o pino 2 do MCO3011 vai para o nível lógico “0” e o LED D_2 fica polarizado diretamente, disparando o fotodetector Q_2 e, como consequência, o TRIAC Q_1 .

Solucionando Problemas

- 1) Quais os componentes utilizados para isolar partes de sinal e de potência em circuitos com SCRs e TRIACs?

.....

- 2) Explique qual a causa de formação de um “ponto quente” no disparo de um SRC ou TRIAC.

.....

- 3) O que é o sistema de disparo por trem de pulsos de alta frequência e porque é utilizado?

.....

- 4) Como funciona a isolação de pulsos de disparo por acopladores óticos?

.....

Introdução

A grande utilização de circuitos tiristorizados e a similaridade dos circuitos de disparo associados deu margem ao aparecimento de circuitos integrados dedicados.

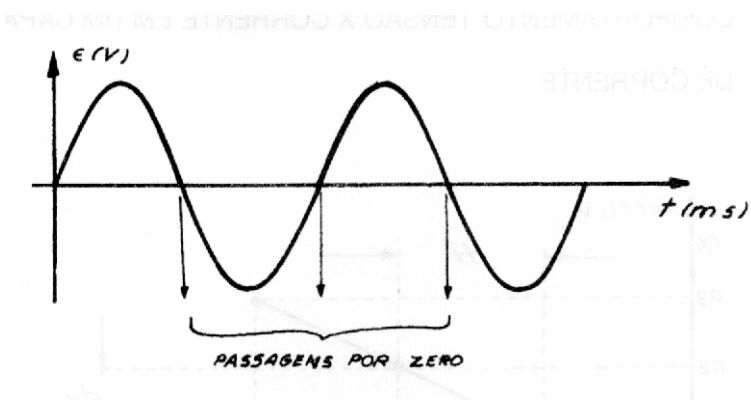
A finalidade desses circuitos é facilitar o projeto dos circuitos de disparo e torná-los mais compactos, com menos componentes e, portanto, mais confiáveis e de menos custo.

Entre os circuitos comercializados, destaca-se o TCA 785 que será objeto de estudo neste fascículo.

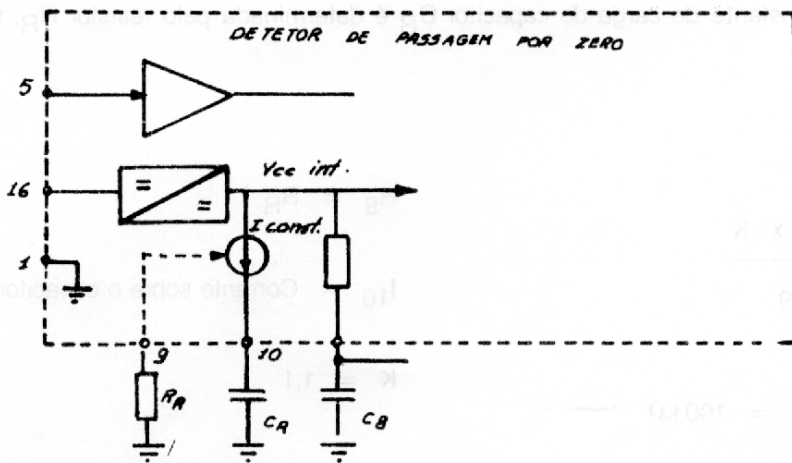
Princípio de funcionamento do TCA 785

Todo circuito de disparo em retificadores controlados deve ser sincronizado com a rede, ou ocorrerá o disparo aleatório dos tiristores, uma vez que cada pulso será aplicado em um instante que não está sincronizado com a rede.

Um ponto de referência para o sincronismo é a passagem da rede por zero (figura abaixo), o que ocorre a cada 8,33ms, aproximadamente, em redes de 60 Hz.



No TCA 785, existe um detector de passagem por zero (figura seguinte), que gera um pulso de sincronismo toda vez que a tensão da rede passa por zero.

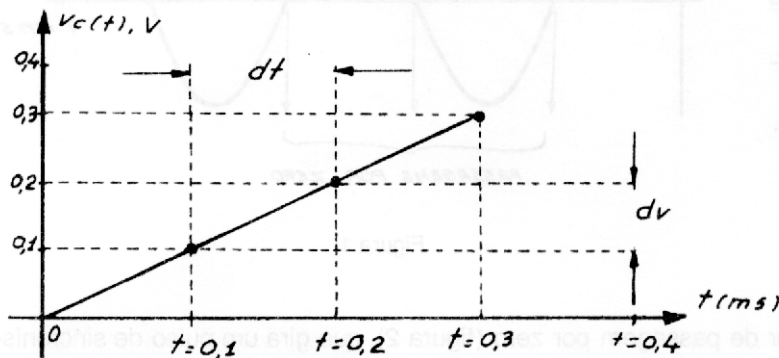


Detector de passagem por zero / fonte alimentação / gerador de rampa

Para permitir a alimentação do TCA 785 com diferentes valores de tensão, existe internamente uma fonte de alimentação regulada, que fornece aproximadamente 3,1V aos circuitos internos. Essa tensão é disponível para uso externo, sendo possível filtrá-la através de C_B , aumentando assim, a sua imunidade e ruído.

A base para sincronismo é um gerador de rampa, cuja característica é ajustada por R_R e C_R nos pinos 9 e 10 respectivamente.

Como a corrente que passa pelo capacitor é constante, fornecida pelo gerador interno de corrente constante, a rampa terá a cada intervalo de tempo ($dt = 0,1\text{ms}$, por exemplo) sempre a mesma variação ($dv = 100\text{mV}$, por exemplo). Com estes dados, pode ser montado um gráfico, figura abaixo, da rampa sobre o capacitor C_R e pino 10.



$$\frac{dv}{dt} = \text{cte}$$

Comportamento tensão x corrente em um capacitor carregado por fonte de corrente

A corrente constante de carga do capacitor C_R é determinada pelo resistor R_R , segundo a expressão:

$$I_{10} = \frac{V_{ref} \times K}{R_g}$$

Assim, se o $R_g = 100k\Omega$, tem-se

$$I_{10} = 3,1 \times 1,1 / 100 \times 10^3 = 3\mu A$$

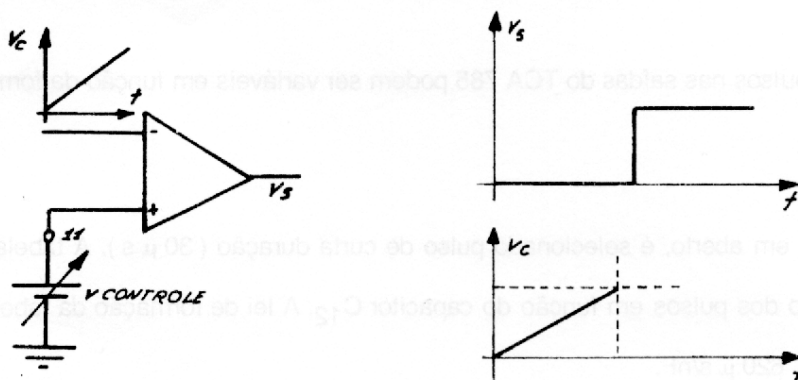
$$R_g = R_R$$

I_{10} = Corrente sobre o capacitor C_R

$$K = 1,1$$

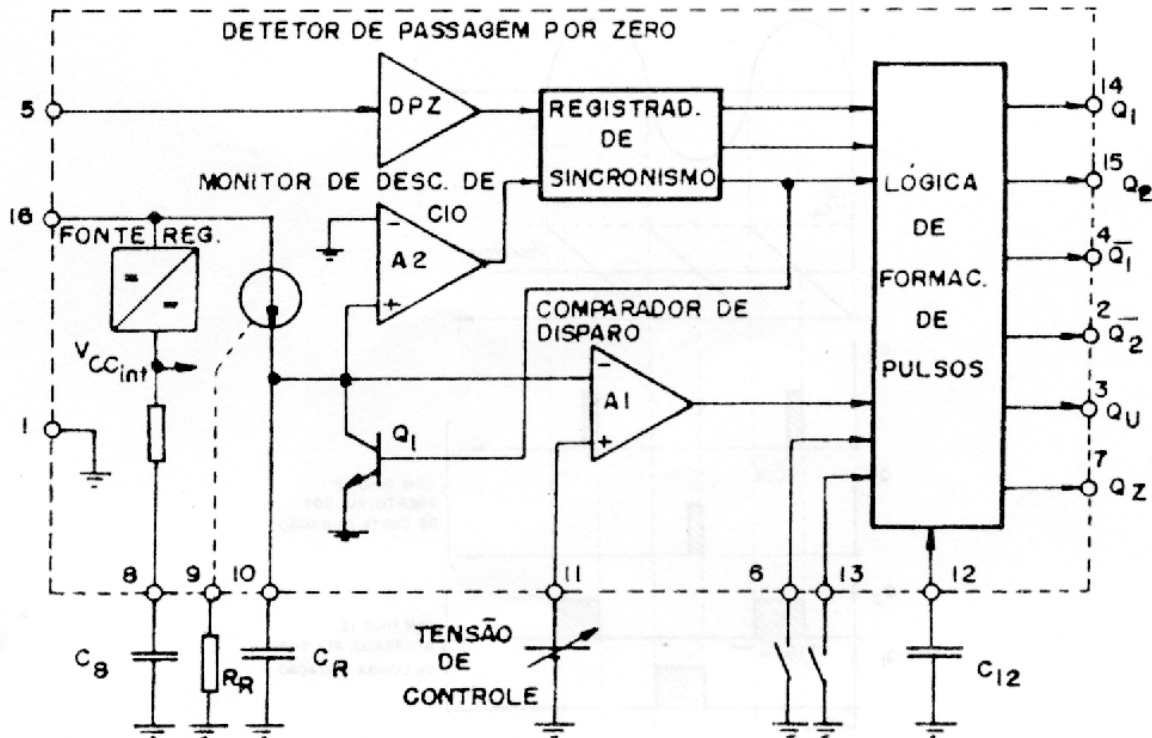
Os valores mínimo e máximo de I_{10} , respectivamente $10\mu A$ e $1mA$ devem ser respeitados. Da mesma forma R_g deve estar entre $3k\Omega$ e $300k\Omega$.

A tensão da rampa do CR é comparada com a tensão de controle V_C no pino 11 do TCA 785. Quando as tensões se anulam, a mudança de estado do comparador de sincronismo indica a lógica de formação de pulsos que um pulso de disparo deve ser acoplado a uma das saídas. A figura abaixo mostra esta comparação enquanto a posterior ilustra o circuito completo do TCA 785.



Comparador de disparo do TCA 785

O capacitor continua a se carregar até que, no próximo cruzamento por zero, o “detector de passagem por zero” informa o evento ao “registrador de sincronismo”, que gera um pulso que satura o transistor Q_1 , o capacitor se descarrega rapidamente, ficando preparado para o início da próxima rampa. A informação de passagem por zero já é liberada pelo “registrador de sincronismo”, após a descarga de CR, que é monitorada por A_2 .



Circuito completo do TCA 785

Com os sinais recebidos dos circuitos anteriores, a “lógica de formação dos pulsos” encarrega-se de colocar nas saídas, a forma de pulso selecionada.

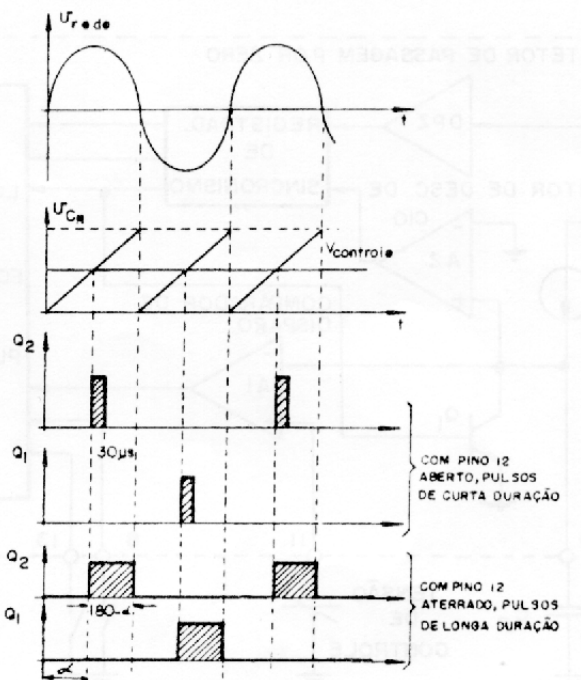
Assim, quando a tensão de rampa se iguala à tensão de controle (Pino 11), é dado um pulso na saída Q_2 (Pino 15) se a tensão da rede estiver no sentido positivo, ou na saída Q_1 (Pino 14) se a rede estiver no semi-ciclo negativo (conforme próxima figura).

A largura dos pulsos nas saídas do TCA 785 podem ser variáveis em função da forma de conexão do pino 12.

Com o pino 12 em aberto, é selecionado pulso de curta duração (30 μ s). a tabela a seguir relaciona a duração dos pulsos em função do capacitor C₁₂. A lei de formação da tabela é aproximadamente $\beta = 620 \mu \text{ s/nF}$.

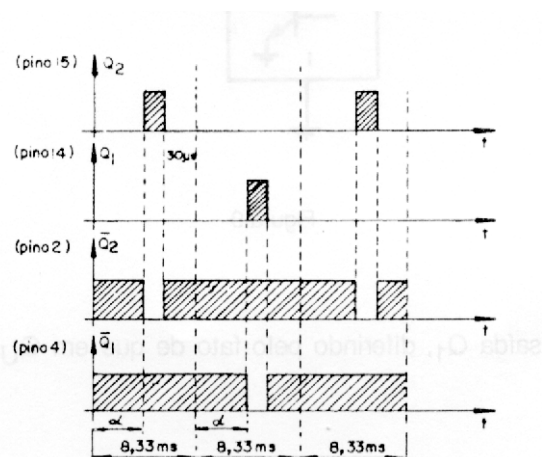
C ₁₂	0	150 pF	220 pF	330 pF	680 pF	1.000 pF
$\beta \cong 620 \beta \text{ s/nF}$	30 μ s	93 μ s	137 μ s	205 μ s	422 μ s	620 μ s

A figura seguinte mostra os pulsos de saída e as opções de duração dos mesmos.



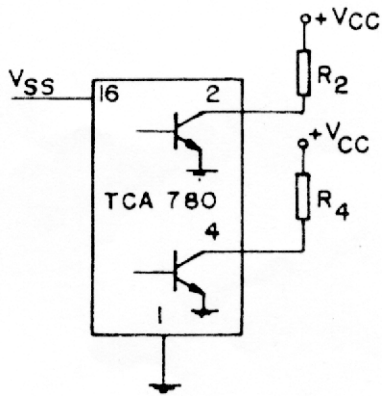
Pulsos de saída do TCA 785

O TCA 785 tem mais opções de pulso de saída. Os pinos 4 e 2 são saídas complementares (com sinal invertido) dos pinos 14 e 15, respectivamente, como mostra a figura ao lado.



Pulsos de saída complementares a Q₁ e Q₂

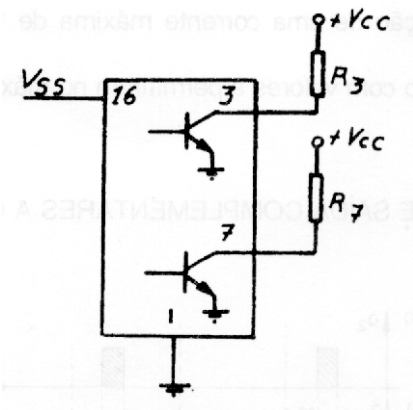
São denominadas de saídas Q_1 e Q_2 e são de coletor aberto, ou seja, tem um transistor interno, com sinal na base e que só conduz se for polarizado corretamente, como mostra a figura.



Polarização das saídas Q_1 e Q_2

Estas saídas permitem a circulação de uma corrente máxima de 10mA. Portanto, os resistores R_2 e R_4 devem ser dimensionados com valores a permitirem no máximo esta corrente de coletor.

Temos ainda, mais duas saídas auxiliares, denominadas Q_U (Pino 3) e Q_Z (Pino 7), ambas com saída em coletor aberto, necessitando de resistores ligados a uma fonte de alimentação positiva conforme mostra a figura.



Polarização de saída Q_U e Q_Z

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

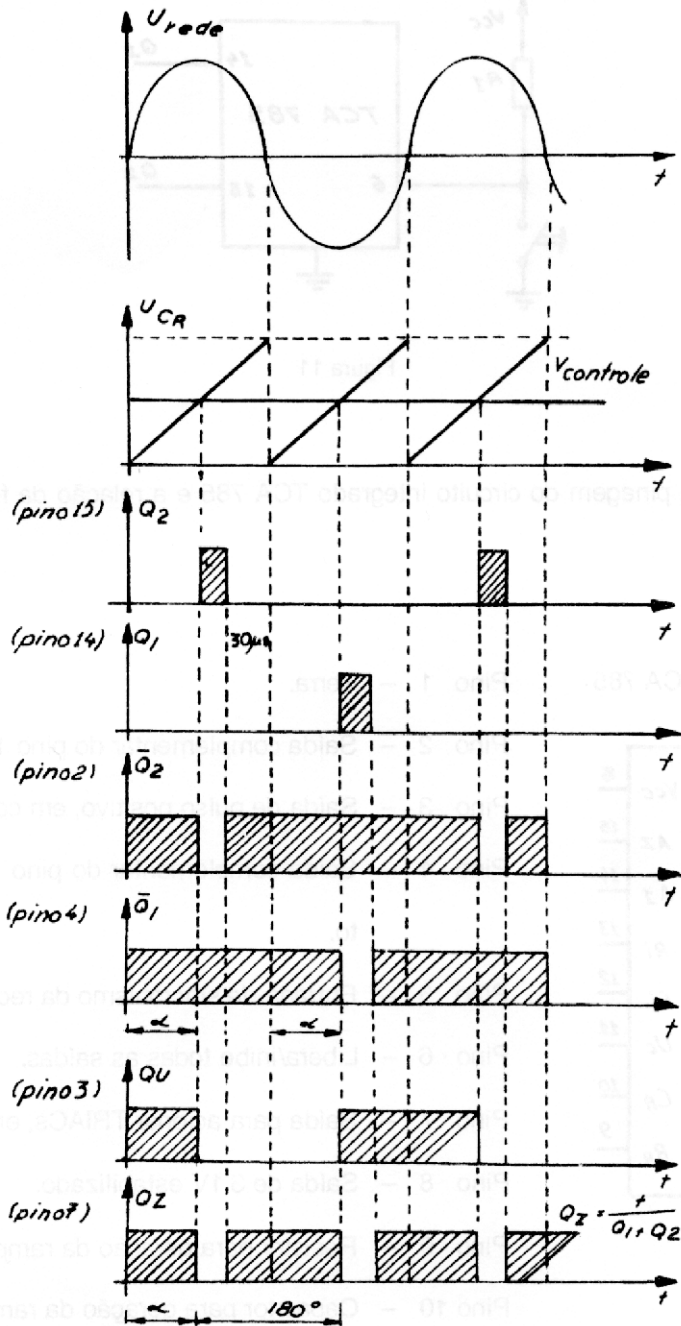
.....

.....

A saída Q_U é análoga à saída Q_1 , diferindo pelo fato de que em Q_U , a duração do pulso é de 180° (8,33 ms em 60Hz).

A saída Q_Z é igual a uma associação lógica NOR das saídas Q_1 e Q_2 sendo útil no disparo de TRIACs.

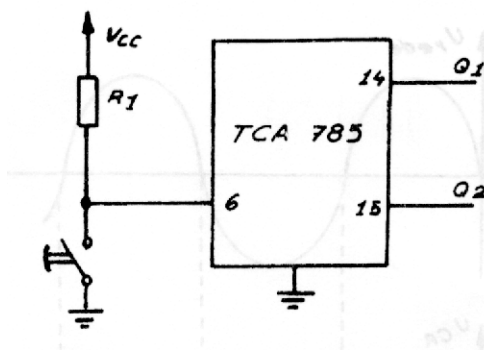
A figura abaixo mostra todos os sinais de saída do TCA 785.



Sinal de saída do TCA 785

No TCA 785 existe uma opção muito importante que é a possibilidade de bloqueio de todas as saídas. As saídas estão liberadas apenas se no pino 6 tiver a presença de tensão superior a 4V. Se a tensão neste pino for inferior a 2,5V, todas as saídas estarão bloqueadas. Esta opção permite, por exemplo, que no caso de uma falha no circuito de potência, possa provocar um bloqueio e acionar um determinado alarme.

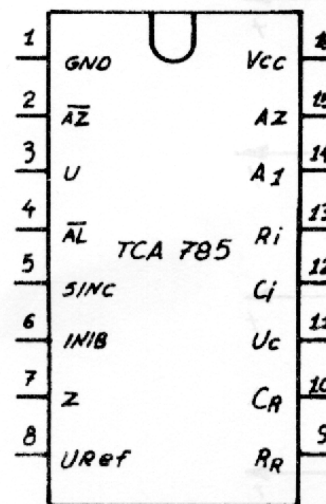
Este bloqueio poderá ser feito através de um contato de relé, de um transistor ou uma chave manual, como mostra a figura.



Circuito de bloqueio de pulsos

A figura seguinte mostra a pinagem do circuito integrado TCA 785 e a relação de função de cada pino do mesmo.

- Pino 1 – Terra.
- Pino 2 – Saída complementar do pino 15, um coletor.
- Pino 3 – Saída de pulso positivo, em coletor aberto.
- Pino 4 – Saída complementar do pino 14, em coletor aberto.
- Pino 5 – Entrada do sincronismo de rede.
- Pino 6 – Libera/inibe todas as saídas.
- Pino 7 – Saída para acionar TRIACs, em coletor aberto.
- Pino 8 – Saída de 3,1V estabilizado.
- Pino 9 – Resistor para geração da rampa.
- Pino 10 – Capacitor para geração da rampa.
- Pino 11 – Entrada de tensão de controle para disparo.
- Pino 12 – Capacitor que define largura dos pulsos de saídas 14 e 15.



Pinagem do TCA 785

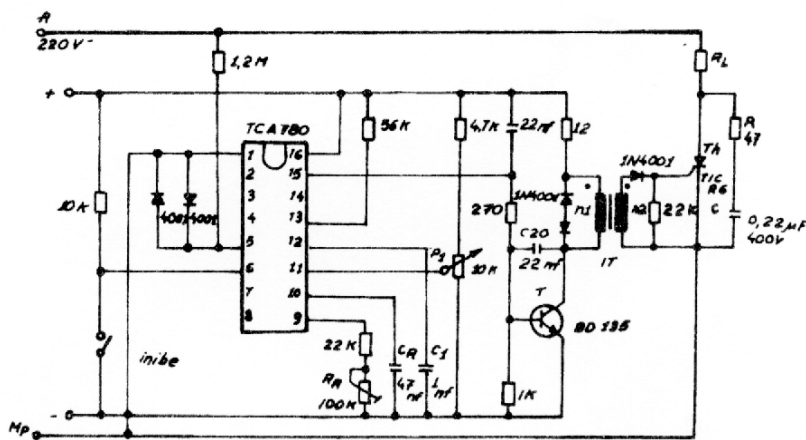
- Pino 13 – Resistor define a largura dos pulsos das saídas 2 e 4. (Se aterrado-pulso tem largura de $180^\circ - \alpha$).
- Pino 14 – Saída de pulso positivo no semiciclo positivo.
- Pino 15 – Saída de pulso positivo no semiciclo negativo.
- Pino 16 – Alimentação CC.

O resistor de ajuste de rampa deve estar entre $3k\Omega$ e $300k\Omega$.

O capacitor de ajuste de rampa deve estar entre $500pF$ e $1\mu F$.

Circuitos aplicativos do TCA 785

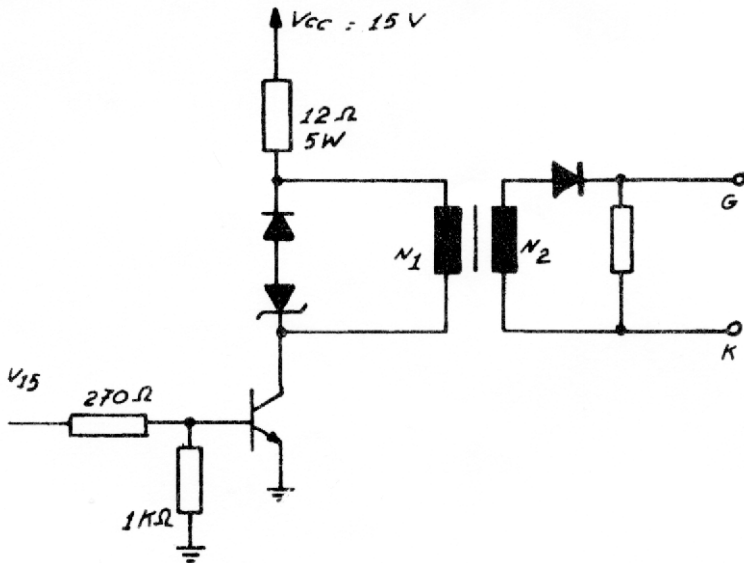
Como você já conhece a função de todos os pinos de circuito integrado TCA 785, vamos apresentar agora, alguns aplicativos que utilizam este CI para controle de disparo dos tiristores.



Controle de meia onda monofásica utilizando TCA785

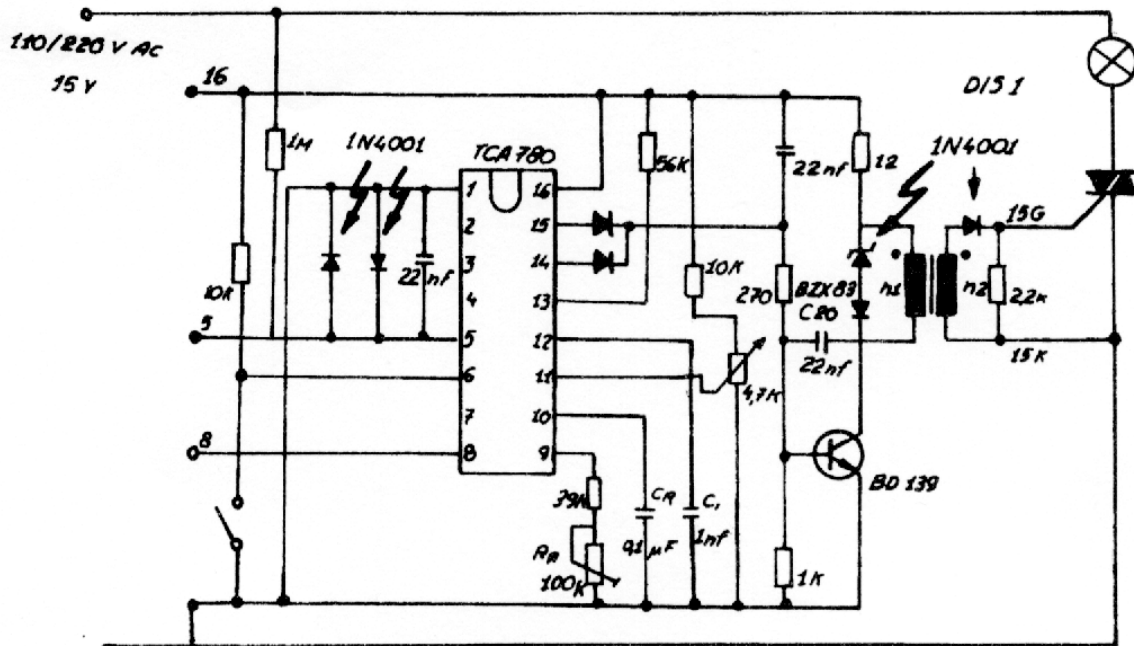
Existem diversas formas de se fazer o acoplamento e isolamento entre o circuito de controle e o circuito de potência.

Nestes exemplos será mostrado o transformador de pulsos com circuito transistorizado no primário para amplificação de corrente, como mostra a figura seguinte.



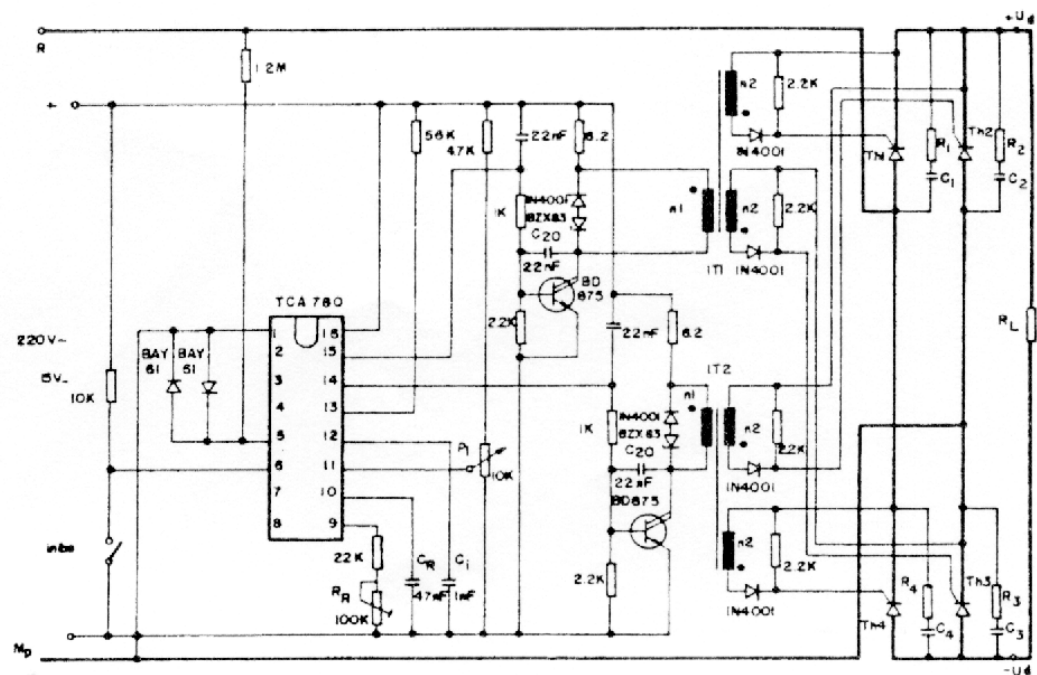
Amplificador de corrente e transformador de pulsos

A figura seguinte mostra um circuito de disparo para TRIAC, onde o mesmo opera no primeiro e no quarto quadrante.



Controle de onda completa com TRIAC

A figura abaixo mostra um circuito monofásico totalmente controlado em ponte utilizando TCA 785.



Circuito em ponte totalmente controlado