UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

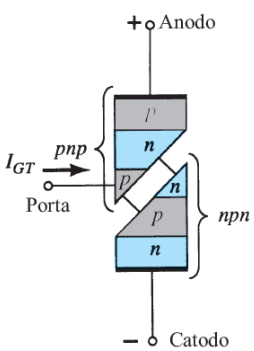
Docente: Rildo Afonso de Almeida

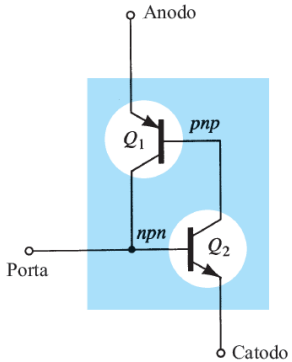
Eletrônica de Potência

Retificadores controlados de silício (SCRs)

O diodo semicondutor de duas camadas levou a dispositivos de três, quatro e até cinco camadas.

Esses dispositivos de quatro camadas com um mecanismo de controle costumam ser chamados de tiristores, embora o termo seja aplicado mais frequentemente ao SCR.



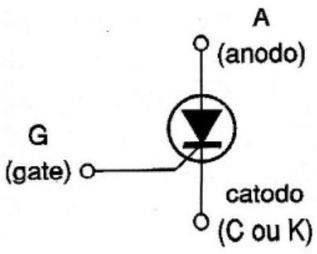


Retificadores controlados de silício (SCRs)

De todos os dispositivos *pnpn*, o retificador controlado de silício é o de maior interesse. Lançado em 1956 pela Bell Telephone Laboratories, algumas das áreas mais comuns de aplicação do SCR são as de controle de relés, circuitos de retardo de tempo, fontes de alimentação reguladas, chaves estáticas, controles de motor, choppers, inversores, cicloconversores, carregadores de bateria, circuitos de proteção, controles de aquecedores e controles de fase.

Retificadores controlados de silício (SCRs)

Recentemente, os SCRs foram projetados para *controlar* potências de até 10 MW, com especificações individuais de até 2000 A em 1800 V. Sua faixa de frequência de aplicação também foi ampliada para até 50 kHz, permitindo algumas aplicações de alta frequência, como o aquecimento por indução e a limpeza ultrassônica.



Símbolo

Invólucros Comuns

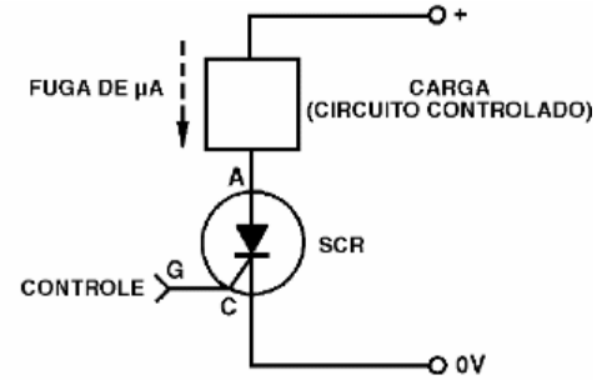
Retificadores controlados de silício (SCRs)

A operação básica do SCR é diferente daquela do diodo semicondutor de duas camadas, pois um terceiro terminal chamado *porta* (*gate*) determina quando o retificador muda do estado de circuito aberto para o de curto-circuito.

Para polarizar o SCR de modo a termos seu funcionamento normal, devemos aplicar uma tensão positiva ao anodo, deixando o catodo sob potencial mais baixo, ou seja, negativo.

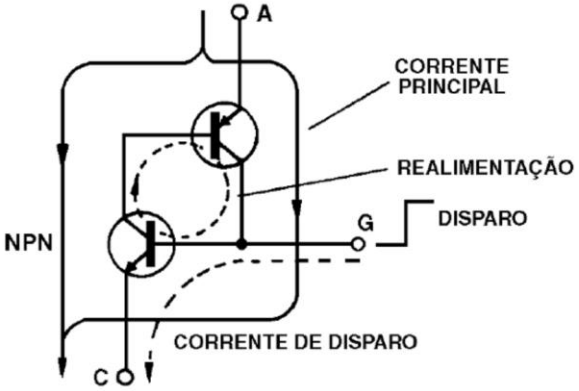
Retificadores controlados de silício (SCRs)

Nestas condições, apenas uma corrente muito fraca pode circular pelo componente devida a fugas dos elementos internos. Esta corrente é da ordem de milionésimos de ampère, e normalmente é desprezada, conforme mostra a figura abaixo.



Retificadores controlados de silício (SCRs)

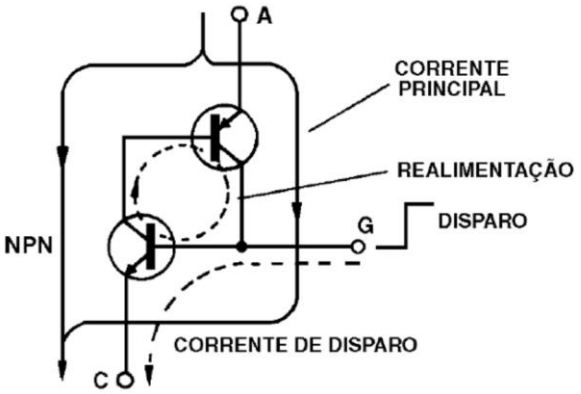
Para disparar o SCR devemos aplicar um sinal positivo no elemento de comporta (G), de modo que a junção base-emissor do transistor NPN seja polarizada no sentido direto.



Nestas condições, a corrente que circula pela base deste transistor é amplificada dando origem a uma corrente maior de coletor.

Retificadores controlados de silício (SCRs)

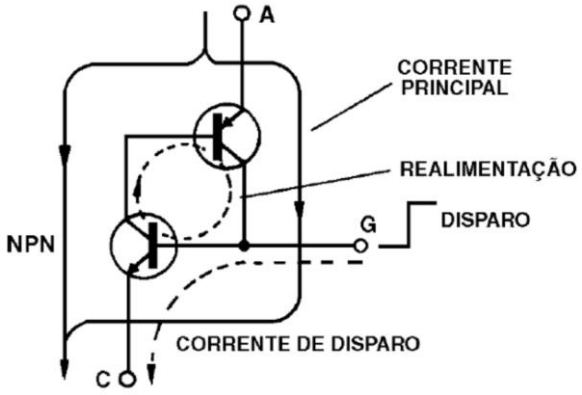
Mas, o coletor do transistor NPN está ligado à base do transistor PNP e, de tal forma que, circulando corrente nesta conexão, ela terá um sentido tal que fará o transistor PNP entrar em ação, amplificando-a.



O resultado é que, agora, por um efeito que se propaga, temos o aparecimento de nova corrente amplificada no coletor do transistor PNP.

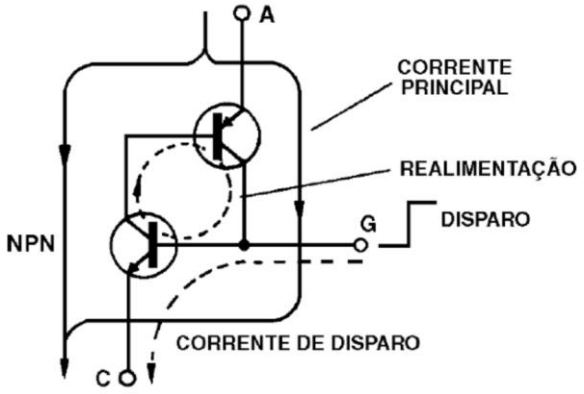
Retificadores controlados de silício (SCRs)

Veja, entretanto, que o transistor PNP tem seu coletor ligado de volta à base do transistor NPN, fechando assim um sistema de realimentação. Desta forma, a corrente de coletor do transistor PNP vem se somar à corrente de disparo, aumentando ainda mais a corrente no transistor NPN.



Retificadores controlados de silício (SCRs)

O resultado final é que todas as correntes neste circuito vão aumentar de intensidade até o máximo determinado pelas características de saturação do componente e, mesmo que tenhamos retirado o sinal inicial que deu origem ao processo, o componente continua conduzindo por um efeito de realimentação.



Retificadores controlados de silício (SCRs)

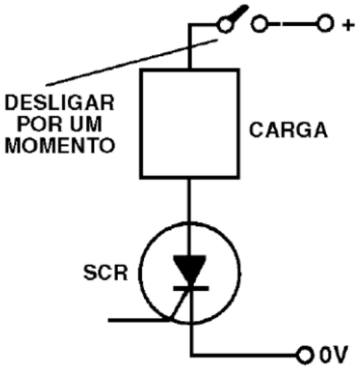
Circula então entre o anodo e o catodo do componente uma forte corrente que não depende mais do sinal que foi usado no disparo.

SCRs comuns são muito sensíveis podendo conduzir correntes de até alguns ampères entre o anodo e o catodo, quando um sinal de disparo de menos de 1 mA á aplicado à sua comporta.

Retificadores controlados de silício (SCRs)

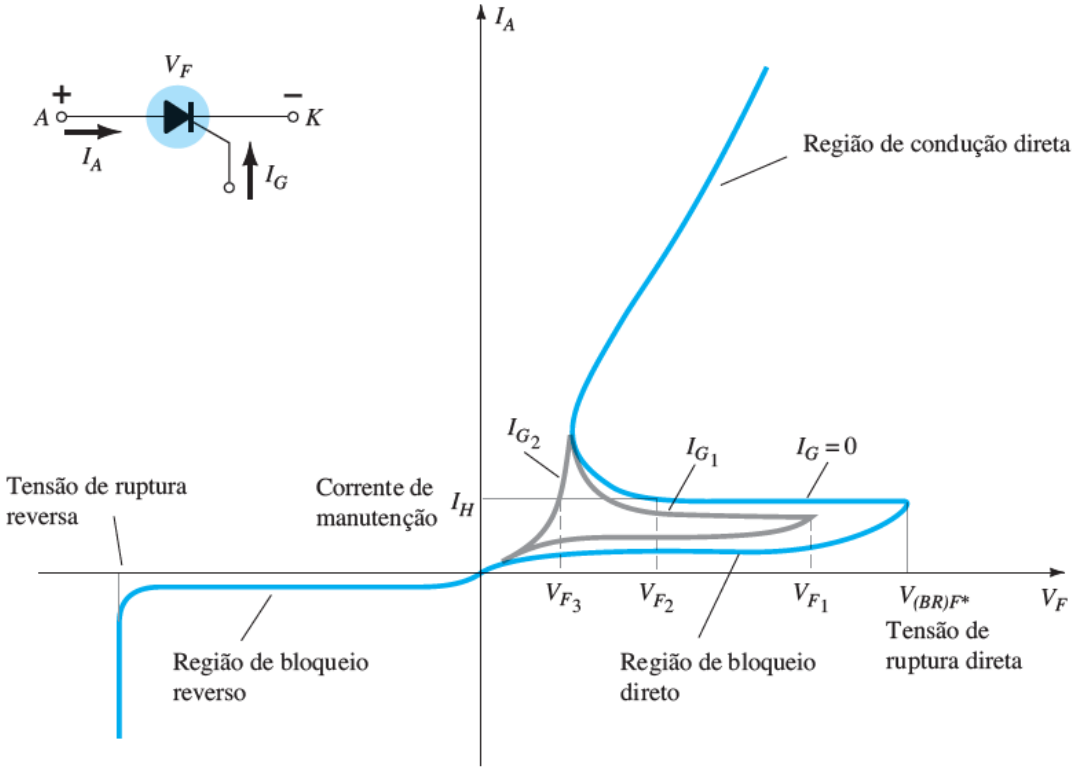
Para desligar o SCR, pois ele continua conduzindo mesmo depois de desaparecida a corrente de comporta inicial, temos diversas possibilidades.

Uma delas consiste em interromper por um momento a corrente principal, que circula entre o anodo e o catodo. Basta então desligar por um momento a alimentação para que o SCR desligue e fique à espera de um novo pulso de disparo.



Características e especificações do SCR

Na Figura ao lado são mostradas as características de um SCR para vários valores de corrente de porta. As correntes e tensões de maior interesse são indicadas na curva característica.



Características e especificações do SCR

Segue uma descrição breve de cada uma delas.

1. A *tensão de ruptura direta* *V*(BR)*F** é a tensão acima da qual o SCR entra na região de condução. O asterisco (*) é uma letra a ser adicionada que depende da condição do terminal da porta, como vemos a seguir:

O = circuito aberto de *G* para *K*

S = curto-circuito de *G* para *K*

R = resistor de *G* para *K*

V = polarização fixa (tensão) de *G* para *K*

Características e especificações do SCR

2. A *corrente de manutenção* (*IH*) é o valor de corrente abaixo do qual o SCR passa do estado de condução para a região de bloqueio direto sob condições estabelecidas.

3. As *regiões de bloqueio direto e reverso* são aquelas que correspondem à condição de circuito aberto para o retificador controlado que *bloqueiam* o fluxo de carga (corrente) do anodo para o catodo.

4. A *tensão de ruptura reversa* é equivalente à região Zener ou de avalanche do diodo semicondutor de duas camadas.

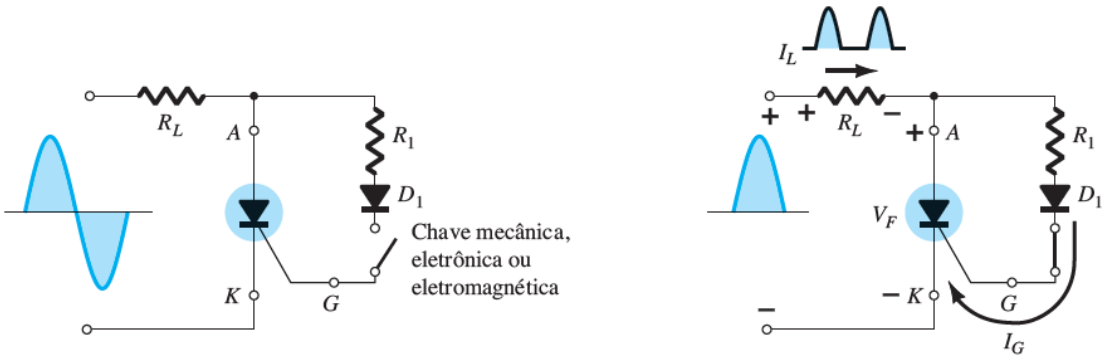
Aplicações do SCR

Abordaremos cinco aplicações: uma chave estática, um sistema de controle de fase, um carregador de bateria, um controlador de temperatura e um sistema de iluminação de emergência com fonte única.

Aplicações do SCR

Chave estática em série

Uma *chave estática em série* de meia-onda é mostrada na Figura (a). Se a chave estiver fechada, como mostra a Figura (b), uma corrente de porta fluirá durante a porção positiva do sinal de entrada, ligando o SCR. O resistor *R*1 limita a corrente de porta.



(a) (b)

Aplicações do SCR

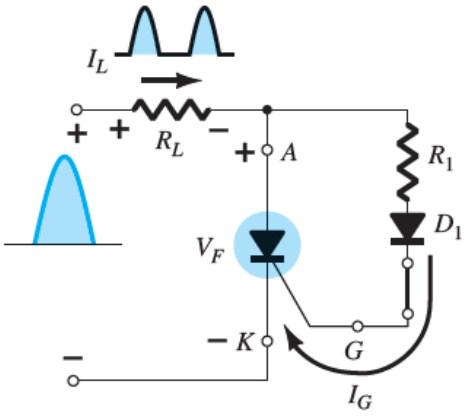
Chave estática em série

Quando o SCR é ligado, a tensão anodo-catodo (*VF*) cai para o valor de condução, o que resulta em uma corrente de porta muito reduzida e em uma perda muito pequena no circuito da porta. Para a região negativa do sinal de entrada, o SCR corta, uma vez que o anodo fica negativo em relação ao catodo. O diodo *D*1 é incluído para impedir uma corrente reversa na porta.

Aplicações do SCR

Chave estática em série

As formas de onda resultantes para corrente e tensão na carga estão mostradas na Figura (b). O resultado é um sinal retificado em meia-onda através da carga. Caso se deseje menos de 180° de condução, a chave pode ser fechada em qualquer valor de fase durante a porção positiva do sinal de entrada. A chave pode ser eletrônica, eletromagnética ou mecânica, dependendo da aplicação.



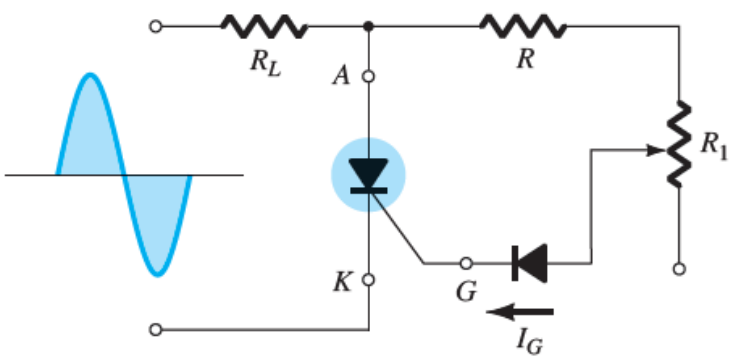
(b)

Aplicações do SCR

Controle de fase com resistência variável

Um circuito capaz de estabelecer um ângulo de condução entre 90° e 180° é mostrado na Figura ao lado.

O circuito é semelhante ao da Figura anterior, exceto pela adição de um resistor variável e pela eliminação da chave.

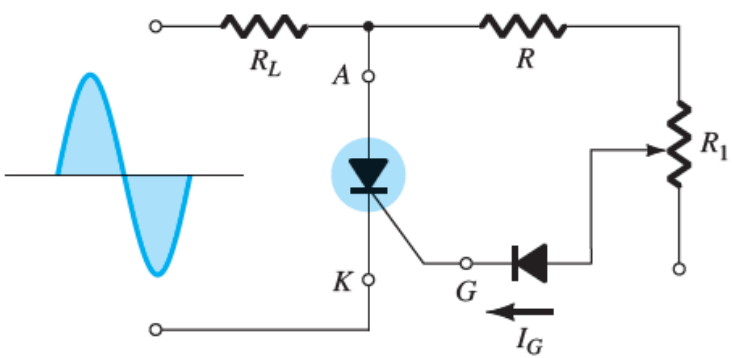


(a)

Aplicações do SCR

Controle de fase com resistência variável

A combinação dos resistores *R* e *R*1 limitará a corrente de porta durante a porção positiva do sinal de entrada. Se *R*1 for ajustado em seu valor máximo, a corrente de porta jamais atingirá o valor de condução (ligado). Conforme *R*1 é reduzido, a corrente de porta aumenta, considerando-se a mesma tensão de entrada.

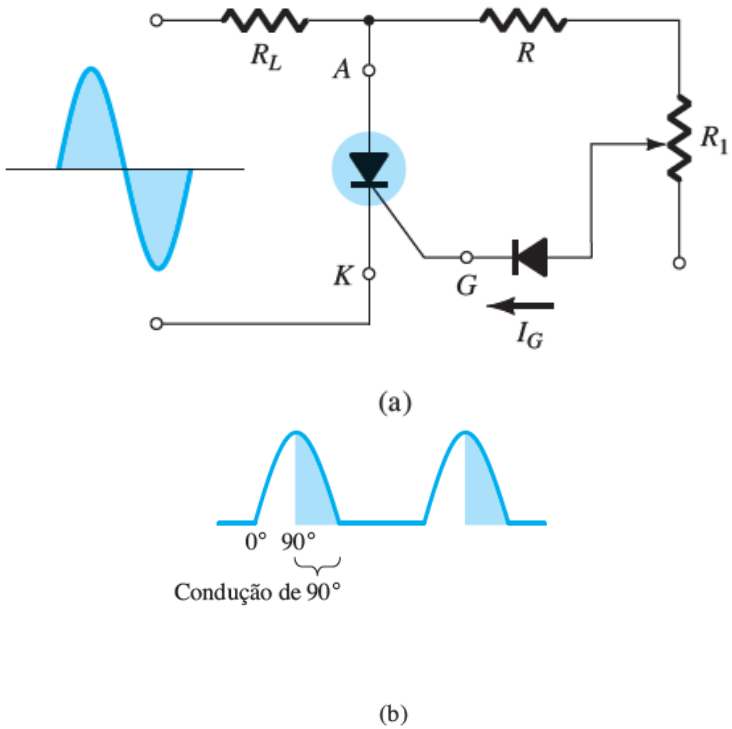


(a)

Aplicações do SCR

Controle de fase com resistência variável

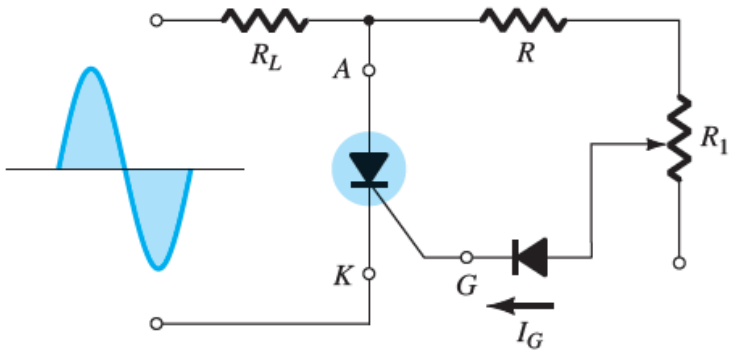
Dessa forma, a corrente de porta necessária para a condução pode ser estabelecida em qualquer ponto entre 0° e 90°, como mostra a figura (b). Se *R*1 for baixo, o SCR disparará quase imediatamente, e o resultado será a mesma ação que aquela obtida do circuito da figura (a) (condução de 180°).



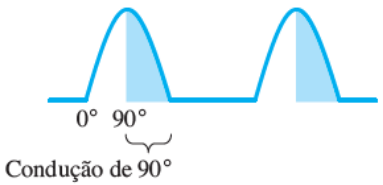
Aplicações do SCR

Controle de fase com resistência variável

No entanto, como indicado anteriormente, se *R*1 for aumentado, uma tensão de entrada maior (positiva) será necessária para disparar o SCR. Como mostra a figura (b), o controle não pode ser estendido além da fase de 90°, uma vez que a entrada tem seu máximo nesse ponto.



(a)

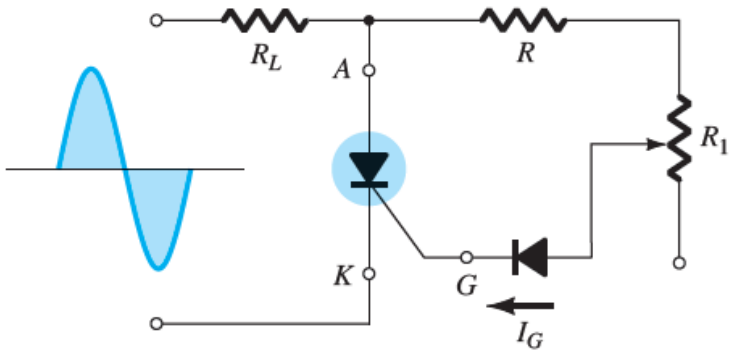


(b)

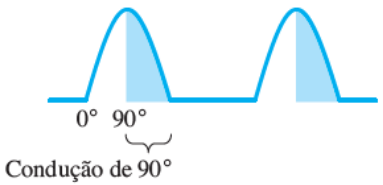
Aplicações do SCR

Controle de fase com resistência variável

Se o circuito de controle falhar e não houver disparo nesse e em valores menores de tensão de entrada durante o trecho de subida da entrada, podemos esperar a mesma resposta durante o trecho de descida da onda de entrada.



(a)



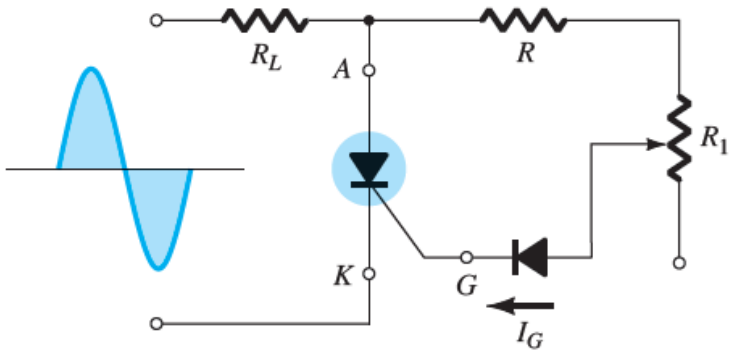
(b)

Aplicações do SCR

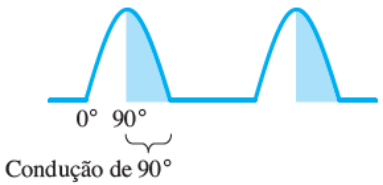
Controle de fase com resistência variável

A operação aqui é normalmente chamada, em termos técnicos, de *controle de fase em meia-onda com resistência variável*.

Trata-se de um método eficaz para controlar a corrente rms e, consequentemente, a potência para a carga.



(a)

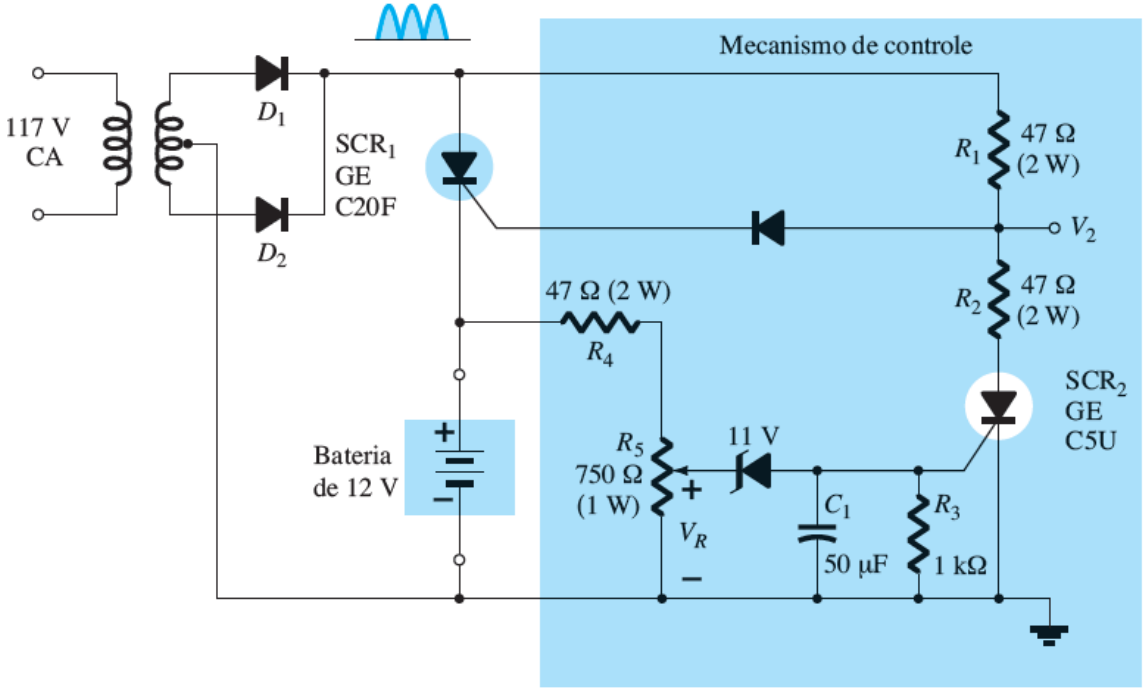


(b)

Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

Uma terceira aplicação bastante comum do SCR consiste em um *regulador carregador de bateria*. Os componentes fundamentais do circuito são mostrados na Figura ao lado.

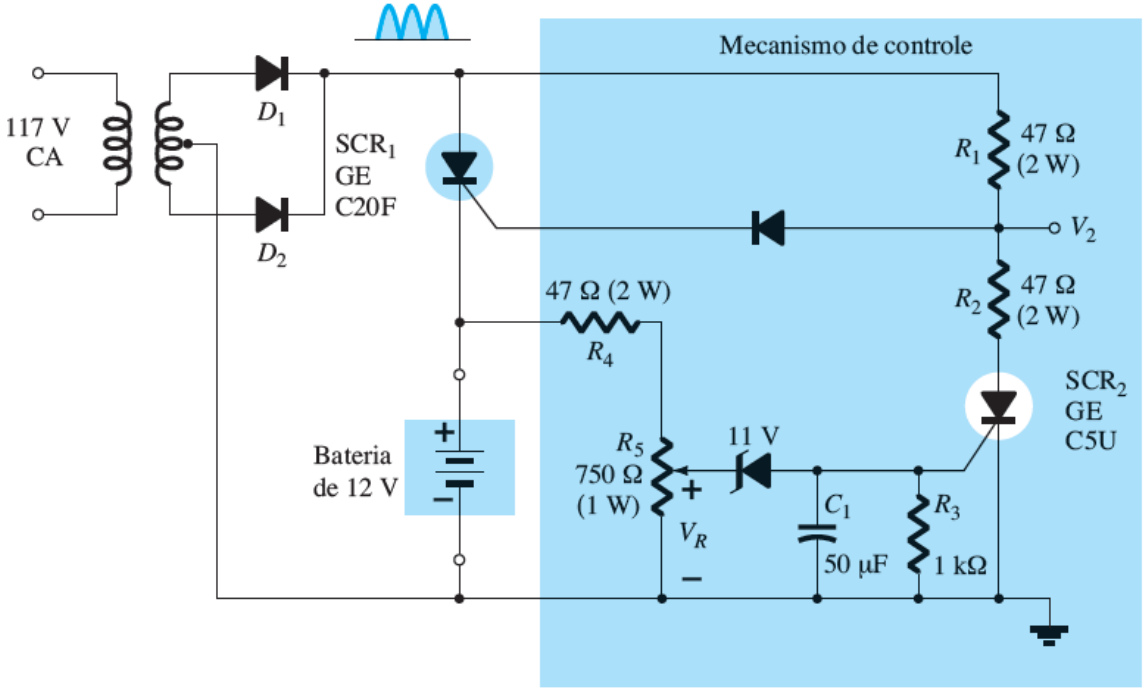


Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

Como indica a figura, *D*1 e *D*2 estabelecem um sinal retificado de onda completa através do SCR1 e da bateria de 12 V a ser carregada.

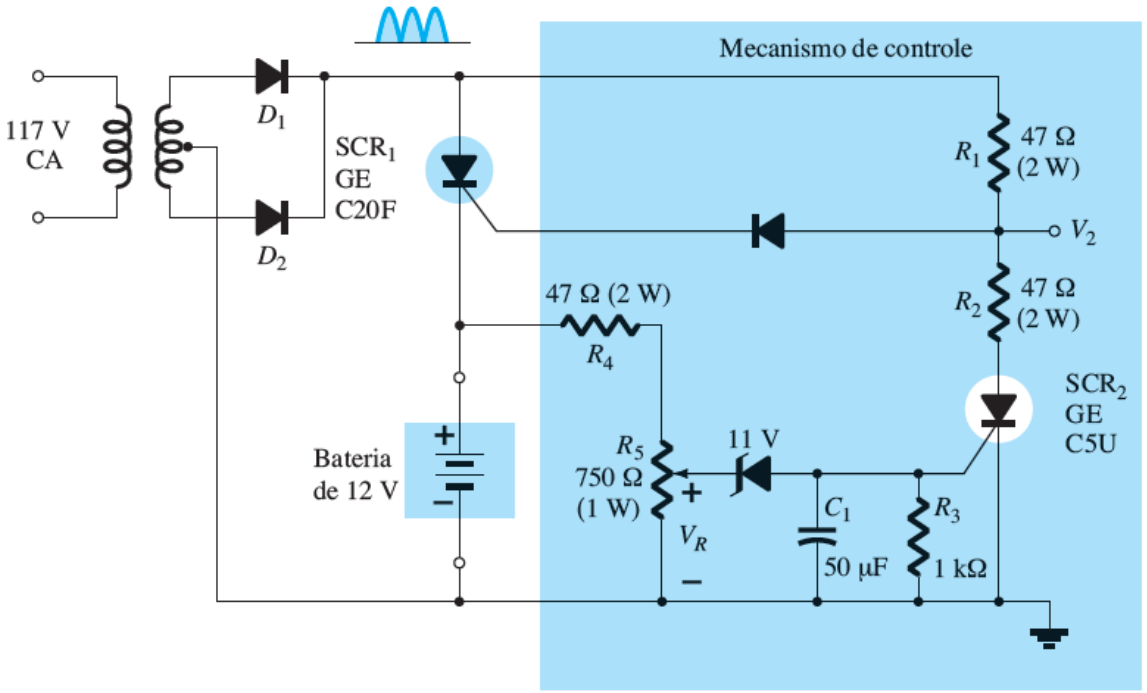
Quando a tensão na bateria está baixa, o SCR2 é cortado ("desligado") por motivos que serão explicados brevemente.



Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

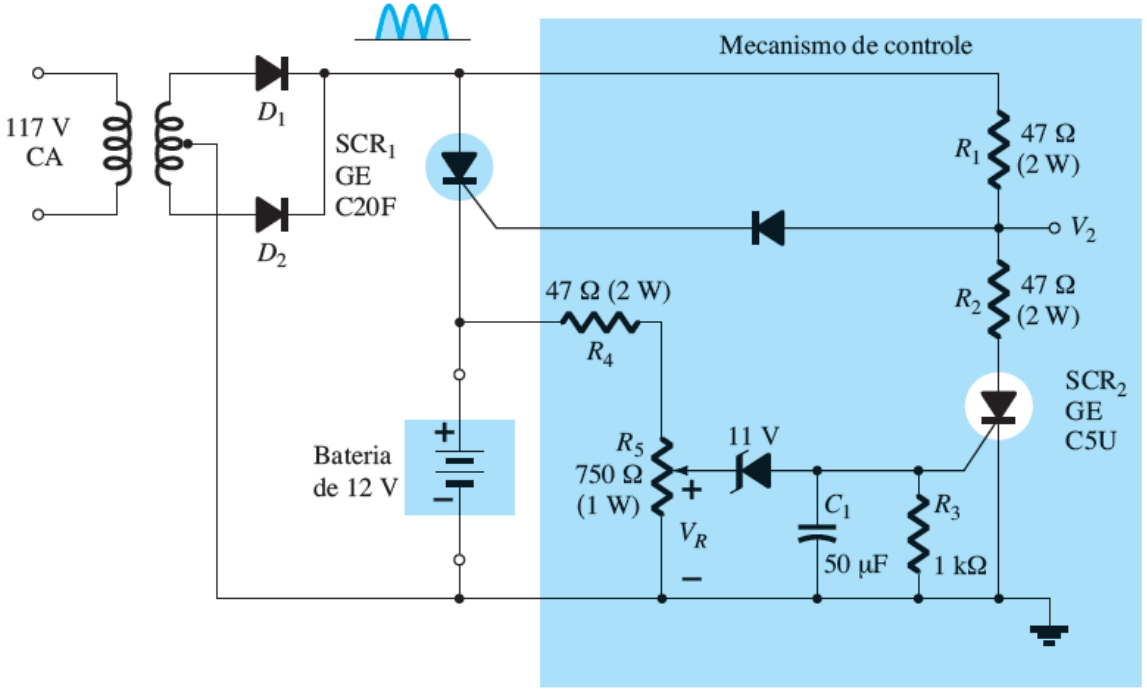
Com o SCR2 aberto, o circuito de controle com SCR1 é exatamente o mesmo que a chave estática de controle já discutida anteriormente. Quando a entrada retificada em onda completa for suficientemente grande para produzir a corrente de porta necessária para a condução (controlada por *R*1), o SCR1 conduzirá e o carregamento da bateria começará.



Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

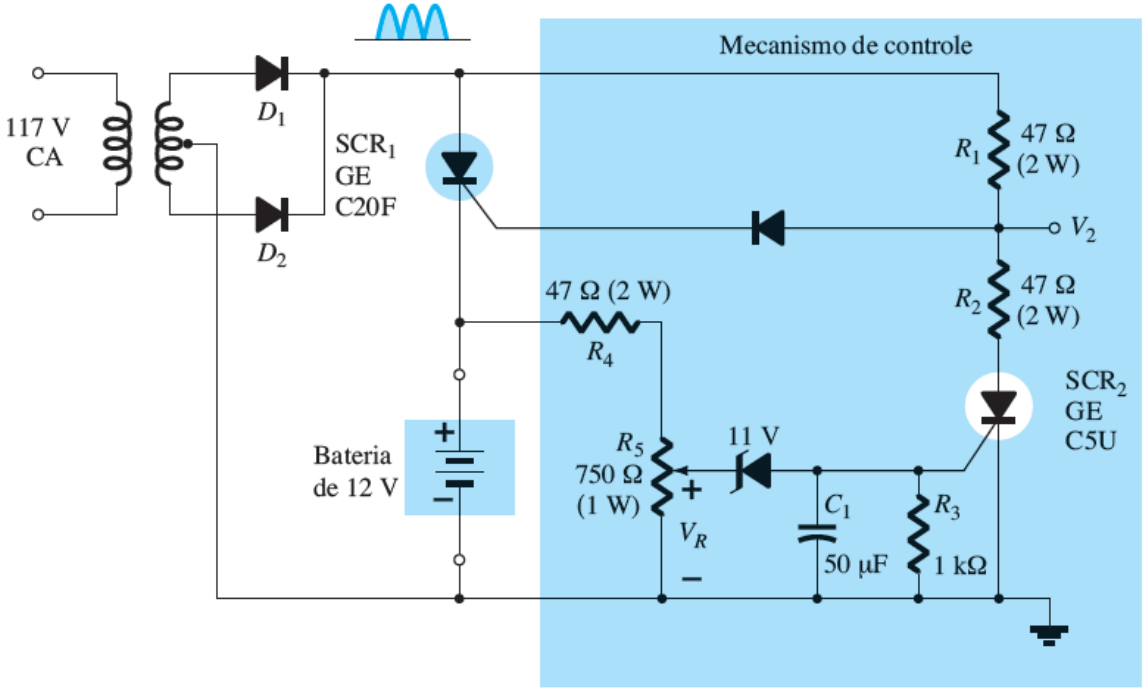
No início do carregamento, a baixa tensão da bateria resultará em uma baixa tensão *VR*, como determinada pelo circuito divisor de tensão simples. A tensão *VR* é, por sua vez, pequena demais para levar o diodo Zener de 11,0 V à condução.



Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

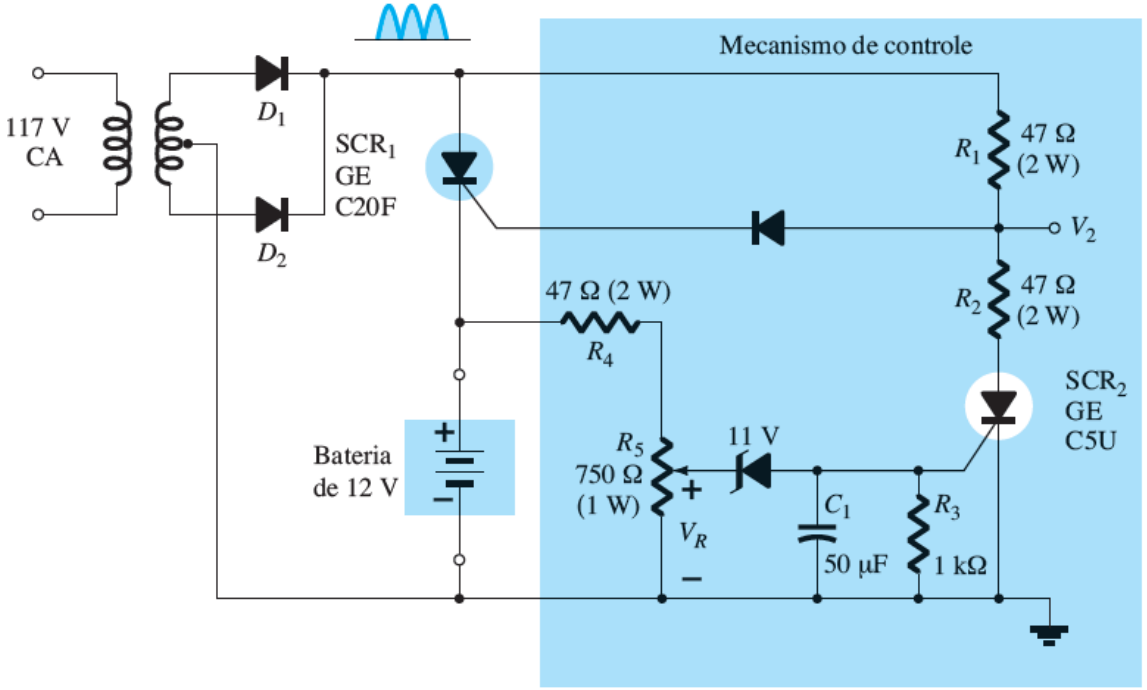
No estado “desligado”, o diodo Zener é, efetivamente, um circuito aberto, mantendo SCR2 cortado, uma vez que sua corrente de porta é igual a zero.



Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

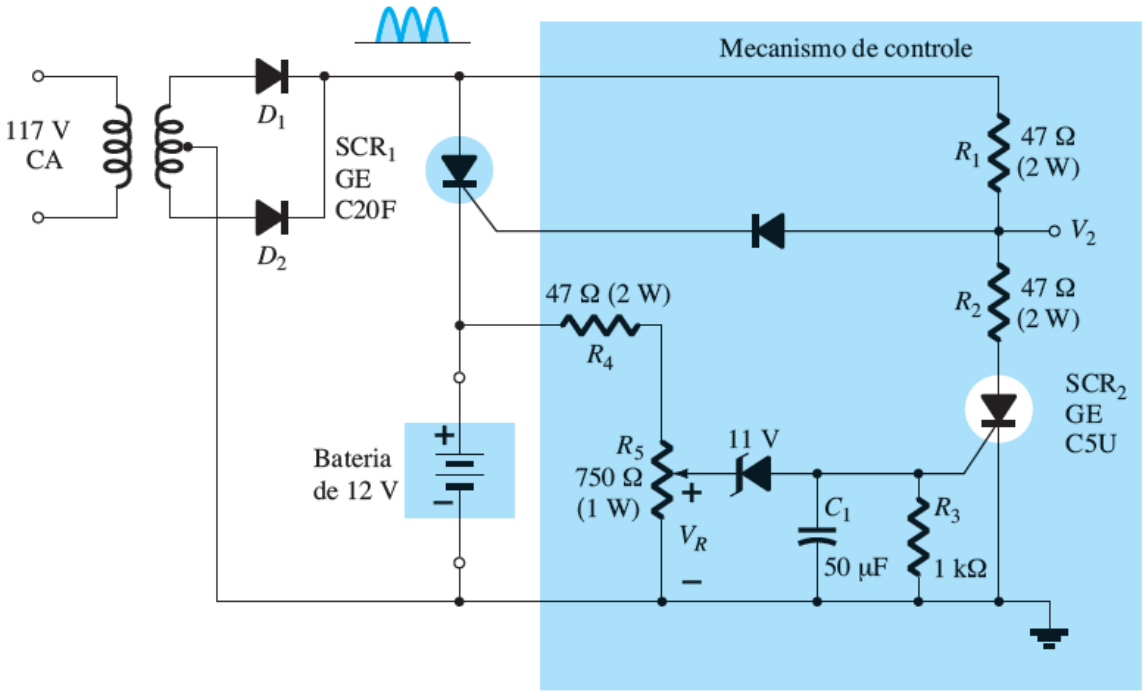
O capacitor *C*1 é incluído para evitar que qualquer transiente de tensão no circuito ligue acidentalmente o SCR2.



Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

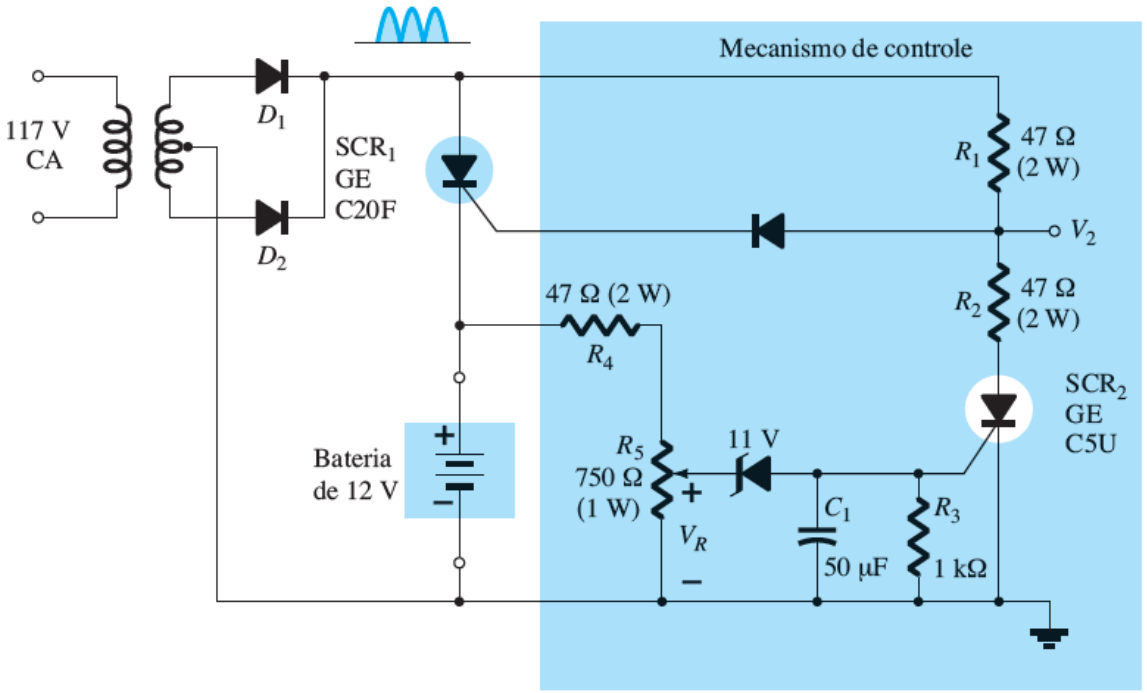
À medida que ocorre o carregamento, a tensão da bateria sobe até um ponto em que *VR* é suficientemente alta para que o Zener de 11,0 V conduza e dispare o SCR2.



Aplicações do SCR

Regulador carregador de bateria

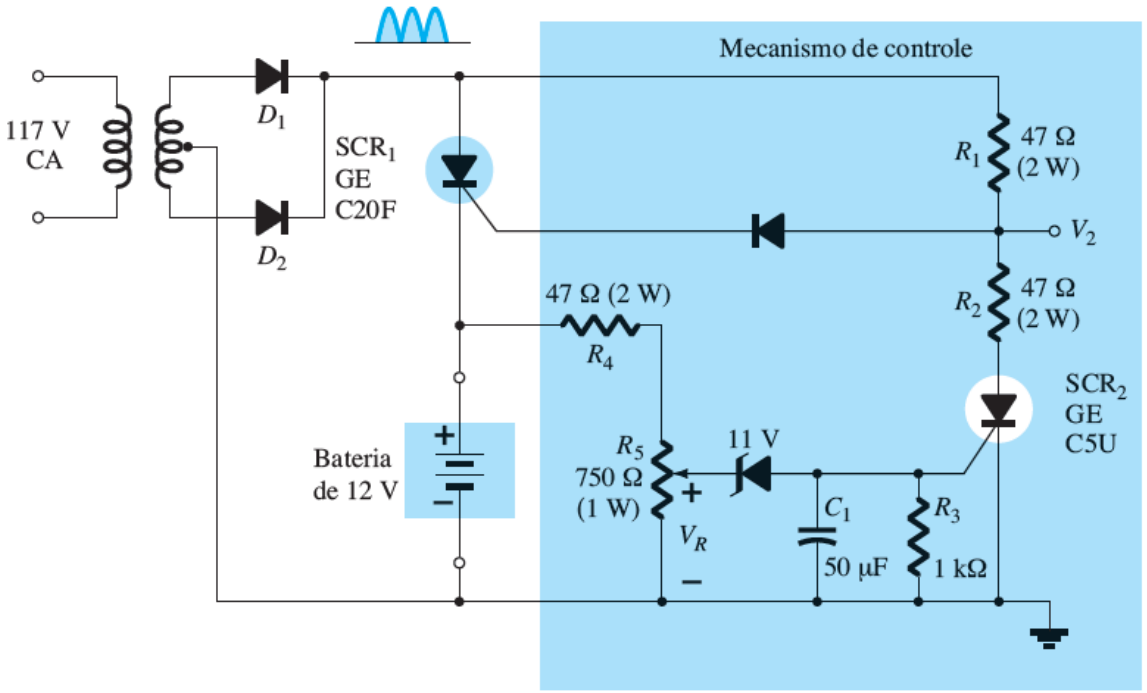
Uma vez que SCR2 é disparado, a representação de curto-circuito para o SCR2 resulta em um circuito divisor de tensão determinado por *R*1 e *R*2, que mantém *V*2 em um nível muito pequeno para ligar o SCR1.



Aplicações do SCR

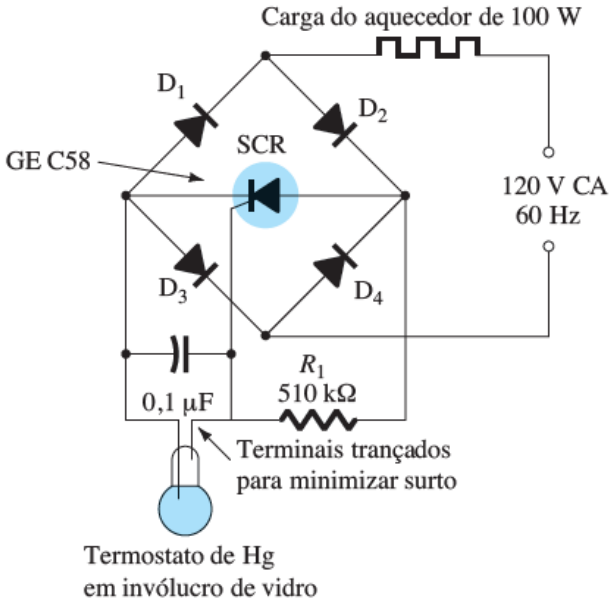
Regulador carregador de bateria

Quando isso ocorre, a bateria está completamente carregada, e o estado de circuito aberto de SCR1 corta a corrente de carga. Portanto, o regulador recarrega a bateria sempre que a tensão cai e evita a sobrecarga quando a carga está completa.



Aplicações do SCR
Controlador de temperatura

O diagrama esquemático do controle de um aquecedor de 100 W utilizando SCR é mostrado na Figura ao ladao. Ele é projetado de tal maneira que o aquecedor de 100 W liga e desliga de acordo com os termostatos. Termostatos de mercúrio são muito sensíveis à variação de temperatura. Eles detectam mudanças de até 0,1 °C; porém, são limitados em aplicação pelo fato de poderem operar apenas com níveis de corrente muito baixos — abaixo de 1 mA.

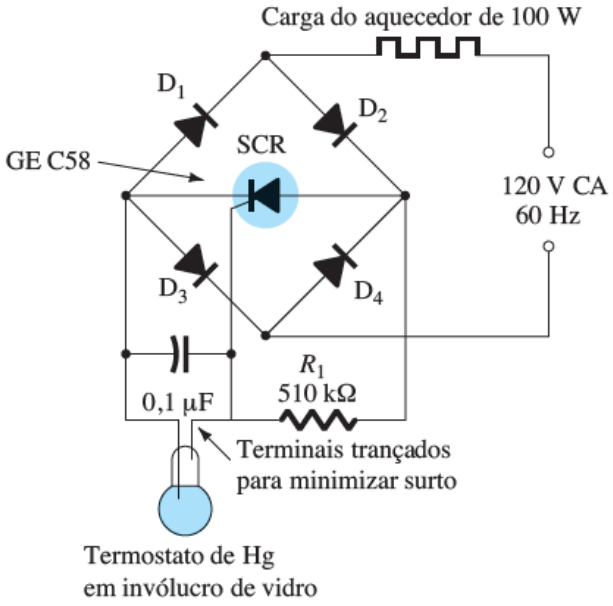


Aplicações do SCR

Controlador de temperatura

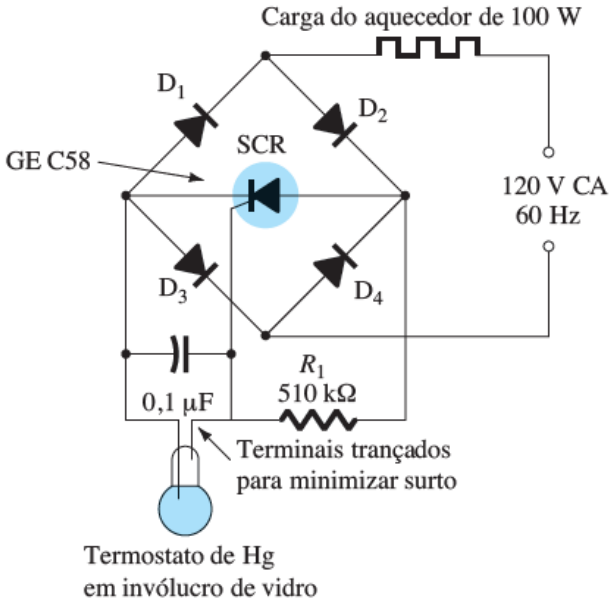
Nessa aplicação, o SCR serve como um amplificador de corrente em um elemento de chaveamento de carga. Não é um amplificador no sentido de amplificar o nível de corrente do termostato.

Em vez disso, é um dispositivo cujo alto nível de corrente é controlado pelo funcionamento do termostato.



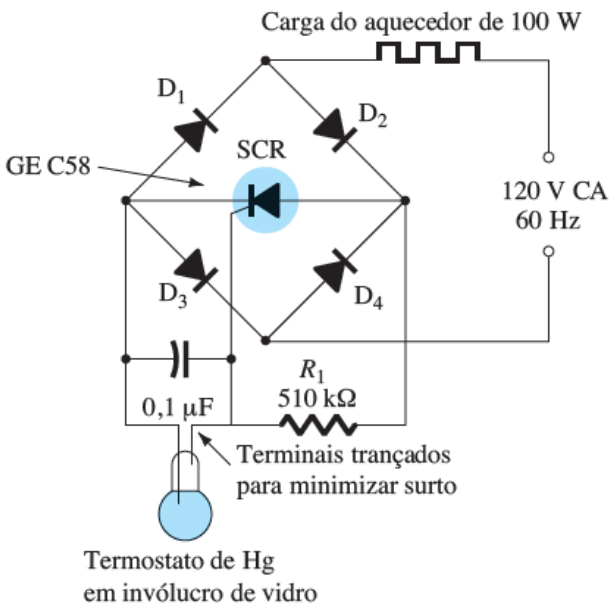
Aplicações do SCR
Controlador de temperatura

Deve ficar claro que o circuito em ponte é conectado à fonte CA por meio do aquecedor de 100 W. Isso resultará em uma tensão retificada de onda completa aplicada ao SCR. Quando o termostato está aberto, o capacitor é carregado até o potencial de disparo da porta em cada pulso do sinal retificado. A constante de tempo de carga é determinada pelo produto *RC*.



Aplicações do SCR
Controlador de temperatura

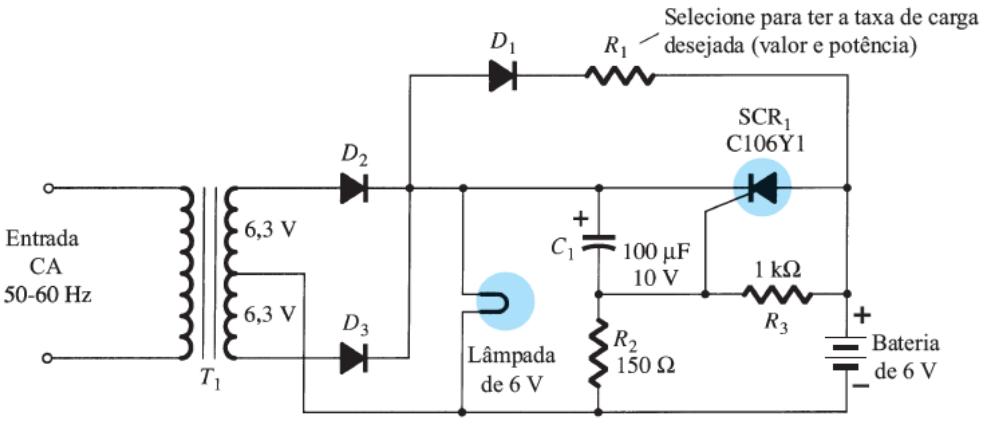
Isso disparará o SCR durante cada semiciclo do sinal de entrada, permitindo um fluxo de carga (corrente) para o aquecedor. Quando a temperatura sobe, o termostato condutivo curto-circuitará o capacitor, eliminando a possibilidade de carregamento do capacitor até o potencial de disparo do SCR. O resistor de 510 kΩ contribuirá, então, para manter uma corrente muito baixa (menos de 250 μA) através do termostato.



Aplicações do SCR

Sistema de iluminação de emergência

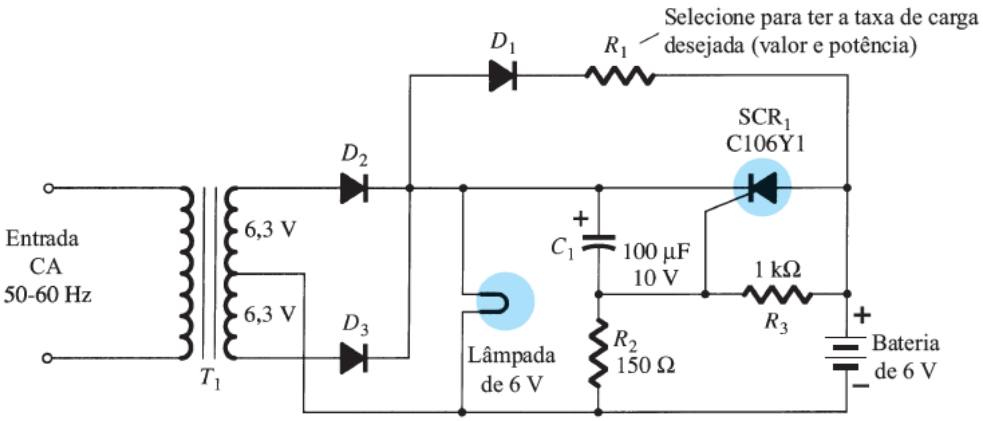
A Figura ao lado, trata-se de um sistema de iluminação de emergência de fonte única que manterá a carga em uma bateria de 6V para garantir sua disponibilidade, e também fornecerá a energia CC a uma lâmpada em caso e falta de energia.



Aplicações do SCR

Sistema de iluminação de emergência

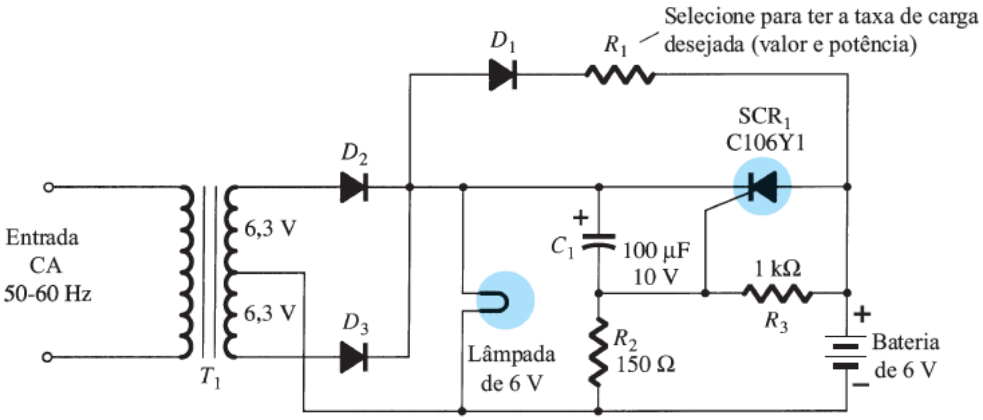
Um sinal retificado de onda completa aparecerá sobre a lâmpada de 6 V devido aos diodos *D*2 e *D*3. O capacitor *C*1 será carregado até uma tensão um pouco menor do que a diferença entre o valor de pico do sinal retificado de onda completa e a tensão CC através de *R*2 estabelecida pela bateria de 6 V.



Aplicações do SCR

Sistema de iluminação de emergência

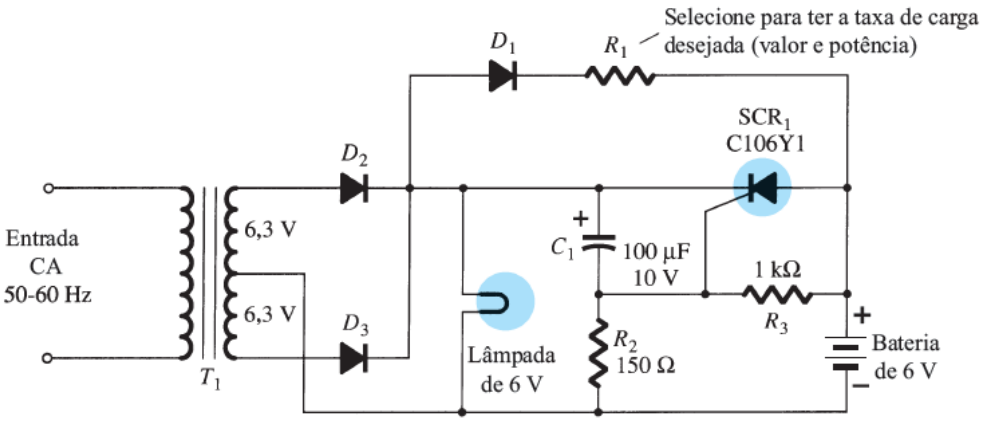
Por garantia, a tensão no catodo do SCR1 é mais alta do que a do anodo, e a tensão porta catodo é negativa, o que assegura que o SCR não esteja conduzindo. A bateria é carregada através de *R*1 e *D*1 a uma taxa determinada por *R*1.



Aplicações do SCR

Sistema de iluminação de emergência

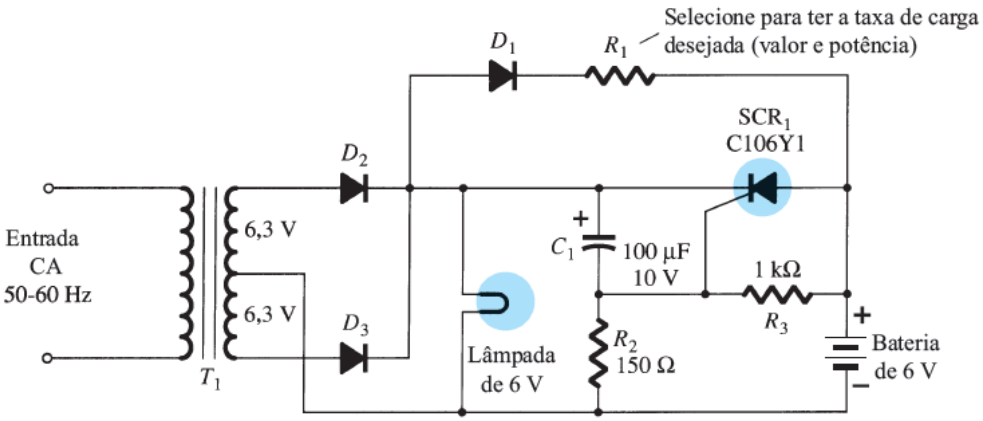
A carga somente ocorrerá quando o anodo de *D*1 tiver uma tensão maior do que seu catodo. O nível CC do sinal retificado de onda completa garante que a lâmpada se acenda quando a alimentação é ligada.



Aplicações do SCR

Sistema de iluminação de emergência

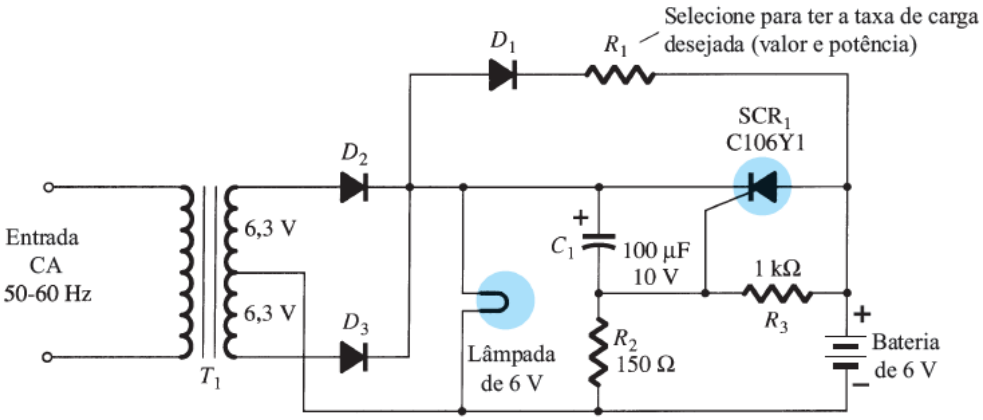
Havendo falta de energia elétrica, o capacitor *C*1 descarrega por meio de *D*1, *R*1 e *R*3 até o catodo de SCR1 ser menos positivo do que o anodo. Simultaneamente, a tensão no ponto comum de *R*2 com *R*3 se torna positiva e estabelece uma tensão porta catodo suficiente para disparar o SCR.



Aplicações do SCR

Sistema de iluminação de emergência

Uma vez disparado, a bateria de 6 V fornece corrente pelo SCR1 e energiza a lâmpada, mantendo sua iluminação. Uma vez restaurada a tensão da rede, o capacitor *C*1 recarrega e restabelece o estado de não condução de SCR1 como descrito anteriormente.



Bibliografia Básica

1 - LANDER, C. W. Eletrônica Industrial – Teoria e Aplicações. São Paulo: McGraw Hill,1988.
2 - RASHID, M. H. Eletrônica de Potência – Circuitos, dispositivos e aplicações. Makron Books, 1999.
3 - RASHID, M. H. Eletrônica de Potência. Pearson, 1999.

Bibliografia Complementar

1 - BARBI, I. Eletrônica de Potência. 2. ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Série Didática, 2000.
2 - AHMED, A. Eletrônica de Potência. Pearson, 2000.
3 - GIMENEZ, S. P.; ARRABAÇA, D. A. Eletrônica de Potência. Conversores de Energia CA/CC. Teoria, Prática e Simulação. Érica/ Saraiva, 2015.
4 - HART, D. W. Eletrônica de Potência - Análise e Projetos de Circuitos. Mc Graw Hill. Amgh Editora.
5 - ERICSON, R. W.; MAKSIMOVIC, Dragan. Fundamentals of Power Electronics. 2nd Edition, eBook
6 - BARBI, I. Eletrônica de Potência. 2. ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Série Didática, 2000.