

Tiristor SCR
Retificador Controlado de Silício

PROF. Romeu Corradi Júnior

EDIÇÃO PRELIMINAR – 1.1

Campinas - 2005

NOTA DO AUTOR

Esta apostila é um material de apoio didático utilizado pelo autor nas suas aulas de Eletrônica Industrial para Os Cursos de nível técnico e Superior. [COTUCA e UNIP].

Este material não tem a pretensão de esgotar, tampouco inovar o tratamento do conteúdo por ele abordado mas, simplesmente, facilitar a dinâmica de aula, com expressivos ganhos de tempo e de compreensão do assunto por parte dos alunos.

Este trabalho foi construído com base nas referências, devidamente citadas ao longo do texto, nas notas de aula e na experiência do autor na abordagem do assunto com os alunos.

Em se tratando de um material didático elaborado em uma Instituição Pública de Ensino, é permitida a reprodução do texto, desde que devidamente citada a fonte.

Quaisquer contribuições e críticas construtivas a este trabalho serão bem-vindas pelo autor.

Prof. Romeu Corradi Júnior
www.corradi.junior.nom.br

Índice:

Nota do Autor	2
1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO SCR	4
2. SCR IDEAL:	6
3. POLARIZAÇÃO DIRETA:	7
4. POLARIZAÇÃO REVERSA:	8
5. MODOS DE DISPARO DE UM SCR:	9
5.1. Corrente de Gatilho I_{GK} :	9
5.2. Sobretemperatura:	11
5.3. Sobretensão:	11
5.4. Degrau de Tensão dv/dt ($\Delta V/\Delta t$):	12
5.5. Luz ou Radiação:	12
6. ANALOGIA COM 2 TRANSISTORES:	13
7. BLOQUEIO OU COMUTAÇÃO DO SCR	13
7.1. Comutação Natural:	14
7.2. Comutação Forçada:	14
8. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DO SCR:	15
9. CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO SCR	17
9.1. Características Dinâmicas no Disparo:	17
9.2. Características Dinâmicas no Bloqueio:	18
10. PERDAS TÉRMICAS EM CONDUÇÃO:	19
11. TESTANDO UM SCR COM MULTÍMETRO:	20
12. PROTEÇÕES DO SCR:	22
12.1. Proteção contra Degrau de Corrente di/dt ($\Delta I/\Delta t$):	22
12.2. Proteção contra Degrau de Tensão dv/dt ($\Delta V/\Delta t$):	22
12.3. Proteção contra Sobretensão	23
12.4. Proteção contra Sobrecorrente	24
12.5. Proteção do Circuito de Disparo do Gatilho	24
13. ASSOCIAÇÕES DE SCR:	24
14. REQUISITOS BÁSICOS PARA OS CIRCUITOS DE DISPARO:	24
15. CIRCUITOS DE DISPARO COM SINAIS CC	25
16. CIRCUITOS DE DISPARO COM SINAIS CA – CONTROLE DE FASE:	26
16.1. Circuito de Disparo CA com Rede Resistiva	26
16.2. Circuito de Disparo CA com Rede Defasadora RC:	28
16.3. Circuito de Disparo CA com Diodo Schokley ou Diac:	29
17. CIRCUITOS DE DISPARO COM SINAIS PULSADOS:	31
17.1. Oscilador de Relaxação com Transistor Unijunção	31
17.2. Oscilador com Diodo Schokley e com Diac	34
17.3. Outros Circuitos Pulsados	35
18. ISOLAMENTO E ACOPLAMENTO	35
18.1. Acoplamento Magnético	36
18.2. Acoplamento Óptico	36
18.3. Proteção do Gatilho	37
19. PROBLEMAS PROPOSTOS	39
20. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXOS:	42
A.1. VALOR NOMINAL MÁXIMO EFICAZ DA CORRENTE DE ÂNODO REPETITIVA	42

Tiristor SCR

(Silicon Controlled Rectifier)

Retificador Controlado de Silício

1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO SCR

O Tiristor SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) foi desenvolvido por um grupo de engenheiros do *Bell Telephone Laboratory* (EUA) em 1957. É o mais conhecido e aplicado dos Tiristores existentes. Tiristor é o nome genérico dado à família dos componentes compostos por quatro camadas semicondutoras (PNPN).

Os Tiristores SCR's funcionam analogamente a um diodo, porém possuem um terceiro terminal conhecido como Gatilho (*Gate* ou *Porta*). Este terminal é responsável pelo controle da condução (disparo). Em condições normais de operação, para um SCR conduzir, além de polarizado adequadamente (tensão positiva no Ânodo), deve receber um sinal de corrente no gatilho, geralmente um pulso.

A principal aplicação que os SCR têm é a conversão e o controle de grandes quantidades de potência em sistemas CC e CA, utilizando apenas uma pequena potência para o controle. Isso se deve à sua ação de chaveamento rápido, ao seu pequeno porte e aos altos valores nominais de corrente e tensão em que podem operar.

Algumas características dos SCR's:

- São chaves estáticas bi-estáveis, ou seja, trabalham em dois estados: não condução e condução, com a possibilidade de controle.
- Em muitas aplicações podem ser considerados chaves ideais, mas há limitações e características na prática.
- São compostos por 4 camadas semicondutoras (P-N-P-N), três junções (P-N) e 3 terminais (Ânodo, Cátodo e Gatilho).
- São semicondutores de silício. O uso do silício foi utilizado devido a sua alta capacidade de potência e capacidade de suportar altas temperaturas.
- Apresentam alta velocidade de comutação e elevada vida útil;
- Possuem resistência elétrica variável com a temperatura, portanto, dependem da potência que estiverem conduzindo.
- São aplicados em controles de relés, fontes de tensão reguladas, controles de motores, *Choppers* (variadores de tensão CC), Inversores CC-CA, Ciclo-conversores (variadores de frequência), carregadores de baterias, circuitos de proteção, controles de iluminação e de aquecedores e controles de fase, entre outras.

A figura 1.1 apresenta a simbologia utilizada e as camadas, junções e terminais, enquanto a figura 1.2 apresenta um tipo de estrutura construtiva para as camadas de um SCR. A figura 1.3 mostra a aparência do encapsulamento tipo TO de um SCR muito utilizado, já acoplado a um dissipador de calor. A figura 1.4 mostra alguns SCR de alta potência com encapsulamento tipo rosca e tipo disco.

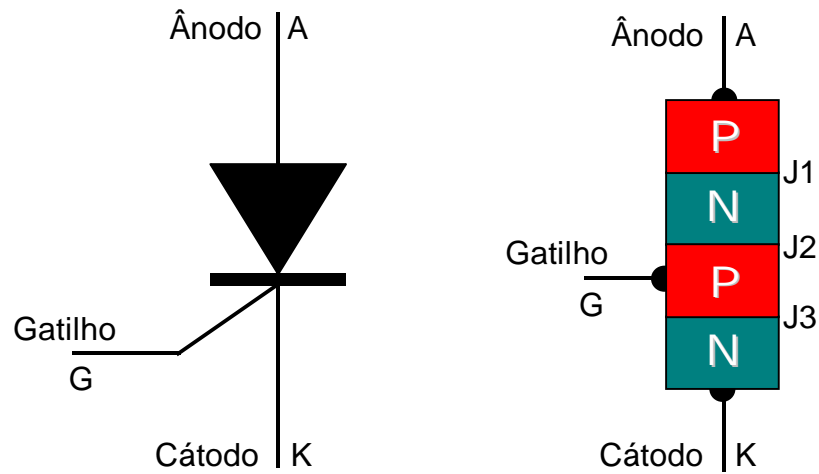


Figura 1.1 – SCR: Simbologia, Camadas e Junções

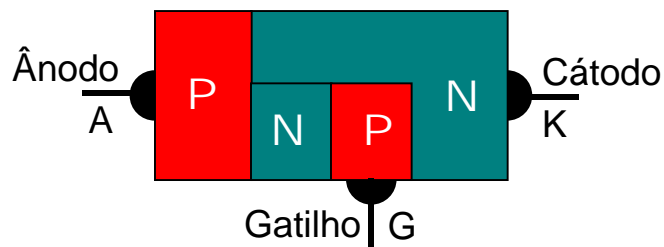


Figura 1.2 – Um tipo de estrutura interna das camadas de um SCR

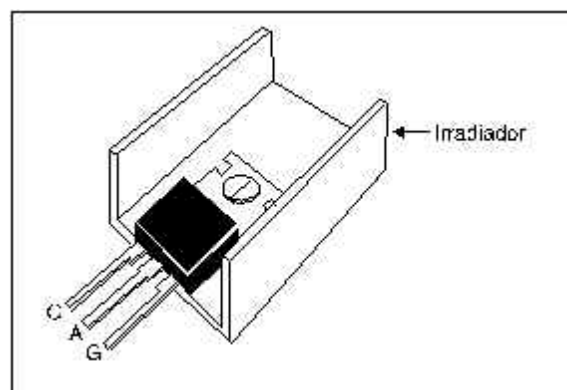


Figura 1.3 – Encapsulamento tipo TO para SCR, com dissipador de calor.



Figura 1.4 – SCR com encapsulamentos tipo rosca e tipo disco para altas potências [ref. 3]

2. SCR IDEAL:

Um SCR ideal se comportaria com uma chave ideal, ou seja, enquanto não recebesse um sinal de corrente no gatilho, seria capaz de bloquear tensões de valor infinito, tanto com polarização direta como reversa. Bloqueado, o SCR ideal não conduziria qualquer valor de corrente. Tal característica é representada pelas retas 1 e 2 na Figura 2.1.

Quando disparado, ou seja, quando comandado por uma corrente de gatilho I_{GK} , o SCR ideal se comportaria como um diodo ideal, como podemos observar nas retas 1 e 3. Nesta condição, o SCR ideal seria capaz de bloquear tensões reversas infinitas e conduzir, quando diretamente polarizado, correntes infinitas sem queda de tensão e perdas de energia por Efeito Joule.

Assim como para os diodos, tais características seriam ideais e não se obtêm na prática.

Os SCR reais têm, portanto, limitações de bloqueio de tensão direta e reversa e apresentam fuga de corrente quando bloqueados. Quando habilitados têm limitações de condução de corrente, pois apresentam uma pequena resistência à circulação de corrente e queda de tensão na barreira de potencial das junções que provocam perdas de energia por Efeito Joule e conseqüente aquecimento do componente.

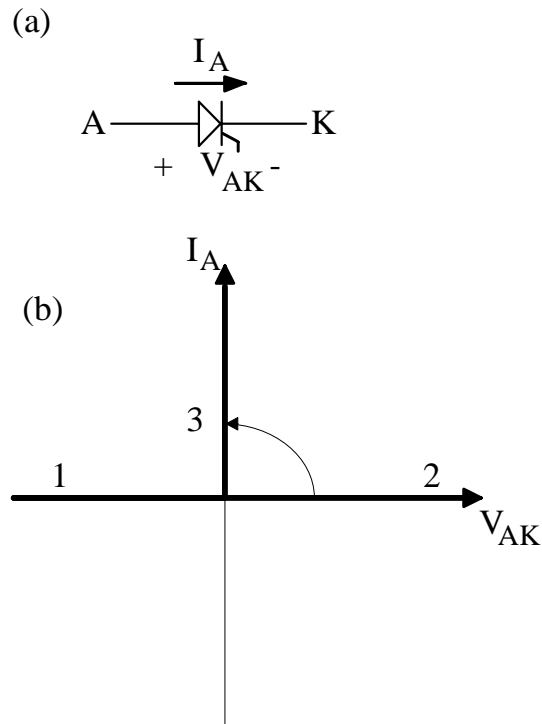


Figura 2.1 - (a) polarização direta (b) características estáticas de um SCR ideal. [ref. 1]

3. POLARIZAÇÃO DIRETA:

A figura 3.1 apresenta um circuito de polarização direta de um SCR onde podemos verificar:

- Tensão do Ânodo positiva em relação ao Cátodo
- J_1 e J_3 polarizadas diretamente
- J_2 polarizada reversamente: apresenta maior barreira de potencial
- Flui pequena Corrente de Fuga Direta de Ânodo para Cátodo, I_F (*Forward Current*).
- Bloqueio Direto – DESLIGADO

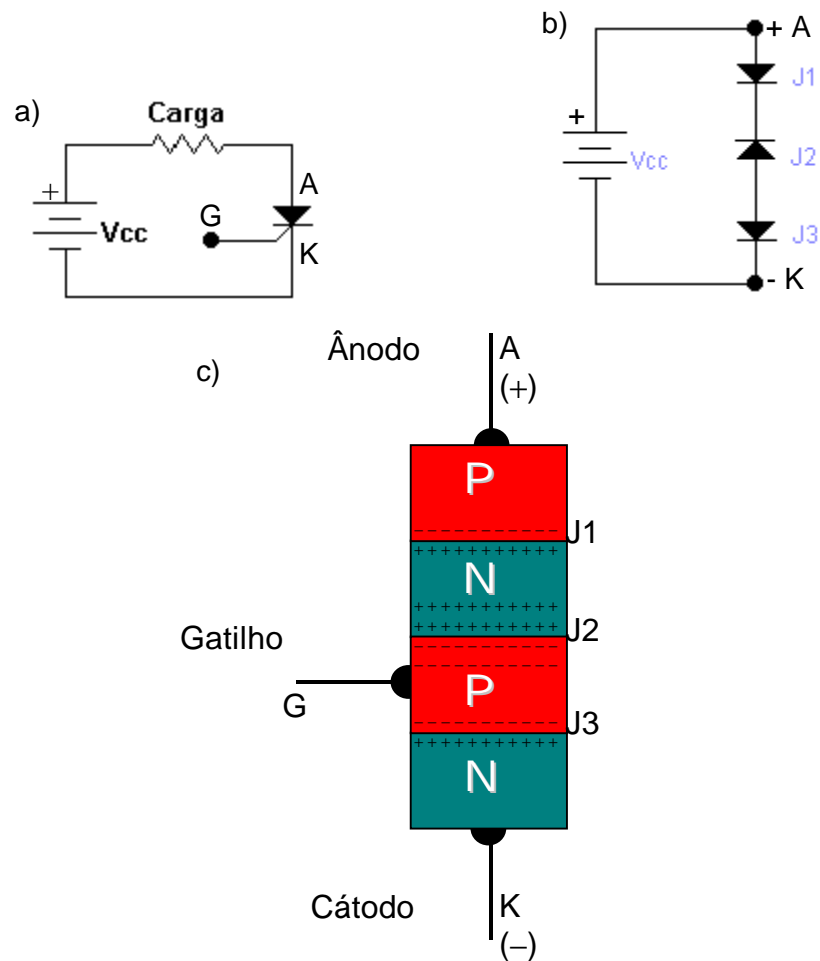


Figura 3.1 – a) SCR bloqueado em polarização direta; b) analogia com diodos
b) efeito da polarização direta nas junções;

4. POLARIZAÇÃO REVERSA:

A figura 4.1 apresenta um circuito de polarização direta de um SCR onde podemos verificar:

- Tensão de Cátodo positiva em relação ao Ânodo
- J_2 diretamente polarizada
- J_1 e J_3 reversamente polarizadas: apresentam maiores barreiras de potencial
- Flui pequena Corrente de Fuga Reversa de Cátodo para Ânodo, I_R (*Reverse Current*).
- Bloqueio Reverso – DESLIGADO

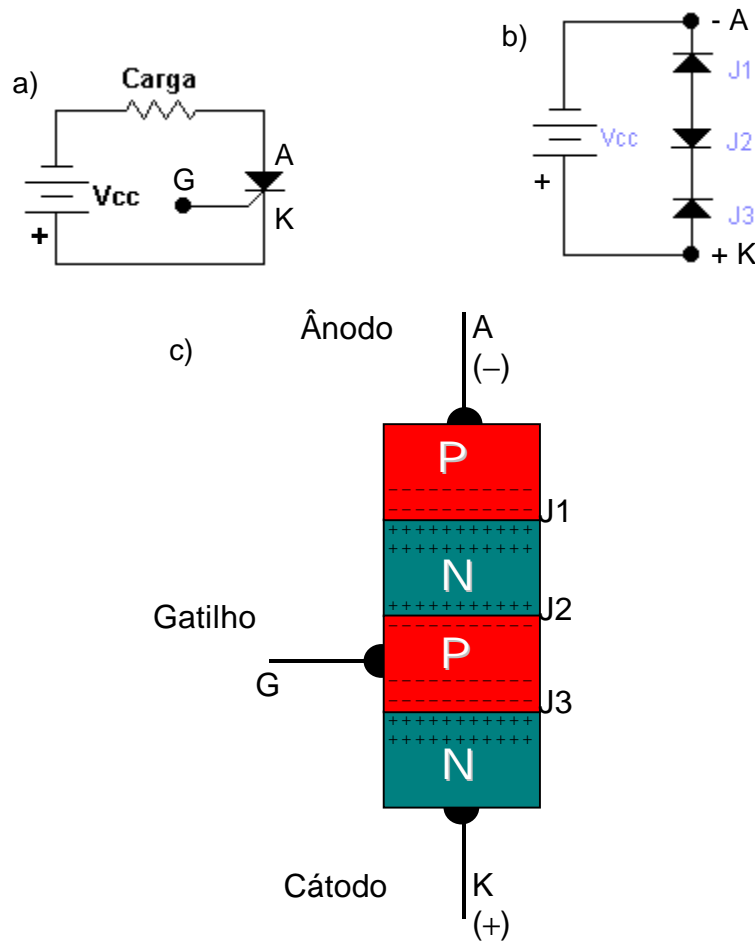


Figura 4.1 – a) SCR bloqueado em polarização reversa; b) analogia com diodos
c) efeito da polarização reversa nas junções

5. MODOS DE DISPARO DE UM SCR:

Um SCR é disparado (entra em condução) quando aumenta a Corrente de Ânodo I_A , através de uma das seguintes maneiras:

5.1. Corrente de Gatilho I_{GK} :

É o procedimento normal de disparo do SCR. Quando estiver polarizado diretamente, a injeção de um sinal de corrente de gatilho para o cátodo (I_G ou I_{GK}), geralmente na forma de um pulso, leva o SCR ao estado de condução. A medida que aumenta a corrente de gatilho para cátodo, a tensão de bloqueio direta diminui até que o SCR passa ao estado de condução.

A Figura 5.1 apresenta um circuito para disparo do SCR. Enquanto diretamente polarizado o SCR só começa a conduzir se receber um comando através de um sinal de corrente (geralmente um pulso) em seu terminal de gatilho (Gate ou Porta). Esse pulso polariza diretamente o “segundo diodo formado pelas camadas N e P” e possibilita a condução.

Enquanto tivermos corrente entre ânodo e cátodo o SCR continua conduzindo, sendo ele cortado (bloqueado) somente quando a mesma for praticamente extinta. Nesta condição, as barreiras de potencial formam-se novamente e o SCR precisará de um novo sinal de corrente no gatilho para voltar ao estado de condução.

Polarizado reversamente o SCR funciona como um diodo, bloqueando a passagem de corrente, mesmo quando efetuado um pulso em seu Gatilho.

A característica gatilho-cátodo de um SCR se assemelha a uma junção PN, variando, portanto, de acordo com a temperatura e características individuais do componente, um exemplo de curva de disparo pode ser encontrado no anexo deste documento.

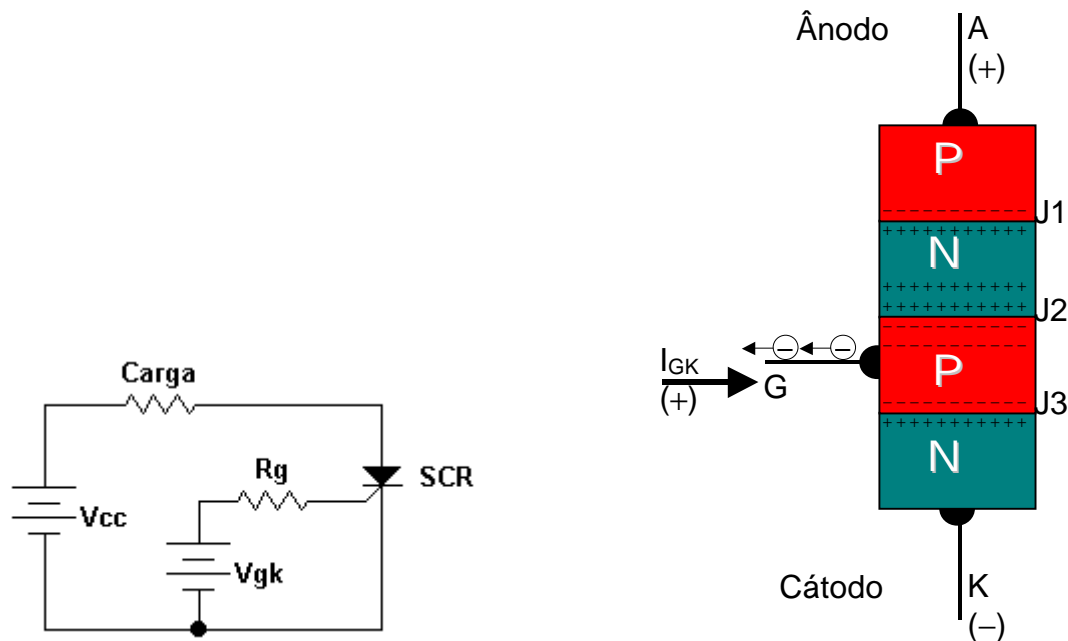


Figura 5.1 – Disparo de um SCR

Como entre o gatilho e o cátodo há uma junção PN, temos uma tensão de aproximadamente 0,7V. Desta forma, analisando o circuito da figura 5.2, podemos determinar os requisitos para o circuito de disparo do SCR.

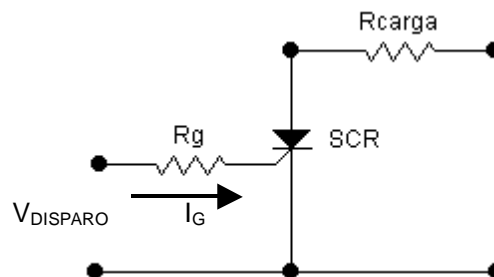


Figura 5.2 – Circuito para disparo do SCR

Assim, a tensão $V_{DISPARO}$ necessária para proporcionar a corrente de disparo I_G através da resistência limitadora R_G pode ser dada por:

$$V_{DISPARO} = I_G \cdot R_G + 0,7$$

Um SCR pode disparar por ruído de corrente no gatilho. Para evitar estes disparos indesejáveis devemos utilizar um resistor R_{GK} entre o gatilho e o cátodo que desviará parte do ruído, como indica a figura 5.3. Em alguns tipos de SCR, a resistência R_{GK} já vem internamente no componente para diminuir sua sensibilidade.

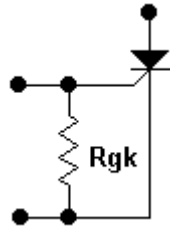


Figura 5.3 – Resistência para evitar disparos por ruídos no gatilho

5.1.1. Corrente de Retenção e Corrente de Manutenção

Para entrar em condução o SCR deve conduzir uma corrente suficiente, cujo valor mínimo recebe o nome de Corrente de Retenção I_L (*Latching Current*). O SCR não entrará em condução se a Corrente de Gatilho I_{GK} for suprimida antes que a Corrente de Ânodo I_A atinja o valor da Corrente de Retenção I_L .

Uma vez retirada a corrente de gatilho, a mínima Corrente de Ânodo I_A para manter o SCR em condução é chamada Corrente de Manutenção I_H (*Holding Current*). Se a Corrente de Ânodo for menor que a Corrente de Manutenção, as barreiras de potencial formam-se novamente e o SCR entrará em Bloqueio.

A Corrente de Retenção é maior que a Corrente de Manutenção ($I_L > I_H$). O valor de I_L é em geral de duas a três vezes a corrente de manutenção I_H . Ambas diminuem com o aumento da temperatura e vice-versa.

É por este motivo que dizemos que o SCR é uma **Chave de Retenção** (ou Travamento) porque uma vez em condução, permanece neste estado enquanto a Corrente de Ânodo I_A for maior que a Corrente de Manutenção ($I_A > I_H$), mesmo sem corrente no gatilho (I_{GK}).

5.2. Sobretemperatura:

O aumento brusco da temperatura aumenta o número de pares elétrons-lacunas no semiconductor provocando maior corrente de fuga, o que pode levar o SCR ao estado de condução. O disparo por aumento de temperatura deve ser evitado.

5.3. Sobretensão:

Se a tensão direta ânodo-cátodo V_{AK} for maior que o valor da tensão de ruptura direta máxima V_{DRM} (V_{BO}), fluirá uma corrente de fuga suficiente para levar o SCR ao estado de condução.

Isto acontece porque o aumento da tensão V_{AK} em polarização direta acelera os portadores de carga na junção J2 que está reversamente polarizada, podendo atingir energia suficiente para provocar a avalanche e disparar o SCR. Este fenômeno faz com que muitos elétrons choquem-se e saiam das órbitas dos átomos do semiconductor ficando disponíveis para condução e permitindo o aumento da corrente de fuga no SCR e levando-o ao estado de condução.

O disparo por sobretensão direta diminui a vida útil do componente e, portanto, deve ser evitado.

A aplicação de uma sobretensão reversa, ou seja, uma tensão ânodo-cátodo maior que o valor da tensão de ruptura reversa máxima (V_{RRM} ou V_{BR}) danificará o componente.

5.4. Degrau de Tensão dv/dt ($\Delta V/\Delta t$):

Se a taxa de crescimento da tensão ânodo-cátodo V_{AK} no tempo for alta (subida muito rápida da tensão V_{AK}) pode levar o SCR ao estado de condução. Em polarização direta a Junção J2 está reversamente polarizada e se comporta como um capacitor carregado, como podemos observar na figura 5.1.

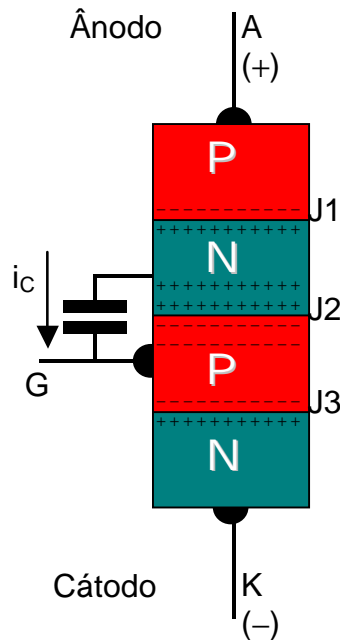


Figura 5.1 – Disparo por degraú de tensão

Num capacitor a corrente de carga relaciona-se com a tensão pela expressão:

$$i_c = C \cdot \frac{dv}{dt}$$

Assim, quando for aplicada uma tensão V_{AK} a capacitância da Junção J2 fará circular uma corrente no gatilho tanto maior quanto maior for a variação da tensão no tempo ($\Delta v/\Delta t$). Esta corrente no gatilho pode ser suficiente para disparar o SCR.

O valor máximo de dv/dt é dado pelo fabricante em catálogos. O disparo por degraú de tensão deve ser evitado pois pode provocar queima do componente ou disparo intempestivo. O circuito de proteção é chamado de *Snubber* e será estudado adiante.

5.5. Luz ou Radiação:

Se for permitida a penetração de energia luminosa (luz) ou radiante (fótons, raios gama, nêutrons, prótons, elétrons ou raios X) nas junções do semiconductor, haverá maior combinação de pares elétrons-lacunas, provocando maior corrente de fuga, o que pode levar o SCR ao estado de condução. É o caso do SCR ativado por luz, chamado foto-SCR ou LASCR (*Light-Activated Silicon Controlled Rectifier*).

6. ANALOGIA COM 2 TRANSISTORES:

A figura 6.1 apresenta um circuito com dois transistores complementares (PNP e NPN) que permitem uma analogia ao funcionamento do SCR e demonstra a ação de retenção (travamento) devido à realimentação positiva no circuito

De uma maneira simplificada, com polarização direta, a injeção de um sinal de corrente no gatilho do circuito provoca um efeito de realimentação em que o aumento da corrente na base de Q2 aumenta a corrente de fuga no coletor de Q2 e da base de Q1 e, conseqüentemente, a corrente de coletor de Q1. Esta, por sua vez, realimenta a corrente de base de Q2 e assim sucessivamente até ambos os transistores entrarem em saturação.

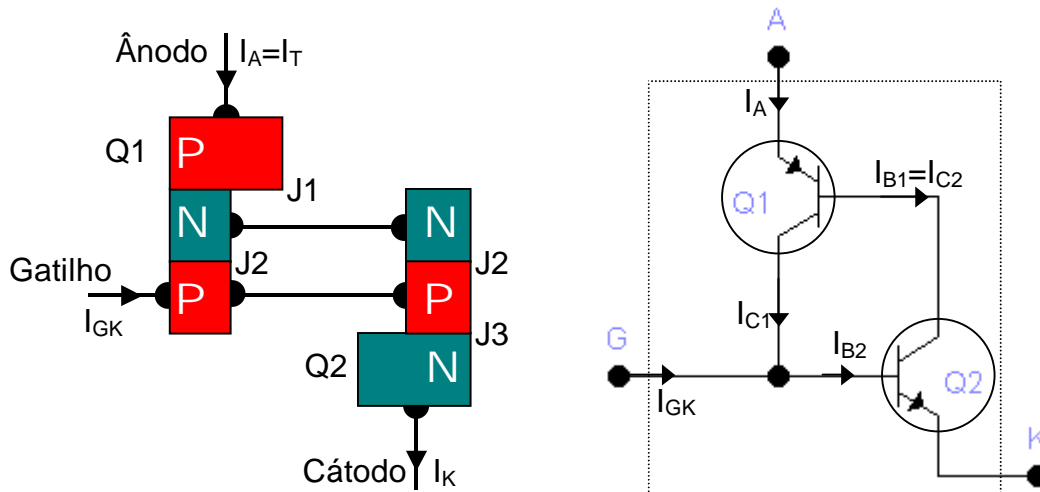


Figura 6.1 – Modelo de um SCR com dois transistores complementares

Requisite ao professor material sobre Prática da Analogia do SCR com Transistores, ou consulte:

<http://www.corradi.junior.nom.br>

7. BLOQUEIO OU COMUTAÇÃO DO SCR

O desligamento de um SCR é chamado de Bloqueio ou Comutação. O SCR é uma chave de retenção, ou seja, uma vez disparado e conduzindo, o gatilho perde o controle. A única forma de bloquear um SCR é reduzir a corrente de ânodo I_A para um valor menor que o valor da corrente de manutenção I_H durante um certo tempo. Este é o tempo necessário para o desligamento do SCR, t_{off} .

Devemos portanto lembrar:

- Diodos e SCR's somente bloqueiam quando praticamente é extinta a corrente entre ânodo-cátodo e não por aplicação de tensão reversa.
- Para um SCR comutar, ou seja, passar do estado de condução para o estado de não condução, também chamado de bloqueio, a Corrente de Ânodo I_A deve ser reduzida a um valor abaixo do valor da corrente de manutenção I_H , durante um certo tempo (tempo de desligamento t_q).
- O tempo de desligamento é da ordem de 50 a 100 μ s para os SCR normais e de 5 a 10 μ s para os SCR rápidos.

7.1. Comutação Natural:

A Comutação Natural acontece quando a Corrente de Ânodo I_A for reduzida a um valor abaixo da Corrente de Manutenção I_H . A Corrente de Manutenção é cerca de 1000 vezes menor que a corrente nominal do SCR.

Em circuitos de corrente alternada a corrente passa por zero em algum momento do ciclo. Isso já é suficiente para o bloqueio do SCR em frequências comerciais (50 ou 60Hz). A Figura 7.1 apresenta um circuito em que ocorre a Comutação Natural. Fechada a chave Ch1 e pulsando a chave Ch2 o SCR entra em condução e permanece até que o momento em que a corrente passe por zero no ciclo alternado. Nesse momento $I_A < I_H$ e o SCR bloqueia.

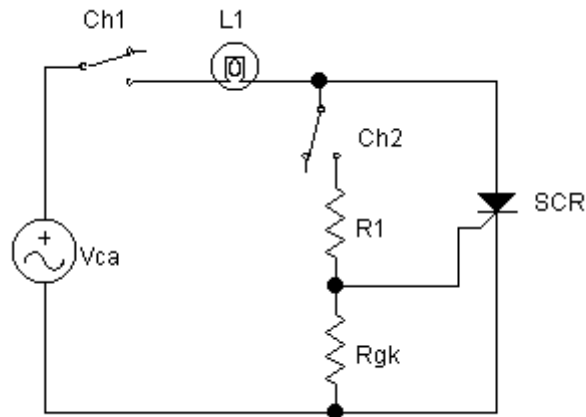


Figura 7.1 – Circuito para comutação natural do SCR

7.2. Comutação Forçada:

Em circuitos de corrente contínua a tensão permanece positiva no ânodo. Como a corrente não diminui naturalmente, deve-se provocar a redução da Corrente de Ânodo através da Comutação Forçada. Há duas formas para isso:

- Desviando-se a corrente por um caminho de menor impedância provocando $I_A < I_H$;
- Aplicando-se tensão reversa e forçando-se a operação na região de polarização reversa. Note que isso também fará $I_A < I_H$.

A Figura 7.2 apresenta um circuito para Comutação Forçada onde a chave Ch1 permitirá um caminho que drenará a corrente do SCR levando-o ao bloqueio.

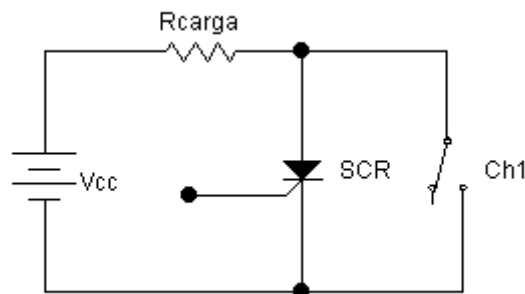


Figura 7.2. –Comutação forçada por chave

A Figura 7.3 apresenta um circuito para Comutação Forçada através de um capacitor. Quando a chave Ch1 for fechada, o capacitor aplicará tensão reversa levando o SCR ao bloqueio. Devemos lembrar que o SCR deverá conduzir durante o tempo necessário para que o capacitor

esteja totalmente carregado e que a chave pode ser um outro semicondutor (um outro SCR ou um transistor, por exemplo).

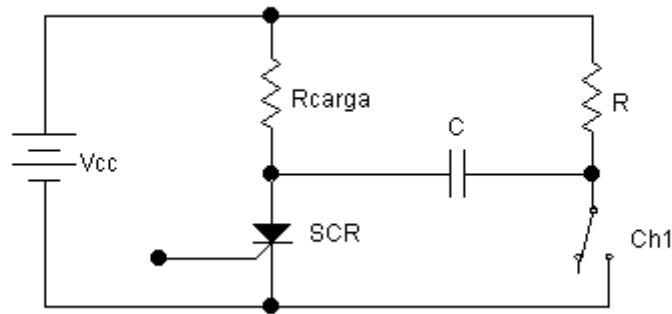


Figura 7.3 – Comutação forçada por capacitor

Requisite ao professor material sobre Prática sobre Comutação de SCR, ou consulte:
<http://www.corradi.junior.nom.br>

8. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DO SCR:

Existem limites de tensão e corrente que um SCR pode suportar. Tais limites constituem as características estáticas reais como mostra a Figura 8.1. As curvas 1 e 2 apresentam as características para o SCR no estado de bloqueio, enquanto as curvas 1 e 3 mostram as características para o SCR com Corrente de Gatilho I_{GK} , para ambas as polarizações. Podemos, então, verificar na Figura 8.1, que a curva característica de um SCR real apresenta três regiões distintas:

- Bloqueio em Polarização Reversa – curva 1
- Bloqueio em Polarização Direta – curva 2
- Condução em Polarização Direta – curva 3

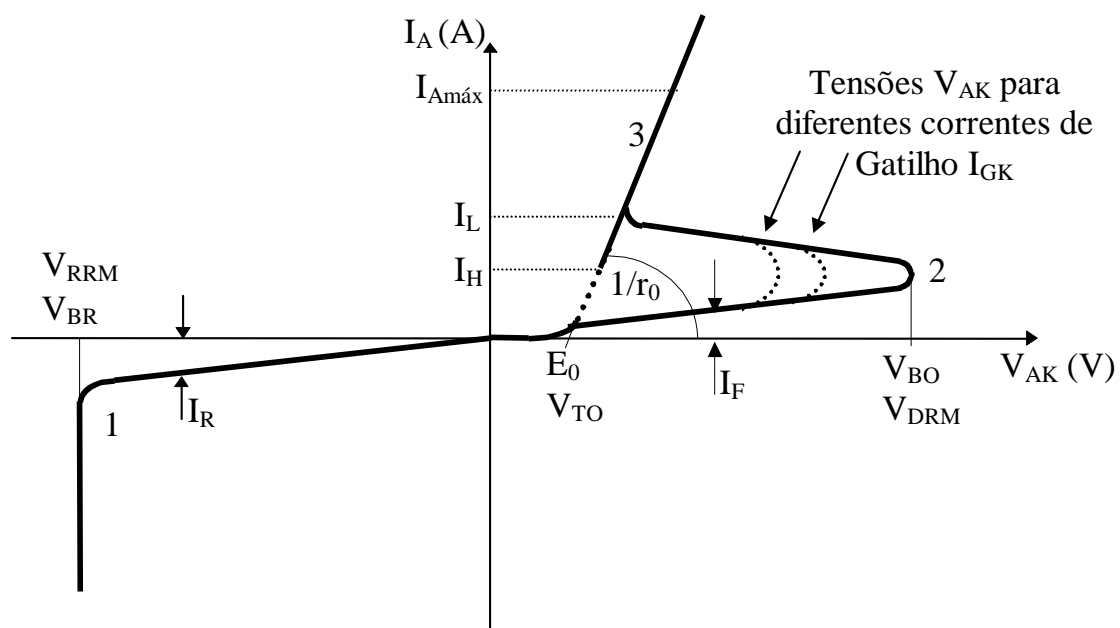


Figura 8.1 – Características estáticas reais do SCR. [ref. 1]

A Tabela 8.1 apresenta os principais parâmetros nominais dos SCR.

Tabela 8.1 – Principais Parâmetros dos SCR

Parâmetros Importantes	Simbologias Usuais	Nome Original	Unidades Usuais
Tensão Ânodo-Cátodo, quando em condução	E_0 V_{TO} V_F	<i>Turn-on Voltage</i> ou <i>Forward Voltage</i>	V
Tensão de Ruptura Reversa Máxima	V_{RRM} V_{BR}	<i>Reverse Breakover Voltage</i>	V kV
Tensão de Ruptura Direta Máxima	V_{DRM} V_{BO}	<i>Breakover Voltage</i>	V kV
Corrente de Fuga Reversa	I_R	<i>Reverse Current</i>	mA
Corrente de Fuga Direta	I_F	<i>Forward Current</i>	mA
Resistência em Condução	r_O r_F r_T	<i>Forward Resistance</i> ou <i>Turn-on Resistance</i>	mΩ
Corrente de Disparo de Gatilho para Cátodo	I_G I_{GK}	<i>Gate Current</i>	mA A
Tensão de Gatilho para Cátodo	V_{GK}	<i>Gate Voltage</i>	V
Corrente Média no Ânodo	I_{AV} I_{med}	<i>Average Current</i>	A kA
Corrente Eficaz no Ânodo	I_{RMS} I_{ef}	<i>Root Mean Square Current</i>	A kA
Corrente de Pico no Ânodo	I_P	<i>Peak Current</i>	A kA
Tensão Inversa Máxima entre Gatilho e Cátodo	V_{GRM}	<i>Maximum Reverse Gate Voltage</i>	V
Corrente Máxima de Disparo do Gatilho	I_{GTM}	<i>Maximum Gate Trigger Current</i>	μA mA
Tensão Máxima de Disparo do Gatilho	V_{GTM}	<i>Maximum Gate Trigger Voltage</i>	V
Corrente Mínima de Disparo do Gatilho	I_{GT}	<i>Gate Trigger Current</i>	μA mA
Tensão Mínima de Disparo do Gatilho	V_{GT}	<i>Gate Trigger Voltage</i>	V
Corrente de Retenção	I_L	<i>Latching Current</i>	μA mA
Corrente de Manutenção	I_H	<i>Holding Current</i>	μA mA

Observação: A maioria dos SCR apresentam I_{GT} entre 0,1 a 50mA. I_{GT} e V_{GT} variam inversamente com a temperatura. O caso mais crítico, portanto, ocorre em altas temperaturas.

Como exemplo, temos os dados de catálogo fornecidos pelo fabricante para o tiristor:

SCR Aegis A1N:16.06J [ref.3]

- SCR encapsulamento tipo rosca
- Tensão de ruptura reversa máxima (V_{RRM}) 600V
- Corrente de ânodo média admissível (I_{AKmed}) 16A
- Corrente de ânodo eficaz admissível (I_{Akef}) 35A
- Tensão direta em condução (E_0) 1,0V
- Resistência em condução (r_O) 18mΩ
- Corrente de disparo mínima (I_{GT}) 150mA
- Tensão Mínima de Gatilho (V_{GT}) 2,0V

•Degrau de Tensão Admissível (dV/dt)	200V/ μs
•Degrau de Corrente Admissível (dI/dt)	150A/ μs
•Corrente de Manutenção (I_H)	100mA
•Corrente de Retenção (I_L)	200mA
•Corrente de Fuga (I_F)	10mA

9. CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO SCR

As características dinâmicas do SCR estão ligadas diretamente com o comportamento transitório do componente durante os processos de entrada em condução e de bloqueio.

9.1. Características Dinâmicas no Disparo:

A Figura 9.1 mostra o circuito para o estudo do disparo do SCR, onde V_{CC} é a fonte que alimentará a resistência de carga através do SCR. A fonte V_G fornecerá a corrente de gatilho I_{GK} através da resistência limitadora R_G .

Considere que no instante inicial t_0 a chave Ch1 é fechada e a fonte V_G fornece a corrente I_{GK} ao gatilho.

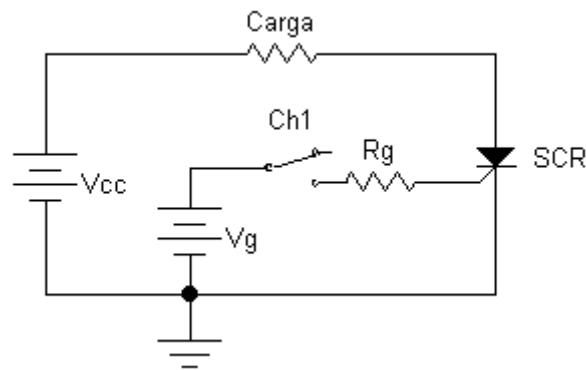


Figura 9.1 – Circuito para o estudo do disparo do SCR

As formas de onda de interesse para o disparo são mostradas na Figura 9.2. Entre o fechamento da chave Ch e a efetiva condução do SCR há um tempo necessário para que a corrente de gatilho I_{GK} provoque o decaimento da tensão ânodo-cátodo V_{AK} e a elevação da corrente de ânodo I_A . O tempo de retardo é chamado de t_d (*delay time*) e o tempo de decaimento t_r . O tempo de fechamento $t_{on} = t_d + t_r$, é o tempo necessário para que o SCR comece a conduzir efetivamente a partir do disparo.

O tempo de retardo t_d (*delay time*) é a maior componente do tempo de fechamento e depende principalmente da amplitude da corrente de gatilho I_{GK} e da velocidade de crescimento da referida corrente.

O tempo de decaimento da tensão ânodo-cátodo t_r independe da corrente I_{GK} . Apenas as características de fabricação do componente interferem no decaimento de V_{AK} .

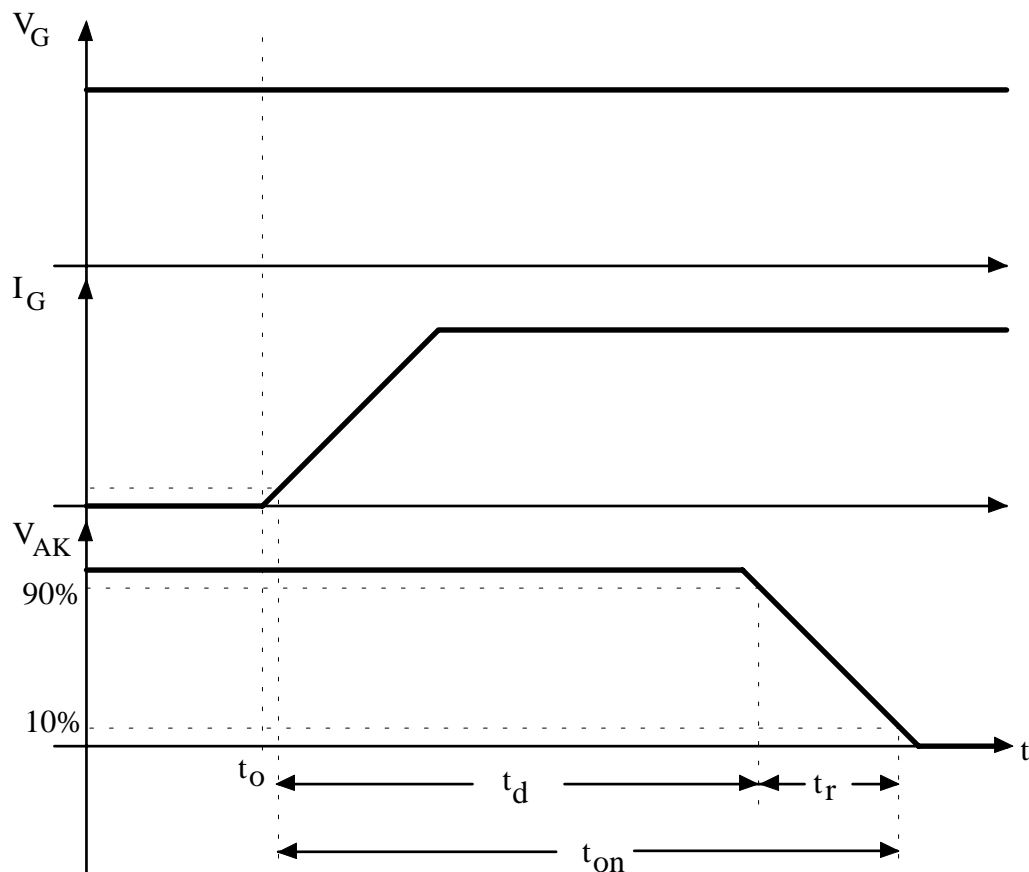


Figura 9.2 - Representação do atraso no disparo do SCR. [ref. 1]

9.2. Características Dinâmicas no Bloqueio:

Para o estudo da dinâmica de bloqueio utilizamos o circuito da Figura 9.3, que acrescenta uma fonte de tensão reversa V_r e a chave Ch2 ao circuito da Figura X. O indutor L_p representa uma indutância parasita que influencia no decaimento da corrente do SCR.

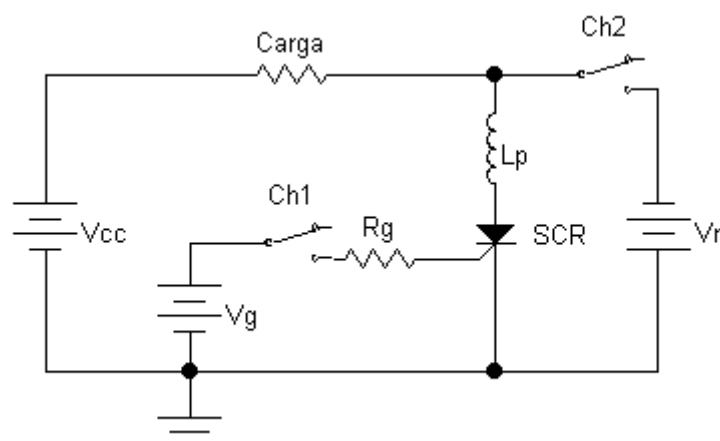


Figura 9.3 – Circuito para estudo do bloqueio do SCR

Enquanto o SCR conduz a corrente de carga, a chave Ch2 encontra-se aberta. Quando, em $t = t_0$, a chave Ch2 é fechada, inicia-se o processo de bloqueio do SCR. No instante $t = t_1$, a chave Ch2 é novamente aberta e o SCR encontra-se bloqueado.

Podemos observar o processo dinâmico de bloqueio do SCR pela Figura 9.4. Após o tempo de recuperação do SCR t_{rr} , para que o SCR possa bloquear efetivamente é necessário manter a tensão reversa por um tempo igual ou maior do que t_q . Isto é necessário para que o SCR possa alcançar o equilíbrio térmico e permanecer bloqueado até ser aplicada corrente em seu gatilho. A corrente reversa máxima (I_{RM}) tem valor limitado e que depende das características do SCR e do circuito.

O tempo t_q varia desde 5 μs para os SCR rápidos (SCR Inversores) até 50 a 400 μs para os SCR lentos (SCR Controladores de Fase).

Portanto, a frequência de operação, ou velocidade de chaveamento requerida num circuito definirá o tipo de SCR a ser utilizado. Os fabricantes fornecem os valores nominais associados à velocidade através da frequência máxima f_{max} bem como os tempos de ligação t_{on} e de desligamento t_q ou t_{off} .

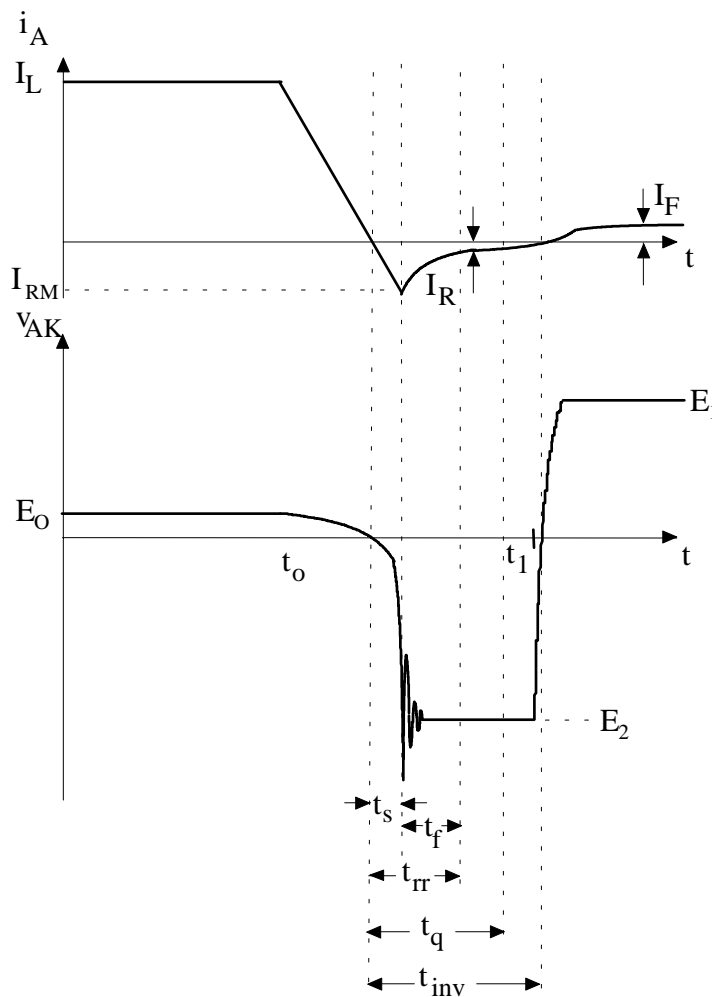


Figura 9.4 - Característica dinâmica de bloqueio do SCR, mostrando o tempo mínimo de aplicação de tensão inversa t_q . [ref. 1]

10. PERDAS TÉRMICAS EM CONDUÇÃO:

Durante o ciclo de chaveamento, um SCR apresenta as seguintes perdas de potência (e, conseqüentemente de energia):

- Perdas de Potência em Condução
- Perdas de Potência em Bloqueio (direto e reverso)

- Perdas de Potência por Chaveamento (comutação)
- Perdas de Potência por Acionamento do Gatilho

Em Geral, sob condições normais de operação as Perdas em Bloqueio e por Acionamento do Gatilho são pequenas o suficiente para serem desprezadas. Em baixas frequências (<400Hz), as Perdas por Chaveamento também são pequenas e podem ser desprezadas. Em altas frequências, especialmente na entrada em condução do SCR, as perdas aumentam significativamente. A referência [5] apresenta uma boa discussão a respeito.

A principal fonte de perdas de potência são durante a condução do SCR.

Analogamente a um diodo, podemos representar o SCR por seu circuito elétrico equivalente, mostrado na Figura 10.1, onde E_0 (V_F ou V_{TO}) representa a queda de tensão e r_0 (r_F ou r_T) representa a resistência quando o componente está em condução.

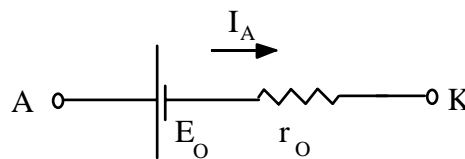


Figura 10.1 - Circuito equivalente do SCR em condução.

O SCR conduzindo dissipa uma potência elétrica (em Watts) na forma de calor que pode ser calculada por:

$$P_{SCR} = E_0 \cdot I_{med} + r_0 \cdot I_{ef}^2$$

onde:

P_{SCR} – perda de potência no SCR durante a condução (W)

E_0 – tensão ânodo-cátodo durante a condução (V)

r_0 – resistência em condução ($m\Omega$)

I_{med} – valor médio da corrente de ânodo (A)

I_{ef} – valor eficaz da corrente de ânodo (A)

A determinação das Perdas em Condução do SCR tem importância fundamental no chamado “Cálculo Térmico” para o dimensionamento dos Dissipadores de Calor e Sistemas de Refrigeração. O seu correto dimensionamento permite que o componente controle o máximo de potência sem sobreaquecimento, o que poderia danificá-lo.

11. TESTANDO UM SCR COM MULTÍMETRO:

Os SCR devem ser testados em polarização direta e acionando-se a porta com um sinal de corrente e observando-se se ele permanece conduzindo após essa corrente ser removida.

Para os SCR de pequeno porte, que apresentam baixas Correntes de Manutenção I_H , o teste pode ser feito com um Multímetro na função Ohmímetro, como mostra a seqüência de testes na figura 11.1.

O terminal positivo do multímetro é ligado ao ânodo e o negativo ao cátodo para que a bateria interna do instrumento polarize diretamente o SCR. Esta é a condição de bloqueio direto e a leitura do ohmímetro deve ser um valor muito alto. Mantendo-se esta condição e conectando-se também o gatilho no terminal positivo do multímetro, a bateria do instrumento fornecerá o sinal de corrente para disparar o SCR. A leitura do ohmímetro deverá indicar um valor substancialmente baixo e manter-se neste valor após o gatilho ser removido do terminal positivo do multímetro.

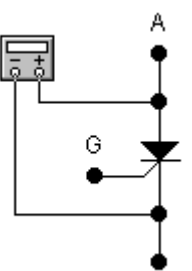
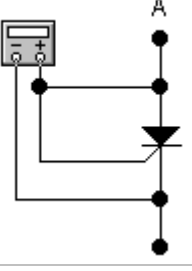
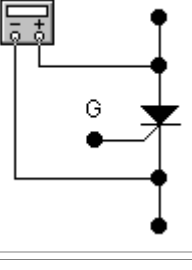
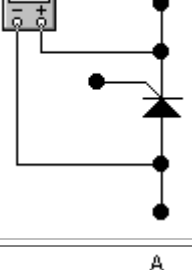
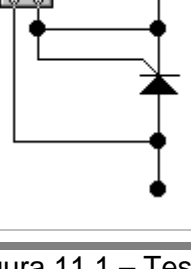
Conexão	Resistência	Condição
	ALTA	BOM
	BAIXA	CURTO
	BAIXA	BOM
	ALTA	ABERTO
	BAIXA	BOM
	ALTA	DUVIDOSO
	ALTA	BOM
	BAIXA	CURTO
	ALTA	BOM
	BAIXA	CURTO

Figura 11.1 – Testando um SCR com Multímetro

Se em polarização direta e sem a conexão do gatilho, a leitura do ohmímetro for baixa, isso indicará um curto-circuito entre ânodo e cátodo. Se ao conectar o gatilho a leitura do ohmímetro não diminuir, o SCR estará aberto. Se estiver conduzindo e voltar ao bloqueio quando do gatilho for desconectado, sua condição de operação será duvidosa pois talvez a corrente fornecida pela bateria do instrumento não seja suficiente para atingir a corrente de manutenção (I_H).

Em polarização reversa a leitura do ohmímetro deve ser sempre muito alta, mesmo com a conexão do gatilho.

Observação Importante:

Este método deve ser usado com cautela pois a tensão do ohmímetro aplicada ao gatilho pode ser alta o suficiente para danificar o componente. O teste mais adequado deve ser feito com um instrumento traçador de curvas.

12. PROTEÇÕES DO SCR:

Um SCR exige uma adequada proteção contra sobretensões e sobrecorrentes para oferecer uma operação segura e confiável.

Sob condições anormais, sobrecargas por exemplo, o SCR poderá ser percorrido por uma sobrecorrente suficiente para danificá-lo. Operações inadequadas e transitórios podem provocar sobretensões que ultrapassem os seus limites nominais de tensão.

O dimensionamento do SCR deverá ser feito para as condições normais de operação, levando-se em conta uma certa margem de segurança. Superdimensioná-lo para as possíveis condições anormais seria antieconômico.

12.1. Proteção contra Degrau de Corrente di/dt ($\Delta I/\Delta t$):

Quando o SCR começa a conduzir, a corrente de ânodo fica concentrada em uma área relativamente pequena próxima ao gatilho. É necessário um certo tempo para que a condução se espalhe por igual em toda a pastilha semicondutora.

Entretanto, se ocorrer um Degrau de Corrente, rápido crescimento da corrente de ânodo I_A , poderão formar-se pontos quentes (*hot spots*) no semicondutor e queimar o componente por sobre-temperatura. Este Degrau de Corrente é dado pela taxa com que a corrente varia no tempo, ou di/dt ($\Delta I/\Delta t$) e é expresso em Ampères por microssegundos (A/ μ s).

Limita-se o di/dt com uma pequena indutância em série com o SCR, pois esta se opõe às variações bruscas de corrente, amortecendo a subida da corrente no ânodo. A Indutância requerida pode ser determinada pela equação:

$$L \geq \frac{V_P}{(di/dt)_{\max}}$$

Onde:

L – indutância (μ H)

$(di/dt)_{\max}$ – degraude corrente máximo admissível (A/ μ s)

V_P – tensão de pico (V)

12.2. Proteção contra Degrau de Tensão dv/dt ($\Delta V/\Delta t$):

O Degrau de Tensão, rápido crescimento da tensão V_{AK} , pode disparar indesejavelmente o SCR. Para proteger contra o disparo intempestivo utiliza-se uma rede RC (resistor em série com capacitor) conectada aos terminais de ânodo e cátodo do SCR. Este circuito de proteção, apresentado na Figura 12.1, é chamado de *Snubber*.

A capacitância é uma oposição à variação de tensão e, portanto, o capacitor C_S conectado aos terminais do SCR reduz a taxa na qual a tensão no dispositivo varia.

Quando o SCR estiver bloqueado, o capacitor C_S se carregará até o instante em que o dispositivo entrar em condução.

Quando o SCR for acionado, o capacitor descarregará e sua corrente se somará ao di/dt apresentado pelo circuito original. Portanto, uma resistência R_s deve ser colocada em série com o capacitor para amortecer a descarga e limitar a corrente transitória no disparo.

Para um determinado degrau de tensão, os componentes do circuito *Snubber* podem ser calculados pela equação:

$$C_s \geq \frac{V_{DRM}}{R_{carga} \cdot \left(\frac{dv}{dt}\right)_{\max}}$$

A equação abaixo fornece o valor mínimo para R_s :

$$R_s = \sqrt{\frac{V_{DRM}}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max}}}$$

Para aumentar a eficiência do *Snubber*, um diodo D_s pode ser ligado em paralelo com R_s . Quando o dv/dt for grande, o diodo curto-circuitará R_s , mas quando o di/dt for grande, o diodo estará desligado.

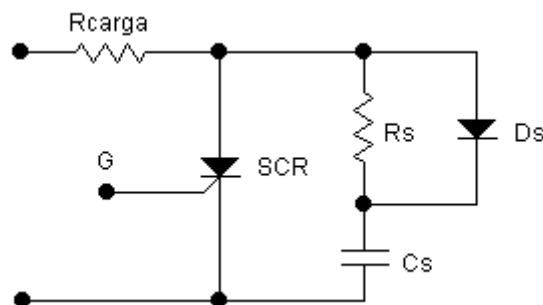


Figura 12.1 – Circuito *Snubber*

12.3. Proteção contra Sobretensão

As sobretensões geralmente são causadas por distúrbios no chaveamento devidos à energia armazenada em componentes indutivos. A sobretensão transitória resultante pode exceder os limites de tensão do SCR podendo causar disparo intempestivo ou queimá-lo por ruptura reversa.

Algumas maneiras de proteger um SCR contra sobretensão:

- Diodo em série com o SCR: para que ambos os componentes compartilhem a tensão inversa. Devido à queda de tensão no diodo, este método pode introduzir perdas de potência significativas em certos circuitos.
- SCR com alto valor de tensão nominal: como margem de segurança, porém, isto pode implicar maiores custos.
- Circuito Snubber RC: em paralelo com a fonte geradora de sobretensão.
- Varistor (resistor não linear): em paralelo com o SCR, fornece um caminho de baixa resistência para o transitório de tensão.

12.4. Proteção contra Sobrecorrente

A sobrecorrente ocorre, em geral, por sobrecarga ou curto-circuito e o dispositivo de proteção deverá abrir o circuito antes do superaquecimento do SCR.

As proteções contra sobrecorrente mais usuais são:

- Fusíveis de Ação Rápida: escolhidos através do parâmetro I^2t , relativo ao tempo do ação, fornecido em catálogos de SCR e de fusíveis.
- Disjuntores de Alta Velocidade.
- Relés de Sobrecorrente.

12.5. Proteção do Circuito de Disparo do Gatilho

O circuito de disparo do gatilho deve ser protegido contra transitórios de tensão e, preferencialmente, ser eletricamente isolado do circuito de alta potência que o SCR controla. Isso pode ser feito com Transformadores de Pulso e de Acopladores Ópticos (Opto-acopladores).

Este assunto será estudado posteriormente.

13. ASSOCIAÇÕES DE SCR:

Os valores nominais de corrente direta e de bloqueio de tensão determinam a potência máxima de carga que um SCR pode controlar.

No mercado podem ser encontrados SCR com valores nominais de tensão e de corrente bastante altos (5kV e 5kA). Porém, em algumas aplicações esses limites não são suficientes, como em linhas de transmissão de energia em corrente contínua, como é o caso das linhas da Usina Itaipu, operando com tensões de 1200kV (bipolo de $\pm 600\text{kV}$).

Para aumentarmos a capacidade de bloqueio de tensão, devemos associar SCR em série e para aumentarmos a capacidade de corrente, devemos associar SCR em paralelo.

Como qualquer outro componente, as características de dois SCR de mesmo tipo, são diferentes. Essas diferenças propiciam um complicador no projeto de circuitos com associações de SCR e devem ser equalizadas. Em projetos adequados as tensões e correntes entre os SCR devem ser compartilhadas igualmente entre eles.

Não trataremos desse assunto neste curso, porém a referência [5] apresenta uma boa discussão a respeito.

No mercado já se encontram disponíveis alguns módulos de componentes já conectados para aplicações específicas.

14. REQUISITOS BÁSICOS PARA OS CIRCUITOS DE DISPARO:

Os circuitos de disparo devem proporcionar ao SCR o sinal adequado e no instante desejado para que o componente entre em condução corretamente. São, portanto, requisitos fundamentais no projeto de um circuito de disparo de SCR:

- O sinal de gatilho deverá ter amplitude adequada e tempo de subida suficientemente curto;
- A largura do pulso de gatilho (o tempo de duração do pulso t_G) deve ser maior que o tempo necessário para a corrente ânodo-cátodo passar o valor da corrente de retenção I_L . Na prática: $t_G > t_{on}$.
- Evitar ocorrência de disparos indesejados por sinais falsos ou ruídos;
- O sinal de gatilho deve ser removido após o disparo. Sinal contínuo aumenta as perdas de potência, levando ao sobre-aquecimento o que reduz a vida útil do componente.

- Quando reversamente polarizado é desaconselhável haver sinal de gatilho, pois o componente pode queimar pelo aumento da corrente de fuga reversa.
- O controle deverá ser suficientemente preciso;
- Em circuitos trifásicos, garantir a defasagem de 120° nos sinais dos gatilhos.
- Em associações de SCR, garantir o acionamento simultâneo.

Basicamente, existem 3 tipos usuais de sinais de disparo:

- Sinais CC;
- Sinais AC.
- Sinais Pulsados;

15. CIRCUITOS DE DISPARO COM SINAIS CC

Geralmente os parâmetros de acionamento de um SCR são fornecidos em relação à tensão e corrente médias CC.

Os circuitos de disparo com sinais CC podem fazer uso da própria fonte de tensão que alimenta a carga, se ela for CC, ou ter uma fonte própria, como mostra a figura 15.1.

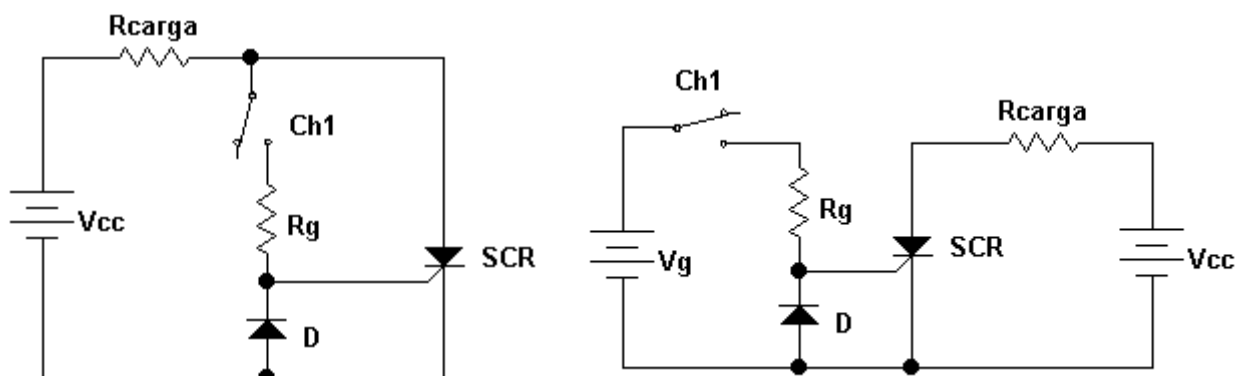


Figura 15.1 – a) Circuito de Disparo CC com a mesma fonte da carga;
b) Circuito de Disparo CC com fonte própria.

Ao fecharmos a chave Ch1 o SCR entra em condução pois uma corrente CC é aplicada no gatilho, que está diretamente polarizado pela fonte V_{CC} . Uma vez conduzindo, o sinal de gatilho pode ser removido pela abertura da chave Ch1. O resistor R_g limita a corrente no gatilho e o diodo D limita a amplitude de um possível sinal negativo no gatilho em aproximadamente 1V. Em alguns casos, o diodo D pode ser substituído por um resistor R_{GK} com a função de proteção do gatilho, como estudado no item sobre proteção do SCR.

Não é recomendado o uso de sinal de gatilho CC para disparar SCR em aplicações CA porque um sinal positivo durante o semiciclo negativo aumenta a corrente de fuga reversa I_R e pode danificar o componente.

Aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff podemos determinar o valor da resistência R_g para limitar a corrente de gatilho, em função da fonte V_g e da tensão máxima de gatilho admitida pelo componente:

$$V_G - R_G \cdot I_G - V_{GK}$$

$$R_G = \frac{(V_G - V_{GK})}{I_G}$$

Exemplo 15.1:

O SCR da Figura 15.1(a) apresenta uma corrente máxima de gatilho de 100mA e máxima tensão V_{GK} de 2V. Sendo a tensão V_G de 15V, determine a resistência R_G que fornecerá corrente suficiente para o disparo.

$$\begin{aligned}
 V_G - I_G \cdot R_G - V_{GK} &= 0 \\
 I_G \cdot R_G &= V_G - V_{GK} \\
 R_G &= \frac{(V_G - V_{GK})}{I_G} = \frac{(15 - 2)}{100 \cdot 10^{-3}} = 130\Omega
 \end{aligned}$$

Assim, uma resistência mínima de 130Ω deverá ser conectada.

16. CIRCUITOS DE DISPARO COM SINAIS CA – CONTROLE DE FASE:

Um circuito de disparo sincronizado para o controle de fase é capaz de gerar e injetar uma corrente no gatilho do SCR para dispará-lo, quando polarizado diretamente, com a possibilidade de controlar o instante em que essa corrente será injetada no gatilho

O método mais comum em aplicações de corrente alternada é derivar o sinal de disparo a partir da própria fonte principal CA. A grande vantagem é que este processo mantém o sinal de gatilho **sincronizado** com o ciclo de acionamento do tiristor, propiciando o controle do ângulo de fase α onde o SCR dispara. É o chamado CONTROLE DE FASE.

16.1. Circuito de Disparo CA com Rede Resistiva

A figura 16.1 mostra um circuito bastante simples para o controle de fase a partir do sinal CA e de uma rede resistiva no gatilho. Durante o semiciclo positivo o SCR está em bloqueio direto. Num dado instante a tensão V_{CA} proporciona uma tensão e, conseqüentemente, uma corrente no gatilho suficiente para disparar o SCR. Esse instante pode ser controlado pelo potenciômetro R_1 .

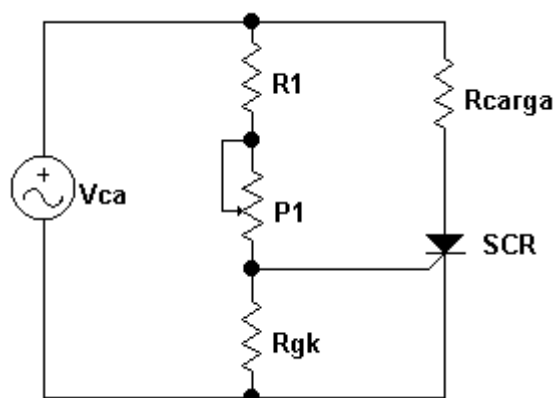


Figura 16.1 – Circuito de disparo CA com rede resistiva

Exemplo 16.1.1:

Para o circuito de disparo CA com rede resistiva da figura 16.1, determinar o valor da resistência R_1 e do potenciômetro P_1 tal que proporcionem uma corrente no gatilho suficiente para disparar o SCR em 2°, 15°, 30°, 60° e 90°.

Dados:

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot 127 \cdot \sin(\omega t) \text{ V}$$

$$f = 60\text{Hz}$$

$$R_{\text{carga}} = 100\Omega$$

$$R_{\text{GK}} = 1\text{k}\Omega$$

SCR TIC106

$$I_{\text{GK}} = 200\mu\text{A}$$

$$V_{\text{GK}} = 0,6\text{V}$$

Solução:

O objetivo é determinar as resistências que fazem com que a tensão em R_{GK} seja suficiente para provocar a corrente mínima para disparo do SCR, I_{GK} .

Usando a técnica do Equivalente Thèvenin para os ramos do circuito de controle, temos o circuito equivalente da figura 16.2.

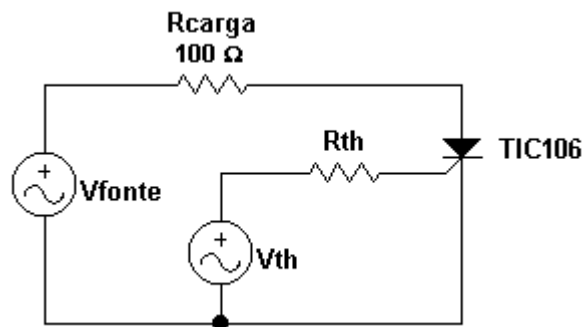


Figura 16.2 – Equivalente Thèvenin no gatilho do SCR

Seja $R_x = R_1 + R_2$ e aplicando a técnica do Equivalente Thèvenin, temos:

$$V_{\text{th}} = \frac{R_{\text{GK}} \cdot v(t)}{R_{\text{GK}} + R_x}$$

$$R_{\text{th}} = \frac{R_{\text{GK}} \cdot R_x}{R_{\text{GK}} + R_x}$$

Como queremos determinar o valor de R_x que suprim a corrente necessária I_{GK} para o disparo do SCR, analisando a malha do Equivalente Thèvenin, determinamos a corrente que ele fornece ao gatilho:

$$I_{\text{G}} = \frac{V_{\text{th}} - V_{\text{GK}}}{R_{\text{th}}}$$

Substituindo nesta equação as equações para o cálculo de V_{th} e de R_{th} e isolando R_x , encontramos:

$$R_x = \frac{R_{\text{GK}} \cdot v(t) - V_{\text{GK}} \cdot R_{\text{GK}}}{V_{\text{GK}} + R_{\text{GK}} \cdot I_{\text{GK}}}$$

Substituindo os valores conhecidos de R_{GK} , I_{GK} e V_{GK} , encontramos;

$$R_x = \frac{1000 \cdot v(t) - 0,6 \cdot 1000}{0,6 + 1000 \cdot 200\mu}$$

$$R_x = 1250 \cdot v(t) - 750$$

Concluimos, então, que a resistência necessária é função da tensão instantânea $v(t)$. Como queremos disparar o SCR em diversos ângulos, basta determinarmos qual o valor da tensão instantânea nestes ângulos e finalmente a resistência R_x que proporciona a corrente de disparo nestes mesmos ângulos:

α (°)	$v(t)$ (V)	R_x (Ω)
2	6,3	7,13
15	46,5	57,38
30	89,8	111,5
60	155,5	193,62
90	179,6	223,75

Desta tabela, podemos deduzir os valores mínimos e máximos para a resistência R_x :

$$R_x \text{ mínimo} = 7,13\Omega$$

$$R_x \text{ máximo} = 223,75\Omega$$

O valor mínimo é dado pelo resistor R_1 e o valor máximo pela soma das resistências $R_1 + R_2$, ou seja, R_2 será o valor de $R_x - R_1$:

Dentre os valores comerciais disponíveis, podemos determinar finalmente o valor dos componentes:

$$R_1 = 6,8k\Omega$$

$$R_2 = 220k\Omega$$

16.2. Circuito de Disparo CA com Rede Defasadora RC:

No circuito RC da figura 16.3 a tensão no gatilho está atrasada da tensão de alimentação devido o capacitor e as resistências do resistor e do potenciômetro. O potenciômetro controla a defasagem e o tempo em que a tensão no capacitor leva para atingir o valor suficiente para disparar o SCR. O objetivo é atrasar a tensão que irá comandar o disparo do tiristor. A tensão se disparo ocorrerá mais tarde no semiciclo, como indicam as formas de onda na figura 16.4, onde:

α - ângulo de disparo proporcionando pela senóide da fonte

α' - ângulo de disparo proporcionado pela rede defasadora (RC)

ϕ - atraso proporcionado pela rede defasadora (RC)

θ - defasagem entre o ângulo de disparo normal e o ângulo de disparo com rede defasadora

Assim: $\alpha' = \alpha + \theta$

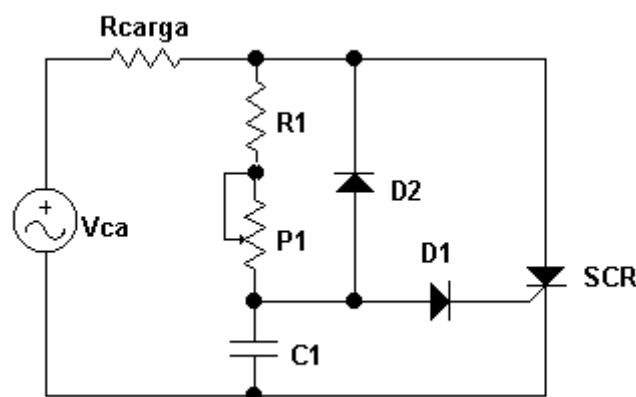


Figura 16.3 – Circuito de disparo CA com rede defasadora RC

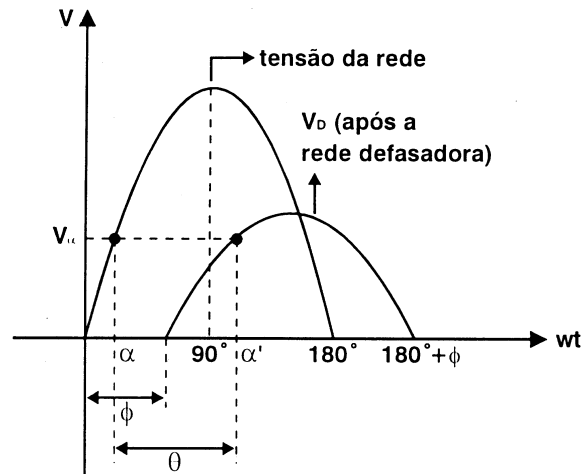


Figura 16.4 – Formas de Onda para o circuito da figura 14.13 [ref. 4]

Durante o semiciclo negativo o SCR se mantém em bloqueio reverso. O diodo em série com o gatilho garante a unidirecionalidade do sinal de disparo evitando assim, sinais no gatilho no semiciclo negativo.

A tensão de disparo, sobre o capacitor, está atrasada em relação à tensão da rede, por um ângulo ϕ . O valor dessa defasagem depende da constante de tempo de carga do capacitor: $\tau = R.C = (R_1 + R_2).C_1$.

Variando R_2 varia o ângulo ϕ e portanto varia também o ângulo de disparo α' do SCR.

D_1 garante que só haverá corrente no gatilho no semiciclo positivo, preservando o SCR.

D_2 conduz no semiciclo negativo, carregando C_1 com tensão negativa. Isso garante que no início de cada semiciclo positivo, o capacitor sempre esteja carregado com uma tensão fixa (negativa), mantendo a regularidade do disparo.

16.3. Circuito de Disparo CA com Diodo Schokley ou Diac:

O Diodo Schokley é um componente semiconductor de quatro camadas (PNPN). Seu comportamento é de um SCR sem gatilho preparado para disparar por sobretensão direta. Ou seja, reversamente polarizado não conduz. Diretamente polarizado só entra em condução quando a tensão atingir um determinado valor, a chamada Tensão Schokley, como indica a sua curva característica na figura abaixo. Quando conduzindo sua tensão é bem menor que a tensão de disparo, como podemos observar na curva característica da figura 16.5.

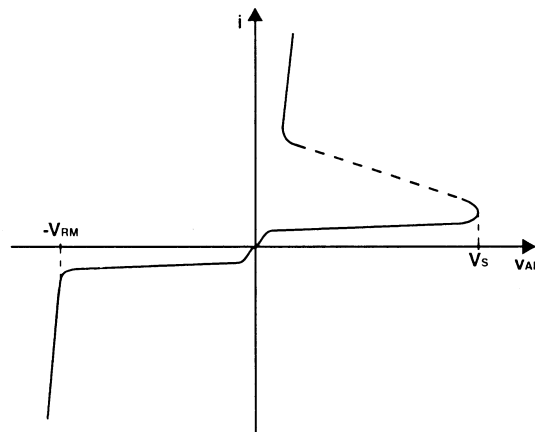


Figura 16.5 – Curva característica do Diodo Schokley [ref. 4]

A figura 16.6 apresenta um circuito de disparo com sinal CA usando um diodo Schokley. Enquanto a tensão no capacitor for menor que a tensão Schokley, o diodo estará cortado e o SCR não entrará em condução.

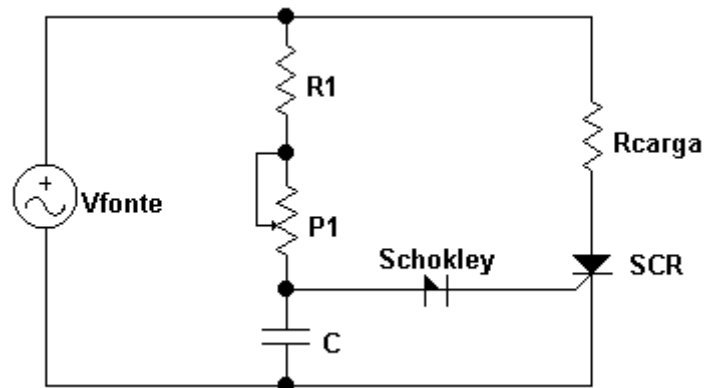


Figura 16.6 – Circuito de disparo CA com Diodo Schokley

Quando a tensão no capacitor atingir a tensão Schokley, o diodo entrará em condução e proporcionará um caminho de baixa impedância para a descarga do capacitor através do gatilho do SCR. O capacitor provocará um pulso de corrente suficiente para disparar o SCR. Controlando a defasagem τ entre a tensão da rede e a tensão no capacitor, varia-se o ângulo de disparo α .

O Diac se comporta como um Diodo Schokley bidirecional, ou seja, como um Triac sem gatilho, preparado para disparar tanto por sobretensão direta como reversa. Assim, o diodo Schokley no circuito da figura 16.6 pode ser substituído por um Diac. A figura 16.7 mostra o símbolo e a curva característica do Diac. Os terminais são identificados por terminal 1 e 2 (*Main Terminal*).

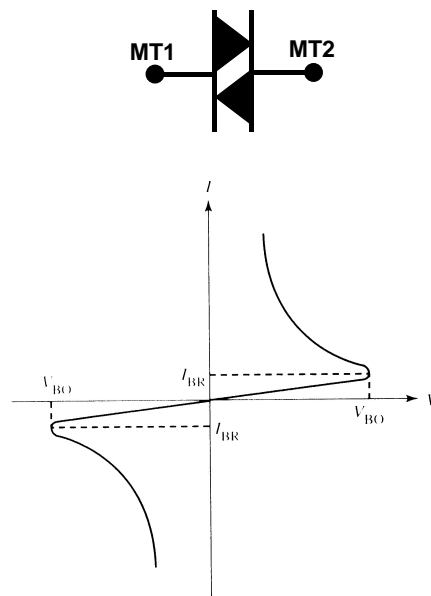


Figura 16.7 – Símbolo e curva característica do Diac

17. CIRCUITOS DE DISPARO COM SINAIS PULSADOS:

Para reduzir a dissipação de potência no gatilho, é aconselhável que os circuitos de disparo de SCR, em vez de um sinal CC contínuo, gerem um único pulso, ou um trem de pulsos. Isto apresenta algumas vantagens tais como:

- permite controle mais preciso do ponto de disparo do tiristor
- facilita o acoplamento e o isolamento elétrico entre o circuito de disparo e o circuito de potência que o SCR aciona. O isolamento elétrico pode ser feito através de transformadores de pulso ou de acopladores ópticos.
- reduzir ruídos e transitórios que podem disparar intempestivamente o componente.

Para o controle de fase adequado, os circuitos de disparo com sinais pulsados devem ser **sincronizados** com o sinal senoidal, ou seja, devem oscilar em relação ao zero da senóide.

17.1. Oscilador de Relaxação com Transistor Unijunção

O Transistor Unijunção (*Unijunction Transistor*), fabricado desde 1948, apresenta três terminais: Emissor (E), Base 1 (B_1) e Base 2 (B_2). A figura 17.1 apresenta o símbolo, o diagrama equivalente e a estrutura interna do transistor unijunção.

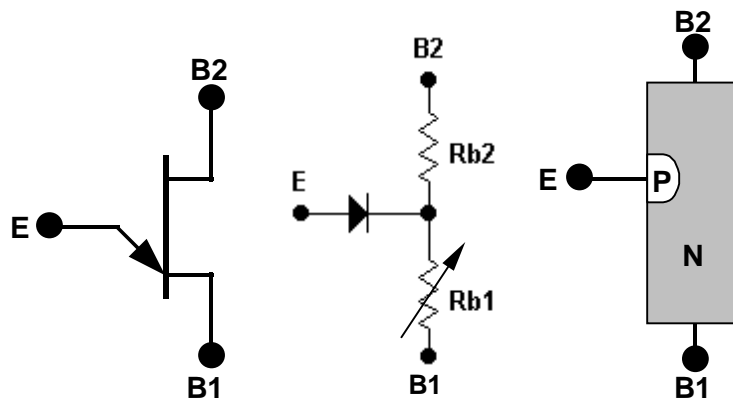


Figura 17.1 – Simbologia, diagrama equivalente e estrutura interna do TUJ

O transistor unijunção atua como uma chave controlada por tensão. Quando a tensão de emissor atingir a tensão de pico do transistor unijunção, este dispara conduzindo entre emissor e base 1, na região de resistência negativa. Quando a tensão de emissor decair ao ponto de vale, o transistor unijunção corta. Entre B_1 e B_2 o transistor unijunção apresenta uma resistência na faixa de 4,7 a 9,1k Ω . A figura 17.2 apresenta a curva característica para um transistor unijunção..

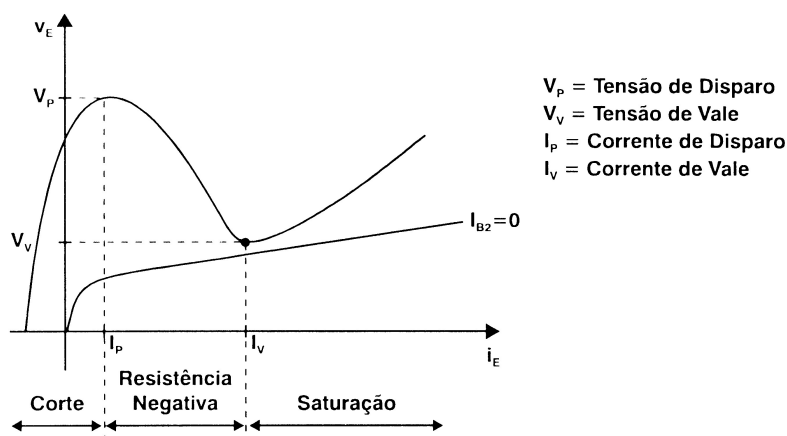


Figura 17.2 – Curva característica do Transistor Unijunção [ref. 4]

A tabela 17.1 mostra um procedimento simplificado de teste com a função ohmímetro de um multímetro para o transistor unijunção.

Tabela 17.1 – Teste de um Transistor Unijunção com Multímetro

Ponteira Positiva (+)	Ponteira Negativa (-)	Resistência
B2	B1	$R_{B1} + R_{B2}$
B1	B2	$R_{B1} + R_{B2}$
E	B1	R_{B1}
B1	E	Aberto (∞)
E	B2	R_{B2}
B2	E	Aberto (∞)

Um oscilador de relaxação com transistor unijunção, apresentado na figura 17.3 é um circuito comum para a produção de pulsos para disparo de SCR. Ele produz um trem de pulsos estreitos na base 1. O carregamento do capacitor C_1 se dá através da fonte V_{cc} e é controlado pelo resistor R_i e o potenciômetro P_1 . Quando a tensão no capacitor atingir o valor da tensão de pico do transistor unijunção, este entra em condução entre emissor e base1, fluindo uma corrente de emissor para o primário do transformador de pulso e aplicando um sinal no gatilho do SCR.

Quando a tensão no capacitor C_1 cair para o valor da tensão de vale, o transistor unijunção corta e o processo se repete. A figura 17.4 mostra as formas de onda para este oscilador. A largura do pulso é dada pelo valor do capacitor. A desvantagem deste circuito é a curta duração dos pulsos, o que pode levar um SCR a não se manter em condução. Isto pode ser solucionado pelo circuito *snubber RC*, já estudado.

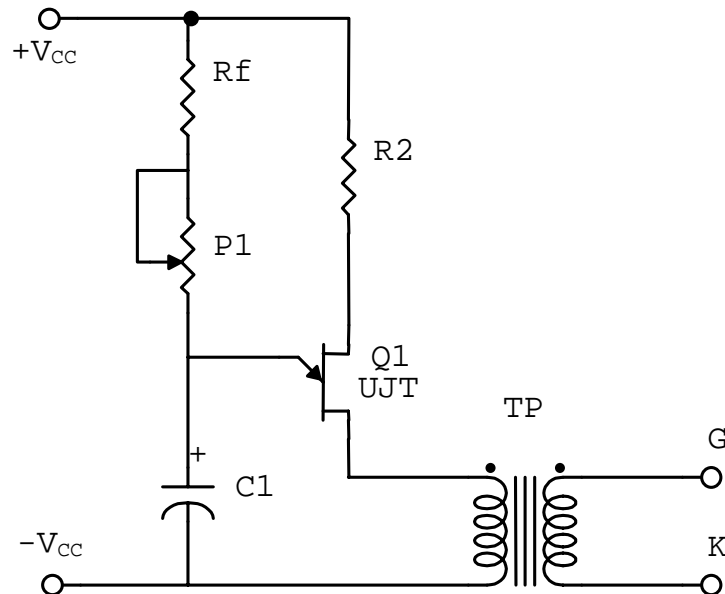


Figura 17.3 – Oscilador de Relaxação com Transistor Unijunção - TUJ

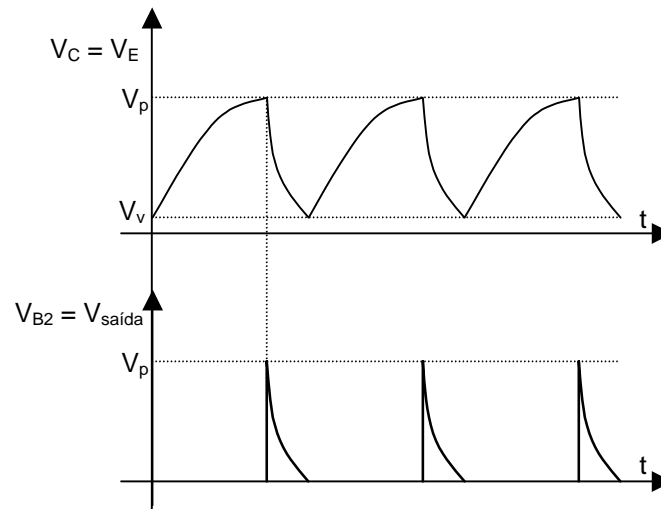
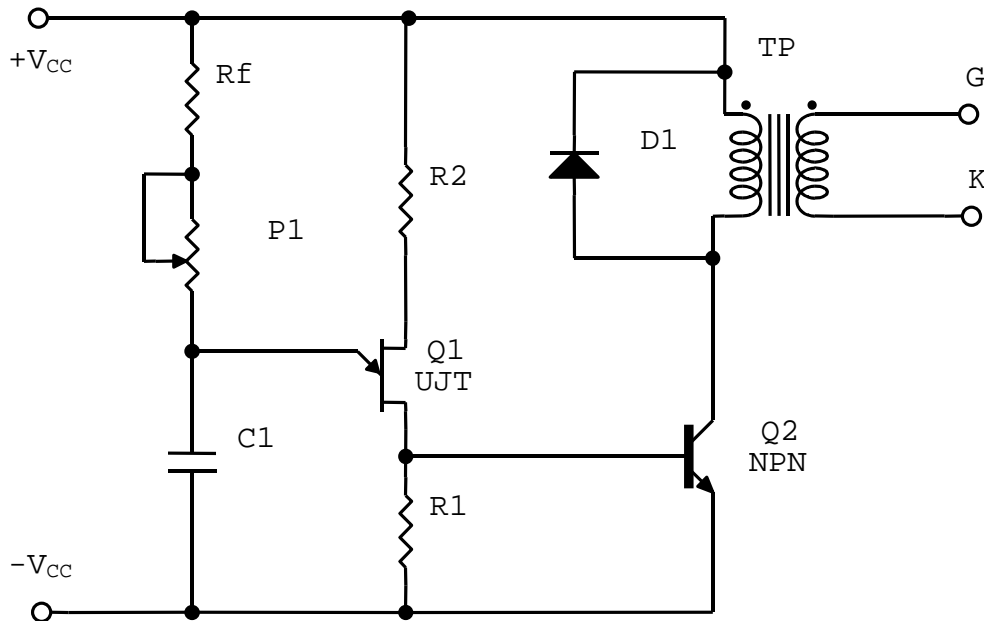


Figura 17.4 – Formas de Onda para o Oscilador de Relaxação

No circuito da figura 17.5, quando o pulso proveniente do transistor unijunção Q_1 for aplicado à base do transistor bipolar Q_2 , este satura e a tensão de alimentação será aplicada ao primário do transformador de pulso, induzindo um sinal no gatilho do tiristor. Quando o transistor unijunção Q_1 cortar, o transistor bipolar Q_2 corta e cessa o sinal no gatilho. O diodo D_1 é um diodo com efeito roda-livre, para desmagnetizar o transformador de pulso. O transistor Q_2 opera como um *driver* de corrente. Este circuito melhora a largura do pulso e o seu tempo de subida.

Figura 17.5 – Oscilador de Relaxação com TUJ e *driver* de corrente

A figura 17.6 apresenta uma etapa de sincronismo a ser conectada como fonte de alimentação para o oscilador. O diodo D_1 retifica em meia onda o sinal do secundário do transformador e o diodo Zener D_z mantém a tensão a ser aplicada ao oscilador que será praticamente uma onda quadrada, sincronizada com a senóide do secundário. O resistor R_z limita a corrente no Zener. O circuito oscilará somente enquanto houver tensão aplicada e o disparo do tiristor será no primeiro pulso gerado no instante determinado pelo tempo de carga controlado pelo potenciômetro do oscilador. A figura 17.7 mostra o oscilador gerando os pulsos sincronizados com o sinal senoidal aplicado.

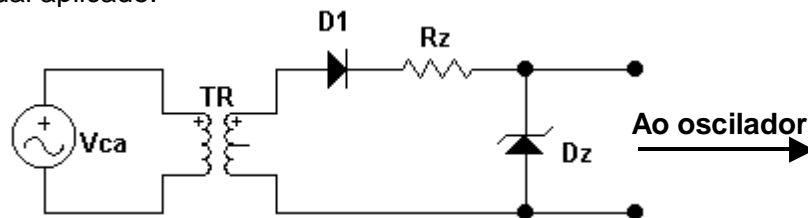


Figura 17.6 – Etapa de sincronismo para controle de fase

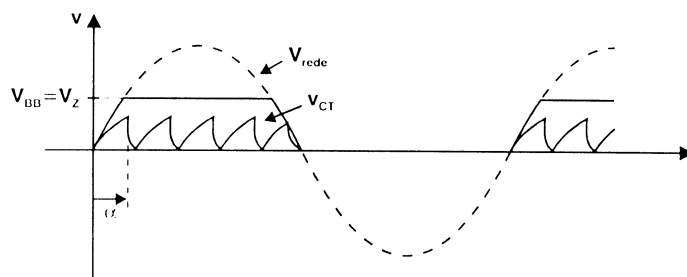


Figura 17.7 – Forma onda do oscilador sincronizado

17.2. Oscilador com Diodo Schokley e com Diac

O circuito da figura 17.8 apresenta um oscilador para o disparo de um SCR utilizando um Diac. A constante RC define o tempo de carga do capacitor através da fonte de tensão V_{cc} .

Quando carregado com a tensão de disparo do Schokley (ou do Diac), se descarrega através deste injetando uma corrente de disparo no SCR. Rapidamente o capacitor se descarrega e faz o Schokley (ou o Diac) cortar, repetindo o processo. As formas de onda são semelhantes às da figura 17.4.

Este circuito requer baixa potência da fonte V_{cc} para carregar o capacitor e fornece uma potência alta em um curto intervalo de tempo, garantindo assim, o disparo do SCR.

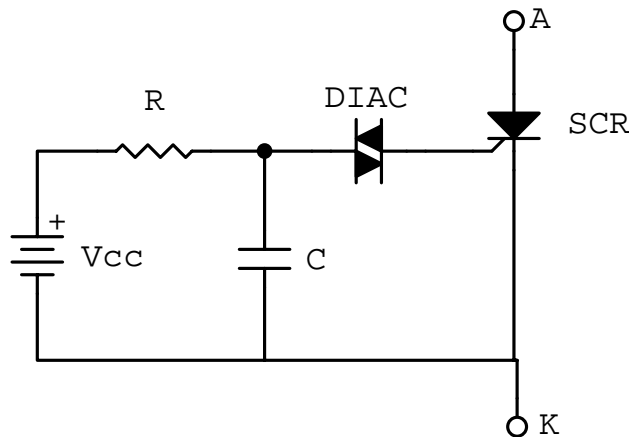


Figura 17.8 – Disparo de SCR usando um Diac

17.3. Outros Circuitos Pulsados

Existem muitos outros circuitos pulsados para o disparo de tiristores, como por exemplo:

- Oscilador com o circuito integrado 555;
- Circuito Integrado dedicado a disparos de tiristores TCA-785 da Siemens;
- Via programação (*software*) em circuitos microcontrolados e microprocessados;
- outros

Para obter mais informações sobre este assunto ou esclarecer alguma dúvida, fale com o professor ou consulte:

<http://www.corradi.junior.nom.br>

18. ISOLAMENTO E ACOPLAMENTO

Em circuitos tiristorizados existem diferentes tensões em diversos pontos. O circuito de potência que o tiristor controla é submetido a tensões elevadas, geralmente maiores de 100V. Já o circuito de controle do disparo é alimentado com baixas tensões, tipicamente até 30V.

Portanto, é necessário um circuito que isole eletricamente o tiristor e seu circuito de controle e os mantenha acoplados.

A isolamento e o acoplamento podem ser feitos por:

- Acopladores Magnéticos: transformadores de pulso (*pulse transformers*)
- Acopladores Ópticos: opto-acopladores (*opto-couplers*)

18.1. Acoplamento Magnético

O isolamento elétrico e o acoplamento magnético é feito através de Transformadores de Pulso. Os transformadores de pulso têm a vantagem de proporcionar um circuito de controle simplificado e isolado eletricamente do circuito de potência, evitando disparos indesejáveis gerados por realimentação do circuito de potência para o comando. Transferem os pulsos com baixas perdas, pequenas dimensões e enrolamentos isolados.

Construtivamente, os transformadores de pulso são semelhantes aos transformadores comuns: possuem dois (ou mais) enrolamentos eletricamente isolados. A diferença é que o núcleo é de ferrite e a relação de transformação geralmente é de 1:1 ou de 1:2.

A figura 18.1. apresenta um circuito para acoplamento magnético. Quando um pulso é aplicado à base do transistor chaveador Q1, este satura e a tensão V_{CC} é aplicada ao primário do transformador de pulso induzindo uma tensão pulsada no secundário que é aplicada entre o gatilho e o cátodo do SCR. Quando o pulso for removido, Q1 corta e uma tensão de polaridade oposta é induzida no primário. O diodo D_{RL} (diodo de roda livre) conduz para desmagnetizar o transformador de pulso. Durante este processo uma tensão reversa correspondente é induzida no secundário. Um capacitor para aumentar a largura do pulso pode ser ligado em paralelo com R1. O núcleo do transformador de pulso saturará devido à corrente CC aplicada. Portanto, esse tipo de acoplamento é adequado para pulsos de 50 a 110 μ s, tipicamente.

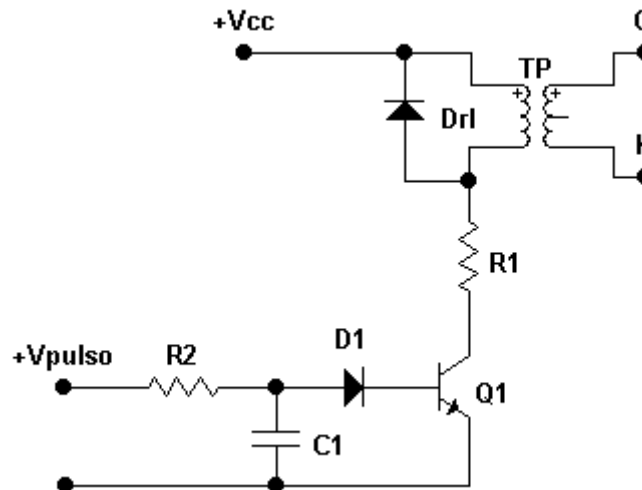


Figura 18.1 – Circuito para Acoplamento Magnético

18.2. Acoplamento Óptico

Os acopladores ópticos foram desenvolvidos na década de 70 com a finalidade de acoplar e isolar circuitos que operam com diferentes níveis de potência. Consistem de uma fonte de radiação (luz), o foto-emissor, e de um elemento foto-sensor (foto-receptor), com alta sensibilidade na faixa de frequência da radiação emitida. A luz é acoplada ao sensor através de um material isolante transparente ao através do ar.

Um circuito gerador de pulsos é ligado no foto-emissor do opto-acoplador, geralmente um LED, que disparará o foto-receptor, que pode ser um foto-transistor, um foto-diodo, um foto-SCR, um foto-DIAC, etc.

Esse tipo de acoplamento requer uma fonte auxiliar V_{CC} para alimentar o opto-acoplador, o que aumenta o volume, peso e custo do circuito. A figura 18.2 apresenta um circuito para o acoplamento óptico a partir de uma fonte V_{CC} . A figura 18.3 apresenta o acoplamento óptico a partir da própria fonte do circuito de potência V_{CA} .

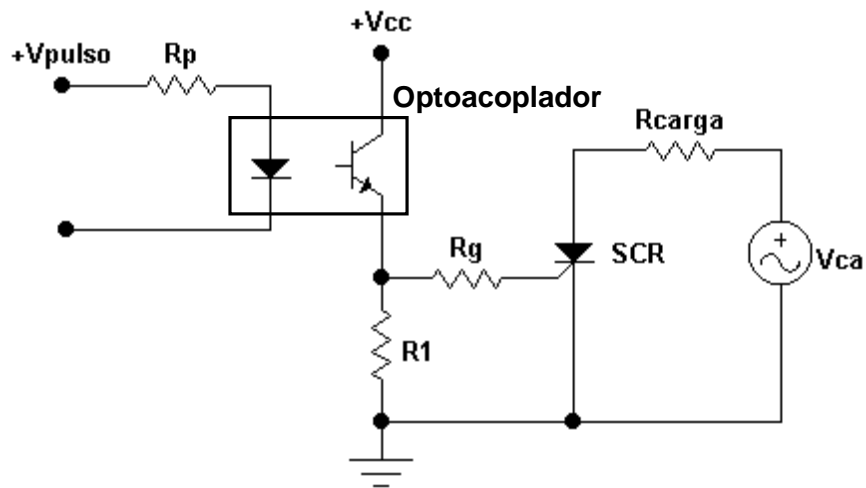


Figura 18.2 – Acoplamento óptico com fonte V_{CC} dedicada

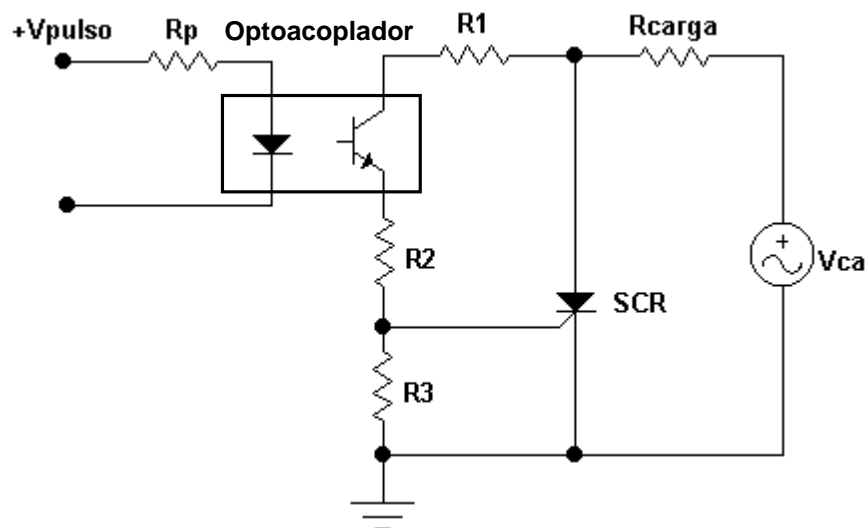


Figura 18.3 – Acoplamento Óptico a partir da fonte V_{CA}

18.3. Proteção do Gatilho

Os circuitos de disparo e os acopladores devem ser conectados aos gatilhos dos SCR através de um ou mais componentes de proteção, cada qual com sua função, como indica a figura 18.4.

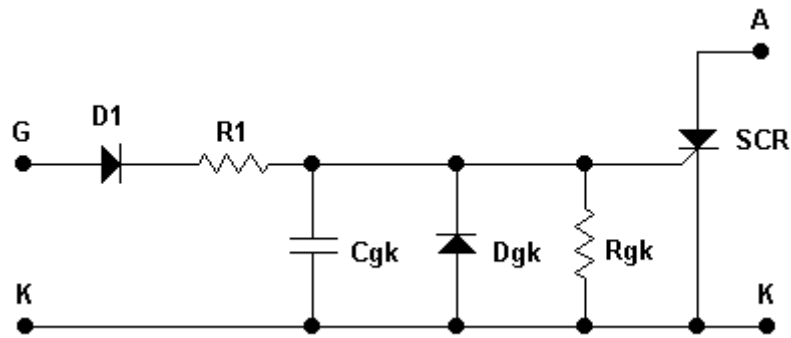


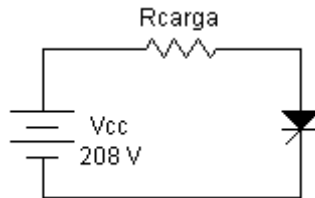
Figura 18.4 – Componentes de proteção do gatilho do SCR

Na figura 18.4 cada componente possui uma ou mais funções, sendo:

- R_{GK}**
 - aumenta a capacidade de degrau de tensão (dv/dt)
 - reduz o tempo de desligamento
 - aumenta as correntes de retenção e de manutenção
- D_{GK}**
 - protege o gatilho contra tensões negativas
- C_{GK}**
 - remove componentes de ruídos de alta frequência
 - aumenta a capacidade de degrau de tensão (dv/dt)
- R₁**
 - limita a corrente de gatilho
 - amortece quaisquer oscilações transitórias
- D₁**
 - garante a unidirecionalidade (um só sentido) da corrente de disparo

19. PROBLEMAS PROPOSTOS

- P.1. Sabendo que a corrente mínima para disparo de um SCR é de 15mA e que o circuito proporciona uma tensão de 5V, qual o valor comercial da resistência R_G a ser conectada ao gatilho? Explique.
- P.2. Determine o valor máximo da resistência de carga que vai assegurar a condução do SCR no circuito abaixo. O SCR tem uma corrente de manutenção de 200mA. Explique.
Resp.: 1040Ω.



- P.3. Uma fonte de tensão de 220Vef aciona uma resistência de carga de 10Ω através de um SCR. Determine o valor de uma indutância L a ser incluída no circuito para limitar o degraude corrente em 20A/μs. Resp.: 15,6μH
- P.4. Determine a corrente eficaz em um circuito com um SCR quando um amperímetro CC indica 100A com um ângulo de condução de 60°. Resp.: 270A.
- P.5. Um SCR tem VDRM de 600V, degraude tensão máximo de 25V/μs, degraude corrente máximo de 30A/μs e é usado para acionar uma carga resistiva de 100Ω. Dimensione os valores mínimos para o circuito snubber para que não ocorra acionamento intempestivo. Sendo a tensão aplicada de 311V, qual a resistência mínima para limitar a descarga em 5A? Explique. Resp.: 0,24μF; 4,5mΩ; 62,2Ω.
- P.6. Obtenha os parâmetros da tabela 8.1 para os seguintes SCR: TIC-106D, TIC-116E, Aegis A1N60.10.H, Aegis A5F1000.20HY, Semikron SKT16/04C e BT151-500R.
- P.7. Compare um SCR a um Diodo de Potência;
- P.8. Cite as condições necessárias para disparo e para o bloqueio de um SCR;
- P.9. Como deve ser o sinal adequado de disparo de um SCR? Porque?
- P.10. Qual a relação entre a tensão de disparo e a corrente de gatilho?
- P.11. Como pode haver disparos intempestivos? Como evitar?
- P.12. Qual a relação entre a corrente de retenção e manutenção?
- P.13. O que é e como se evitam os degraus de tensão e de corrente?
- P.14. Qual o valor mínimo da indutância L para proteger um SCR contra dv/dt sendo seu valor de 10A/μs e a tensão de 220V? Como deve ser conectado?
- P.15. Determine os valores dos componentes de um circuito snubber para as condições:
VRRM = 200V
(dv/dt)max = 200V/μs
(di/dt)max = 100A/μs

$R_{carga} = 10\Omega$

- a) Explique sua conexão e funcionamento.
- b) Desenhe os esquemas para conectar quatro SCR em série e em paralelo. Quais as vantagens?

P.16. Descreva os circuitos de disparo;

P.17. Descreva os circuitos de comutação;

P.18. O que é tempo de desligamento de um SCR?

P.19. Em um teste com multímetro, quais as condições que um SCR pode estar defeituoso? Porque?

P.20. Quais os tipos de proteção adequados para um SCR?

P.21. Considerando o circuito de fase com SCR da figura 16.1, onde $R_{GK}=1,5k\Omega$, a carga é uma lâmpada de 220V/100W e o SCR é o TIC116D:

- a) calcule R_1 e R_2 para os seguintes ângulos de disparo do SCR: 5; 20; 45; 60; 90 e 150 graus;
- b) simule em computador para obter as formas de onda das tensões na lâmpada para cada ângulo de disparo do SCR;
- c) calcule a tensão média e eficaz, bem como a potência média na lâmpada, para cada ângulo de disparo do SCR (considere que a lâmpada mantém a sua resistência nominal)

Dados:

TIC 116 D

$I_{GK} = 5mA$ (min) e $20mA$ (máx)

$V_{GK} = 1,5V$

P.22. Em que condições de teste um transistor unijunção apresenta defeito?

P.23. Explique como e porque se pode controlar a frequência de um oscilador de relaxação com transistor unijunção.

P.24. Como se pode sincronizar os circuitos de disparo com sinais pulsados para se fazer o controle de fase adequado?

Para obter mais problemas sobre este assunto ou esclarecer alguma dúvida, fale com o professor ou consulte:

<http://www.corradi.junior.nom.br>

20. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VILLAÇA, M.V.M. e RANGEL, P.R.T.; *“Eletrônica de Potência”*, Volumes 1 e 2, apostila, CEFET/SC, Florianópolis, 199x.
- [2] RASHID, M.H.; *“Eletrônica de Potência – Circuitos, Dispositivos e Aplicações”*, Makron Books, São Paulo, 1999.
- [3] AEGIS SEMICONDUTORES; Página oficial do fabricante na Internet: <http://www.aegis.com.br>
- [4] ALMEIDA, J.L.A.; *“Dispositivos Semicondutores: Tiristores – Controle de Potência em CC e CA”*, Coleção Estude e Use, Série Eletrônica Analógica, Editora Érica, São Paulo, 1996.
- [5] AHMED, A.; *“Eletrônica de Potência”*, Prentice Hall, São Paulo, 2000.
- [6] ANDRADE, E.A.; *“Eletrônica Industrial – Análise de Dispositivos e suas Aplicações”*, 1ª edição, Editora CEFET/BA, Salvador, 1996.

ANEXOS:

A.1. VALOR NOMINAL MÁXIMO EFICAZ DA CORRENTE DE ÂNODO REPETITIVA

A corrente de ânodo máxima que um SCR pode suportar depende da temperatura máxima da junção do semicondutor (T_J). Essa temperatura não pode ser excedida.

Medir T_J não é fácil, mas podemos medir e controlar as tensões e correntes do SCR que contribuem para o aumento de T_J . A maior contribuinte é a corrente eficaz repetitiva $I_{T(RMS)}$.

A corrente eficaz (RMS, *Root Mean Square*) é o valor usado para rotular o SCR pois diz respeito à dissipação de calor. Já a corrente média $I_{T(AVG)}$ diz respeito ao acionamento da carga.

A corrente média é igual à corrente eficaz em circuitos de corrente contínua puros. Entretanto, o valor médio é menor que o eficaz para outras formas de onda. Para **senóides puras** o valor eficaz é dado pela relação:

$$I_{eficaz} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$$

Determinar o valor eficaz de uma forma de onda não senoidal não é tarefa fácil. Podemos simplificar os cálculos fazendo uma aproximação da forma de onda não senoidal a uma forma de onda retangular cuja altura seja igual ao valor de pico e cuja largura seja igual à duração do pico, como mostra a figura 18.1. O valor eficaz resultante será maior, mas proporcionará um bom fator de segurança.

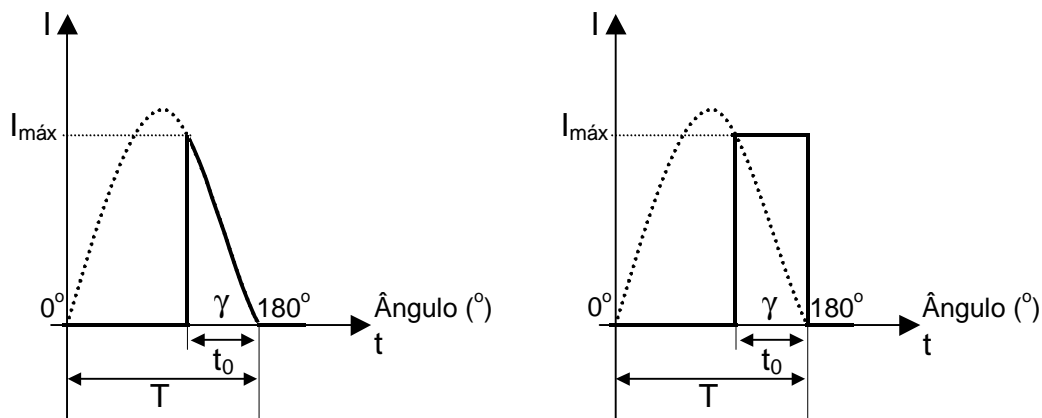


Figura 18.1 – Aproximação da forma de onda real

Assim:

$$I_{eficaz} = \sqrt{\frac{I_{pico}^2 \cdot t_0}{T}}$$

$$I_{médio} = \frac{I_{pico} \cdot t_0}{T}$$

Podemos então definir Fator de Forma (FF) como sendo a relação do valor eficaz pelo valor médio:

$$FF = \frac{I_{eficaz}}{I_{médio}}$$

Sabendo-se o Fator de Forma de uma determinada forma de onda, o valor eficaz da corrente pode ser determinado por:

$$I_{eficaz} = FF \cdot I_{médio}$$

O Ângulo de Condução γ corresponde ao tempo em que o SCR fica ligado, como mostra a figura 18.1. A tabela 18.1 apresenta o Fator de Forma em função do Ângulo de Condução.

Tabela 18.1 – Fator de Forma em função do Ângulo de Condução γ

ÂNGULO DE CONDUÇÃO (γ)	FATOR DE FORMA (FF)
20°	5,0
40°	3,5
60°	2,7
80°	2,3
100°	2,0
120°	1,8
140°	1,6
160°	1,4
180°	1,3

Fonte: referência [5]