

Capítulo 3

SCR ou RCS

3.1- INTRODUÇÃO

O termo tiristor aplica-se a qualquer dispositivo semicondutor que possua quatro ou mais camadas semicondutoras, que possa operar como uma chave com dois estados estáveis: de ligado e desligado. O tiristor é um componente de chaveamento, cujo funcionamento depende de um processo de regeneração positiva que permite o seu travamento. Pode possuir dois, três ou quatro terminais, **no entanto, o uso do termo tiristor vem se restringindo aos dispositivos de três terminais.**

O tiristor pode apresentar comportamento unidirecional (fluxo de corrente em apenas um sentido) ou bidirecional (fluxo de corrente em ambos os sentidos).

Iniciaremos com o estudo do tiristor unidirecional SCR (Silicon Controlled Rectifier) ou RCS (Retificador Controlado de Silício).

3.2 - HISTÓRICO

Idealizado e fabricado pela primeira vez em 1957, foi imediatamente batizado de Thyatron Sólido, pelo fato de se assemelhar à válvula Thyatron.

Do ponto de vista elétrico, o SCR supera de longe as válvulas Thyatron. Sua baixíssima queda de tensão no sentido de condução, funcionamento instantâneo, ausência de filamento e disparo por meio de pequenos sinais, significam uma eficiência altíssima.

O SCR é o mais popular membro da família dos tiristores e o que consegue controlar grandes potências, daí a sua larga aplicação industrial.

3.3 - ESTRUTURA INTERNA

O SCR é constituído de quatro camadas semicondutoras, conforme disposição apresentada na figura 3.1, e possui três terminais: anodo, catodo e gate.

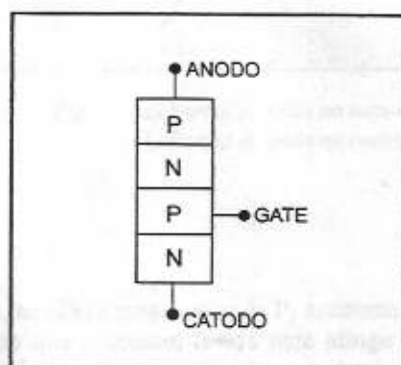


Fig.3.1 - a) Estrutura interna do SCR.

3.4 - SÍMBOLO

Nos desenhos dos circuitos eletrônicos o SCR é identificado através de um dos símbolos apresentados na figura 3.2.

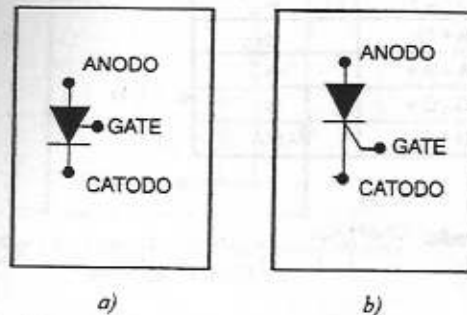


Fig.3.2 - a) Símbolo do SCR (Norma DIN)
b) Símbolo do SCR (Norma ABNT)

3.5 - CIRCUITOS EQUIVALENTES

Com o intuito de facilitar o estudo do SCR, podemos, da sua estrutura interna, obter os circuitos equivalentes a diodo e a transistor que serão de grande ajuda para um melhor entendimento do funcionamento deste componente.

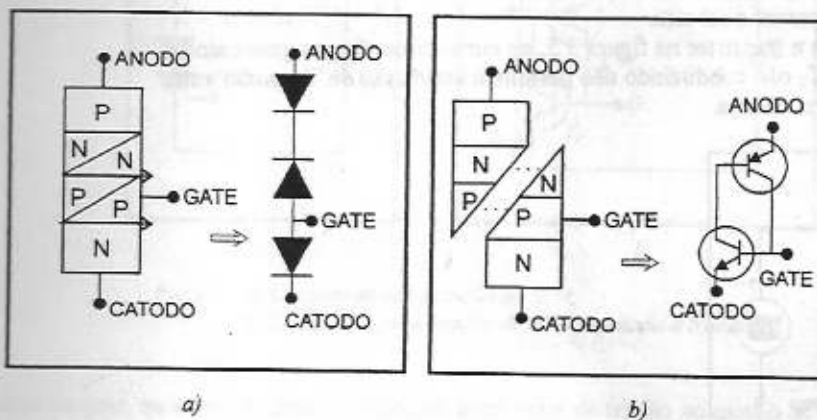
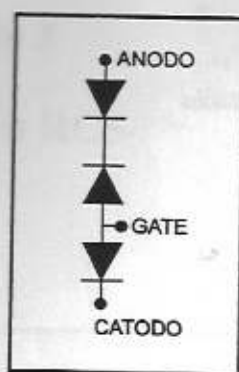


Fig.3.3 - a) Circuito equivalente a diodo.
b) Circuito equivalente a transistor.

3.6 - IDENTIFICAÇÃO DOS TERMINAIS

Testar o SCR é semelhante ao processo de testar simultaneamente três diodos ligados como no circuito equivalente da figura 3.4-a.



a)

POLARIZAÇÃO	RESISTÊNCIA
A + C -	∞
A - C +	∞
A + G -	∞
A - G +	∞
G - C +	∞
G + C -	BAIXA

b)

Fig.3.4 - a) Equivalente a diodo.

b) Tabela de Teste.

A única junção que deve dar baixa resistência é a junção gate-catodo, quando polarizada diretamente.

É bom frisar que na prática poderemos encontrar duas resistências baixas no teste do SCR, se o mesmo estiver disparado por ruído (sinais de interferência) ou se tiver internamente um resistor entre gate-catodo.

No caso do SCR estar disparado por ruído, encontraremos duas resistências baixas (gate-catodo e anodo-catodo), logo o terminal comum das duas resistências encontradas é o catodo.

Para verificarmos se o SCR está realmente disparado por ruído, colocamos o multiteste entre os dois terminais onde encontramos baixa resistência (uma delas) e curto-circuitamos o terminal que sobrou com o catodo (já identificado). Repetimos este experimento com a outra resistência baixa encontrada.

Quando ao curto-circuitarmos o terminal que sobrou com o catodo e a resistência deixar de ser baixa e passar a ser alta, é sinal que acabamos de curto-circuitar gate-catodo. O catodo já identificado, pois é o terminal comum das duas resistências baixas e o gate, então, é o terminal que ao ser curto-circuitado com o catodo faz a resistência deixar de ser baixa para passar a ser alta.

Como pode ser visto no circuito equivalente a transistor na figura 3.5, ao curto-circuitarmos gate-catodo, a junção base-emissor de T_2 deixa de conduzir. T_2 não conduzindo não permite a condução de T_1 , então entre anodo e catodo encontraremos, agora, uma alta resistência.

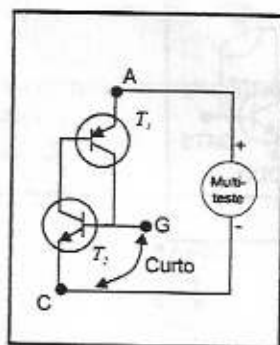


Fig.3.5 - Circuito equivalente a transistor.

Alguns tipos de SCR's já trazem internamente um resistor entre gate e catodo para diminuir a sua sensibilidade e com isto evitar o disparo errático do componente por ruído. Este tipo de disparo será analisado mais detalhadamente adiante.

No caso da existência de resistor interno entre gate-catodo, encontramos duas resistências baixas entre: Gate-catodo nos dois sentidos de polarização.

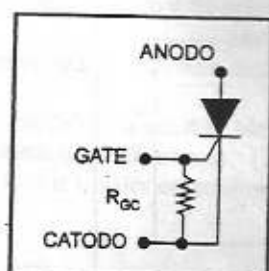


Fig.3.6 - Componente com resistor interno entre gate-catodo.

3.7 - FUNCIONAMENTO

Passaremos a analisar o comportamento do SCR para algumas situações de polarização.

3.7.1- Polarização direta anodo-catodo e gate aberto:

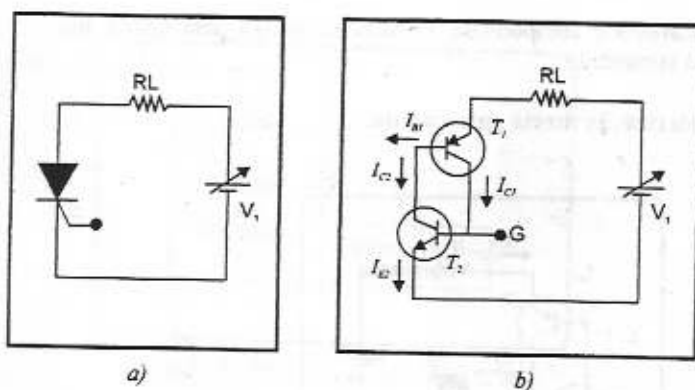


Fig.3.7 - a) Circuito de polarização do SCR.

b) Circuito de polarização do SCR simulado a transistor.

Sem sinal no gate, ao aumentarmos V_1 , chegará a um valor de tensão no qual o SCR passará a conduzir, visto que a corrente de fuga do coletor de T_1 será introduzida na base de T_2 , fazendo com que surja a corrente de coletor de T_2 que por sua vez é a corrente de base de T_1 .

A corrente de coletor de T_1 agora é maior e volta a entrar na base T_2 e este processo (realimentação positiva ou feed-back regenerativo) é responsável pelo crescimento da corrente anódica, levando, desta forma, o SCR à condução.

Vale a pena ressaltar que este método de disparo não é utilizado na prática, pois requer um valor muito alto de tensão anodo-catodo capaz de gerar uma corrente que dê início ao processo de realimentação positiva.

A tensão direta anodo-catodo capaz de fazer o SCR conduzir é denominada de tensão de **BREAKOVER**.

Podemos concluir que o SCR na prática não é utilizado com o gate aberto, pois necessita de um valor de tensão de **BREAKOVER** muito alto para dispará-lo.

3.7.2 - Polarização Reversa anodo-catodo e gate aberto:

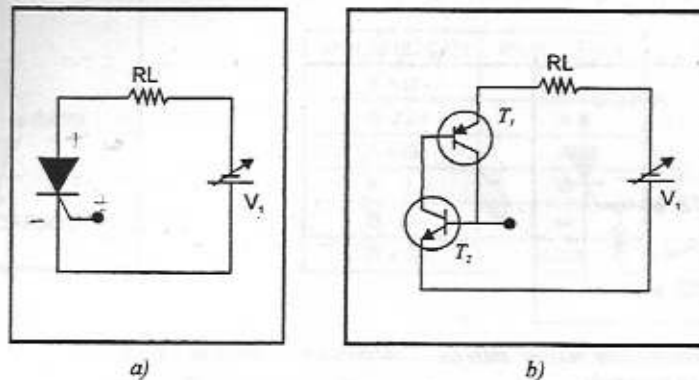


Fig.3.8 - a) Circuito de polarização reversa do SCR.
b) Circuito de polarização reversa do SCR simulado a transistor.

Como pode ser visto na figura 3.8.b, os transistores estão reversamente polarizados e apenas uma corrente de fuga circula. Caso o valor da tensão reversa ultrapasse o valor suportado pelo componente, o mesmo poderá se danificar permanentemente. Esta tensão reversa de ruptura é chamada de tensão de **BREAKDOWN** ou tensão reversa máxima.

Esta situação é evitada, a fim de não danificarmos o componente. O SCR escolhido para operar nos circuitos, deve suportar a tensão reversa a qual será submetido.

3.7.3- Polarização direta anodo-catodo e polarização direta gate-catodo:

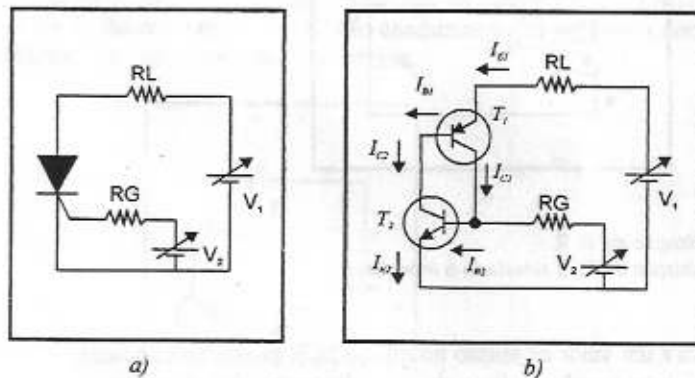


Fig.3.9 - a) Circuito de polarização direta do SCR com gate polarizado.
b) Circuito de polarização direta do SCR simulado a transistor.

Como podemos verificar através da fig.3.9-b, ao aplicarmos uma tensão V_2 capaz de fazer circular I_{B2} , T_2 conduz e este ao conduzir leva T_1 à condução. T_1 conduzindo, sua corrente de coletor passa a ser a corrente na base de T_2 (realimentação positiva). O SCR conduz, neste caso, com valores de tensões menores do que no caso onde o gate se encontrava aberto.

Já que a corrente de coletor de T_1 passa a alimentar a base de T_2 , podemos retirar o sinal do gate que o SCR permanece conduzindo, ou seja, o SCR engatou.

Podemos, portanto, dizer que o SCR engatou, quando após disparado, ao retirarmos o sinal do gate, o componente permanece conduzindo.

Quando o SCR conduz, a sua tensão anodo-catodo é da ordem de 0,7v a 2v e praticamente toda a tensão da fonte aparece na carga (RL).

O SCR se comporta como uma chave: ou se encontra desligado (aberto) ou se encontra conduzindo (fechado).

O sinal do gate do SCR só pode ser retirado e o mesmo permanecer conduzindo, se a corrente que circula no anodo for maior do que a corrente de engatamento. (**IL-LATCHING CURRENT**). Caso seja aplicada uma corrente no anodo menor do que o valor especificado pelo fabricante como I_L , o SCR dispara, mas não engata.

3.4 - INFLUÊNCIA DO SINAL DO GATE

O gate permite ao SCR conduzir com valores menores de tensão entre anodo-catodo e quando formos estudar o comportamento deste componente em corrente alternada, verificaremos que quanto maior for o valor da corrente injetada no gate do SCR, menor será o valor da tensão anodo-catodo necessário para remover o disparo do componente.

3.5 - ETAPAS DOS CIRCUITOS COM SCR

Nos circuitos com SCR's possuímos duas etapas bem distintas: etapa de potência e a etapa de disparo, como mostra a figura 3.10.

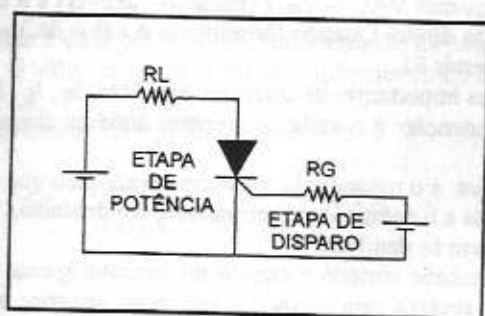


Fig.3.10 - Etapas do circuito com SCR.

A etapa de potência ou etapa de força consiste na parte do circuito onde circula uma corrente de maior intensidade e onde aplicamos uma tensão de maior valor.

A etapa de disparo consiste na parte do circuito onde circula a corrente de gate do SCR.

Uma das características fundamentais do SCR é conseguir controlar altas correntes (corrente anódica) a partir de pequenas correntes (corrente de gate). No circuito de disparo temos um pequeno consumo de potência, enquanto no circuito de potência temos uma grande dissipação de potência, pois aí é que se encontra ligada a carga.

3.6 - CURVA CARACTERÍSTICA DO SCR

Na figura 3.11-a está representada a curva característica do SCR, obtida a partir do circuito da figura 3.10.

Já que a corrente de coletor de T_1 passa a alimentar a base de T_2 , podemos retirar o sinal do gate que o SCR permanece conduzindo, ou seja, o SCR engatou.

Podemos, portanto, dizer que o SCR engatou, quando após disparado, ao retirarmos o sinal do gate, o componente permanece conduzindo.

Quando o SCR conduz, a sua tensão anodo-catodo é da ordem de 0,7v a 2v e praticamente toda a tensão da fonte aparece na carga (RL).

O SCR se comporta como uma chave: ou se encontra desligado (aberto) ou se encontra conduzindo (fechado).

O sinal do gate do SCR só pode ser retirado e o mesmo permanecer conduzindo, se a corrente que circula no anodo for maior do que a corrente de engatamento. (IL-LATCHING CURRENT). Caso seja colocada uma corrente no anodo menor do que o valor especificado pelo fabricante como IL, o SCR dispara, mas não engata.

3.8 - INFLUÊNCIA DO SINAL DO GATE

O gate permite ao SCR conduzir com valores menores de tensão entre anodo-catodo e quando formos estudar o comportamento deste componente em corrente alternada, verificaremos que quanto maior for o valor da corrente injetada no gate do SCR, menor será o valor da tensão anodo-catodo necessário para promover o disparo do componente.

3.9 - ETAPAS DOS CIRCUITOS COM SCR

Nos circuitos com SCR's possuímos duas etapas bem distintas: etapa de potência e a etapa de disparo, como mostra a figura 3.10.

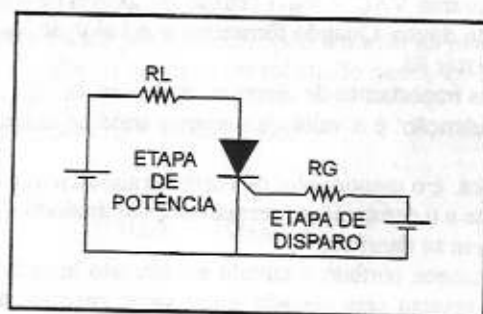


Fig.3.10 - Etapas do circuito com SCR.

A etapa de potência ou etapa de força consiste na parte do circuito onde circula uma corrente de maior intensidade e onde aplicamos uma tensão de maior valor.

A etapa de disparo consiste na parte do circuito onde circula a corrente de gate do SCR.

Uma das características fundamentais do SCR é conseguir controlar altas correntes (corrente anódica) a partir de pequenas correntes (corrente de gate). No circuito de disparo temos um pequeno consumo de potência, enquanto no circuito de potência temos uma grande dissipação de potência, pois aí é que se encontra ligada a carga.

3.10 - CURVA CARACTERÍSTICA DO SCR

Na figura 3.11-a está representada a curva característica do SCR, obtida a partir do circuito da figura 3.11-b.

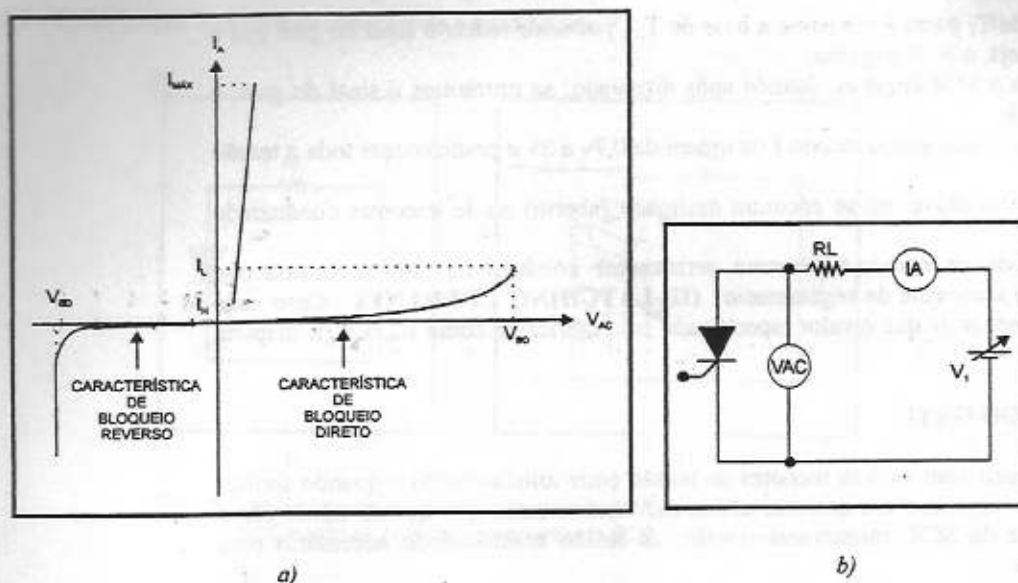


Fig. 3.11 - a) Curva característica do SCR.

b) Circuito para obtenção da curva característica.

Podemos observar que o SCR se encontra em corte enquanto $V_{AC} < V_{BO}$ (Tensão Breakover) e a única corrente a circular no circuito é a corrente de fuga no sentido direto. Quando for atingido o valor de V_{BO} , o SCR passará a conduzir e sua corrente será limitada pelo resistor R_L .

Na curva característica do SCR encontramos três valores importantes de correntes anódicas: I_H , I_L , I_{MAX} .

I_H : (Holding current), corrente de retenção ou de manutenção: é o valor de corrente anódica abaixo do qual o SCR irá cortar.

I_L : (Latching current), corrente de engatamento ou tranca: é o menor valor de corrente anódica que deve circular no SCR, a fim de que possamos retirar o sinal do gate e o componente permanecer conduzindo.

I_{MAX} : é a máxima corrente anódica que o SCR admite sem se danificar.

Ao polarizarmos o SCR reversamente, o mesmo permanece cortado e circula no circuito apenas uma pequena corrente de fuga reversa. Caso o valor da tensão reversa seja elevado a um valor superior ao da tensão de BREAKDOWN (Tensão reversa máxima), o SCR será danificado.

3.11 - CÁLCULO DE POLARIZAÇÃO DO SCR EM C.C

Ao ligarmos o SCR em corrente contínua, devemos nos preocupar com dois aspectos importantes: O valor adequado de I_G e o valor adequado de I_A .

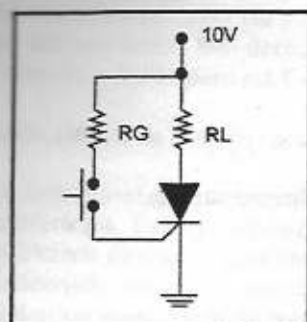
Uma polarização mal feita poderá trazer transtornos no funcionamento do componente como os que são mencionados abaixo:

a) **O SCR não dispara:** Quando o SCR não dispara a corrente de gate está insuficiente e podemos resolver este problema, diminuindo o resistor do gate a fim da corrente aumentar sua intensidade. A corrente de gate deve ficar acima do valor mínimo (IGT_{min}) e abaixo do valor máximo (IGT_{max}).

No caso da corrente de gate ficar abaixo do IGT_{min} , o SCR não dispara e se esta corrente ficar acima do IGT_{max} , a junção gate-catodo será danificada.

b) **O SCR não engata:** quando na prática você retira o sinal do gate e o SCR não permanece conduzindo, é sinal que o SCR não engatou, ou seja, a corrente anódica está abaixo de I_L . Para resolver tal problema, devemos aumentar a corrente anódica, diminuindo o valor da resistência em série com o anodo do SCR.

Abaixo é dado um exemplo de circuito de polarização do SCR em C.C., bem como os cálculos de R_G e



Dados

$$I_{M\max} = 500\text{mA}$$

$$I_L = 8\text{mA}$$

$$I_H = 4\text{mA}$$

$$I_{GT\max} = 200\mu\text{A}$$

$$I_{GT\min} = 30\mu\text{A}$$

Fig.3.12 - Circuito de polarização do SCR em C.C.

Podemos observar que a presença da chave N.A. (normalmente aberta) no gate do SCR é justificável uma vez que a corrente de gate só é necessária no momento do disparo do componente.

O valor de R_G é dado por:

$$R_G = \frac{V_{RG}}{I_{RG}}$$

A tensão no resistor de gate é dada por $V_{CC} - 0,7$, pois a tensão na junção gate-catodo é de valor igual ao da tensão de uma junção PN. O valor de I_{RG} deve ser escolhido dentro do limite de min e máx de corrente de gate, ou seja, $I_{GT\min} < I_G < I_{GT\max}$.

Para o exemplo dado, escolhendo $I_G = 100\mu\text{A}$ temos:

$$R_G = \frac{10 - 0,7}{100\mu\text{A}} = \frac{9,3}{100\mu\text{A}} = 93\text{k}\Omega$$

Valor comercial: 100 k Ω

Para calcularmos o valor de R_L , devemos escolher uma corrente anódica capaz de engatar o SCR ($I_A > I_H$) e abaixo da corrente máxima, a fim de não danificar o componente ($I_A < I_{A\max}$). Escolhendo $I_A = 50\text{mA}$ temos:

$$R_L = \frac{V_{RL}}{I_{RL}} = \frac{V_{CC} - V_{scr}}{I_{A\text{escolhido}}} = \frac{10 - 0,7}{50\text{mA}} = \frac{9,3}{50\text{mA}} = 186\Omega$$

Valor comercial: 180 Ω

3.12 - CODIFICAÇÃO DA SÉRIE TIC

Uma família de tiristores muito comum no mercado é a série TIC. Vale a pena ressaltar que a série TIP relativa a transistores, enquanto a série TIC, como foi dito anteriormente, é referente a família de tiristores.

Na série TIC temos as seguintes convenções:

- 1 - número 1(um) iniciando o número da série representa tiristor unidirecional (SCR) e o número 2 (dois) iniciando o número de série representa tiristor bidirecional.

Ex: TIC 106

└─ Indica tiristor unidirecional:

TIC 206

└─ Indica tiristor bidirecional:

- 2 - Quanto maior o número da série, maior é a intensidade da corrente que o tiristor suporta.

Ex: TIC 126 suporta uma corrente anódica maior do que o TIC 106.

- 3 - A letra que segue o número da série representa a tensão V_{DRM} (tensão máxima direta, com o tiristor bloqueado). Esta tensão será melhor tratada no capítulo 4 sobre dados técnicos de tiristores, mas de uma forma resumida é a máxima tensão que pode ser aplicada ao tiristor.

Ex: TIC 106 - A

└─ 100V

TIC 106 - B

└─ 200V

3.13 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS TIRISTORES EM RELAÇÃO AOS RELÉS

O tiristor por ser uma chave de estado sólido, vem apresentando uma série de vantagens em relação ao relé eletromecânico com suas peças móveis.

Como vantagens dos tiristores em relação aos relés podemos citar:

- 1 - Inexistência de partes móveis. Nos tiristores não há contatos que devam ser periodicamente limpos, nem molas para serem trocadas, nem partes metálicas sujeitas à corrosão, nem perigo de centelhamento.
- 2 - Velocidade elevada de comutação. Os tiristores são mais rápidos no chaveamento do que os relés.
- 3 - Vida útil maior.

Como desvantagens dos tiristores em relação aos relés podemos citar:

- 1 - O tiristor não é uma chave ideal. O tiristor quando se encontra em condução tem nos seus terminais uma tensão da ordem de 0,7v a 2v.
- 2 - Cada tiristor representa um contato e um relé pode ter mais de um contato.

3.14 - MÉTODOS DE DISPARO DO SCR

Abaixo serão analisadas as possíveis formas de ocorrer o disparo do SCR. Alguns destes disparos são indesejáveis e por tal motivo, proteções deverão ser utilizadas para evitar o disparo errático.

3.14.1 - Disparo por tensão de BREAKOVER (VBO):

Existe um valor de tensão anodo-catodo capaz de levar o SCR do estado de corte para o estado de condução, sem aplicação de corrente ao gate, conhecido como tensão de **BREAKOVER**. Este método de disparo, como foi mencionado anteriormente, não é utilizado na prática pelo fato de necessitarmos de valores altos de tensão capaz de fazer o SCR conduzir.

3.14.2 - Disparo através de sinal aplicado ao gate:

O método usual de disparo do SCR é através da aplicação de um sinal ao terminal do gate.

Este sinal propicia o início do processo regenerativo interno que coloca o SCR em condução.

Ao dispararmos um SCR com um sinal no gate, devemos manter este sinal até que a corrente anódica atinja um valor superior a I_L (corrente de engatamento).

Como já foi mencionado anteriormente, uma vez o SCR conduzindo, podemos retirar o sinal do gate que o componente permanecerá em condução. Em decorrência deste fato, não é necessária a presença constante do sinal no gate quando o SCR opera em C.C.

3.14.3 - Disparo por ruído (Sinais de Interferência)

Esta forma de disparo é indesejável, pois o tiristor poderá conduzir a qualquer momento, desde que o mesmo capte estes sinais de interferência. Este tipo de disparo só ocorre para a linha de SCR's mais sensíveis (Ex.: TIC 106), onde pequenos níveis de sinal no gate são suficientes para disparar o componente.

Para evitar o disparo indesejado por ruído, devemos utilizar um resistor entre o gate-catodo que irá dissipar parte do ruído (sinal de interferência), evitando com isto o disparo do SCR. Na figura 3.13 temos a localização do resistor que evita o disparo do SCR por ruído e vale a pena ressaltar que em alguns casos (Ex.: TIC 116, TIC 126) este resistor já vem colocado internamente no componente.

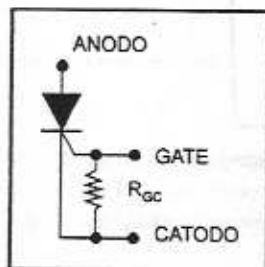


Fig.3.13 - Resistor entre gate-catodo que evita o disparo por ruído.

3.14.4 - Disparo pelo efeito dV/dt :

Sabemos que toda junção PN reversamente polarizada, apresenta característica capacitiva. Na estrutura interna do SCR percebemos, através da figura 3.14.a, que a junção J_2 se encontra polarizada reversamente, possuindo o efeito capacitivo.

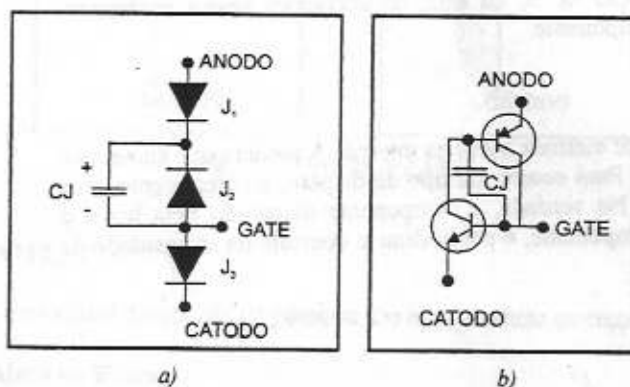


Fig.3.14 - a) Equivalente a diodo com o efeito capacitivo.
b) Equivalente a transistor com efeito capacitivo.

Um capacitor se constitui um curto para altas frequências. Quando tivermos uma variação brusca de tensão, haverá no capacitor uma pequena corrente capacitiva que será injetada no gate do SCR. Caso o valor da corrente capacitiva seja suficiente para que haja o processo regenerativo, o SCR entra em condução. Convém ressaltar que quanto maior for a potência do SCR, maior será a capacitância da junção.

Podemos reduzir o efeito da variação brusca de tensão no SCR, colocando um circuito que amortecesse esta variação de tensão.

Este circuito é constituído de um ramo RC em paralelo com os terminais anodo e catodo do SCR. Este circuito é conhecido como SNUBBER (amortecedor).

Na figura 3.15, verificamos o circuito SNUBBER ligado ao SCR, a fim de evitar o disparo errático do mesmo por alto dv/dt .

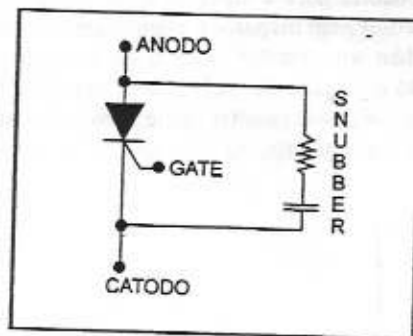


Fig.3.15 - Circuito SNUBBER (amortecedor).

O capacitor possui a propriedade de se opor a variação de tensão, visto que a tensão nos seus terminais cresce de forma gradativa. Por este motivo, a tensão entre anodo e catodo não irá variar bruscamente.

3.14.5 - Disparo por temperatura:

À medida que a temperatura da junção é aumentada, diversos parâmetros do SCR variam tais como: I_{fuga} , V_{BO} , I_H . Na figura 3.16 mostramos o efeito da temperatura sobre alguns parâmetros do SCR.

Notamos que o aumento da temperatura facilita o disparo do SCR, uma vez que há um aumento da corrente de fuga, diminuição de V_{BO} e uma diminuição de I_H , ou seja, as alterações nestes parâmetros contribuem para uma maior facilidade de disparo do componente.

3.14.6- Disparo pela Luz

A incidência de luz em uma junção pode fazer surgir elétrons livres na mesma. À medida que aumenta a incidência de luz, aumenta o número de elétrons livres. Para ocorrer tal tipo de disparo, o componente deve apresentar uma janela que propicie a entrada da luz. Na verdade, o componente disparado pela luz é o LASCR (SCR ativado à luz). O papel do gate, neste componente, é possibilitar o controle da intensidade de luz necessária para o disparo do mesmo.

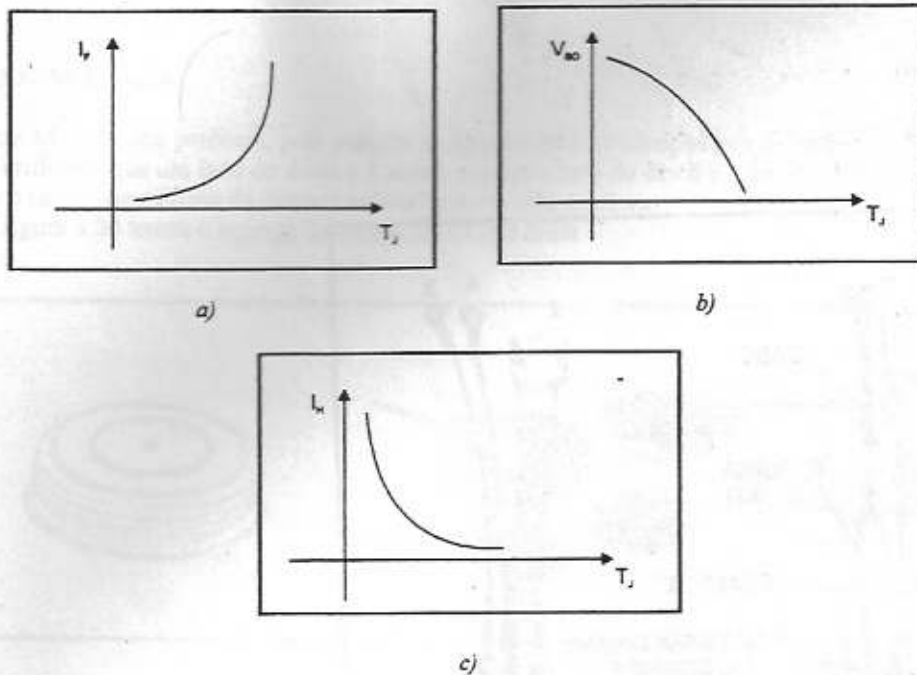


Fig. 3.16 - a) Variação da corrente de fuga com a temperatura.
 b) Variação de V_{BO} com a temperatura.
 c) Variação de I_H com a temperatura.

Na figura 3.17 é mostrado o símbolo da LASCR.

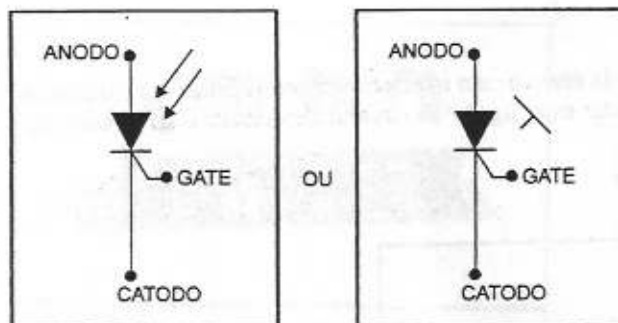


Fig. 3.17 - Símbolo do LASCR.

3.15- SCRs DE POTÊNCIA

Os SCRs de uma maior dissipação de potência são tipo parafuso ou rosca e tipo disco.

3.15.1- SCR Parafuso ou Rosca:

O SCR parafuso é apresentado na figura 3.18. Podemos observar a existência de quatro terminais:

1. Anodo.
2. Catodo (do circuito de potência).
3. Gate (do circuito de disparo).
4. Catodo (do circuito de disparo).

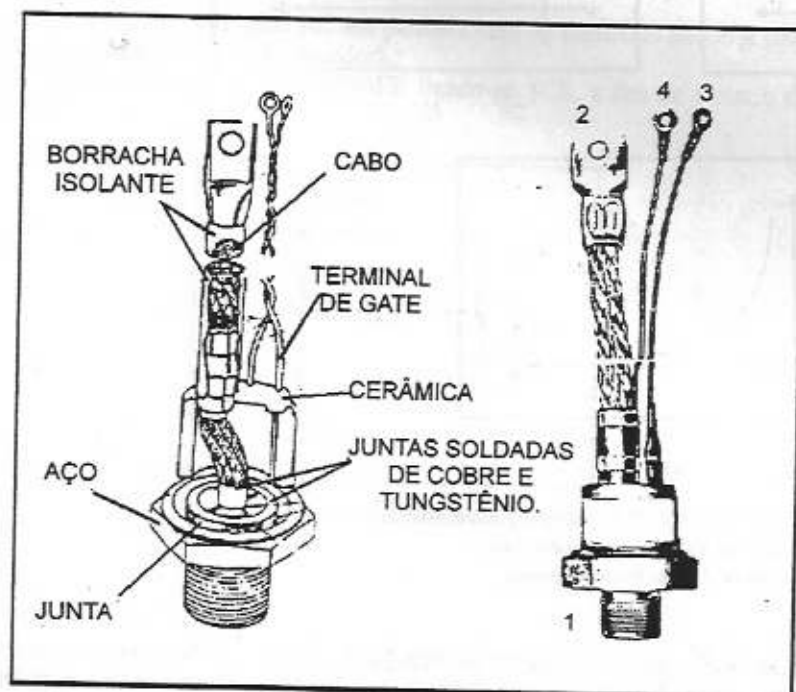


Fig. 3.18 - SCR parafuso ou rosca.

Os catodos (do circuito de potência e do circuito de disparo) são internamente interligados e a existência de dois catodos se dá pelo fato deste terminal necessitar estar ligado ao circuito de disparo e ao circuito de potência, conforme está esquematizado na figura 3.19.

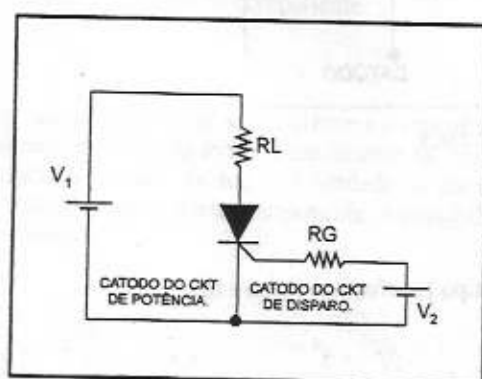


Fig. 3.19 - Ligações do Catodo do SCR.

3.15.2 - SCR Disco

É um SCR de alta potência, pois permite a conexão de dois dissipadores de calor, um de cada lado do disco. Verifica-se que um lado do disco é o anodo e o outro lado do disco é o catodo do circuito de potência.

O gate e o catodo do circuito de disparo se localizam no lado do disco.

Na figura 3.20 temos o aspecto físico dos SCR's tipo disco.

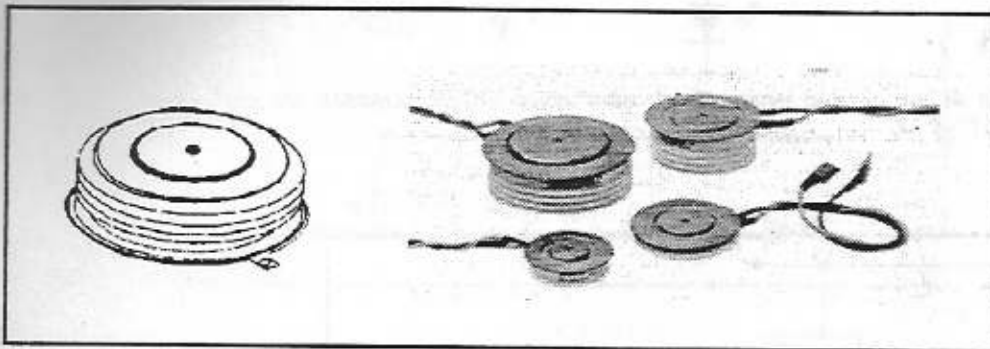


Fig. 3.20. - SCR Disco.

3.16 - THYODUL

Os THYODUL'S constituem-se na montagem integrada de dois elementos de potência.

A unidade THYODUL vem possibilitar a otimização do layout e a construção de conversores estáticos muito mais compactos e principalmente mais econômicos.

Na figura 3.21 temos o aspecto físico de uma unidade THYODUL.

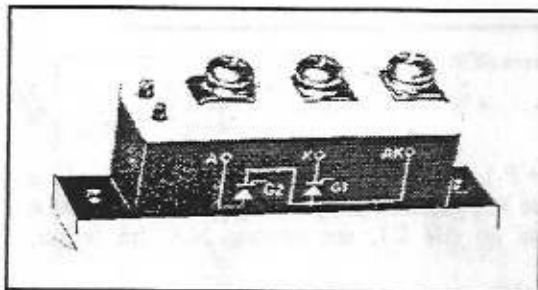


Figura. 3.21 - THYODUL

As unidades THYODUL'S se apresentam com as seguintes alternativas :

- 2 SCR's comutação normal
- 2 SCR's comutação rápida
- 1 diodo e 1 SCR comutação normal
- 1 diodo e um SCR para comutação rápida
- dois diodos.

A combinação de dois tiristores recebe o nome de FULLY-CONTROLLED THYODUL. A combinação de um tiristor e um diodo de : HALF-CONTROLLED THYODUL e a combinação de dois diodos de : DIODUL.

Graças à isolamento elétrica de sua base, torna-se possível associar várias unidades THYODUL em um único dissipador para construção de pontes retificadoras monofásicas ou trifásicas controladas, etc.

As unidades THYODUL'S para conversores compactos significam muita economia de componentes, de espaço, de matéria prima, de mão-de-obra de manutenção.

3.17 - CIRCUITOS APLICATIVOS DE SCR EM C.C.

Neste item serão apresentados alguns circuitos aplicativos do SCR em C.C.

3.17.1 - Temporizador com SCR:

O circuito da figura 3.22 trata-se de um circuito temporizador onde temos o SCR acionado por um circuito oscilador de relaxação com UJT.

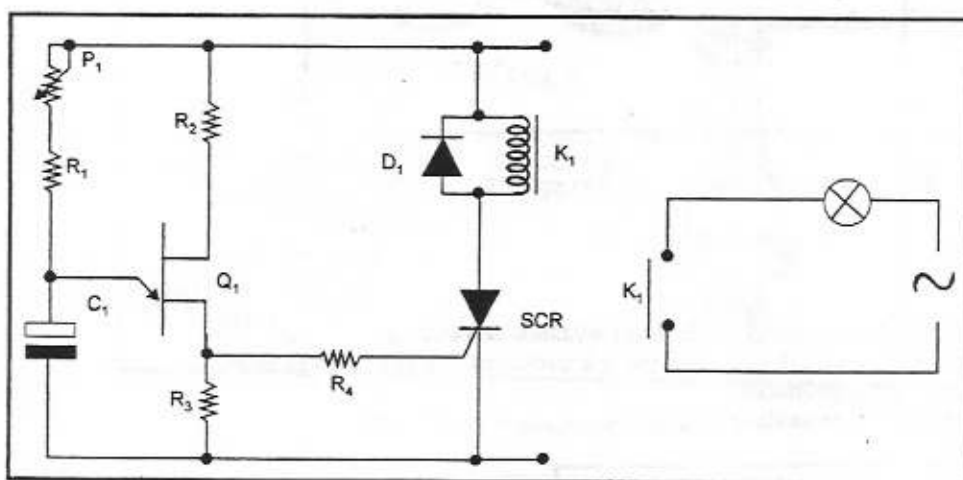


Fig.3.22 - Temporizador com SCR.

O capacitor levará um certo tempo, dado pela rede $(R_1 + P_1) \cdot C_1$, até atingir o valor de V_P . Quando o valor de V_P for atingido, o capacitor se descarrega através de R_3 , gerando um pulso que aciona o SCR e energiza a bobina do relé K_1 . Ao ser energizada a bobina do relé K_1 , seu contato N.A. irá fechar, possibilitando o acendimento da lâmpada.

O diodo D_1 evita que a tensão induzida gerada por K_1 venha a queimar o SCR, uma vez que este diodo limita o valor da tensão induzida em $-0,7V$.

3.17.2 - Chave de Código

Para energizar o relé K_1 que irá ligar a carga, é necessário acionar as chaves S_1 , S_2 e S_3 na sequência correta. O relé K_2 será energizado, se alguma chave, não pertencente ao código, for acionada. Este relé poderá ser usado para acionar algum alarme indicando que foi acionado o código errado.

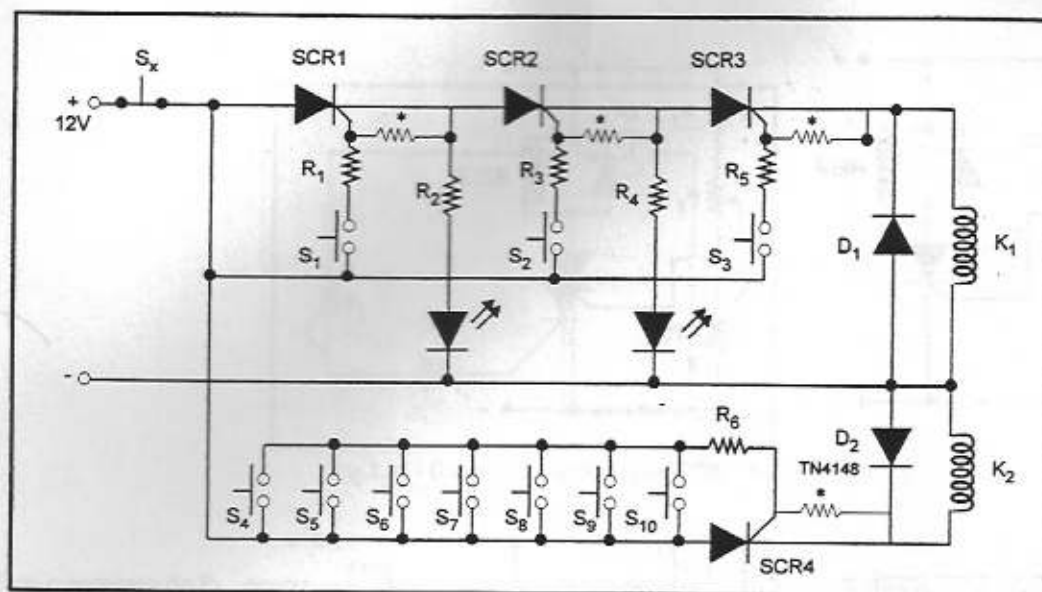
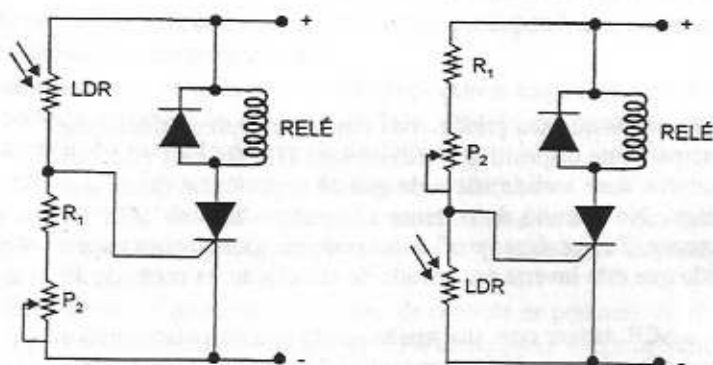


Fig.3.23 - Chave de código.

Os resistores (*) deverão ser utilizados caso os SCRs sejam sensíveis a disparo por ruído.

3.17.3 - Circuitos de Alarmes:

Os circuitos abaixo irão atuar de formas diversas. Analise o comportamento de cada um e verifique em que situação cada circuito poderia ser aplicado.



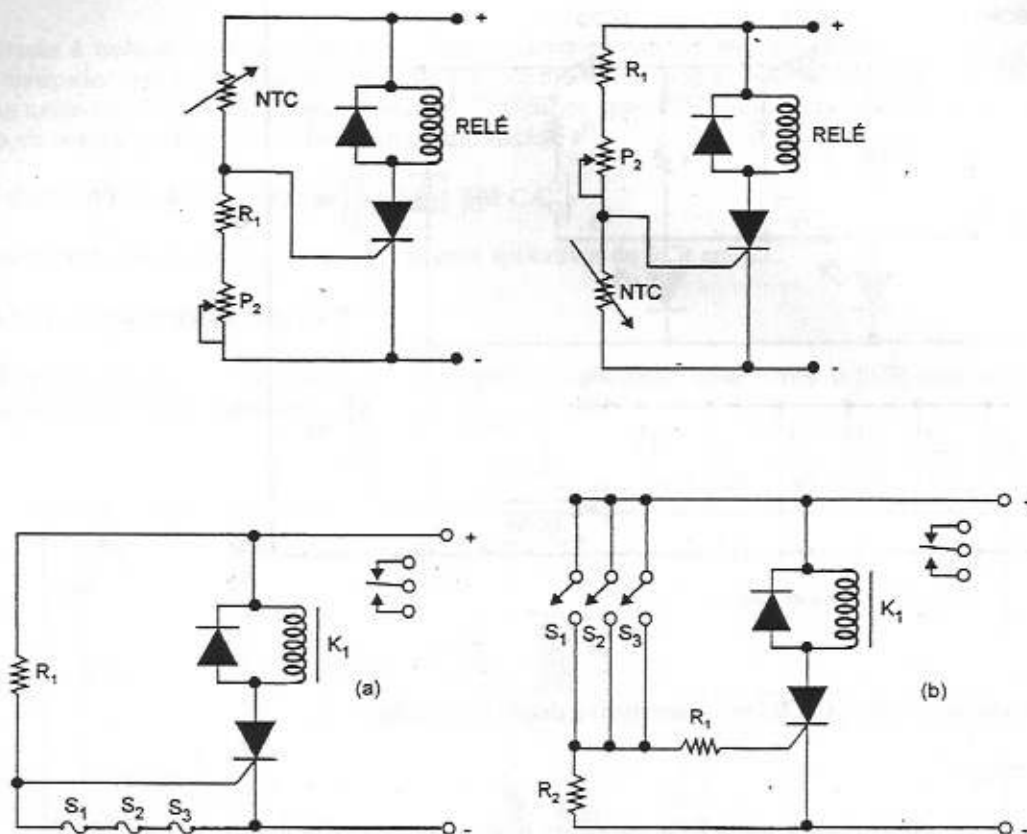


Fig.3.24 - Circuitos de alarme com SCR.

3.18 - SCR EM CORRENTE ALTERNADA:

Quando analisamos o comportamento do SCR, vimos que seu princípio de funcionamento é semelhante ao de um diodo, pois a condução de corrente principal neste dispositivo só é feita num sentido. Nos circuitos de corrente contínua, o fato do SCR conduzir corrente num sentido não é de grande importância desde que sempre lembremos de polarizá-lo no sentido direto. No circuito de corrente alternada o fato do SCR ter comportamento similar a um diodo é muito importante. Temos duas possibilidades de comportamento para o SCR num circuito de corrente alternada, lembrando que esta inverte seu sentido de circulação na razão de 60 Hz.

Se, durante a aplicação do pulso de disparo, o SCR estiver com sua tensão anodo-catodo polarizando-o reversamente, **não ocorrerá o disparo**, mas se por outro lado, o SCR se encontrar diretamente polarizado e for aplicado um pulso de disparo, o mesmo entrará em condução.

Supondo que o pulso de disparo desapareça, o SCR permanecerá em condução somente enquanto ele estiver polarizado no sentido direto, ou seja, enquanto I_a for maior que I_H (corrente de manutenção).

O controle do SCR é percebido quando aplicado em corrente alternada, pois **quanto maior a corrente aplicada ao gate, menor será a tensão anodo-catodo necessária para o SCR disparar**.

Na figura 3.25 temos um circuito de controle de potência através de SCR.

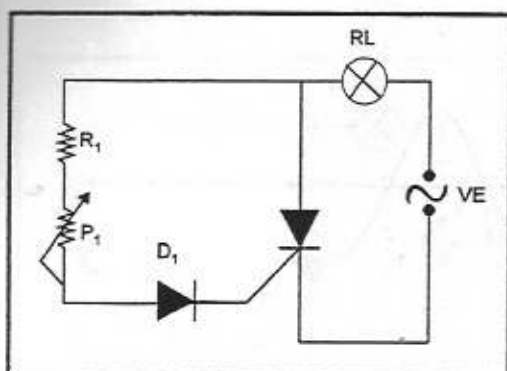


Fig. 3.25 - Controle de potência com SCR.

Com o aumento de P_1 , ocorre uma diminuição na corrente de gate e isto faz com que o SCR exija uma tensão maior entre anodo-catodo para o seu disparo. Neste caso o SCR leva mais tempo cortado e a carga recebe sinal por um intervalo de tempo menor.

Na figura 3.26 apresentamos as formas de ondas na carga e no SCR para diferentes valores de I_G .

Podemos observar que enquanto o SCR se encontra cortado, ele se comporta como uma chave aberta e praticamente toda tensão de entrada aparece nos seus terminais anodo-catodo. Quando o SCR dispara, ele se comporta como uma chave fechada e toda a tensão do circuito aparece praticamente em cima da carga, ficando uma tensão entre 0,7V a 2V em cima do SCR.

Notamos que quanto maior o valor de I_G , o SCR dispara com um valor menor de tensão anodo-catodo, ou seja, dispara mais cedo e isto permite que para a carga passe uma maior parte do sinal da rede, fazendo com que a mesma dissipe uma maior potência.

Concluimos, portanto, que podemos fazer o controle da potência dissipada na carga a partir do controle da corrente de gate, já que maiores correntes de gate fazem o SCR disparar mais cedo e com isto a carga dissipa mais potência.

A tensão anodo-catodo na qual o SCR dispara, possui um ângulo correspondente, chamado **ângulo de disparo** (α). A tensão na qual o SCR corta possui um ângulo correspondente, chamado de **ângulo de corte** (β), normalmente este ângulo fica em torno de 180° .

O **ângulo de condução** (θ) é definido como a diferença entre o ângulo de corte e o ângulo de disparo.

O controle de potência através do controle de fase consiste no processo de controlar a potência dissipada pela carga através da variação do ângulo de disparo.

No circuito da figura 3.25, a faixa de ângulo de disparo do circuito é de 0° a 90° , pelo fato da corrente de gate estar em fase com a tensão. O ângulo máximo, neste circuito, é de 90° visto que se diminuirmos I_G o máximo valor de tensão que o anodo-catodo pode atingir, a fim de conseguir disparar o SCR, é o valor da tensão de pico e este se localiza a 90° .

O efeito prático deste circuito é pequeno, pois a faixa de controle de potência vai de 25% a 50%.

Quando $\alpha = 0^\circ$, a potência dissipada na carga é de 50% da potência máxima, visto que o SCR perde $\frac{1}{2}$ ciclo do sinal da rede, pois não conduz quando polarizado reversamente.

Quando $\alpha = 90^\circ$, a potência dissipada na carga é de 25% da potência máxima, pois a carga só aproveita o primeiro meio ciclo do sinal da rede.

O diodo D_1 está presente no circuito, a fim de evitar danos a junção gate-catodo por polarização reversa.

O circuito da figura 3.27 realiza o controle de potência através do controle de fase, com a faixa de ângulo de disparo de 0° a 180° .

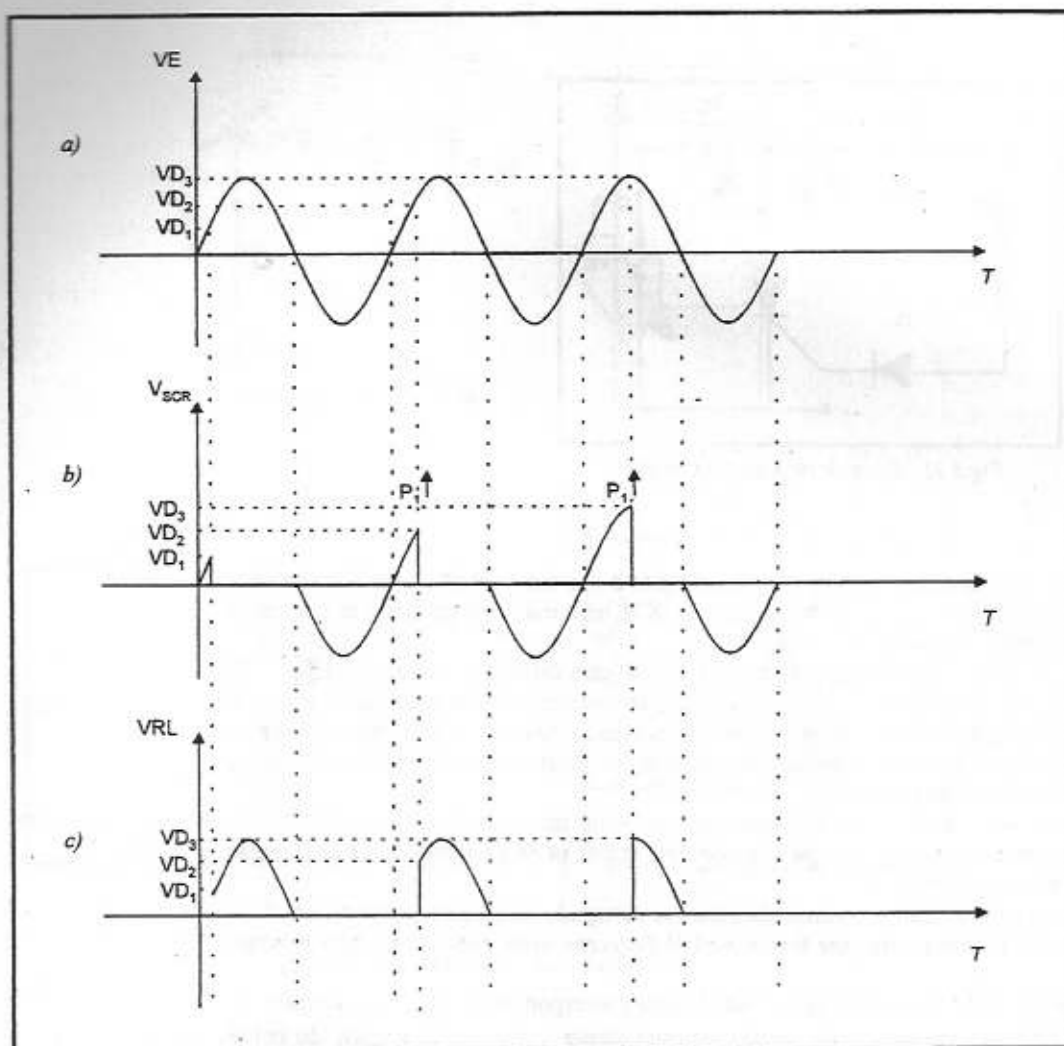


Fig.3.26 - a) Forma de onda de entrada.

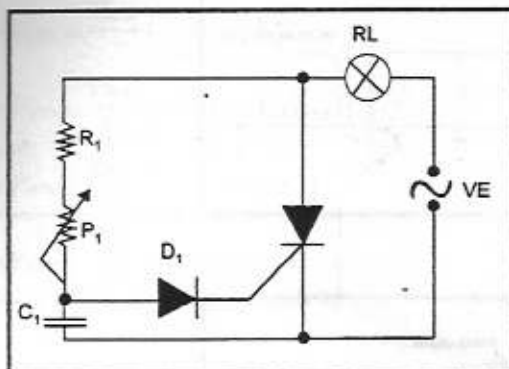
b) Forma de onda no SCR.

c) Forma de onda na carga.

No circuito da figura 3.27, o ângulo de disparo consegue ultrapassar de 90° , pois IG só surgirá quando a tensão no capacitor atingir $(VD_1 + V_{GC} = 1,4V)$ e este tempo é controlado através de P_1 que agora controla o valor da corrente de carga do capacitor. Quanto maior o valor de P_1 , menor o valor da corrente de carga e mais tempo o capacitor leva para atingir a tensão necessária para fazer surgir a corrente de gate e com isto o SCR demora para disparar, ou seja, o ângulo de disparo (α) aumenta.

No circuito da figura 3.27 a faixa de α é de 0° a 180° e a faixa de controle de potência é de 0% a 50%.

Quando $\alpha = 0^\circ$, o SCR dispara no início do semiciclo, portanto, neste caso a potência dissipada na carga é de 50%. Quando $\alpha = 180^\circ$, não irá passar para a carga tensão e isto fará com que a mesma não dissipe potência, ou seja, $P = 0\%$. A partir da aplicação em CA podemos melhor compreender o nome SCR para este componente:

Fig.3.27 - Circuito de controle de potência com $0^\circ < \alpha < 180^\circ$

Retificador: pelo fato de que a corrente só circula em 1 sentido pelo componente.

Controlado: pelo fato de ao variarmos a corrente de gate, controlarmos a tensão de disparo do componente e com isto controlarmos a potência dissipada na carga.

Silício: pelo fato do material utilizado na sua fabricação ser o Silício.

3.19 - CÁLCULO DA TENSÃO MÉDIA E EFICAZ NA CARGA:

A variação do ângulo de disparo (α) nos circuitos de controle de potência, permite variar a potência dissipada na carga, desta forma o valor da tensão eficaz e o valor da tensão média são variados.

Antes do cálculo do valor médio e eficaz na carga, vamos deixar bem claro a definição destes termos.

3.19.1 - Definição de Valor Médio:

O valor médio de qualquer forma de onda periódica é definida como:

Valor médio:

área resultante entre a forma de onda e o eixo do tempo durante um dado intervalo

intervalo de tempo

Na figura 3.28 temos a representação do valor médio de uma forma de onda.

O valor médio é obtido através do **calibre DC** dos multímetros. A terminologia para valor médio de tensão é V_{DC} ou V_{AV} (average = valor médio).

Matematicamente, o valor médio da forma de onda da figura 3.28 é expresso por:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt.$$

É a integral da área sobre o período da forma de onda.

3.19.2 - Definição de Valor eficaz ou RMS (Root mean Square):

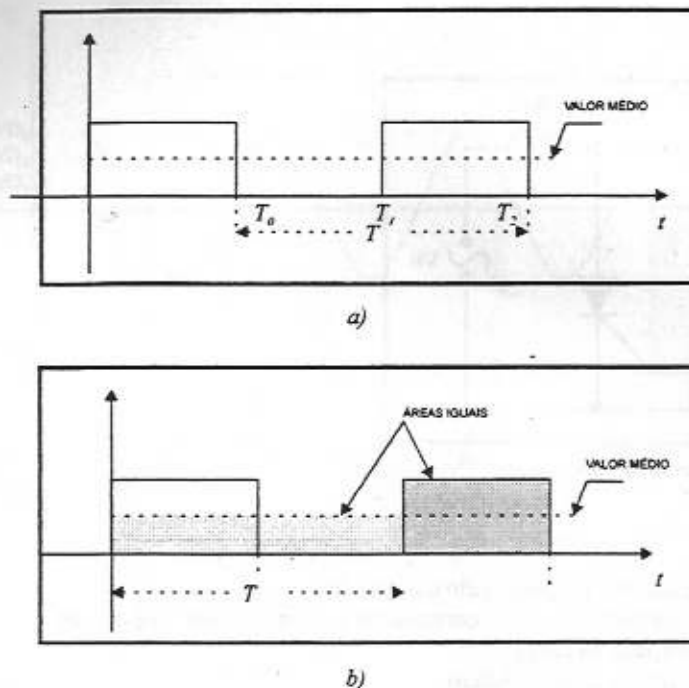


Fig. 3.28 - a) Forma de onda e o seu valor médio.

b) Comparação entre as áreas da forma de onda.

O valor eficaz ou RMS (raiz médio quadrático) de uma forma de onda está relacionado com a potência que ela pode desenvolver. Ainda que o valor médio seja zero, haverá dissipação de potência, pois o simples fato de passar corrente, não importando o sentido, já ocasiona uma dissipação de potência.

A interpretação física do valor eficaz diz que: o valor eficaz de uma forma de onda periódica qualquer, corresponde ao valor da corrente contínua que dissipa a mesma potência sobre uma mesma carga.

Matematicamente o valor eficaz da forma de onda da figura 3.28 é dado por:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 \cdot dt}$$

Matematicamente o valor eficaz é igual a raiz do valor médio do quadrado da função.

3.19.3 - Cálculo do valor de VDC e VRMS nos circuitos de 1/2 onda:

No circuito de controle de potência de 1/2 onda o valor VDC na carga é dado por:

$$V_{DCR} = V_{AVR} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DCR} = V_{AVR} = \frac{V_{MAX}}{T} (-\cos \omega t) \Big|_{\alpha}^{\pi}$$

$$V_{DCR} = V_{AVR} = \frac{V_{MAX}}{2\pi} [-(\cos \pi - \cos \alpha)]$$

$$V_{DCR} = V_{AVR} = \frac{V_{MAX}}{2\pi} [-(-1 - \cos \alpha)]$$

$$V_{DCR} = V_{AVR} = \frac{V_{MAX}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

O valor da tensão eficaz na carga é obtido através da equação deduzida abaixo.

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{\int_{\alpha}^{\pi} (V_{max} \cdot \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t}{T}}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{MAX}^2 \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t \cdot d\omega t}{T}}$$

$$\int \sin^2 \omega t = \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right]$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{MAX}^2}{T} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right] \Big|_{\alpha}^{\pi}}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{MAX}^2}{T} \left[\frac{\pi - \alpha}{2} - \frac{1}{4} (\sin 2\pi - \sin 2\alpha) \right]}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{MAX}^2}{T} \left[\frac{\pi - \alpha}{2} - \frac{1}{4} (-\sin 2\alpha) \right]}$$

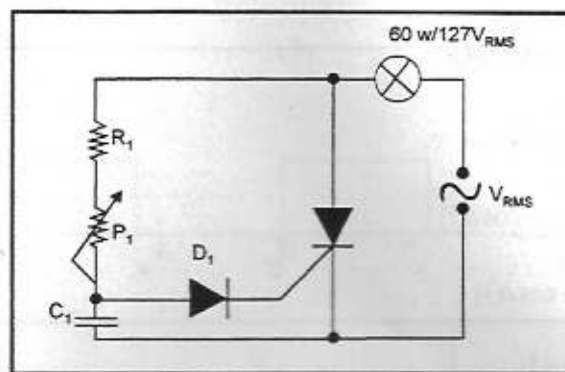
$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{max}^2}{T} \left[\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \cdot \sin 2\alpha \right]}$$

De posse das informações anteriores, passemos a resolver o seguinte exercício:

Para o circuito da figura 3.29, supondo $\alpha = 60^\circ$, calcule o VDC, o VRMS na carga e a potência que a carga esta dissipando para este ângulo de disparo. Suponha a tensão de entrada $127 V_{RMS}$.

Para o cálculo da tensão média na carga (V_{DCR} ou V_{AVR}), utilizamos da seguinte expressão:

$$V_{DCR} = \frac{V_{max}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Fig.3.29 - Circuito de controle de potência com $0^\circ < \alpha < 180^\circ$

$$V_{DCR} = \frac{127 \times \sqrt{2}}{2\pi} (1 + \cos 60)$$

$$V_{DCR} = \frac{179,1}{6,28} (1 + 0,5) = 42,78V$$

O valor que deverá ser encontrado pelo multímetro em DC será 42,78V.

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{MAX}^2}{T} \left(\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{\text{Sen}2\alpha}{4} \right)}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{(127 \times \sqrt{2})^2}{2\pi} \left(\frac{\pi - \frac{\pi}{3}}{2} + \frac{\text{Sen}2 \cdot 60}{4} \right)}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{5106,06 \left(1,05 + \frac{0,866}{4} \right)}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{5106,06 \cdot (1,27)}$$

$$V_{RMSR} = 80,5V$$

Para o cálculo da potência que a carga está dissipando, referente a este ângulo de disparo, temos:

$$P = \frac{(V_{RMS})^2}{R}$$

O valor da resistência de uma lâmpada de 60W/127V_{RMS} é:

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

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(127)^2}{60} = 268,8\Omega$$

Agora podemos calcular a potência que a lâmpada está dissipando para $\alpha = 60^\circ$:

$$P = \frac{(V_{RMS})^2}{R} = \frac{(80,5)^2}{268,8} = \frac{6480,25}{268,8} = 24,1W$$

Pelo cálculo acima, podemos concluir que para $\alpha = 60^\circ$, a lâmpada está dissipando 24,1 W.

No caso do circuito aproveitar os 2 semicírculos da rede, através da utilização de um circuito retificador, como mostrado na figura 3.30 os cálculos de VDC, VRMS e potência na carga serão realizados como veremos a seguir.

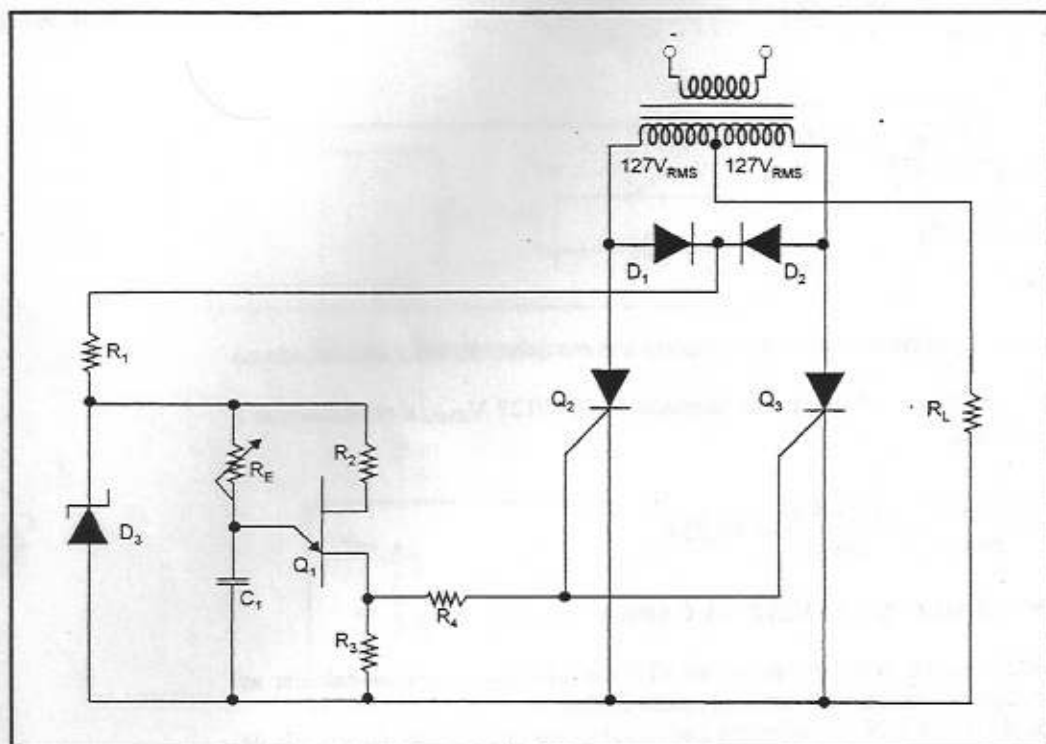


Fig.3.30 - Controle de potência com aproveitamento dos 2 semiciclos da rede

No caso do aproveitamento dos 2 semicírculos da rede, o valor V_{DC1} é dado pela seguinte expressão:

$$V_{DCR} = \frac{V_{MAK}}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

Já o valor eficaz é dado por:

$$V_{RMSx} = \sqrt{\frac{V_{MA}^2}{\pi} \left(\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{\text{Sen}2\alpha}{4} \right)}$$

Para um circuito aproveitando os dois semiciclos da rede, como o da figura 3.30 e supondo $V_{\text{RMS}} = 127\text{V}$ cada enrolamento de saída do transformador e $\alpha = 60^\circ$, temos:

$$V_{DCR} = \frac{127 \times \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos 60^\circ)$$

$$V_{DCR} = \frac{179,07}{3,14} (1,5) = 85,54V$$

Notamos que nos circuitos de onda completa, o valor de V_{DCR} é o dobro do valor encontrado nos circuitos de $\frac{1}{2}$ onda. Para o cálculo do valor eficaz de tensão, para $\alpha = 60^\circ$ temos:

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{V_{MAX}^2}{\pi} \left(\frac{\pi - \frac{\pi}{3}}{2} + \frac{\text{Sen} 2.60}{4} \right)}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{\frac{(127 \times \sqrt{2})^2}{3,14} \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\text{Sen} 120}{4} \right)}$$

$$V_{RMSR} = \sqrt{10212,12(1,27)}$$

$$V_{RMSR} = 113,88V$$

Observe que o valor eficaz de tensão no circuito de onda completa não é o dobro do valor encontrado no circuito de $\frac{1}{2}$ onda.

Supondo que a carga do circuito da figura 3.30 seja uma lâmpada de 60W/127 V_{RMS}, a potência que a mesma estará dissipando para $\alpha = 60^\circ$ será:

$$P = \frac{(V_{RMS})^2}{R} = \frac{(113,88)^2}{268,8} = \frac{12968,65}{268,8} = 48,25W$$

3.20 - CÁLCULO DAS CORRENTES MÉDIA E EFICAZ NA CARGA

Para qualquer dos circuitos onde encontramos os valores de V_{DCR} e V_{RMSR} , podemos calcular as respectivas correntes I_{AVR} e I_{RMSR} , ou, seja, as respectivas correntes média e eficaz.

No caso do circuito de $\frac{1}{2}$ onda da figura 3.29, as correntes que circulam no circuito são calculadas da seguinte forma:

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R}$$

$$I_{AVR} = \frac{V_{DCR}}{R}$$

Para $\alpha = 60^\circ$, podemos calcular a corrente eficaz (I_{RMSR}) e a corrente média (I_{AVR}) que irão circular na carga da figura 3.29:

$$I_{AVR} = \frac{V_{DCR}}{R} = \frac{42,78}{268,8} = 0,159A$$

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} = \frac{80,5}{268,8} = 0,299A$$

No circuito da figura 3.30 o valor da corrente eficaz (I_{RMSR}) e o valor da corrente média (I_{AVR}) para $\alpha = 60^\circ$ é dado por:

$$I_{AVK} = \frac{V_{DCR}}{R} = \frac{85,54}{268,8} = 0,318 A$$

$$I_{RMSR} = \frac{V_{RMSR}}{R} = \frac{113,88}{268,8} = 0,424 A$$

1- PROCESSOS DE CHAVEAMENTO

Existem dois processos de chaveamento de tensão: chaveamento com chaves e chaveamento com SCR. Em ambos os casos temos como desvantagem a geração de RFI, ondas eletromagnéticas que podem provocar interferências em outros circuitos.

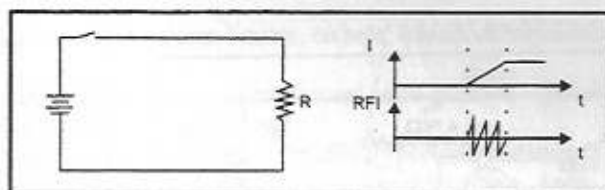


Fig.3.31 - Chaveamento com chave.

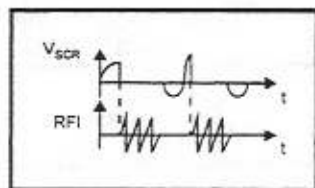


Fig.3.32 - Chaveamento com SCR.

2 - MEIOS DE PROPAGAÇÃO DA RFI:

A RFI gerada pode se propagar **através da rede** ou **através do ar**. Para cada um dos meios de propagação, há uma proteção conveniente para as interferências que os circuitos sofrerão.

- **RFI irradiada:** a RFI pode ser transmitida através do ar e neste caso, para se evitar a interferência em outros circuitos é necessário utilizarmos a **BLINDAGEM**. Na parte industrial quando a linha de força e a linha de controle são instaladas em dutos comuns permite a indução de ruídos em outros cabos, afetando assim outros circuitos.

- **RFI através da rede:** a RFI pode atingir outros circuitos através da rede e para evitarmos esse inconveniente nos utilizamos dos **filtros passa-baixas** que irão drenar toda frequência elevada.

3.23 - DIMMER PROGRAMÁVEL COM SCR:

O circuito de controle de potência com SCR é conhecido popularmente com o nome de DIMMER. O circuito da figura 3.33 é um DIMMER programável onde no modo manual o circuito opera como um circuito de controle de potência e no modo automático o circuito continua operando como controlador de potência e temporiza a atuação do circuito, que transcorrido um certo tempo é desligado.

Análise o circuito de forma detalhada e veja como o mesmo funciona no modo manual e no modo automático.

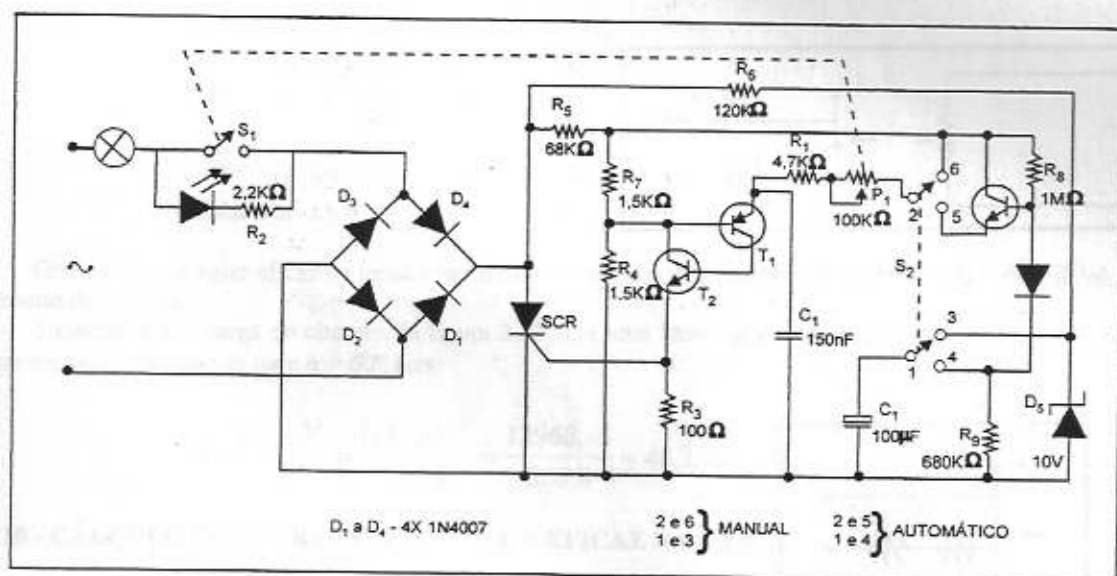


Fig.3.33 - Dimmer programável.