

# Aula 5 – Retificador Controlado de Silício (SCR)

## Objetivos

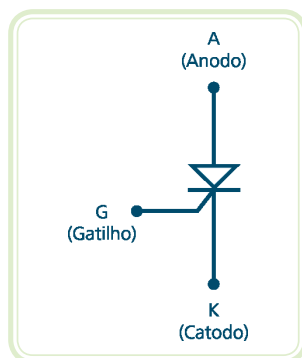
Compreender o funcionamento de um SCR, bem como suas formas de disparo e de bloqueio.

Aprender esboçar a forma de onda sobre a carga em circuitos com SCR.

## 5.1 Funcionamento do SCR

O dispositivo SCR (*Silicon Controlled Rectifier* ou Retificador Controlado de Silício) é um diodo controlado de silício. Este componente faz parte da família dos tiristores.

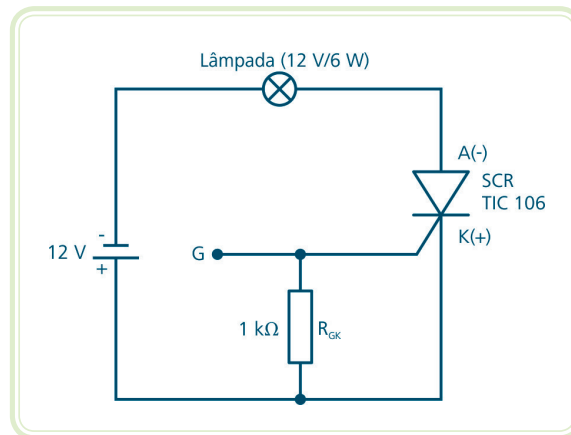
Os tiristores são uma família de componentes que possuem em comum a característica do disparo, que será explicada mais a diante. O SCR é construído por quatro camadas de material semicondutor: PNPN ou NPNP. Ele possui três terminas, chamados anodo, cátodo e gatilho. A Figura 5.1 mostra o símbolo usado para representá-lo.



**Figura 5.1: Símbolo do SCR**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

A Figura 5.2 apresenta o primeiro exemplo de um circuito utilizando um SCR.



**Figura 5.2: Circuito utilizando SCR**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

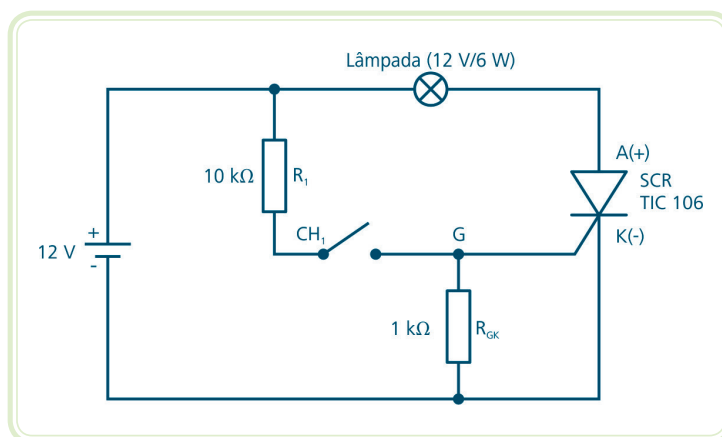
Observe que no circuito da Figura 5.2 o SCR está polarizado reversamente, ou seja, o anodo está negativo em relação ao cátodo. Portanto, ele funciona como uma chave aberta e as lâmpadas permanecerão apagadas.



É importante observar que, se a polaridade da fonte for invertida, a lâmpada ainda continuará apagada.

## 5.2 O gatilho (G)

Para que o SCR entre em condução, além de estar diretamente polarizado (anodo positivo em relação ao cátodo), um pulso de tensão positiva deve ser aplicado no gatilho (G), conforme o circuito da Figura 5.3.



**Figura 5.3: Circuito de gatilho**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

Portanto, com a chave  $CH_1$  aberta, apesar de o SCR estar diretamente polarizado ele não conduz, e a lâmpada permanecerá apagada. Quando desejado, a lâmpada pode ser acesa, bastando apenas fechar a chave  $CH_1$ . Após acender a lâmpada, ou seja, após disparar o SCR, a chave  $CH_1$  pode ser aberta sem fazer com que a lâmpada se apague. Esta é uma característica dos tiristores em geral.

O gatilho serve só para disparar o SCR e, posteriormente, perde função. Para bloquear o SCR é necessário que a corrente que ele conduz entre anodo e cátodo seja anulada. Para este circuito isso só é possível se a fonte de 12 V for desligada.

### 5.3 Curva ideal do diodo e do SCR

Idealmente, tanto no diodo como no SCR, quando a tensão é negativa, ocorre o bloqueio e a corrente é nula para qualquer tensão. Quando a tensão é positiva, o diodo conduz. Já no SCR, mesmo que seja aplicada tensão positiva, ele continua bloqueado, a não ser que seja aplicado um pulso no gatilho. Dessa maneira, o SCR também passa a conduzir, comportando-se como um curto-circuito idealmente.

A Figura 5.4 mostra o comportamento desses dois dispositivos, conforme a polarização aplicada.

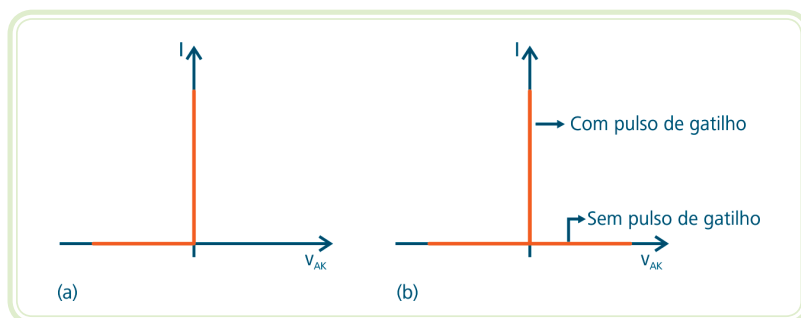
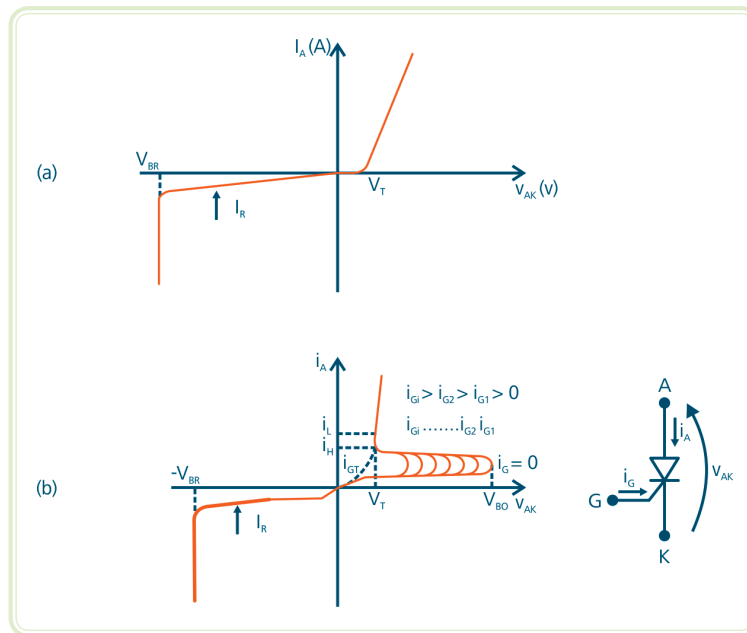


Figura 5.4: Curvas ideais do diodo (a) e do SCR (b)

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

### 5.4 Curva real do diodo e do SCR

A Figura 5.5 mostra a curva real do diodo e do SCR.



**Figura 5.5: Curva real do diodo (a) e curva real do SCR (b)**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

Existem três tipos de polarização possíveis para o SCR:

- a) **Polarização reversa** – quando  $V_{AK} < 0$ , o SCR funciona como uma chave aberta, ou seja, não conduz. Na realidade, existe uma corrente de polarização reversa muito baixa, geralmente na ordem de alguns nA, assim como ocorre nos diodos. Porém, quando a tensão reversa atinge o valor da tensão de ruptura reversa  $V_{BR}$ , o dispositivo conduz.
- b) **Polarização direta em bloqueio** – há várias curvas parametrizadas pela corrente de gatilho  $i_G$ . Quando  $i_G = 0$ , o SCR permanece bloqueado, desde que a tensão seja inferior a  $V_{BO}$  (tensão de disparo). Quando  $V_{AK} = V_{BO}$ , o SCR dispara e a corrente cresce, sendo limitada pela resistência da carga, colocada em série com o SCR.
- c) **Polarização direta com condução** – para entrar em condução o SCR deve conduzir uma corrente suficiente, cujo valor mínimo recebe o nome de corrente de retenção  $I_L$ . O SCR não entrará em condução, se a corrente de gatilho for suprimida antes que a corrente de anodo atinja o valor  $I_L$ . Este valor  $I_L$  é geralmente de duas a três vezes a corrente de manutenção  $I_H$  que, uma vez retirada a corrente de gatilho, é a suficiente para manter o estado de condução.



A corrente de retenção  $I_L$  deve ser estabelecida entre o anodo e o catodo do SCR para que ele passe a conduzir. Após a condução, esta corrente pode ser reduzida até o valor da corrente de manutenção  $I_H$ , que, mesmo assim, o SCR continua conduzindo.

De acordo com a curva real do SCR, quanto menor a tensão  $V_{AK}$ , maior a corrente de gatilho necessária para disparar o SCR. Isto é verdade até o limite de  $I_G = I_{GT}$  (corrente de gatilho com disparo).  $I_{GT}$  é a mínima corrente de gatilho que garante o disparo do SCR com tensão direta de condução  $V_T$ . Portanto, com  $I_{GT}$  aplicada, é como se o SCR fosse um diodo.

Em condução, a queda de tensão no SCR é igual a  $V_T$  (valor típico de 1,5 V).

## 5.5 Condições de disparo e bloqueio do SCR

Vimos que, para que um SCR seja disparado, ele deve estar diretamente polarizado e um pulso de tensão positiva deve ser aplicado no gatilho (G). Este pulso de tensão deverá garantir uma corrente mínima  $I_{GT}$  no terminal de gatilho. Além disto, para entrar em condução, o SCR deve conduzir uma corrente entre anodo e cátodo ( $I_A$ ) maior do que a corrente de retenção  $I_L$ . Podemos resumir as condições de disparo conforme:

$$\begin{aligned}V_{GK} &\geq V_{GT} \\ I_G &\geq I_{GT} \\ V_{AK} &\geq V_T \\ I_A &\geq I_L\end{aligned}$$

As duas primeiras condições são as mais importantes e serão estudadas com maiores detalhes na Aula 6.

Para se obter o bloqueio do SCR, basta polarizar reversamente o SCR ou fazer com que a corrente entre anodo e cátodo ( $I_A$ ) caia abaixo do seu valor de manutenção  $I_H$ . Podemos resumir as condições de bloqueio conforme:

$$\begin{aligned}V_{AK} &< 0 \\ \text{ou} \\ I_A &< I_H\end{aligned}$$

No item 5.8, serão mostrados alguns circuitos que realizam a comutação ou bloqueio de um SCR utilizando esses princípios.



No símbolo  $I_L$  referente à corrente de retenção, o L refere-se a *Latching Current*, em inglês. Já no símbolo  $I_H$  referente à corrente de manutenção, o H refere-se a *Holding Current*.



## 5.6 Analogia de um SCR com dois transistores

Na Figura 5.6, está representada uma analogia entre um SCR e dois transistores. Observe que o SCR é subdividido em dois transistores: um do tipo PNP e outro do tipo NPN. Quando o anodo está positivo em relação ao catodo, ou seja, o potencial do emissor do transistor  $T_1$  está positivo em relação ao potencial do emissor do transistor  $T_2$ , o SCR está pronto para conduzir. Quando é aplicada uma tensão na base do transistor  $T_2$  (gatilho do SCR), ele conduz e ativa a base do transistor  $T_1$ . Agora os dois transistores estão conduzindo, e o transistor  $T_1$  passa a alimentar a base do transistor  $T_2$ , estabelecendo uma realimentação. Dessa forma, mesmo que a tensão no terminal G seja suprimida, o circuito permanece conduzindo.

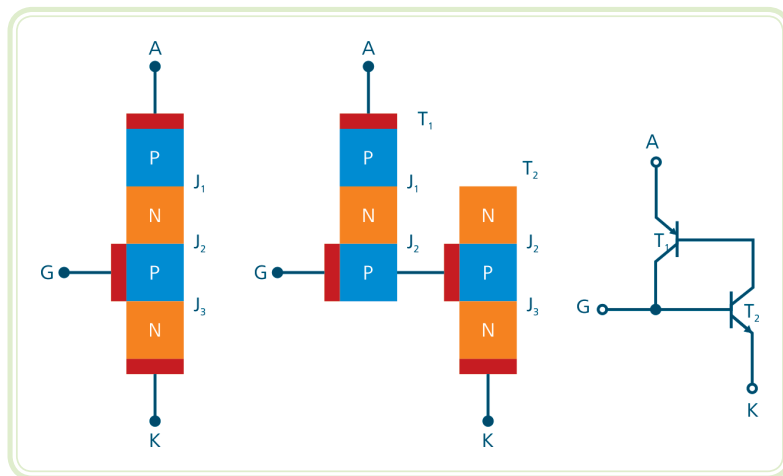


Figura 5.6: Analogia entre um SCR e dois transistores

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

Com  $V_{AK} < 0$ , o SCR está polarizado reversamente e não conduz. Isso ocorre porque duas junções estão reversamente polarizadas ( $J_1$  e  $J_3$ ) e uma junção polarizada diretamente ( $J_2$ ). A corrente é nula em toda faixa da tensão reversa.

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

Na polarização direta, existem duas junções polarizadas diretamente ( $J_1$  e  $J_3$ ). Entretanto, ainda não é possível fluir corrente pelo SCR, pois a junção  $J_2$  está polarizada reversamente. Há apenas uma corrente de fuga de baixo valor. Porém, se foi aplicado um pulso de corrente no gatilho, os portadores injetados causarão um fenômeno de avalanche na junção  $J_2$  levando o SCR ao disparo.

## 5.7 Outros métodos de disparos

A seguir serão apresentados outros métodos para se obter o disparo de um SCR.

### 5.7.1 Disparo por sobretensão

Quando o SCR está polarizado diretamente e sem corrente no gatilho, a junção  $J_2$  está reversamente polarizada. Portanto, a corrente do SCR é muito pequena, formada apenas pelos portadores minoritários. Com o aumento de  $V_{AK}$ , esses portadores são acelerados na junção  $J_2$ , podendo atingir uma energia tão grande que provoque o fenômeno de avalanche.

Esse fenômeno faz com que muitos elétrons choquem-se e saiam das órbitas dos átomos da rede. Estando disponíveis para condução, esses elétrons permitem que a corrente de anodo cresça. Esse processo de disparo, nem sempre destrutivo, raramente é utilizado na prática. Para o gatilho aberto ( $I_G = 0$ ), a tensão na qual o SCR passa ao estado de condução, é chamado tensão de *breakover* ( $V_{BO}$ ).

### 5.7.2 Disparo por variação de tensão (dv/dt)

A corrente num capacitor é dada pela Equação 5.1

Equação 5.1

$$I = C \times \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

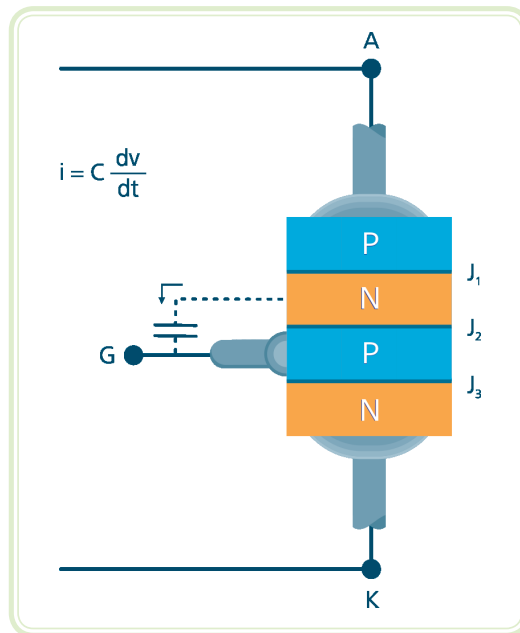
Em que: I – corrente no capacitor em A

C – capacitância do capacitor F

$\Delta V$  – variação de tensão no capacitor V

$\Delta t$  – variação de tempo em s

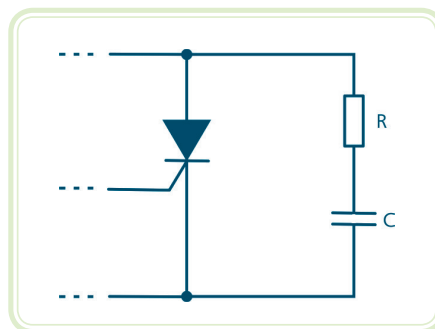
Em um SCR polarizado diretamente existem cargas armazenadas na junção  $J_2$ : íons positivos de um lado e íons negativos do outro. Isso é como um capacitor carregado. Observe a Figura 5.7.



**Figura 5.7: Capacitância da junção J<sub>2</sub>**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

Mesmo não havendo pulso no gatilho, a capacitância da junção J<sub>2</sub> pode fazer circular uma corrente de gatilho, devido à variação de tensão. Se a variação de tensão for muito grande, a corrente resultante pode ser grande o suficiente para disparar o SCR. Esse disparo, normalmente indesejado, pode ser evitado pela ação de um circuito chamado *snubber*, formado por um resistor em série com um capacitor, de acordo com o circuito da Figura 5.8.



**Figura 5.8: Circuito *snubber***

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

O dimensionamento do circuito *snubber* deve ser feito de modo que ele funcione como um curto-circuito para frequências acima de um valor que possa provocar uma variação de tensão suficiente para disparar o SCR.



### 5.7.3 Disparo por aumento de temperatura

A corrente que circula por uma junção reversamente polarizada é extremamente dependente da temperatura. Ela é composta por portadores minoritários gerados termicamente. Essa energia pode ser suficiente para fazer com que o SCR dispare.

### 5.7.4 Disparo por luz ou radiação

A incidência de energia radiante sob a forma de fótons (luz), raios gama, nêutrons, prótons, elétrons ou raios X, sobre uma janela adequadamente colocada no SCR, pode dispará-lo. Você está lembrado de que a corrente de fuga de uma junção reversamente polarizada é dependente da radiação e da temperatura? Essa energia pode ser suficiente para quebrar as ligações covalentes do material semiconductor, liberando pares elétrons-lacunas e disparando o SCR. Um dispositivo com esse modo de disparo é chamado LASCR (*Light Activated Silicon Controlled Rectifier*).

## 5.8 Métodos de comutação ou bloqueio de um SCR

Bloquear ou comutar significa cortar a corrente que ele conduz e impedir que ele retorne à condução. Naturalmente, leva certo tempo para que o SCR possa assumir essa condição de bloqueio.

A seguir serão apresentadas algumas formas de bloqueio:

### 5.8.1 Comutação natural

O bloqueio de um SCR ocorre quando a corrente de anodo se torna menor do que a corrente de manutenção ( $I_H$ ). Em um circuito de corrente alternada, a corrente passa pelo zero em algum ponto do ciclo. Isso já leva o SCR ao bloqueio ( $I_A < I_H$ ). A Figura 5.9 exemplifica esse tipo de circuito. Portanto, ocorre bloqueio pelo zero da rede.

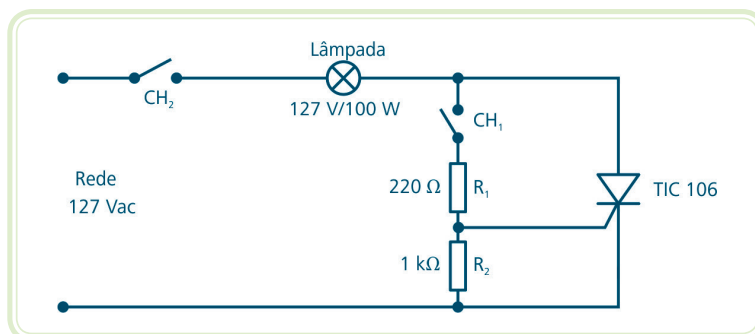


Figura 5.9: Circuito de comutação natural

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

## 5.8.2 Comutação forçada

A seguir são apresentadas duas maneiras de provocar o bloqueio do SCR de maneira forçada:

### a) Bloqueio por chave

Fechando-se  $CH_3$  da Figura 5.10, naturalmente a lâmpada não se apagará, pois a chave curto-circuita o SCR, ficando a lâmpada alimentada diretamente pela tensão da fonte. Como o SCR real não é exatamente um curto-circuito, toda corrente da lâmpada vai passar pela chave  $CH_3$  e a corrente de anodo do SCR cairá a zero ( $I_A < I_H$ ). O SCR então irá bloquear.

Consulte a folha de dados (*datasheet*) do SCR TIC106D acessando o link: [http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/166/322997\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/166/322997_DS.pdf)

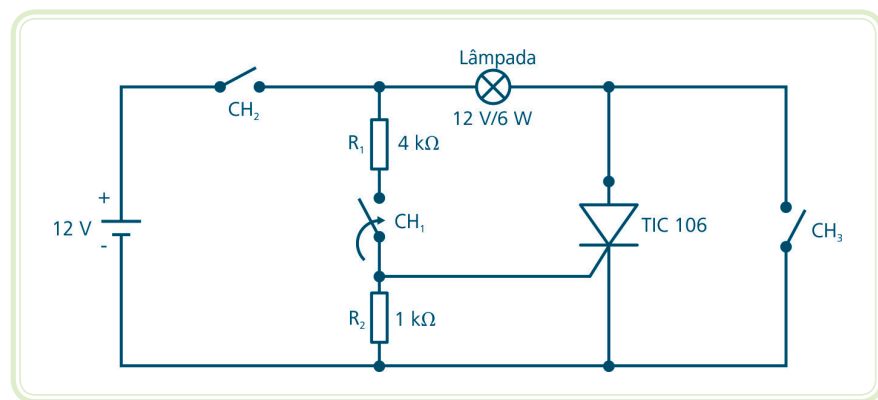


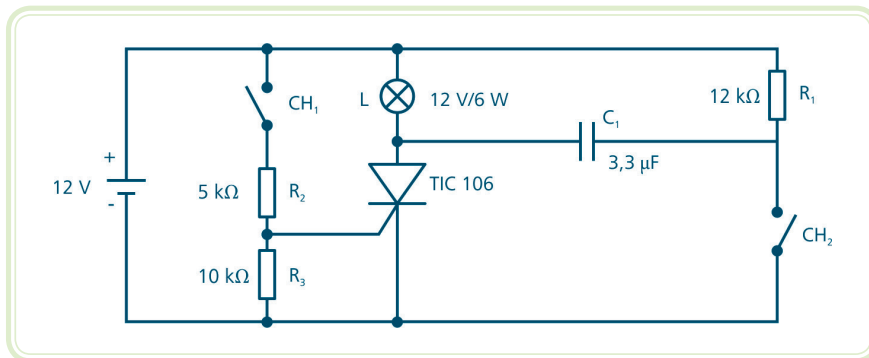
Figura 5.10: Circuito de bloqueio por chave

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

Após soltar a chave  $CH_3$ , a lâmpada se apaga e o SCR permanece bloqueado. Assim, a lâmpada só acenderá novamente se a chave  $CH_2$  for novamente fechada, provocando a corrente de gatilho no SCR.

### b) Bloqueio por capacitor

Fechando-se a chave  $CH_1$  do circuito da Figura 5.11, ocorre a alimentação do circuito de gatilho. O SCR dispara e a lâmpada se acende.



**Figura 5.11: Circuito de bloqueio por capacitor**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

Já que o SCR está conduzindo, é criado um caminho de corrente para que o capacitor  $C_1$  se carregue.

Ao fechar a chave  $CH_2$ , o capacitor fica em paralelo com o SCR e aplica sobre ele uma tensão reversa, bloqueando-o.

## Resumo

Nessa aula, você aprendeu sobre o funcionamento do SCR. Foi visto também as diversas formas de disparo e de bloqueio de um SCR.

## Atividades de aprendizagem



1. Explique as principais diferenças e semelhanças entre um diodo e um SCR.
2. Cite e explique pelo menos duas formas de se obter disparo de SCR, além da aplicação de pulsos de tensão no seu gatilho.
3. Explique uma maneira de evitar que o SCR dispare indesejadamente devido à variação de tensão.
4. Cite e explique pelo menos duas formas de se obter o bloqueio de um SCR.
5. Explique o funcionamento do SCR, baseado na analogia com os dois transistores.
6. Explique o mecanismo de bloqueio por chave de um SCR na Figura 5.10, após a chave  $CH_3$  ser fechada.



## Aula 6 – Circuitos utilizando SCR

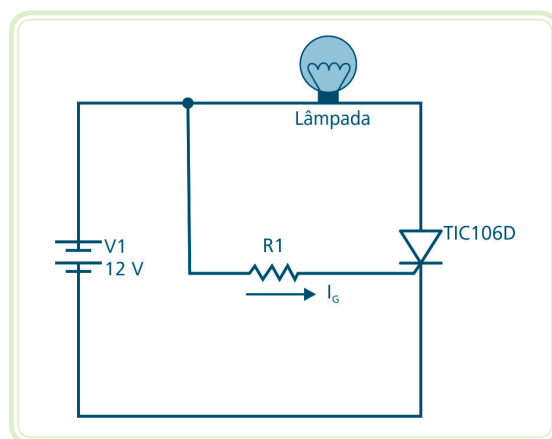
### Objetivos

Aprender algumas aplicações práticas utilizando SCR.

Aprender a dimensionar circuito de disparo para controlar fase em carga resistiva utilizando SCR.

### 6.1 Circuito em corrente contínua

A Figura 6.1 apresenta um circuito utilizando SCR em corrente contínua. Este circuito tem fim apenas didático, pois ele não é utilizado na prática.



**Figura 6.1: Circuito utilizando SCR em corrente contínua**

Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Consultando o catálogo do SCR TIC106D, foram obtidas as seguintes informações:

$$V_{GT} = 0,6 \text{ V}$$
$$I_{GT} = 200 \mu\text{A}$$

Para que o SCR dispare, uma corrente no mínimo igual à  $I_{GT}$  deve ser aplicada ao gatilho do SCR. Além disso, a tensão entre anodo e cátodo ( $V_{GK}$ ) deve ser maior ou igual a 0,6 V ( $V_{GT}$ ). Neste caso, o resistor  $R_1$  irá determinar (ou limitar) a corrente de gatilho  $I_G$ .



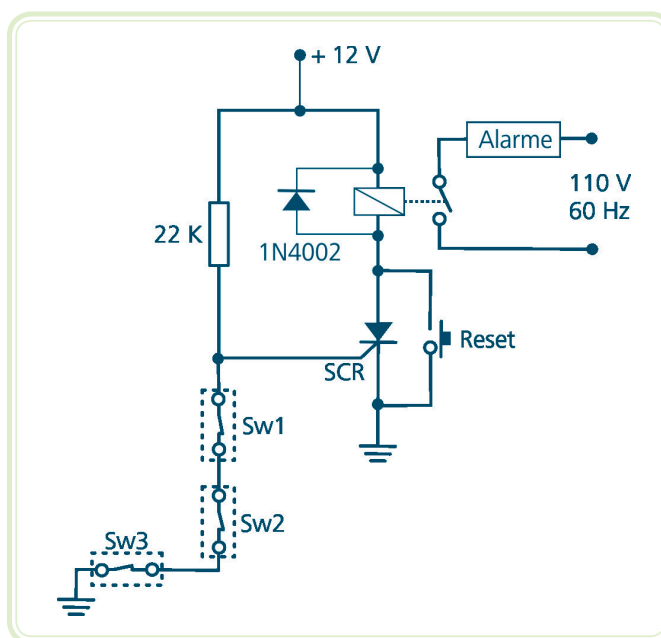
Consulte a folha de dados (datasheet) do SCR TIC116B acessando o link: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/PowerInnovations/mXyzzvvr.pdf>

Para dimensionar  $R_1$ , basta aplicar a Lei de Ohm na primeira malha do circuito. Os cálculos são apresentados a seguir:

$$I_G = \frac{12 - 0,6}{R_1} \rightarrow R_1 = \frac{12 - 0,6}{200 \times 10^{-6}} = 57000 \Omega$$
$$R_1 < 57 \text{ k}\Omega$$

## 6.2 Circuito de alarme 1

O circuito da Figura 6.2 mostra um dispositivo de alarme simples.



**Figura 6.2:** Circuito simples de alarme utilizando SCR

Fonte: CTISM, adaptado de Zuim, 2005



O método de bloqueio por chave visto na Aula 5, utilizando uma chave NA em paralelo com o SCR, é muito utilizado em circuitos de corrente contínua. O Circuito de alarme 1 é um exemplo desta aplicação.

Observe que, inicialmente, as chaves Sw1, Sw2 e Sw3 estão fechadas (NF), levando o gatilho do SCR a zero volt. Portanto, o SCR estará inicialmente bloqueado.

Quando qualquer uma das chaves (Sw1, Sw2 ou Sw3) for acionada, os seus contatos serão abertos e, conseqüentemente, o SCR irá disparar. Observe que nesta situação, o gatilho do SCR passa a receber corrente. Quando o SCR entra em condução, a bobina do relé é energizada e, conseqüentemente, o seu contato é fechado. Neste momento, o alarme é acionado.

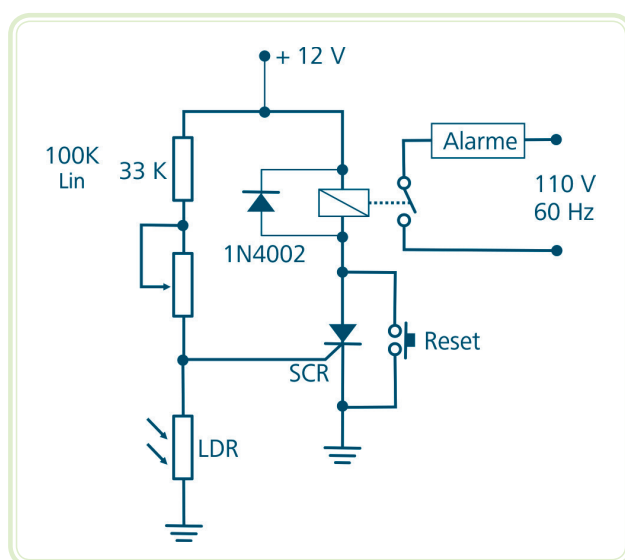
Quando qualquer chave for acionada, ou seja, se tornar aberta, uma corrente irá circular através do resistor e do gatilho do SCR, disparando-o. O diodo,

em paralelo com a bobina do relê, tem finalidade de proteção contra surtos de tensão durante a retração do campo magnético. Este diodo é conhecido como diodo de roda livre.

Para levar o SCR à condição de bloqueio e, conseqüentemente, desativar o alarme, basta pressionar a chave "reset". Ao pressionar esta chave, a corrente que passa pelo SCR se anula ( $I_A < I_H$ ) e ele é bloqueado.

### 6.3 Circuito de alarme 2

O circuito da Figura 6.3 tem funcionamento semelhante ao circuito da Figura 6.2. No entanto, o disparo ocorre quando não existe iluminação sobre o LDR.



**Figura 6.3: Alarme utilizando LDR e SCR**

Fonte: CTISM, adaptado de Zuim, 2005

A resistência do LDR é baixa quando ele está iluminado. Neste momento, o SCR está bloqueado. A resistência do LDR aumenta quando a iluminação é interrompida. Esta situação poderia ocorrer, por exemplo, quando houvesse o corte de um feixe luminoso direcionado ao LDR.

O aumento da resistência do LDR provoca aumento de tensão e de corrente no gatilho do SCR, levando-o à condução. Nesta condição, o relê é ativado, acionando o alarme. Para interromper o alarme, basta pressionar o botão "reset".

## 6.4 SCR como retificador de meia onda

A Figura 6.4 apresenta um circuito que utiliza um SCR como retificador de meia onda.

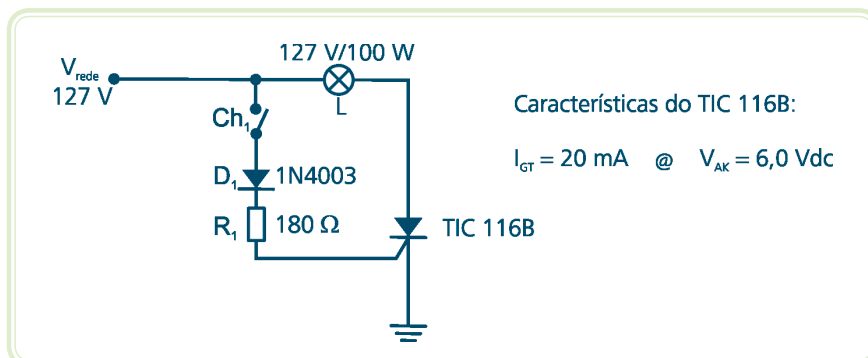


Figura 6.4: SCR como retificador de meia onda

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009



Lembre-se que a tensão da rede pode ser definida por uma função senoidal temporal:  $v(t) = V_p \text{sen} \omega t$ ; ou uma função senoidal angular:  $v(\alpha) = V_p \text{sen} \alpha$ .  $V_p$  é a tensão de pico da rede em volts;  $\omega$  é a velocidade angular em radianos por segundo; e  $\alpha$  é o ângulo em radianos.

Segundo a sua folha de dados, o SCR TIC 116B precisa de 20 mA de corrente de gatilho para garantir o disparo, quando VAK for de 6 VCC. Além disso, para o disparo, a tensão entre anodo e catodo (V<sub>GK</sub>) deve ser igual a V<sub>GT</sub> (aproximadamente igual a 0,6 V). Desta forma, logo no início do semiciclo positivo, a tensão da rede de alimentação atinge um valor suficientemente alto para garantir as condições de disparo de SCR, que conduzirá e acenderá a lâmpada.

Desconsiderando a queda de tensão no diodo e entre gatilho e cátodo, após a condução do SCR ( $V_{GT}$ ), a tensão da rede em que o disparo ocorre pode ser calculada da seguinte maneira:

$$I_{GT} \cong \frac{V_{REDE}}{R_1} \rightarrow 20 \times 10^{-3} = \frac{V_{REDE}}{180} \rightarrow V_{REDE} = 3,6 \text{ V}$$

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

Com quantos graus, a tensão da rede atinge 6 V?



$$v(t) = V_p \times \text{sen}\omega \times t \quad \text{ou} \quad v(\alpha) = V_p \times \text{sen}\alpha$$

$$6 = 179,6 \times \text{sen}\alpha$$

$$\text{sen}\alpha = \frac{6}{179,6}$$

$$\arcsen = \frac{6}{179,6} = \alpha$$

$$\alpha = 1,9^\circ$$

Em que:  $\alpha$  – ângulo de disparo em graus

Portanto, praticamente todo semiciclo positivo é aplicado à lâmpada, como pode ser observado pelas formas de onda da Figura 6.5.

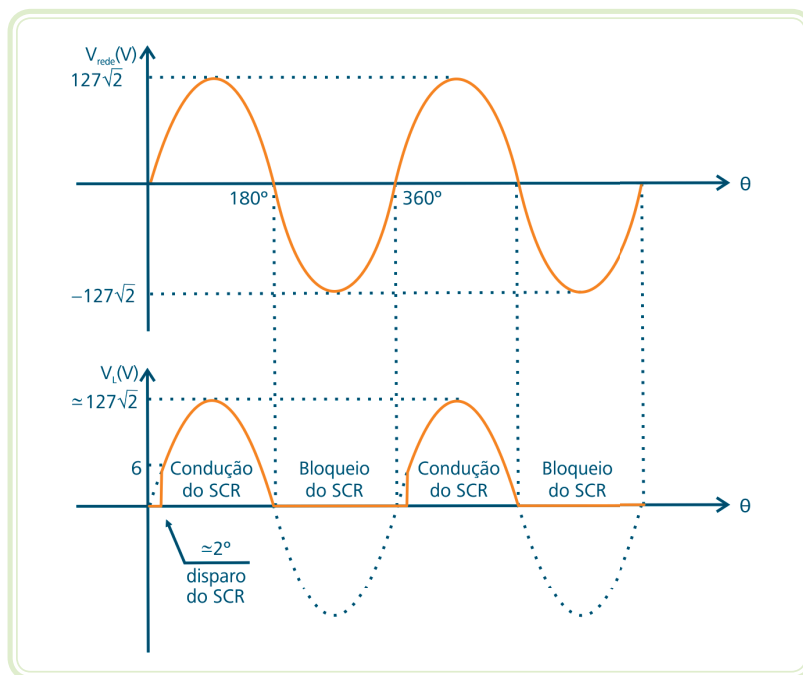


Figura 6.5: Formas de onda no circuito retificador de meia onda com SCR

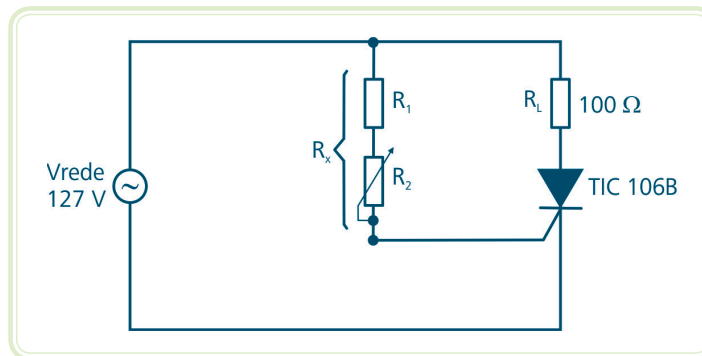
Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

## 6.5 SCR controlando fase numa carga resistiva

O controle de fase numa carga resistiva utilizando um SCR será abordado na forma de exemplo no item a seguir.

### Exemplo

Observe o circuito da Figura 6.6.



**Figura 6.6: Controle de fase numa carga resistiva utilizando SCR**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

### Dados

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

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

### Resposta

- a) Calcule os valores do resistor fixo  $R_1$  e da resistência variável (potenciômetro)  $R_2$ , para disparo do SCR em  $2^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , em relação à tensão da rede.

#### Disparo em $2^\circ$

$$V_{REDE} - R_x \times I_{GT} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{REDE} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{GT}}{I_{GT}}$$

$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(2^\circ) - 0,6}{0,0002} \rightarrow R_x = 28.340,6 \Omega$$

#### Disparo em $15^\circ$

$$V_{REDE} - R_x \times I_{GT} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{REDE} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{GT}}{I_{GT}}$$

$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(15^\circ) - 0,6}{0,0002} \rightarrow R_x = 229.461,1 \Omega$$

### Disparo em 30°

$$V_{\text{REDE}} - R_x \times I_{\text{GT}} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{\text{REDE}} - V_{\text{GT}}}{I_{\text{GT}}} = \frac{V_{\text{rms}} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{\text{GT}}}{I_{\text{GT}}}$$
$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(30^\circ) - 0,6}{0,0002} \rightarrow R_x = 445.012,8 \Omega$$

### Disparo em 60°

$$V_{\text{REDE}} - R_x \times I_{\text{GT}} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{\text{REDE}} - V_{\text{GT}}}{I_{\text{GT}}} = \frac{V_{\text{rms}} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{\text{GT}}}{I_{\text{GT}}}$$
$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(60^\circ) - 0,6}{0,0002} \rightarrow R_x = 774.713,0 \Omega$$

### Disparo em 90°

$$V_{\text{REDE}} - R_x \times I_{\text{GT}} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{\text{REDE}} - V_{\text{GT}}}{I_{\text{GT}}} = \frac{V_{\text{rms}} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{\text{GT}}}{I_{\text{GT}}}$$
$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(90^\circ) - 0,6}{0,0002} \rightarrow R_x = 895.025,6 \Omega$$

Portanto, podem ser escolhidos os seguintes resistores de acordo com a Tabela 6.1.

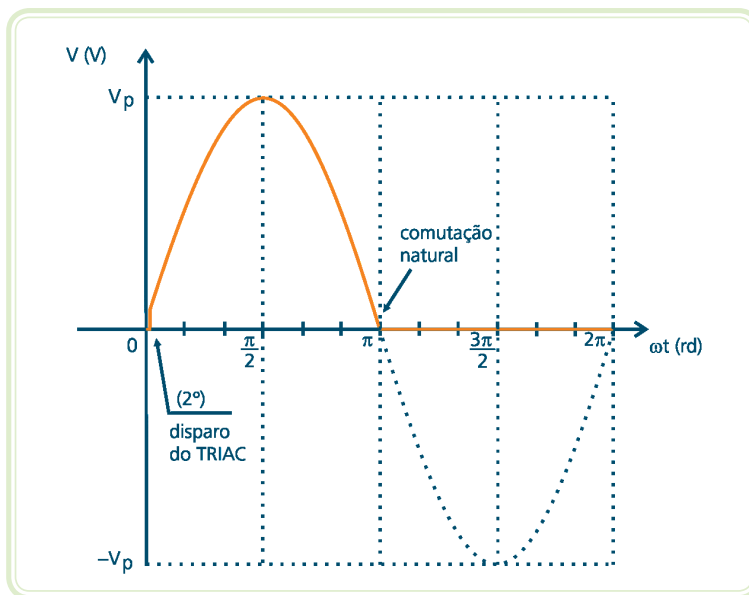
**Tabela 6.1: Ângulos de disparo e componentes relacionados**

Ângulo de disparo ( $\alpha$ )	$R_x$ ( $\Omega$ )	$R_1$ (k $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )
2°	28.340,6	20	8.340,6
15°	229.426,1	20	208.426,1
30°	445.012,8	20	425.012,8
60°	774.713,0	20	754.713,0
90°	895.025,6	20	875.025,6

Fonte: Autores

b) Desenhe as formas de onda da tensão sobre a carga.

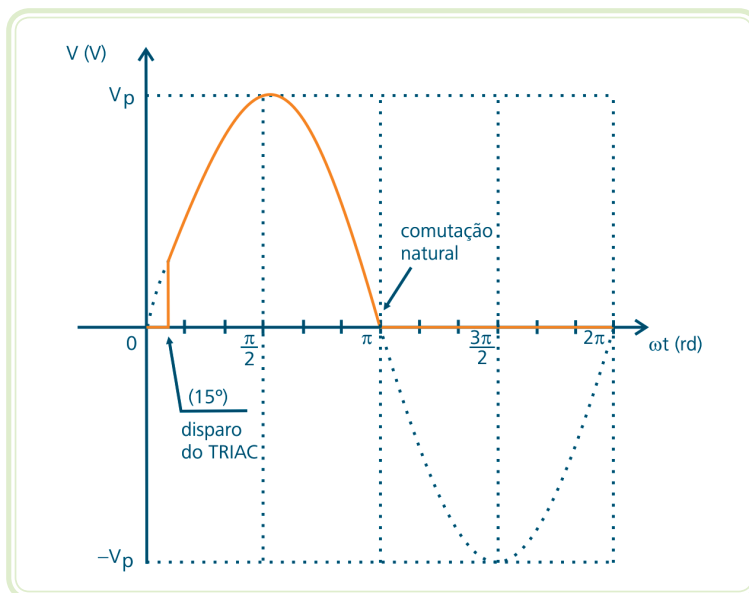
**Disparo em 2°** (Figura 6.7)



**Figura 6.7:** Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 2°

Fonte: CTISM, adaptado dos autores

**Disparo em 15°** (Figura 6.8)



**Figura 6.8:** Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 15°

Fonte: CTISM, adaptado dos autores

### Disparo em 30° (Figura 6.9)

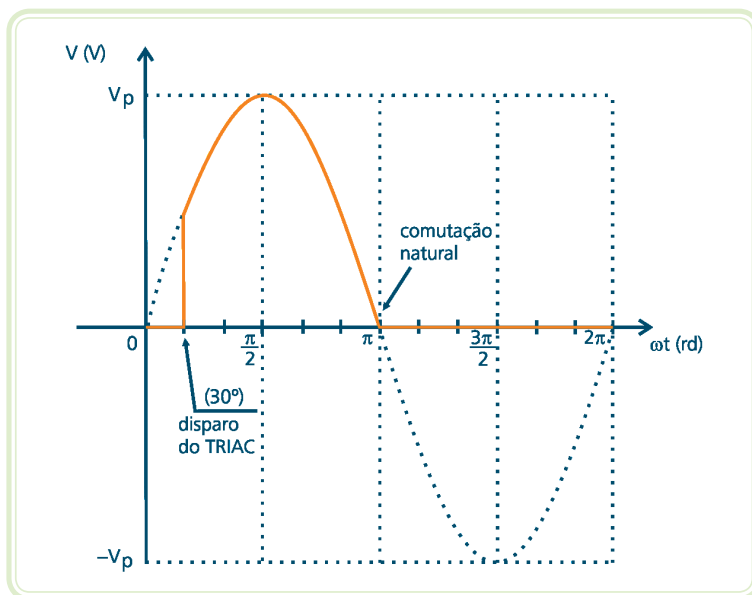


Figura 6.9: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 30°

Fonte: CTISM, adaptado dos autores

### Disparo em 60° (Figura 6.10)

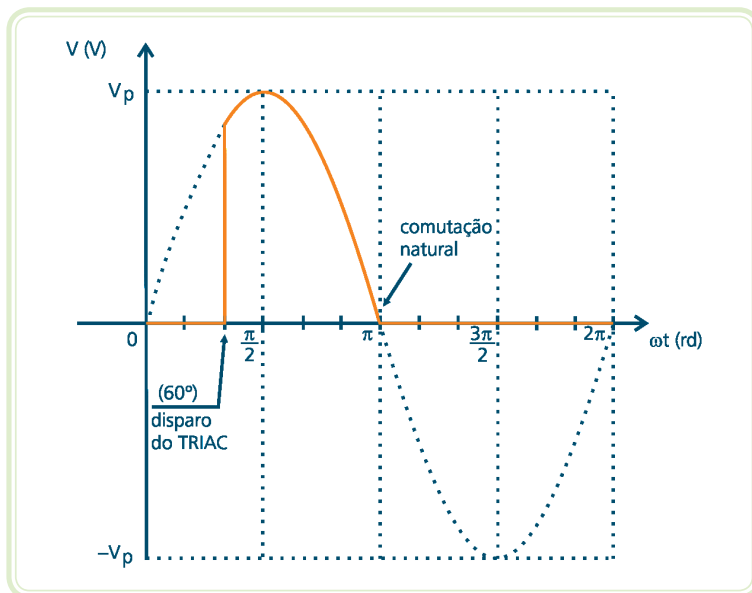


Figura 6.10: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 60°

Fonte: CTISM, adaptado dos autores

### Disparo em 90° (Figura 6.11)

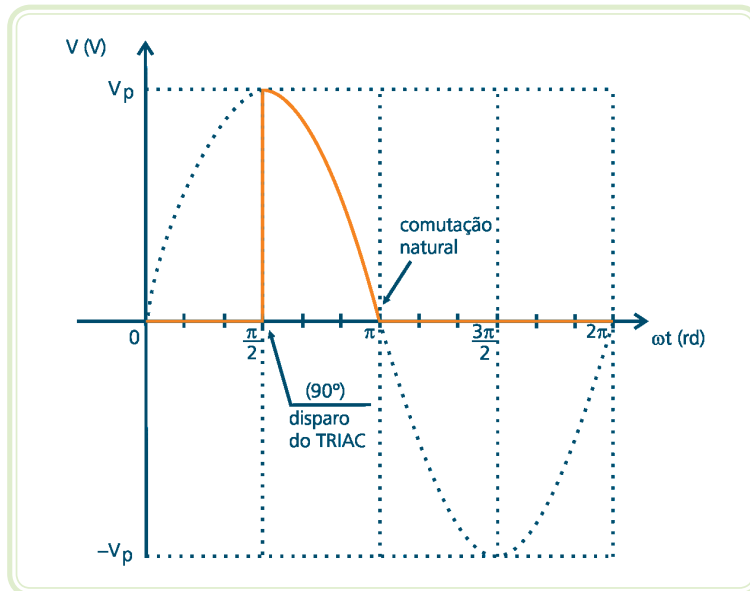


Figura 6.11: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 90°

Fonte: CTISM, adaptado dos autores

- c) Calcule o valor médio e eficaz da tensão na carga para os valores de  $\alpha$ , bem como a potência dissipada.



O valor médio da tensão na carga para uma senóide, retificada em meia onda, com ângulo de disparo  $\alpha$ , é dado pela Equação 6.1.

Equação 6.1

$$V_m = \frac{V_p \times (1 + \cos\alpha)}{2\pi} \quad [V]$$



O valor eficaz da tensão na carga para uma senóide, retificada em meia onda, com ângulo de disparo  $\alpha$ , é dado pela Equação 6.2.

Equação 6.2

$$V_{rms} = V_p \times \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{\alpha}{720} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{8\pi}} \quad [V_{rms}]$$

A potência dissipada pela carga é dada pela Equação 6.3.



Equação 6.3

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R_L} \quad [W]$$

A Tabela 6.2 mostra os valores da tensão média, da tensão eficaz e da potência dissipada pela carga para cada ângulo de disparo.

**Tabela 6.2: Tensões média, eficaz e potência dissipada pela carga para cada ângulo de disparo**

Ângulo de disparo ( $\alpha$ )	$V_m$ (V)	$V_{rms}$ (V <sub>rms</sub> )	P (W)
2°	57,2	89,8	80,64
15°	56,2	89,6	80,28
30°	53,3	88,5	78,32
60°	42,9	80,5	64,80
90°	28,6	63,5	40,32

Fonte: Autores

## Resumo

Nessa aula, foram abordadas algumas aplicações que utilizam SCR, como os dois circuitos de alarme, o circuito retificador de meia onda e o circuito controlador de fase.

## Atividades de aprendizagem



1. O circuito da Figura 6.12 é alimentado por uma fonte CA de 127 V<sub>rms</sub>. Calcule os valores do resistor R<sub>x</sub> para disparo do SCR em 2°, 15°, 30°, 60° e 90° (ângulo de disparo em relação à tensão da rede) e desenhe as formas de onda da tensão na carga R<sub>L</sub> de 100 ohms e no SCR. Calcule o valor médio e eficaz da tensão na carga para os valores de  $\alpha$ . Calcule também a potência dissipada. Para o cálculo do valor dos resistores no circuito de gatilho, considerar a queda de tensão do diodo D1 igual a 0,7 V.

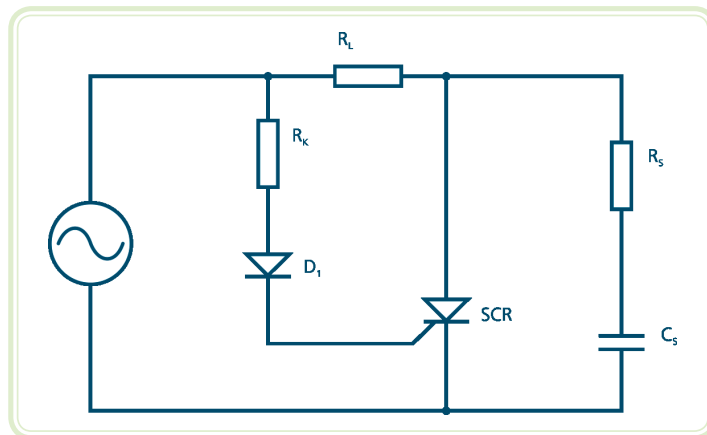
### Dados

$$I_{GT(tip)} = 200 \mu A$$

$$V_{GT(tip)} = 0,6 V$$

$$I_{Tmax} = 8 A$$

$$V_{RRM} = 200 V$$



**Figura 6.12: Circuito do Exercício 1 – circuito**  
Fonte: CTISM, adaptado dos autores



# Aula 7 – Triodo de Corrente Alternada (TRIAC)

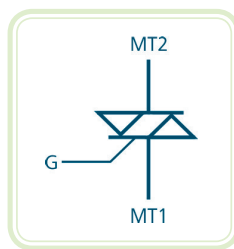
## Objetivos

Compreender o funcionamento de um TRIAC.

Aprender as principais diferenças entre um SCR e um TRIAC.

## 7.1 Funcionamento do TRIAC

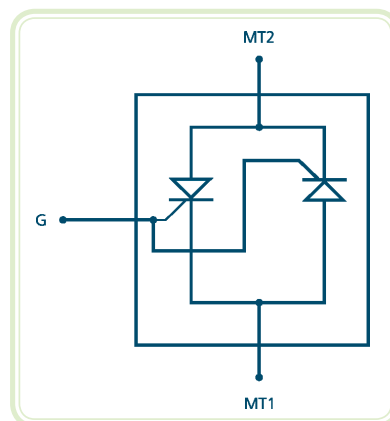
O TRIAC funciona como um interruptor controlado e apresenta as mesmas características funcionais de um SCR. No entanto, ele possui a vantagem de poder conduzir nos dois sentidos de polarização. A Figura 7.1 mostra sua simbologia.



**Figura 7.1:** Símbolo utilizado para representar o TRIAC, em que: G é o gatilho; MT1 é o terminal principal 1 e MT2 o terminal principal 2

Fonte: CTISM, adaptado de Zuim, 2005

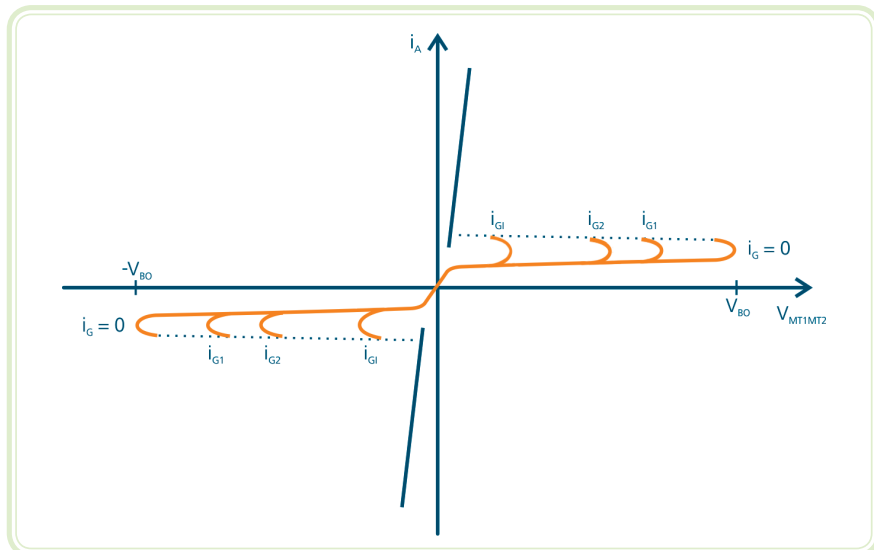
O TRIAC funciona como dois SCRs em anti-paralelo, de acordo com a Figura 7.2.



**Figura 7.2:** Analogia de um TRIAC com dois SCRs em anti-paralelo

Fonte: CTISM, adaptado de Zuim, 2005

A Figura 7.3 mostra a curva característica real de um TRIAC.



**Figura 7.3: Curva característica de um TRIAC**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

O TRIAC entra em condução de modo análogo ao SCR, ou seja:

- Disparo por gatilho, ou seja, quando for aplicada uma corrente de gatilho.
- Disparo por sobretensão, ou seja, quando  $V_{AK}$  ultrapassa a tensão de *breakover* sem pulso no gatilho.
- Disparo por variação de tensão.
- Disparo por aumento de temperatura.
- Disparo por luz ou radiação.

Em condução, a queda de tensão entre os terminais MT1 e MT2 geralmente está entre 1 e 2 V.

O TRIAC pode ser disparado tanto por pulso positivo, quanto por pulso negativo. Isso não consegue ser explicado pela analogia a dois SCRs em anti-paralelo, já que o SCR só é disparado por pulso positivo em relação ao seu cátodo.

## 7.2 Modos de disparo do TRIAC

Existem quatro modos diferentes para disparo de um TRIAC, operando em quatro quadrantes. Tomando-se MT1 como referência, os quatro quadrantes são definidos pela polaridade de MT2 e o gatilho (G) em relação a MT1. A seguir são detalhados estes quatro modos de disparo.

- a) **Disparo no 1º quadrante** – os terminais MT2 e gatilho (G) estão positivos em relação a MT1.
- b) **Disparo no 2º quadrante** – o terminal MT2 está positivo e o terminal G está negativo, ambos em relação a MT1.
- c) **Disparo no 3º quadrante** – o terminal MT2 está negativo e o terminal G está negativo, ambos em relação a MT1.
- d) **Disparo no 4º quadrante** – o terminal MT2 está negativo e o terminal G está positivo, ambos em relação a MT1. Logo, a corrente entra em G.

A Figura 7.4 apresenta os quatro quadrantes de operação de um TRIAC

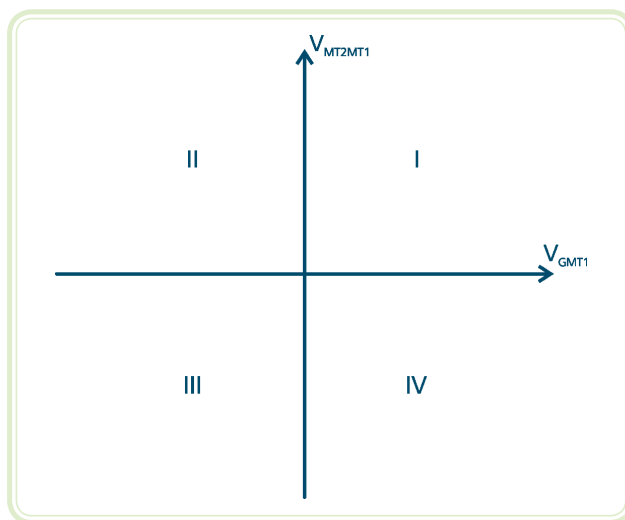


Figura 7.4: Quatro quadrantes de operação de um TRIAC

Fonte: Autores

No 1º e 3º quadrantes, obtêm-se maior sensibilidade de disparo para o TRIAC em relação às outras possibilidades. No 4º quadrante, a sensibilidade é pequena; e no 2º quadrante, é ainda mais reduzida, devendo ser utilizada somente em TRIACs concebidos especialmente para este fim. Portanto, o disparo de um TRIAC não é simétrico, ou seja, não dispara nas mesmas condições para os quatro quadrantes.



### Pergunta

Em circuitos de corrente alternada, como o TRIAC pode ser bloqueado se ele nunca fica reversamente polarizado?

### Resposta

Na passagem do sinal de tensão por zero a corrente principal ( $I_a$ ) também cai a zero e o TRIAC é bloqueado ( $I_a < I_H$ ).

## 7.3 Controle de onda completa com TRIAC

A Figura 7.5 mostra um circuito de controle de onda completa utilizando TRIAC.

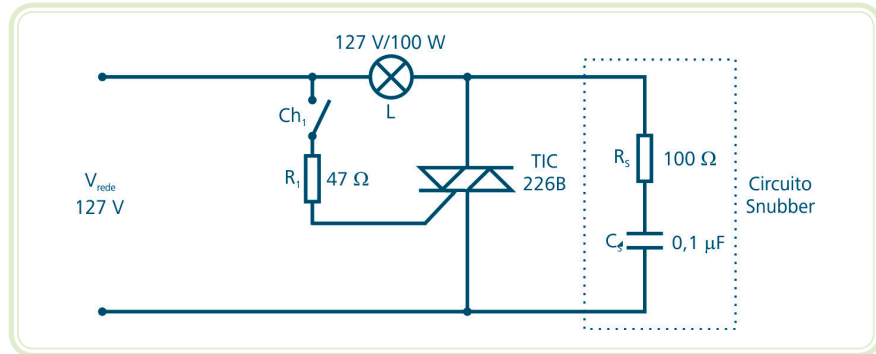


Figura 7.5: Circuito de controle de onda completa com TRIAC

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009



Consulte a folha de dados (datasheet) do TRIAC TIC226 acessando o link: [http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/166/323036\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/166/323036_DS.pdf)

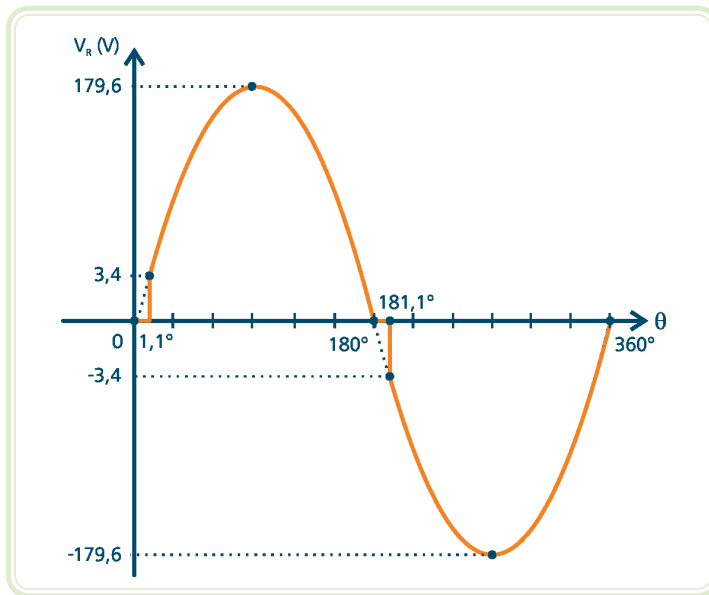
Observe que esse circuito efetua disparo no 1° e 3° quadrantes.

Considerando que este TRIAC possui módulos iguais de corrente de disparo ( $|I_{GT}| = 50 \text{ mA}$ ) para o 1° e o 3° quadrantes, podemos calcular em quais ângulos serão efetuados os disparos. Para isso, vamos considerar que a queda de tensão típica de disparo entre G e MT1 é  $V_{GT} = 1,2 \text{ V}$ .

$$I_{GT} = \frac{V_{REDE} - 1,2}{R_1} \rightarrow 50 \times 10^{-3} = \frac{V_p \times \text{sen}\alpha - 1,2}{47} = \frac{127 \times \sqrt{2} \text{sen}\alpha - 1,2}{47}$$

$$\text{sen}\alpha = 0,0198 \rightarrow \alpha = 1,13^\circ$$

Portanto, o TRIAC irá disparar em  $1,13^\circ$  (1° quadrante) e em  $181,13^\circ$  (3° quadrante). É importante lembrar que o TRIAC bloqueia quando o sinal de corrente entre os terminais MT1 e MT2 passa pelo zero da senoide. No caso deste circuito, como a carga (lâmpada incandescente) é puramente resistiva, a tensão passa por zero no mesmo instante da corrente, ou seja, a tensão e a corrente estão em fase. Neste circuito a lâmpada receberá praticamente todo o ciclo de onda, de acordo com a Figura 7.6.



**Figura 7.6: Forma de onda da tensão VR sobre a carga (lâmpada incandescente)**  
 Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

- a) Como você faria para alterar o ângulo de disparo?
- b) Como você faria para disparar o TRIAC em uma tensão pré-estabelecida?

Estas questões serão abordadas na próxima aula.

## Resumo

Nessa aula, você aprendeu sobre o funcionamento do TRIAC, inclusive sobre as diferenças e vantagens em relação a um SCR. Também foi apresentado o circuito retificador de onda completa.

## Atividades de aprendizagem



1. Para o circuito a seguir, responda:

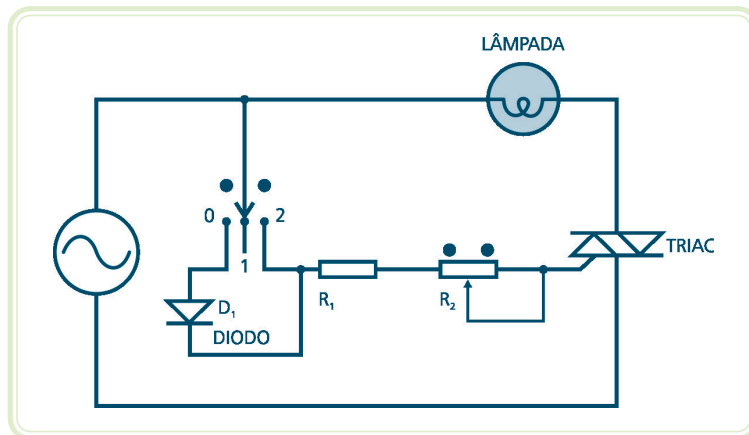
### Dados do TRIAC

$$I_{GT(max)} = 50 \text{ mA}$$

$$V_{GT(tip)} = 2,5 \text{ V}$$

$$I_{Tmax} = 8 \text{ A}$$

$$V_{RRM} = 200 \text{ V}$$



**Figura 7.8: Exercício 1 – circuito**

Fonte: Autores

- a) Explique o funcionamento do circuito, com a chave nas posições 0, 1 e 2.
  - b) Com a chave na posição 2, determine o ângulo de disparo do TRIAC, sabendo-se que, enquanto o TRIAC não estiver conduzindo a tensão sobre a lâmpada é nula. Desenhe as formas de onda da tensão na lâmpada ( $v_L$ ) e sobre o TRIAC ( $v_T$ ), indicando os valores de tensão e ângulo de disparo. Despreze a queda de tensão sobre o TRIAC quando em condução.
  - c) Com a chave na posição 1, determine o novo valor de  $R_1$  que proporciona um ângulo de disparo do TRIAC em  $45^\circ$  da tensão da rede, considerando uma queda de  $0,7\text{ V}$  sobre o diodo. Desenhe novamente as formas de onda da tensão na lâmpada ( $v_L$ ) e sobre o TRIAC ( $v_T$ ), indicando os valores de tensão e ângulo de disparo, desprezando a queda de tensão sobre o TRIAC, quando em condução.
  - d) Calcule a tensão média e a tensão eficaz na lâmpada, para um ângulo de disparo de  $45^\circ$ , com a chave nas posições 1 e 2, comparando os resultados.
2. Sabe-se que o disparo de um TRIAC não é simétrico. Qual a consequência disto na forma de onda da tensão sobre a carga em um circuito retificador de onda completa com TRIAC?
  3. Na verdade, as condições de disparo são diferentes para cada quadrante. Como ficaria a resolução do exemplo da Figura 7.5 se as correntes de disparo do  $1^\circ$  e  $3^\circ$  quadrantes fossem iguais a  $15\text{ mA}$  e  $-30\text{ mA}$ , respectivamente?

# Aula 8 – Circuitos utilizando TRIAC

## Objetivos

Aprender dimensionar circuito para controlar fase de carga resistiva utilizando TRIAC.

Compreender o funcionamento de um DIAC e de um circuito *dimmer*.

Compreender a função e o funcionamento de um acoplador óptico.

## 8.1 TRIAC controlando fase de uma carga resistiva

### Exemplo

Observe o circuito da Figura 8.1.

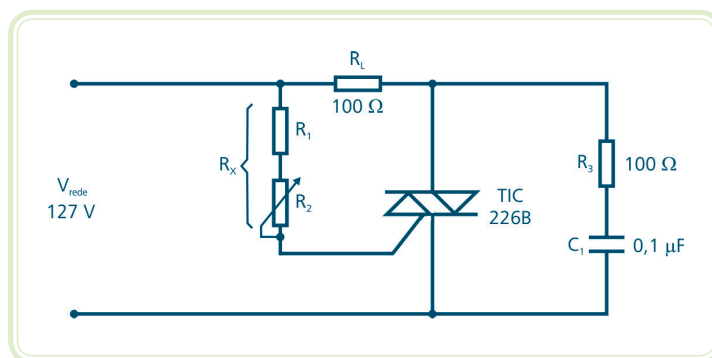


Figura 8.1: Controle de fase numa carga resistiva utilizando TRIAC

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

### Dados

$I_{GT} = 50 \text{ mA}$  (1° e 3° quadrantes)

$V_{GT} = 2,0 \text{ V}$  (1° e 3° quadrantes)

- a) Calcule os valores do resistor fixo  $R_1$  e da resistência variável (potenciômetro)  $R_2$  para disparo do TRIAC em 2°, 15°, 30°, 60° e 90° em relação à tensão da rede.

### Disparo em 2°

$$V_{REDE} - R_x \times I_{GT} - V_{GT} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{REDE} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{GT}}{I_{GT}}$$
$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(2^\circ) - 2}{0,050} \rightarrow R_x = 85,4 \Omega$$

### Disparo em 15°

$$V_{REDE} - R_x \times I_{GT} - V_{GT} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{REDE} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{GT}}{I_{GT}}$$
$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(15^\circ) - 2}{0,050} \rightarrow R_x = 889,7 \Omega$$

### Disparo em 30°

$$V_{REDE} - R_x \times I_{GT} - V_{GT} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{REDE} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{GT}}{I_{GT}}$$
$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(30^\circ) - 2}{0,050} \rightarrow R_x = 1.756,1 \Omega$$

### Disparo em 60°

$$V_{REDE} - R_x \times I_{GT} - V_{GT} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{REDE} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{GT}}{I_{GT}}$$
$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(60^\circ) - 2}{0,050} \rightarrow R_x = 3.070,9 \Omega$$



### Disparo em 90°

$$V_{REDE} - R_x \times I_{GT} - V_{GT} = 0 \rightarrow R_x = \frac{V_{REDE} - V_{GT}}{I_{GT}} = \frac{V_{rms} \times \sqrt{2} \times \text{sen}\alpha - V_{GT}}{I_{GT}}$$

$$R_x = \frac{127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(90^\circ) - 2}{0,050} \rightarrow R_x = 3.552,1 \Omega$$

Portanto, podem ser escolhidos os resistores apresentados na Tabela 8.1.

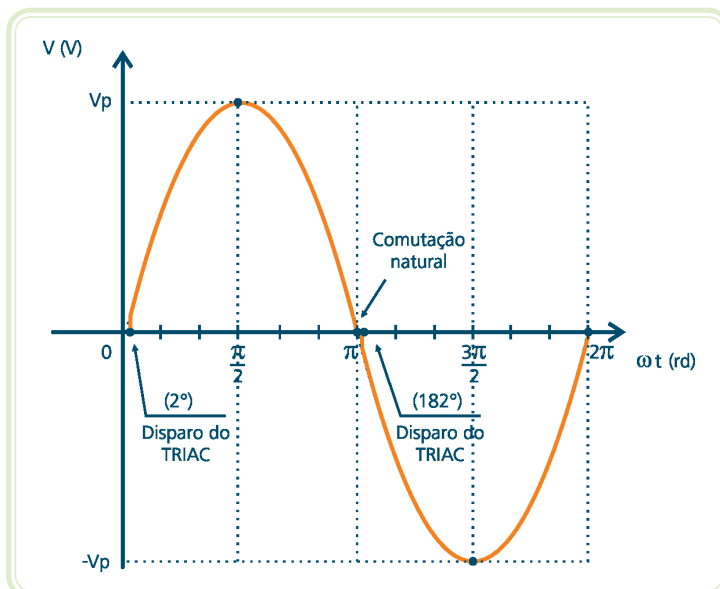
**Tabela 8.1: Ângulos de disparo e componentes relacionados**

Ângulo de disparo ( $\alpha$ )	$R_x$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )
2°	85,4	50	35,4
15°	889,7	50	839,7
30°	1.756,1	50	1706,1
60°	3.070,9	50	3.020,9
90°	3.552,1	50	3.502,1

Fonte: Autores

**b)** Desenhe as formas de onda da tensão sobre a carga.

### Disparo em 2° (Figura 8.2)



**Figura 8.2: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 2°**

Fonte: CTISM, adaptado de autores

### Disparo em 15° (Figura 8.3)

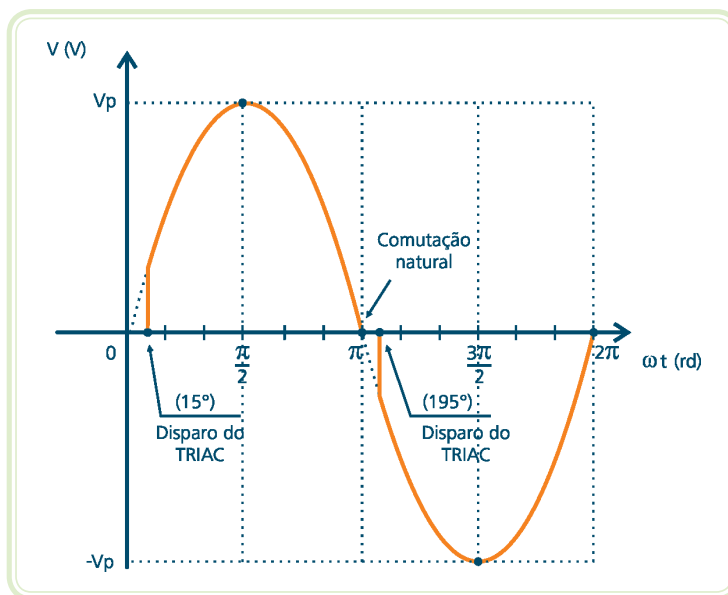


Figura 8.3: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 15°  
Fonte: CTISM, adaptado de autores

### Disparo em 30° (Figura 8.4)

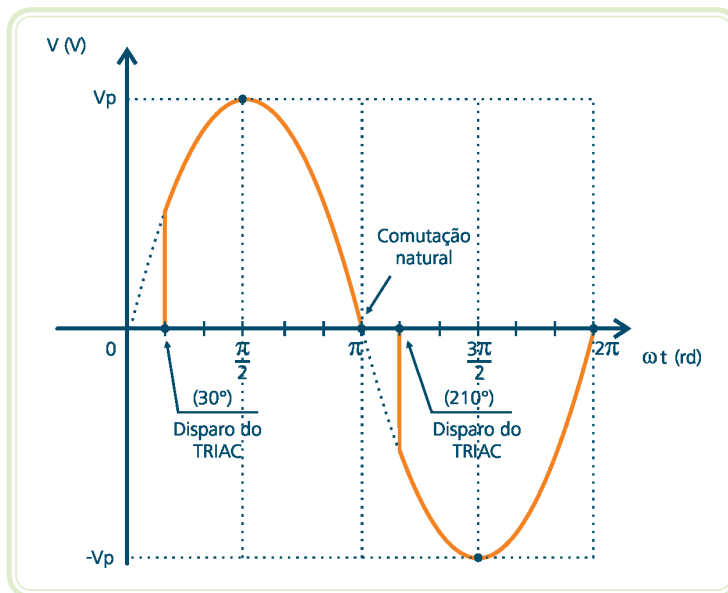


Figura 8.4: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em 30°  
Fonte: CTISM, adaptado de autores

### Disparo em $60^\circ$ (Figura 8.5)

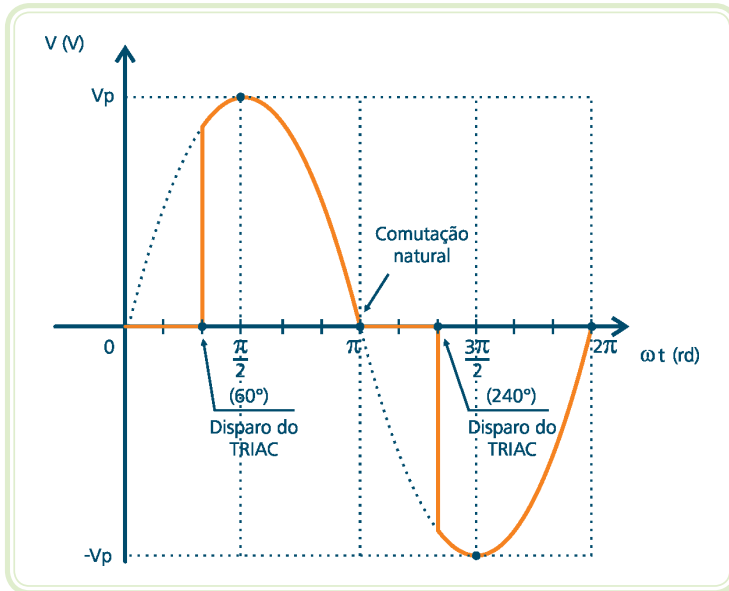


Figura 8.5: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em  $60^\circ$

Fonte: CTISM, adaptado de autores

### Disparo em $90^\circ$ (Figura 8.6)

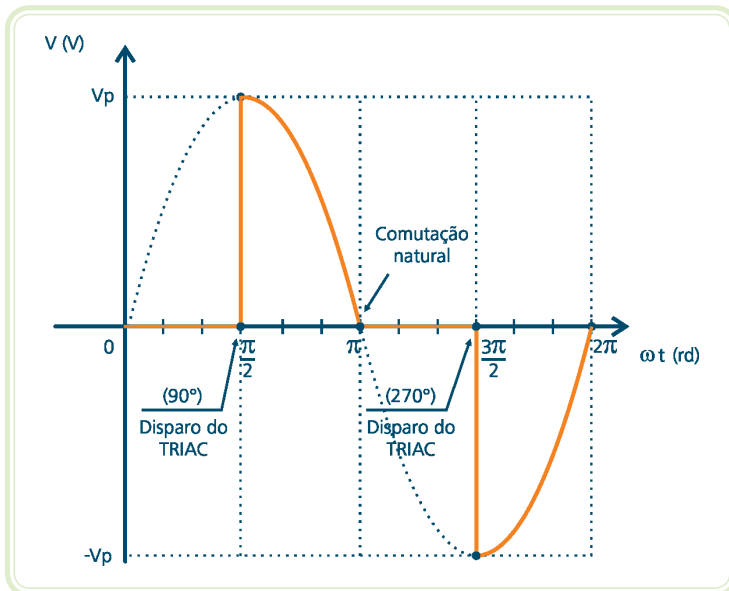


Figura 8.6: Forma de onda da tensão sobre a carga com disparo em  $90^\circ$

Fonte: CTISM, adaptado de autores

- c) Calcule o valor médio e eficaz da tensão na carga para os valores de  $\alpha$ , bem como a potência dissipada.



Quando se utiliza um circuito com TRIAC em corrente alternada, o valor médio da tensão na carga, para qualquer ângulo de disparo, é sempre igual à zero. Entretanto, o valor eficaz da tensão na carga é diferente de zero e dependerá do ângulo de disparo "alfa" ( $\alpha$ ), conforme a Equação 8.1

Equação 8.1

$$V_{rms} = V_p \times \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{360} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4\pi}} \quad [V_{rms}]$$

A Tabela 8.2 mostra os valores da tensão média, da tensão eficaz e da potência dissipada pela carga, para cada ângulo de disparo.

**Tabela 8.2: Tensões média, eficaz e potência dissipada pela carga, para cada ângulo de disparo**

Ângulo de disparo ( $\alpha$ )	$V_m$ (V)	$V_{rms}$ ( $V_{rms}$ )	P (W)
2°	0	127,0	161,29
15°	0	126,8	160,78
30°	0	125,2	156,75
60°	0	113,9	129,73
90°	0	89,8	80,64

Fonte: Autores

Na Tabela 8.2, observa-se que, quanto maior o ângulo de disparo  $\alpha$  do triac, menor será a tensão eficaz aplicada à carga e vice-versa. Disparando-o em diversos ângulos da tensão senoidal da rede, é possível aplicar à carga RL, potências diferentes. No cálculo da potência foi utilizada a mesma expressão utilizada na Equação 6.3.



Não é possível realizar o disparo no 2° e no 4° quadrante para o circuito em questão, pois ele já teria disparado no 1° e 3° quadrante, respectivamente.

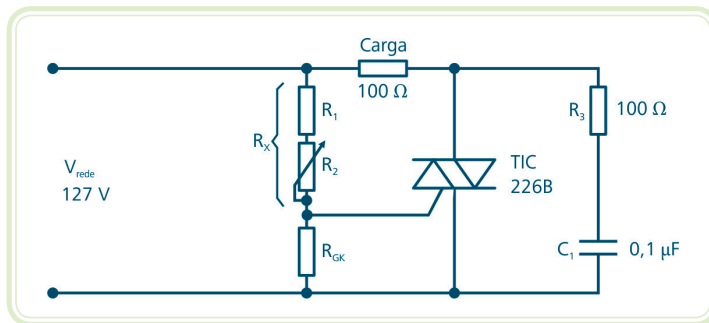


Neste exemplo  $R_1$  é um resistor fixo cuja função é limitar a corrente de gatilho do TRIAC.  $R_2$  é um resistor variável. Sua variação provoca a variação do ângulo de disparo do TRIAC. Observe que  $R_x = R_1 + R_2$ . Como estes elementos estão em série eles possuem a mesma corrente. O conjunto  $R_3$  e  $C_1$  formam um circuito *Snubber* de proteção contra disparo por variação de tensão, visto na Aula 5.

## 8.2 Disparo com divisor de tensão

### Exemplo

Observe o circuito da Figura 8.7.



**Figura 8.7: Circuito de disparo com divisor de tensão**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

**Dados**

$I_{GT} = 50 \text{ mA}$  (1° e 3° quadrantes)

$V_{GT} = 2,0 \text{ V}$  (1° e 3° quadrantes)

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

**Responda**

- a) Encontre a expressão para calcular  $R_x$ , em função da corrente de disparo ( $I_{GT}$ ) do TRIAC.

De acordo com Lei dos Nós, observamos que:

$$I_{R_1} = I_{R_{GK}} + I_G$$

Sabemos que a tensão sobre o resistor  $R_{GK}$  é igual à  $V_{GT}$ , após o disparo. Portanto, podemos reescrever a equação anterior da seguinte maneira:

$$\frac{V_{REDE} - V_{GT}}{R_x} = \frac{V_{GT}}{R_{GK}} + I_{GT} = \frac{V_{GT} + I_{GT} \times R_{GK}}{R_{GK}}$$

Logo:

$$R_x = (V_{REDE} - V_{GT}) \times \frac{R_{GK}}{V_{GT} + I_{GT} \times R_{GK}}$$

- b) Determine os valores de  $R_x$  e  $R_2$  para disparo em 30°.

Cálculo de  $R_x$

$$R_x = [127 \times \sqrt{2} \times \text{sen}(30^\circ) - 2] \times \frac{1000}{2 + 0,050 \times 1000}$$
$$R_x = 1.688,5 \Omega$$

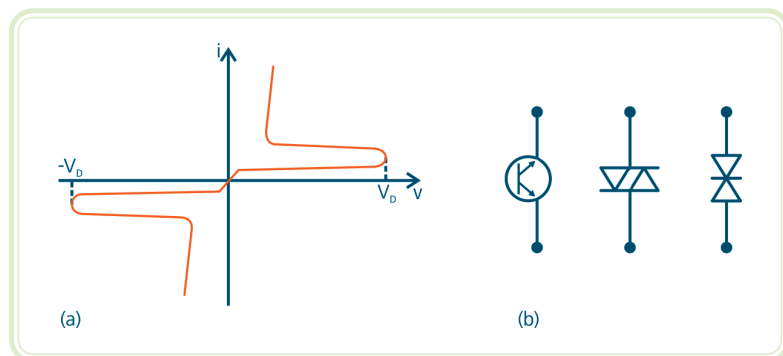
Cálculo de  $R_2$

$$R_x = R_1 + R_2$$
$$R_2 = 1688,5 - 1000$$
$$R_2 = 688,5 \Omega$$

## 8.3 Outros dispositivos

### 8.3.1 DIAC

Um DIAC (*Diode Alternative Current*) é um diodo de corrente alternada. Geralmente ele é utilizado como dispositivo de disparo do TRIAC. A Figura 8.8 apresenta a curva real de um DIAC e sua simbologia.



**Figura 8.8:** Curva característica de um DIAC (a) e seus símbolos (b)

Fonte: CTISM, adaptado de Zuim, 2005

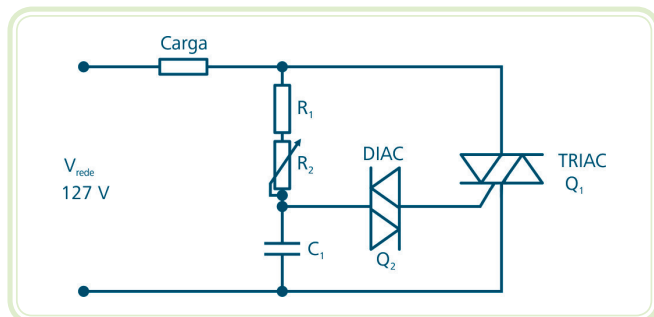


Consulte a folha de dados (*datasheet*) do DIAC DB-3 acessando o link: [http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/90/192949\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/90/192949_DS.pdf)

Basicamente, trata-se de um TRIAC sem gatilho. Portanto, ele só dispara quando a tensão aplicada sobre ele atinge as tensões de disparo  $V_D$ . Geralmente este valor se encontra entre 20 e 40 volts.

Trata-se de um dispositivo simétrico, ou seja, ele possui as mesmas condições de disparo tanto para o 1º, quanto para o 3º quadrantes. Portanto, ele corrige

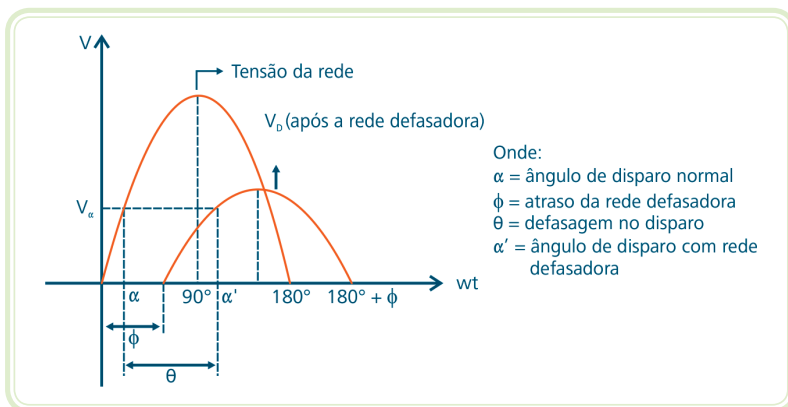
o problema de antissimetria de disparo do TRIAC, de acordo com o circuito *dimmer* da Figura 8.9.



**Figura 8.9: Circuito *dimmer***

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

O capacitor  $C_1$  atrasa a tensão aplicada sobre o DIAC. Então, é comum dizer que se trata de disparo por rede defasadora. Portanto, torna-se possível disparar o TRIAC com ângulos maiores que  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , pois a tensão sobre o capacitor, atrasada em relação à tensão da rede, é quem vai disparar o DIAC e, conseqüentemente, o TRIAC (Figura 8.10).



**Figura 8.10: Tensões de disparo com rede defasadora**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

### 8.3.2 Optoacopladores

Os optoacopladores ou acopladores ópticos possuem a função de proporcionar isolamento elétrico entre o circuito de disparo e o circuito de potência, já que o contato passa a ser realizado por luz.

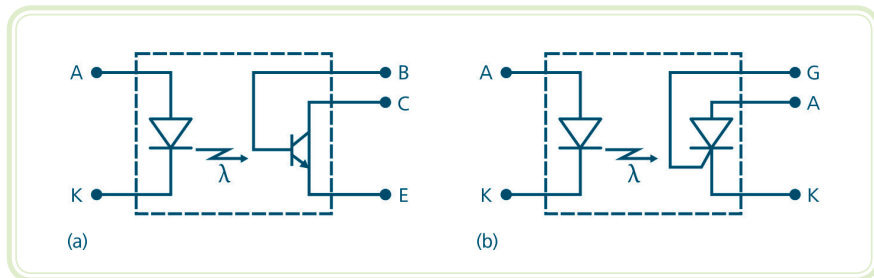
Eles são construídos com um LED infravermelho e um fotodetector, que pode ser um transistor, um SCR ou um TRIAC (sensíveis a luz), de acordo com a Figura 8.11.



Ao produzir a defasagem através da rede RC a tensão de avalanche do DIAC é atingida posteriormente. Conforme o valor de R e C pode-se controlar o disparo do TRIAC resolvendo o problema de disparos para ângulos maiores que  $90^\circ$  e  $270^\circ$ . Além disso, como o TRIAC é disparado por meio do DIAC, os disparos passam a ser simétricos em todos os semiciclos.



Consulte a folha de dados (*datasheet*) do optoacoplador MOC3011 acessando o *link*: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MOC3010.pdf>

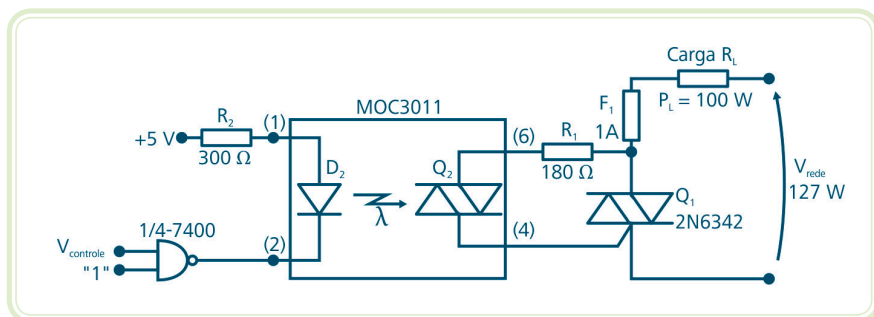


**Figura 8.11: Acopladores ópticos – transistor como fotodetector (a) e SRC como fotodetector (b)**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

### Exemplo

Observe o circuito da Figura 8.12.



**Figura 8.12: Circuito de acionamento utilizando optoacoplador**

Fonte: CTISM, adaptado de Almeida, 2009

A luz emitida pelo LED  $D_2$  irá acionar o fototriac  $Q_2$ . Estes elementos estão encapsulados em um único circuito integrado. Assim, polarizando diretamente o LED  $D_2$ , por meio da tensão de controle ( $V_{\text{controle}}$ ), o fototriac  $Q_2$  irá conduzir, disparando o TRIAC principal  $Q_1$ , ligando a carga.

### Dados

TRIAC  $Q_1$

$$V_{GT} = 2,0 \text{ V}$$

$$I_{GT} = 100 \text{ mA}$$

Optoacoplador MOC3011

- LED  $D_2$   
 $I_A = 10 \sim 50 \text{ mA}$   
 $V_F = 1,3 \text{ V} @ 10 \text{ mA}$



- TRIAC Q<sub>2</sub>  
 $V_{BR}, V_{B0} = 250 \text{ V}$   
 $V_{T(\text{max})} = 3 \text{ V @ } 100 \text{ mA}$   
 $I_{A(\text{max})} = 1,2 \text{ A}$

### Responda

- a) Verifique se o MOC está sendo usado dentro de seus parâmetros máximos.

LED D<sub>2</sub>

$$I_A = \frac{5 - V_F}{R_2} = \frac{5 - 1,3}{300} = 12,3 \text{ mA}$$

(dentro da faixa de 10~50 mA)

TRIAC Q<sub>2</sub>

Considerando  $V_T = 0 \text{ V}$  para Q<sub>2</sub> e  $V_{GT} = 0 \text{ V}$  para Q<sub>1</sub>, a corrente máxima em Q<sub>2</sub> será:

$$I_{A(\text{max})} = \frac{V_{\text{REDE}(\text{max})}}{R_1 + R_L} = \frac{127 \times \sqrt{2}}{180 + 161,3} = 0,5 \text{ A}$$

$$R_L = \frac{127^2}{100} = 161,3 \Omega$$

(menor que 1,2 A)

- b) Cálculo do valor da tensão da rede no instante de disparo do TRIAC Q<sub>1</sub>.

$$V_{\text{REDE}} - V_T(Q_2) - V_{GT}(Q_1) - (R_1 + R_L) \times I_{GT} = 0$$

$$V_{\text{REDE}} = 3 + 2 + (180 + 161,3) \times 0,100$$

$$V_{\text{REDE}} = 39,13 \text{ V}$$

### Resumo

Nessa aula, você aprendeu como controlar a fase em uma carga resistiva, utilizando TRIAC. Você também conheceu o dispositivo DIAC e compreendeu a função e o funcionamento de um optoacoplador.



## Atividades de aprendizagem

1. O circuito da Figura 8.13 é alimentado por uma fonte CA de  $127 V_{rms}$ . Calcule os valores do resistor  $R_x$  para disparo do TRIAC em  $2^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$  (ângulo de disparo em relação à tensão da rede) e desenhe as formas de onda da tensão na carga  $R_L$  de 100 ohms. Calcule o valor médio e eficaz da tensão na carga para os valores de  $\alpha$ . Calcule também a potência dissipada.

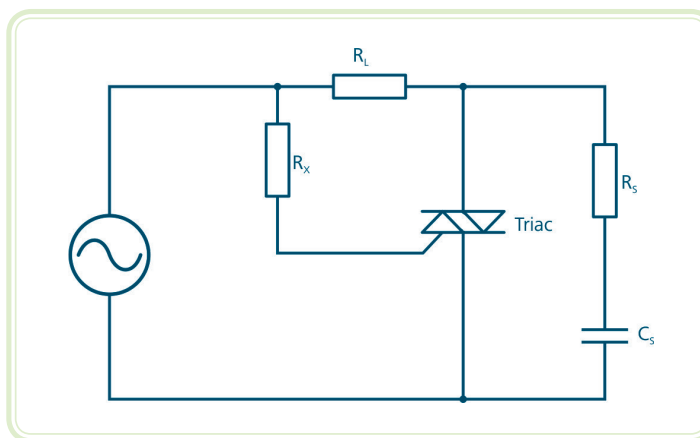


Figura 8.13: Exercício 1 – circuito

Fonte: Autores

### Dados do TIC226

$$I_{GT(max)} = 50 \text{ mA}$$

$$V_{GT(tip)} = 2,5 \text{ V}$$

$$I_{Tmax} = 8 \text{ A}$$

$$V_{RRM} = 200 \text{ V}$$

2. No circuito da Figura 8.9, explique porque é possível disparar o TRIAC com ângulos maiores que  $90^\circ$  e  $270^\circ$  e simétricos nos semiciclos positivo e negativo.