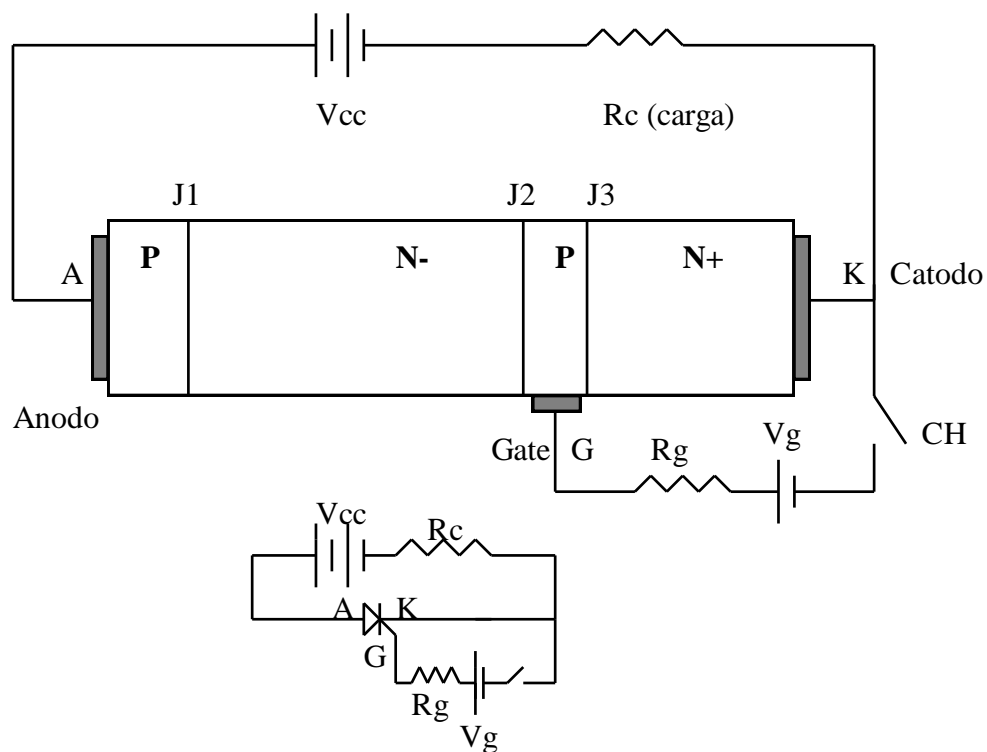


## CONVERSORES CA-CC – RETIFICADORES CONTROLADOS

### TIRISTOR

O nome tiristor engloba uma família de dispositivos semicondutores que operam em regime chaveado, tendo em comum uma estrutura de 4 camadas semicondutoras numa sequência p-n-p-n, apresentando um funcionamento biestável.

O tiristor também é chamado de SCR (Retificador Controlado de Silício), sendo esta uma marca da General Electric, primeira empresa a desenvolver este dispositivo. Há outros componentes com tal estrutura de 4 camadas, todos com características biestáveis: LASCR (SCR ativado por luz), também chamado de LTT (Light Triggered Thyristor), TRIAC (tiristor triodo bidirecional), DIAC (tiristor diodo bidirecional), GTO (tiristor comutável pela porta), MCT (Tiristor controlado por MOS).

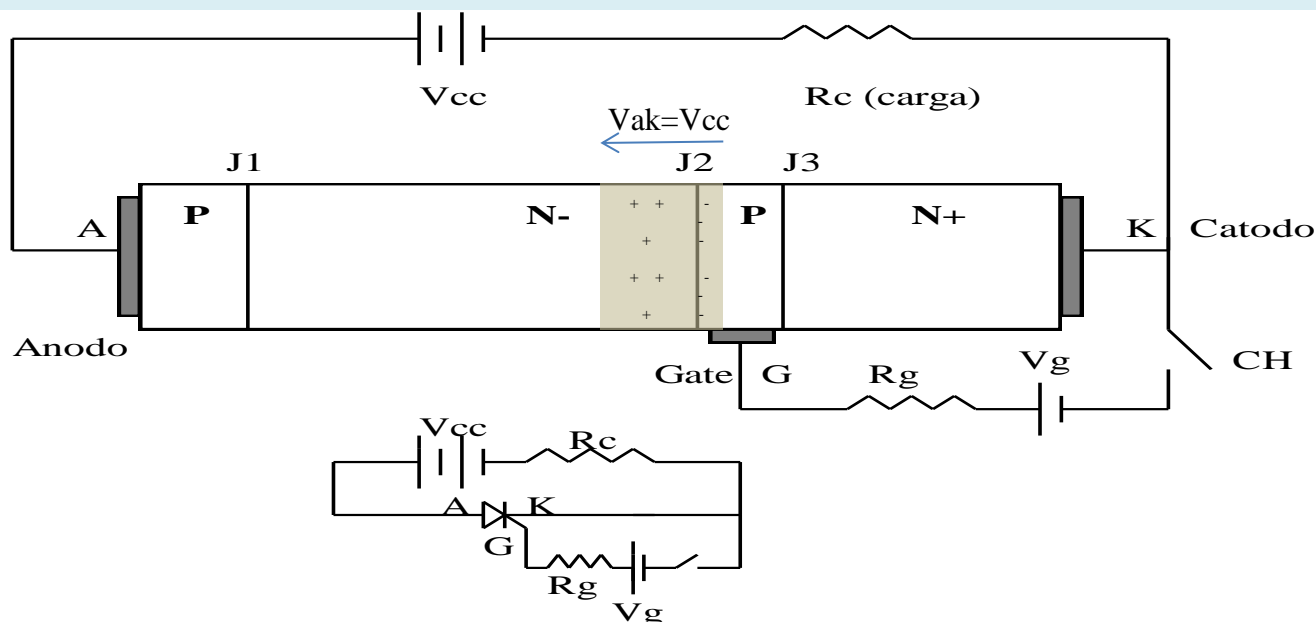


O tiristor é formado por quatro camadas semicondutoras, alternadamente p-n-p-n, possuindo três terminais: *anodo* e *catodo*, pelos quais flui a corrente, e a *porta (ou gate)* que, a partir de uma injeção de corrente entre *gate* e *catodo* faz com que se estabeleça a corrente anódica.

Funcionamento básico do tiristor e seu símbolo.

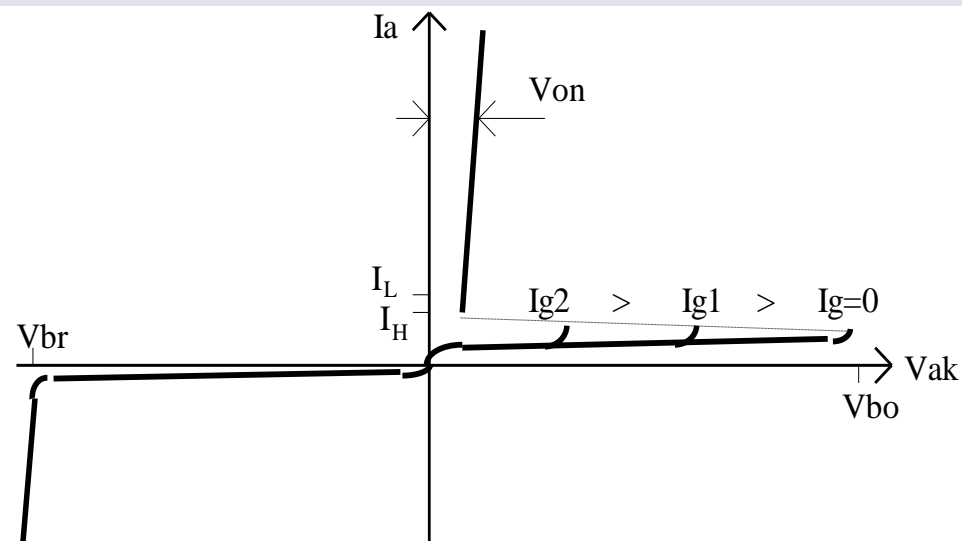
## Princípio de funcionamento

Se entre anodo e catodo há uma tensão positiva, junções J1 e J3 estão diretamente polarizadas, enquanto J2 está reversamente polarizada. Não há condução de corrente até que a tensão  $V_{ak}$  se eleve a um valor que provoque a ruptura da barreira de potencial em J2.



Aplicando uma tensão  $V_{gk}$  **positiva**, circulará corrente através de J3, portadores negativos indo do catodo para a porta. Por construção, a camada P ligada à porta é suficientemente estreita para que parte destes elétrons que cruzam J3 possua energia cinética suficiente para vencer a barreira de potencial existente em J2, sendo então atraídos pelo anodo.

A diferença de potencial da junção reversamente polarizada (J2) diminui e se estabelece a corrente de anodo, que pode persistir mesmo com a retirada da corrente de porta.



Característica estática do tiristor.

Quando a tensão  $V_{ak}$  for negativa, J1 e J3 estarão reversamente polarizadas, e J2 estará diretamente polarizada. Cabe à junção J1 manter o estado de bloqueio no bloqueio reverso.

O tiristor se mantém em condução desde que, após o processo de entrada em condução, a corrente de anodo atinja um valor superior ao limite  $I_L$ , chamado de corrente de "latching".

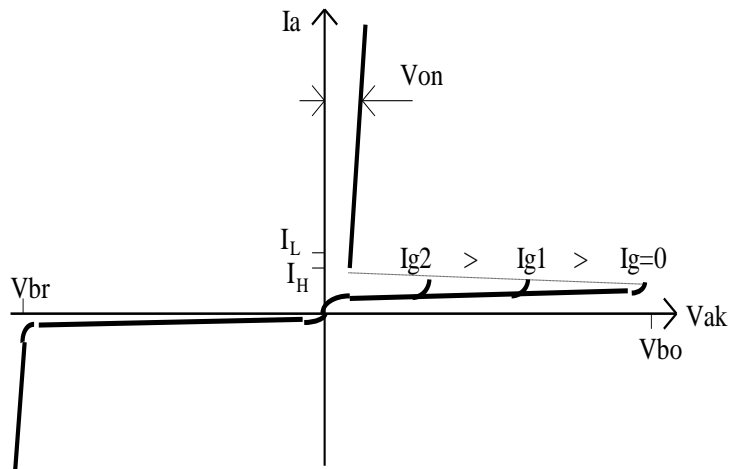
Para que o tiristor deixe de conduzir é necessário que a corrente de anodo caia abaixo do valor de manutenção ( $I_H$ ).

## Maneiras de disparar um tiristor

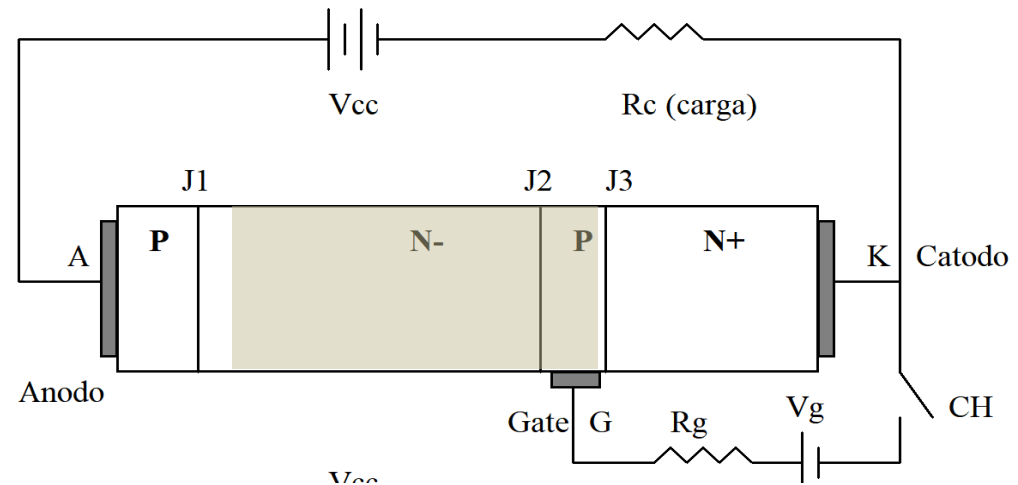
Há cinco maneiras de fazer um tiristor entrar em condução:

### a) Tensão $V_{ak} > V_{bo}$

Quando polarizado diretamente e desligado,  $V_{ak}$  está aplicada em J2. O aumento de  $V_{ak}$  leva a uma expansão da região de transição tanto para o interior da camada do *gate* quanto para a camada N- adjacente. O elevado campo elétrico, associado à corrente de fuga (elétrons livres por efeito térmico) pode levar a um processo de avalanche. Se a região de transição se expandir até os limites das regiões vizinhas (anodo e catodo) também ocorrerá o disparo.



Característica estática do tiristor.

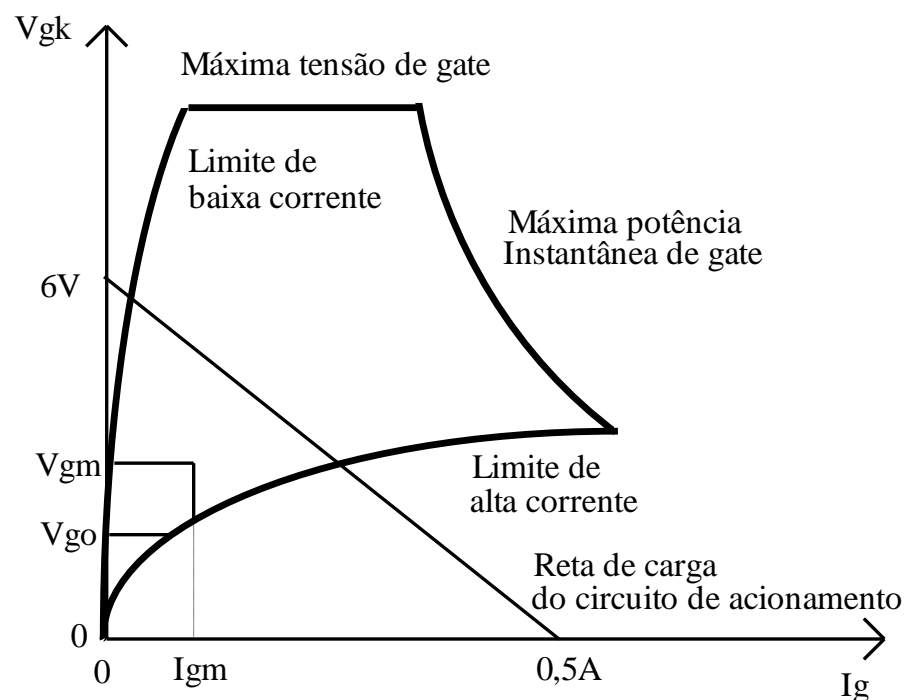


Tiristor com elevado  $V_{ak}$ , sem corrente de *gate*

### b) Ação da corrente positiva de porta

É a maneira mais usual para ligar o tiristor.

Para garantir a operação correta do componente, a reta de carga do circuito de acionamento deve garantir a passagem além dos limites  $V_{gm}$  e  $I_{gm}$ , sem exceder os demais limites (tensão, corrente e potência máximas).



Condições para disparo de tiristor através de controle pela porta.

### c) Taxa de crescimento da tensão direta

Uma junção reversamente polarizada comporta-se de modo similar a uma capacitância. Considerando que praticamente toda a tensão está aplicada sobre a junção J2 (SCR estiver desligado e polarizado diretamente), a corrente que atravessa tal junção é dada por:

$$I_j = \frac{d(C_j \cdot V_{ak})}{dt} = C_j \cdot \frac{dV_{ak}}{dt} + V_{ak} \cdot \frac{dC_j}{dt} \quad C_j \text{ é a capacitância da junção (dependente da tensão)}$$

Uma vez que a capacitância cresce com o aumento da área do semiconductor, os componentes para correntes mais elevadas tendem a ter um limite de  $dv/dt$  menor. Observe-se que a limitação diz respeito apenas ao crescimento da tensão direta ( $V_{ak} > 0$ ). A taxa de crescimento da tensão reversa não é importante, uma vez que as correntes que circulam pelas junções J1 e J3, em tal situação, não tem a capacidade de levar o tiristor a um estado de condução.

Como se verá adiante, utilizam-se circuitos RC em paralelo com os tiristores com o objetivo de limitar a velocidade de crescimento da tensão direta sobre eles.

#### *d) Temperatura*

Em torno da temperatura ambiente (300 K) a corrente de fuga numa junção p-n de silício reversamente polarizada, dobra aproximadamente com o aumento de  $8^{\circ}$  C. Assim, a elevação da temperatura pode resultar uma corrente através de J2 que, associada à polarização reversa da junção J2, pode levar o tiristor à condução.

#### *e) Energia radiante*

Energia radiante dentro da banda espectral do silício, incidindo e penetrando no cristal, produz considerável quantidade de pares elétrons-lacunas, aumentando a corrente de fuga reversa, possibilitando a condução do tiristor. Este tipo de acionamento é o utilizado nos LASCR, cuja aplicação principal é em sistemas que operam em elevado potencial, nos quais a isolamento necessária só é obtida por meio de acoplamentos óticos.



## Parâmetros básicos de tiristores

- Tensão direta de ruptura ( $V_{BO}$ )
- Máxima tensão reversa ( $V_{BR}$ ). Em geral  $V_{BR}=V_{BO}$
- Máxima corrente de anodo ( $I_{amax}$ ): valores RMS, médio, de pico e instantâneo (não repetitivo)
- Máxima temperatura de operação ( $T_{jmax}$ ): A capacidade de bloqueio é garantida desde que a temperatura na junção não exceda esse limite.
- Resistência térmica ( $R_{th}$ ): é a diferença de temperatura entre 2 regiões, dividido pela potência dissipada sob condições de equilíbrio térmico. É uma medida das condições de fluxo de calor do cristal para o meio externo.
- Característica  $I_2t$ : é o resultado da integral do quadrado da corrente de anodo num determinado intervalo de tempo, usada para dimensionamento de fusíveis.
- Máxima taxa de crescimento da tensão direta  $V_{ak}$  ( $dv/dt$ ).
- Máxima taxa de crescimento da corrente de anodo ( $di/dt$ ).

- Corrente de manutenção de condução ( $I_H$ ): a mínima corrente de anodo necessária para manter o tiristor em condução.
- Corrente de disparo ( $I_L$ ): mínima corrente de anodo requerida para manter o SCR ligado imediatamente após ocorrer a passagem do estado desligado para o ligado e ser removida a corrente de porta.
- Tempo de disparo ( $t_{on}$ ): é o tempo necessário para o tiristor sair do estado desligado e atingir a plena condução.
- Tempo de desligamento ( $t_{off}$ ): é o tempo necessário para a transição entre o estado de condução e o de bloqueio. É devido a fenômenos de recombinação de portadores no material semiconductor.
- Corrente de recombinação reversa ( $I_{rqm}$ ): valor de pico da corrente reversa que ocorre durante o intervalo de recombinação dos portadores na junção.

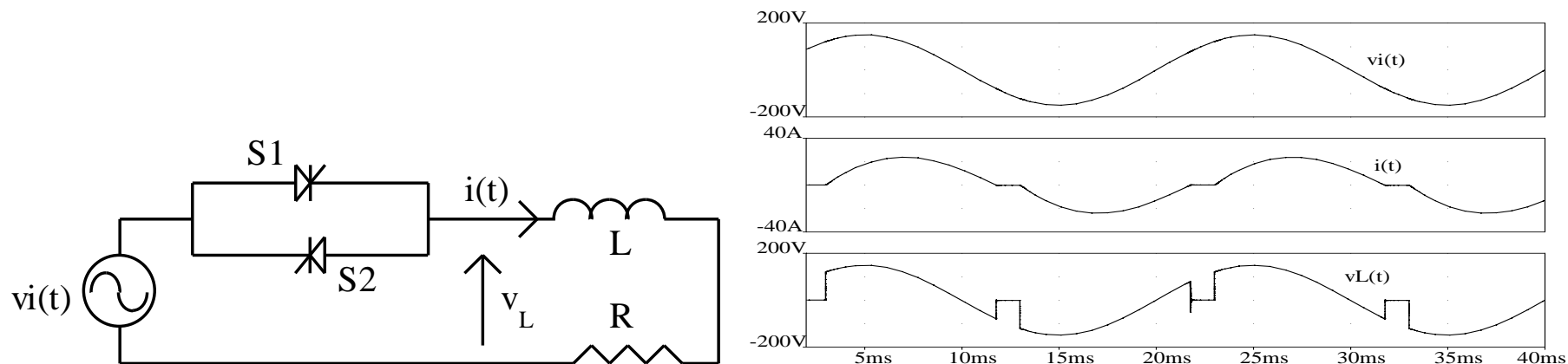
## Circuitos de excitação do *gate*

### a) Condução

A entrada em condução de um tiristor é controlada pela injeção de uma corrente de porta. A duração do sinal de disparo deve ser tal que permita à corrente de anodo atingir  $I_L$  quando, então, pode ser retirada a polarização do *gate*.

### b) Comutação ou desligamento

- A condição de desligamento do tiristor é que a corrente de anodo fique abaixo do valor  $I_H$ .
- Não existe maneira de se desligar o tiristor através de seu terminal de *gate*.
- GTOs e MCTs, com uma estrutura interna mais complexa, são passíveis de desligamento comandado pelo *gate*.
- O modo usual desse desligamento é a chamada “Comutação Natural”
- Quando a alimentação é CA, dado o caráter ondulatorio da tensão, em algum instante a corrente tenderá a se inverter, diminuído abaixo de  $I_H$ , desligando o tiristor.



Controlador de tensão CA com carga RL e formas de onda típicas, mostrando a “comutação natural”.

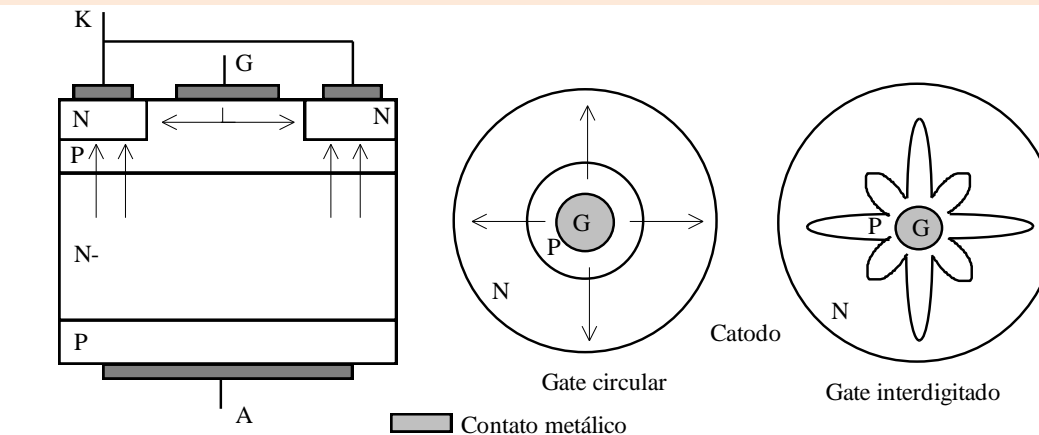
O uso de tiristores a partir de fontes CC é muito raro por conta dessa impossibilidade desligamento comandado.

## Circuitos Amaciadores

O objetivo destes circuitos é evitar problemas advindos de excessivos valores de  $dv/dt$  e  $di/dt$ , conforme descritos anteriormente.

### a) O problema $di/dt$

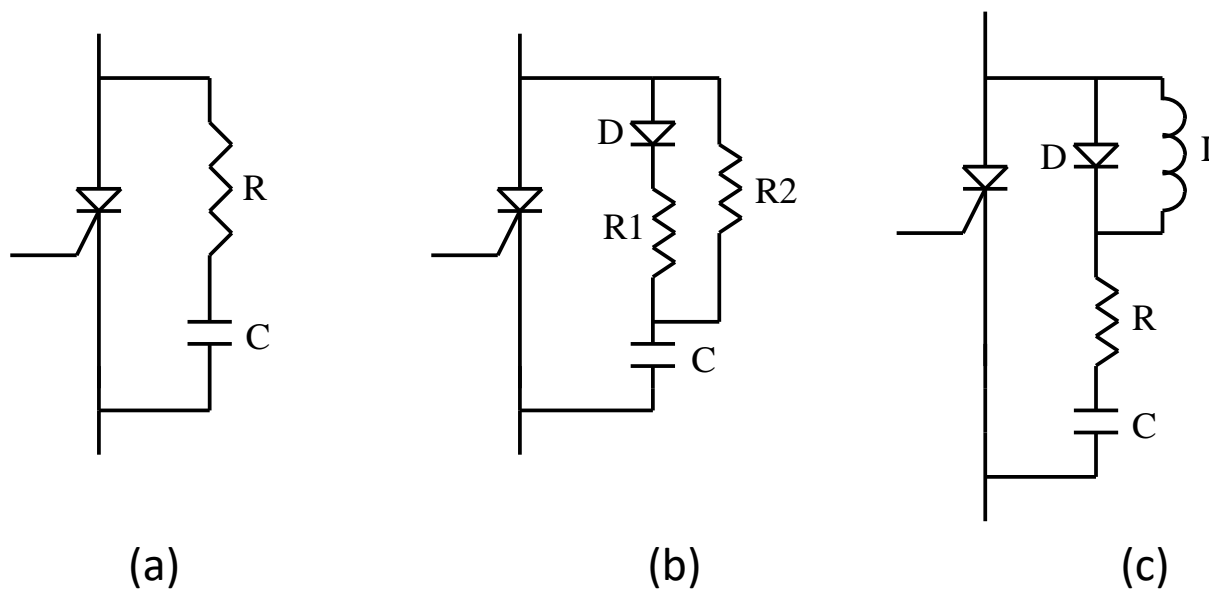
- O circuito acionador de *gate* deve ter alta derivada de corrente de disparo para que seja rápida a expansão da área condutora.
- Um indutor em série com o tiristor também limitará o crescimento da corrente de anodo durante a entrada em condução do dispositivo, dando tempo à expansão da área condutora
- Tal indutor pode ser saturável de maneira a atuar apenas no início da condução.



Expansão da área de condução do tiristor a partir das vizinhanças da região de *gate*.

**b) O problema do  $dv/dt$** 

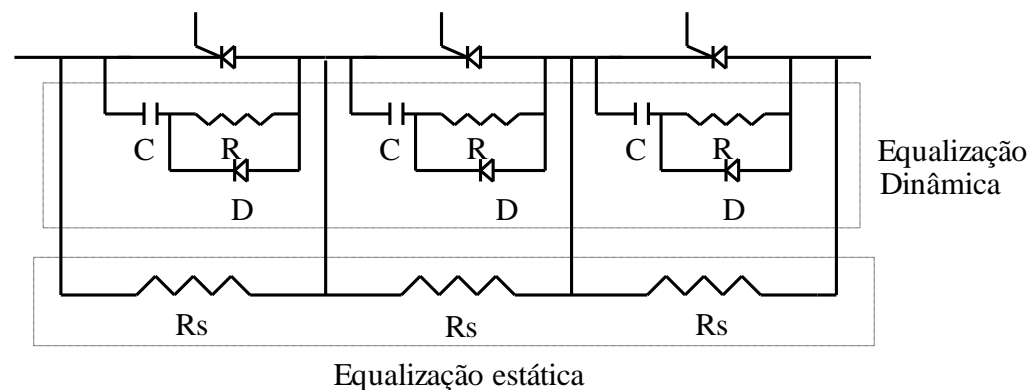
A limitação do crescimento da tensão direta  $V_{ak}$ , usualmente é feita pelo uso de circuitos RC, RCD, RLCD entre anodo e catodo.



Circuitos amaciadores para  $dv/dt$ .

## Associação de Tiristores

- Há diversas aplicações nas quais é necessária a associação de mais de um destes componentes, seja pela elevada tensão de trabalho, seja pela corrente exigida pela carga.
- Quando a corrente de carga, ou a margem de sobre-corrente, não pode ser suportada por um único tiristor, é essencial a ligação em paralelo.
- A principal preocupação neste caso é a equalização da corrente entre os dispositivos, tanto em regime, como durante a comutação.
- Quando o circuito opera com tensão superior àquela suportável por um único tiristor, é preciso associar estes componentes em série.



Circuito de equalização de tensão em associação série de tiristores.