

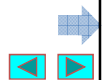
Capítulo 4

Tiristores

Tiristores

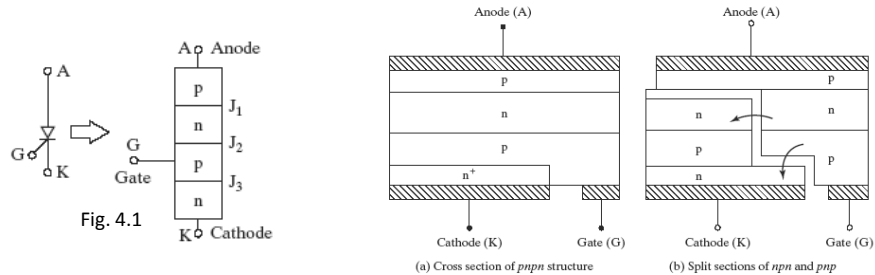
Introdução

- Chaves de **estado sólido** (semicondutor)
- Chaves **biestáveis** (condução e bloqueio de corrente)
- A primeira análise da topologia do circuito de conversão de energia deve ser feita considerando o tiristor como **chave ideal**
- Em seguida devem ser consideradas as **caraterísticas reais** do dispositivo e sua interação com o restante do circuito.

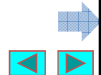


Tiristores

Características dos tiristores

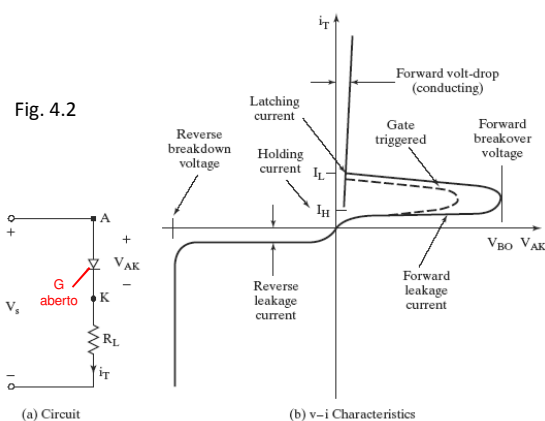


- Possui **quatro camadas** (PNPN) e **três junções** (PN)
- Terminais: Anodo (A), Catodo (K) e **Gatilho** (G)
- Para $v_{AK} > 0$, J_1 e J_3 diretamente polarizadas e J_2 **reversamente polarizada** → **Bloqueio direto**. Existe uma corrente de fuga (corrente do estado desligado)
- Para maiores valores de v_{AK} , J_2 pode sofrer **ruptura por avalanche** → Tensão de ruptura direta, V_{BO} . Haverá corrente no sentido direto (estado ligado).

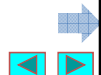


Tiristores

Características dos tiristores

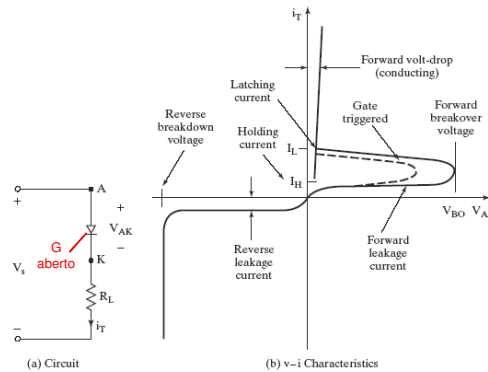


- Em condução, haverá uma pequena queda de tensão direta (aprox. 1V).
- Em condução, i_T será limitada pela impedância externa.
- Ao iniciar a condução, i_T deve ficar acima do valor da corrente de **travamento** (latching current – I_L) para o tiristor permanecer conduzindo.

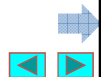


Tiristores

Características dos tiristores

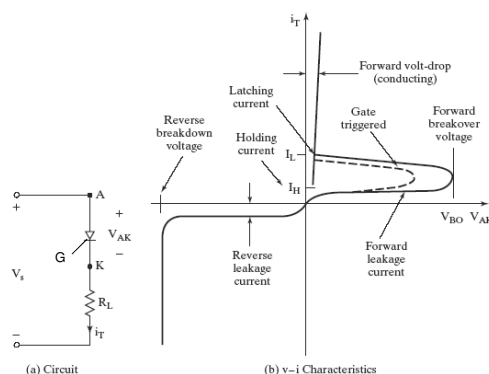


- Em condução, não haverá controle sobre o dispositivo. Reduzida camada de depleção em J_2 .
- Se a i_T cair abaixo da corrente de **manutenção** (holding current - I_H), restabele-se a camada de depleção em $J_2 \rightarrow$ Tiristor volta a bloquear a corrente. Tem-se $I_H < I_L$.

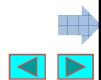


Tiristores

Características dos tiristores



- Para $v_{AK} < 0$, J_1 e J_3 reversamente polarizadas e J_2 diretamente polarizada $\rightarrow$ **Bloqueio reverso**. Existe uma corrente de fuga (corrente reversa).
- Normalmente $v_{AK} < V_{BO}$ e dispara-se o tiristor por uma tensão $V_{GK} > 0$.
- Retirado o sinal de gatilho, o tiristor permanece conduzindo com $i_T > I_H$.
- Uma **realimentação positiva** mantém o estado (chave de retenção ou travamento)



Tiristores

Modelo do tiristor usando dois transistores BJT

$$\begin{aligned} I_C &= \alpha I_E + I_{CBO} \\ I_{C1} &= \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \\ I_{C2} &= \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \end{aligned}$$

$$\text{mas, } I_K = I_A + I_G$$

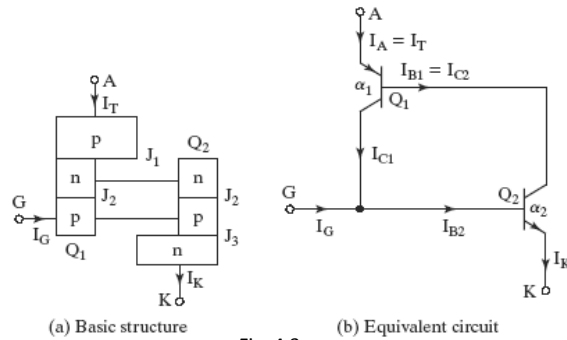


Fig. 4.3

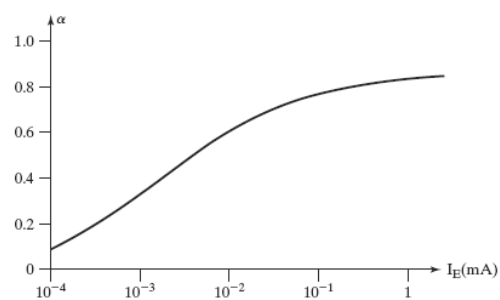
$$\begin{aligned} I_A &= I_{C1} + I_{C2} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} + \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \\ I_A &= \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \end{aligned}$$

Tiristores

Modelo do tiristor usando dois transistores BJT

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Fig. 4.4. Variação típica do ganho de corrente com a corrente de emissor



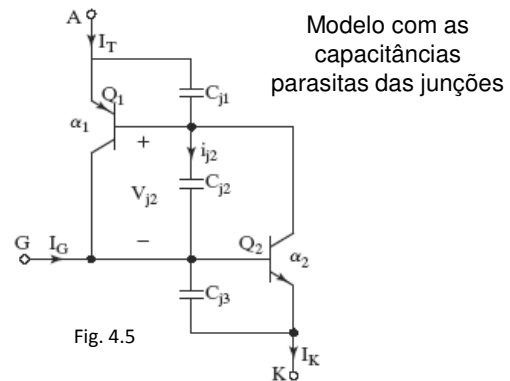
Efeito regenerativo:

- α_1 varia com $I_A = I_E$ e α_2 varia com $I_K = I_A + I_G$
- Se I_G aumenta $\rightarrow I_A$ aumenta $\rightarrow \alpha_1$ e α_2 aumentam $\rightarrow (\alpha_1 + \alpha_2)$ se aproxima da unidade $\rightarrow I_A$ aumenta.
- Se I_G for retirado, I_A ainda permanecerá alto.
- Basta um pequeno I_G para disparar o tiristor.

Tiristores

Modelo do tiristor usando dois transistores BJT

- Uma tensão v_{AK} com alta taxa de crescimento pode causar disparo do tiristor
- Maior $i_{j2} \rightarrow$ maior I_{CBO1} e $I_{CBO2} \rightarrow (\alpha_1 + \alpha_2)$ mais próximo da unidade.



$$i_{j2} = \frac{d(q_{j2})}{dt} = \frac{d}{dt}(C_{j2} \cdot V_{j2}) = V_{j2} \frac{dC_{j2}}{dt} + C_{j2} \frac{dV_{j2}}{dt}$$

Tiristores

Disparo de um tiristor

Formas de disparo:

- **Térmica** – Aumento de portadores gerados termicamente $\rightarrow$ maior corrente de fuga $\rightarrow (\alpha_1 + \alpha_2)$ mais próximo da unidade. Tipo de disparo a ser evitado
- **Luz** – Se luz incidir sobre as junções, portadores minoritários serão gerados, podendo disparar o tiristor. Existem tiristores que operam dessa forma.
- **Tensão elevada ou sobretensão** – No caso de $v_{AK} > V_{BO}$.
- **dv/dt elevado** – Conforme visto no “slide” anterior. Deve-se evitar essa situação. $(dv/dt)_{MAX}$ é uma especificação do tiristor.
- **Corrente de gatilho** – $v_{GK} > 0 \rightarrow$ surgimento de $I_G \rightarrow I_A = (\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}) / [1 - (\alpha_1 + \alpha_2)] \rightarrow$ Ocorre o efeito regenerativo. Maior corrente de gatilho $\rightarrow$ Tensão de bloqueio direta menor (fig. 4.6).

Tiristores

Disparo de um tiristor

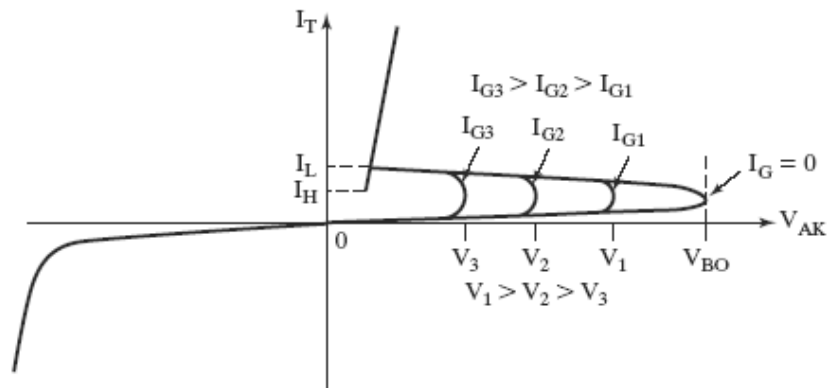


Fig. 4.6

Tiristores

Disparo de um tiristor

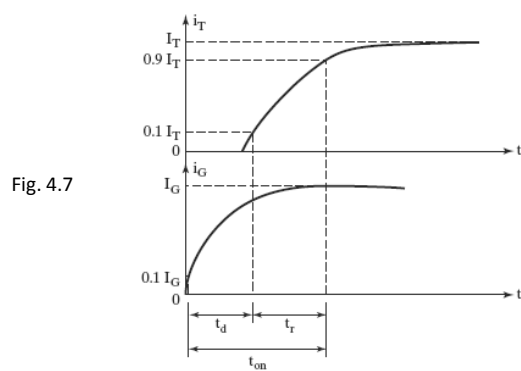


Fig. 4.7

Características de disparo:

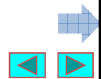
- t_d : tempo de atraso (*delay time*) de $0.1 I_G$ a $0.1 I_T$
- t_r : tempo de subida (*rise time*) de $0.1 I_T$ a $0.9 I_T$
- t_{ON} : tempo de disparo (*turn-on-time*) de $0.1 I_G$ a $0.9 I_T$
- $t_{ON} = t_d + t_r$

Tiristores

Disparo de um tiristor

Aspectos de projeto:

1. Sinal de gatilho deve ser **retirado** após disparo (sinal contínuo causaria perda desnecessária de energia)
2. Com tiristor **reversamente polarizado** ($v_{AK} < 0$), não aplicar pulso de gatilho (causaria aumento da corrente de fuga)
3. Largura (t_G) do pulso i_G deve ser maior que o tempo necessário para i_T assumir um valor acima de I_H . Normalmente $t_G > t_{ON}$.



Tiristores

Proteção contra di/dt

- A condução de corrente deve **se espalhar uniformemente** sobre as superfícies das junções.
- Se di/dt for muito alta, podem surgir **pontos quentes** (*hot spots*) com alta densidade de corrente (temperatura excessiva).
- Um **indutor série** (L_s) pode limitar a taxa di/dt (ver fig. 4.8).
- O problema ocorre no momento em que D_m ainda conduz e o tiristor T_1 é disparado.

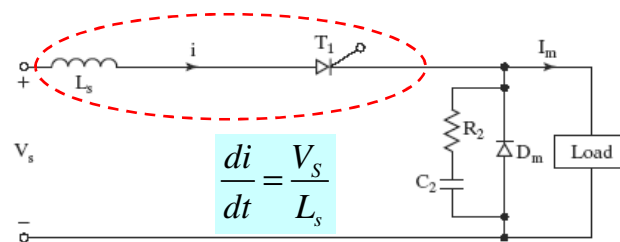
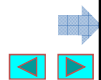


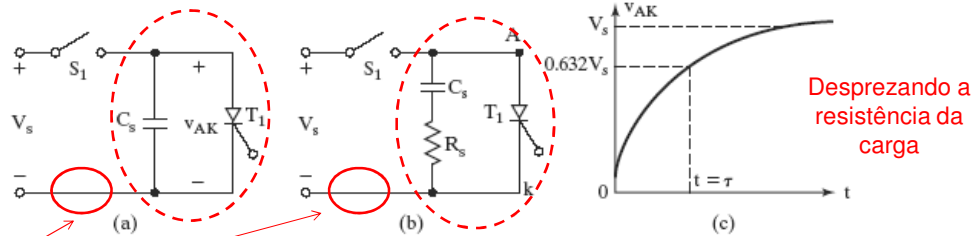
Fig. 4.8



Tiristores

Proteção contra dv/dt

Assumindo que T_1 não esteja conduzindo, raciocine em termos de sua capacitância parasita (fig. 4.5). Utiliza-se o circuito *snubber*.



Assuma que aqui existe alguma carga

Aproximação:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.632V_s}{\tau} = \frac{0.632V_s}{R_s C_s}$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_{TD}}$$

Máxima corrente de descarga do capacitor sobre T_1

Reavaliando:

$$\left. \frac{dv_{AK}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V_s}{\tau} = \frac{V_s}{R_s C_s}$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_{TD}}$$

Tiristores

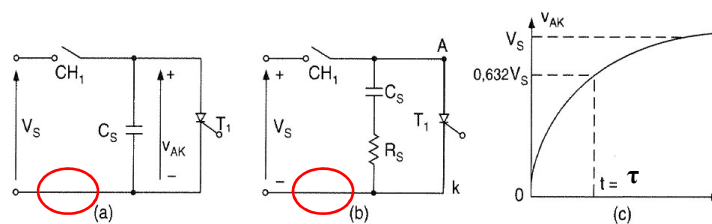
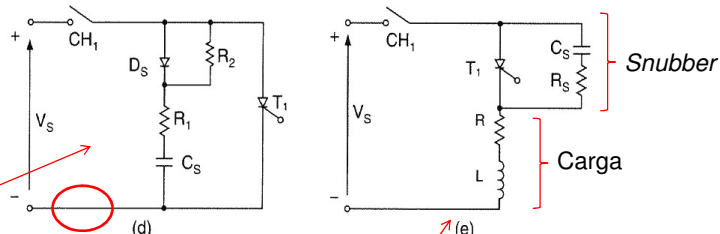
Proteção contra dv/dt 

Fig. 4.9

Com duas constantes de tempo

$$\text{Carregamento : } R_1 C_s$$

$$\text{Descarregamento : } (R_1 + R_2) C_s$$



Circuito com a carga.
A carga efetiva é um circuito RLC

Tiristores

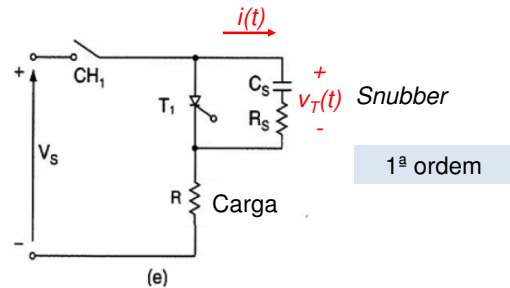
Proteção contra dv/dt

Ex. 4.2

$V_s = 200V$ e $R = 5\Omega$ (indutâncias desprezíveis)
 $f_s = 2kHz$
 Deseja-se $dv/dt = 100V/\mu s$ e I_{TD} limitado a $100A$

Calcular:

- a) R_s e C_s
- b) Perdas no *snubber*
- c) Potência de R_s



$$a) \quad i(t) = \left(\frac{V_s}{R_s + R} \right) e^{-t/\tau} \quad \text{com } \tau = (R_s + R)C_s \quad \text{e } t > 0 \rightarrow v_T(t) = V_s - \left(\frac{RV_s}{R_s + R} \right) e^{-t/\tau} \quad \text{p/ } t > 0$$

$$\frac{dv_T(t)}{dt} = \frac{RV_s}{C_s(R_s + R)^2} e^{-t/\tau} \quad \text{p/ } t > 0 \rightarrow \left. \frac{dv_T(t)}{dt} \right|_{t=0+} = \frac{RV_s}{C_s(R_s + R)^2} = \frac{100V}{10^{-6}s}$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_{TD}} = \frac{200V}{100A} = 2\Omega \rightarrow C_s = 0,204\mu F \rightarrow \tau = 1,4\mu s$$

Tiristores

Proteção contra dv/dt

- b) Perdas no *snubber*

$$\text{Energia armazenada no snubber} \rightarrow E_s = \frac{1}{2} C_s V_s^2$$

$$f_s = 2kHz \Rightarrow T = 500\mu s \Rightarrow \tau \ll T$$

$$P_s = \frac{E_s}{T} = 0,5 C_s V_s^2 f_s = 8,16W$$

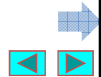
- c) Potência dissipada em $R_s \rightarrow$ Assumindo toda a energia armazenada em C_s dissipada em R_s

$$P_{R_s} = 8,16W$$

Tiristores

Desligamento do tiristor

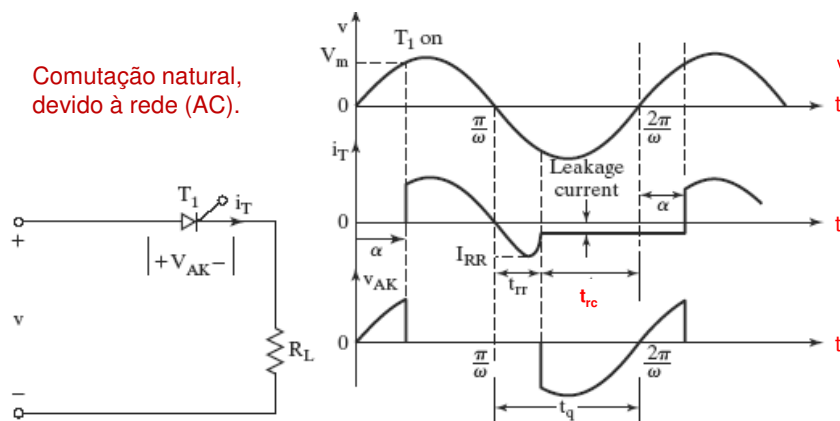
- As técnicas de desligamento (não natural) baseiam-se em forçar a **corrente** no tiristor a cair **abaixo** da **corrente de manutenção** por tempo suficiente para recombinar os portadores em excesso nas 4 regiões.
- Como **J1 e J3 estão diretamente** polarizadas as características de desligamento são semelhantes às do diodo → Tempo de recuperação reversa (t_{rr}) e corrente de recuperação reversa máxima (I_{RR}).
- I_{RR} e t_{rr} podem ser calculadas da mesma forma como foram calculadas no caso de diodos comuns.
- A junção **J2** precisa de um tempo t_{rc} para recombinar seus portadores em excesso. Quanto maior a **tensão reversa** aplicada menor será esse tempo.
- Para **bloquear o Tiristor** uma tensão reversa deve ser aplicada.
- Tempo de desligamento: $t_q = t_{rr} + t_{rc}$



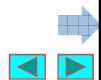
Tiristores

Desligamento do tiristor

Comutação natural,
devido à rede (AC).

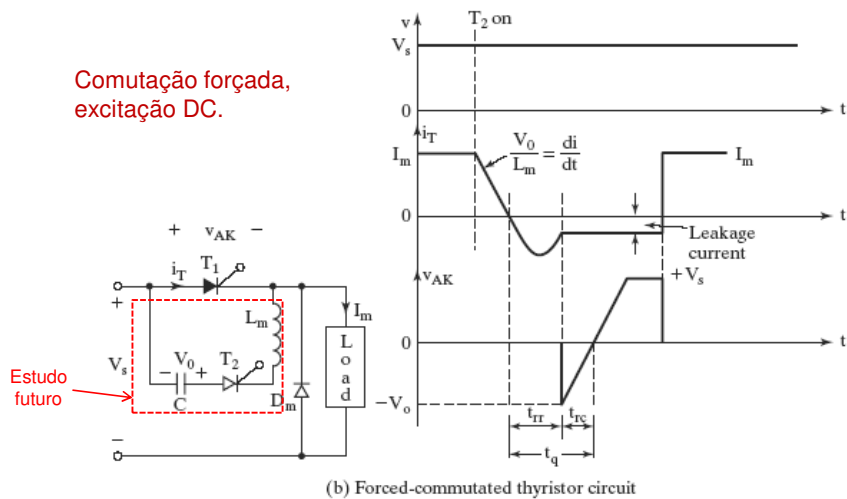


(a) Line-commutated thyristor circuit



Tiristores

Desligamento do tiristor



Tiristores

Tipos de tiristores

Os tipos de tiristores estão associados às **características de disparo**, ao **controle de di/dt** , ao **tempo de disparo** e ao **tempo de desligamento**.

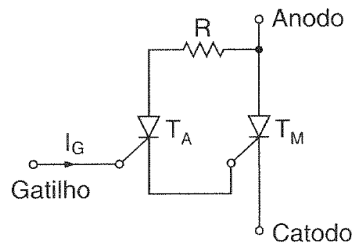
Alguns tipos:

- Tiristor de controle de fase (SCRs),
- Tiristor de desligamento por gatilho (GTOs),
- Tiristores bidirecionais (TRIACs),
- Tiristores controlados por MOS (MCTs),
- etc.

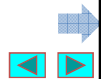
Tiristores

Tipos de tiristores - SCR

Fig. 4.11 – Tiristor (moderno) com amplificação de gatilho.



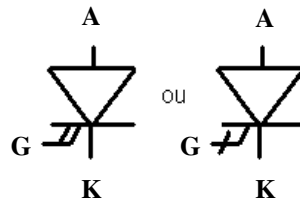
- Alto dv/dt (1000V/ μ s)
- Alto di/dt (500A/ μ s)
- Simplifica o projeto dos circuitos de proteção



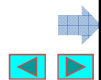
Tiristores

Tipos de tiristores - GTO

GTO (Gate-turn-off) – Tiristor de desligamento pelo gatilho



- Disparo ($v_{GK} > 0$) – pulso positivo de corrente ($I_G > 0$) – relação i_A/I_G para disparo alta (várias centenas)
- Desligamento ($v_{GK} < 0$) – pulso negativo de corrente ($I_G < 0$) – relação $i_A/|i_G|$ baixa para desligamento
- Parâmetro importante (I_{TGQ}): máxima corrente em estado de condução que pode ser bloqueada pelo controle do gatilho.



Tiristores

Tipos de tiristores - TRIAC

TRIAC : Dois SCRs conectados em anti-paralelo, com conexão de gatilho comum.

- Sem A e K, mas com MT1 e MT2
- Se $V_{MT2} > V_{MT1}$ disparo com $V_{GMT1} > 0$ e se $V_{MT1} > V_{MT2}$ disparo com $V_{GMT1} < 0$
- Opera nos quadrantes I e III
- Normalmente utilizados em conversores CA-CA

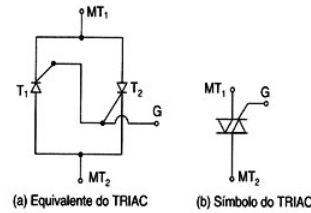
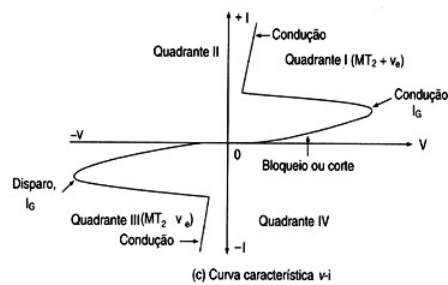


Figura 4.15

Características de um TRIAC.



Tiristores

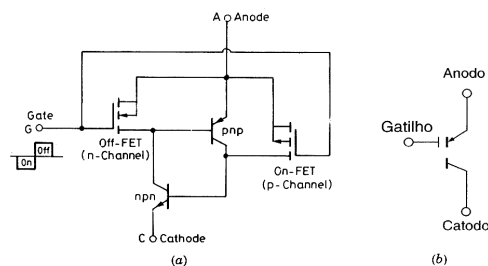
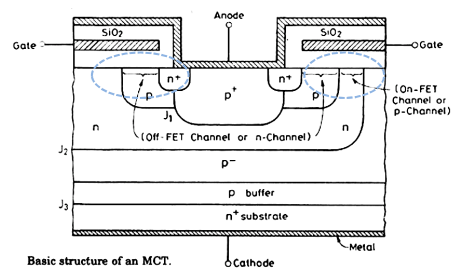
Tipos de tiristores - MCT

MCT – MOS Controlled Thyristor (Tiristor controlador por transistor MOSFET)

A tensão de referência é a do nó A (ânodo) – (P-MCT)

Tensão V_{GA} negativa PMOS conduz (NMOS no corte), disparando o Tiristor.

Tensão V_{GA} positiva NMOS conduz (PMOS no corte), curto-circuita v_{BE} do bjt pnp, i_A tende a circular pelo NMOS, i_C (i_B) do bjt pnp (nnp) tendem a cair → MCT bloqueia a corrente i_A .



MCT (a) equivalent circuit and (b) circuit symbol.

Tiristores

Operação de tiristores em série

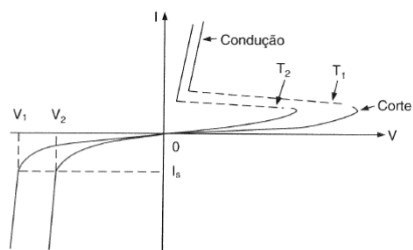


Figura 4.20
Características em estado de bloqueio de dois tiristores.

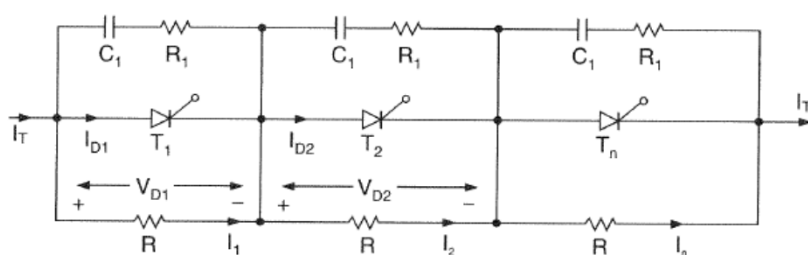
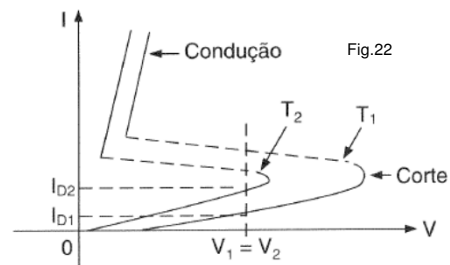


Figura 4.21

Três tiristores conectados em série.

Tiristores

Operação de tiristores em paralelo

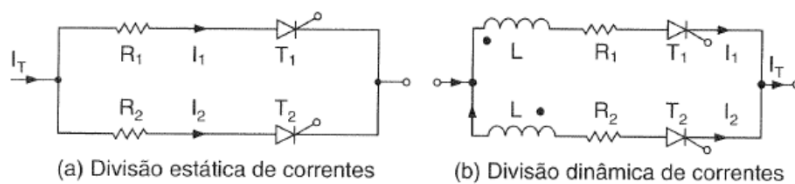


Figura 4.24

Divisão de correntes em tiristores.