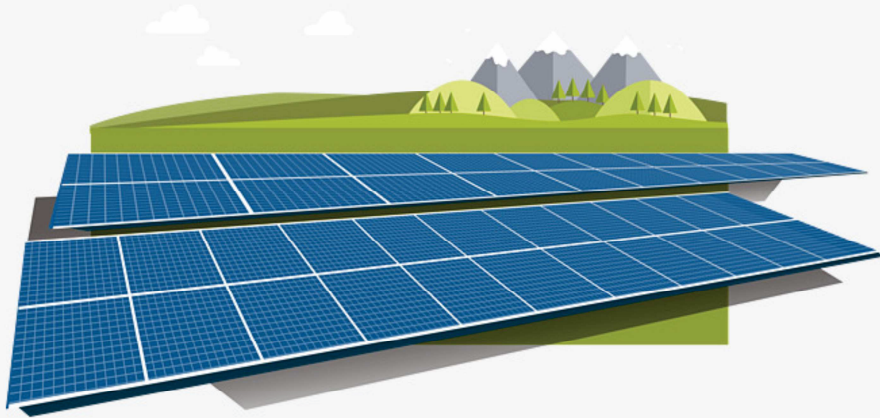


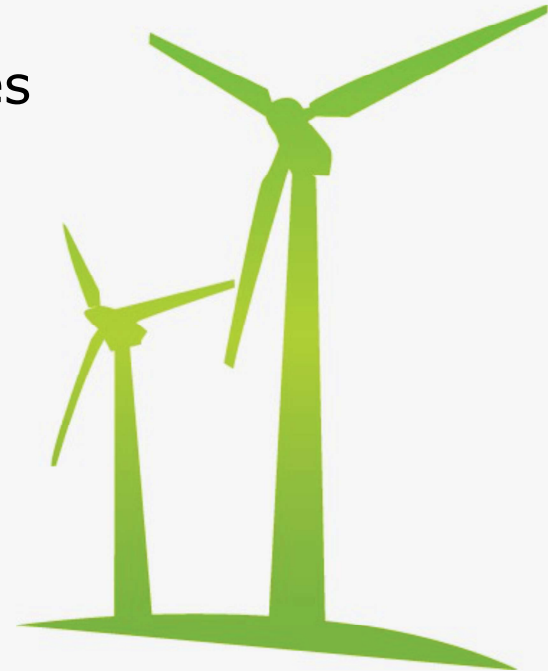
Eletrônica de Potência

Aula 06 – Tiristores

Parte 1 – Características dos tiristores



Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br

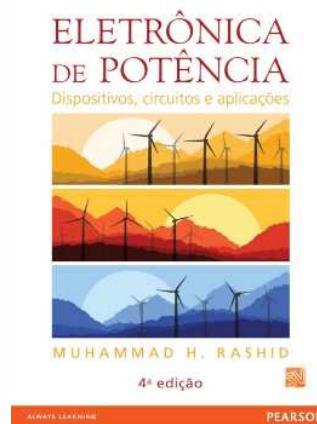


Introdução

		Tópicos
01	-	Introdução
02	-	Diodos de potência e circuitos RLC chaveados
03	-	Retificadores com diodos
04	-	Transistores de potência
05		Conversores CC-CC
06		Tiristores
07		Retificadores controlados
08	-	Conversores CC-CA
09	-	Controladores de tensão CA
10	-	Inversores de pulso ressonante

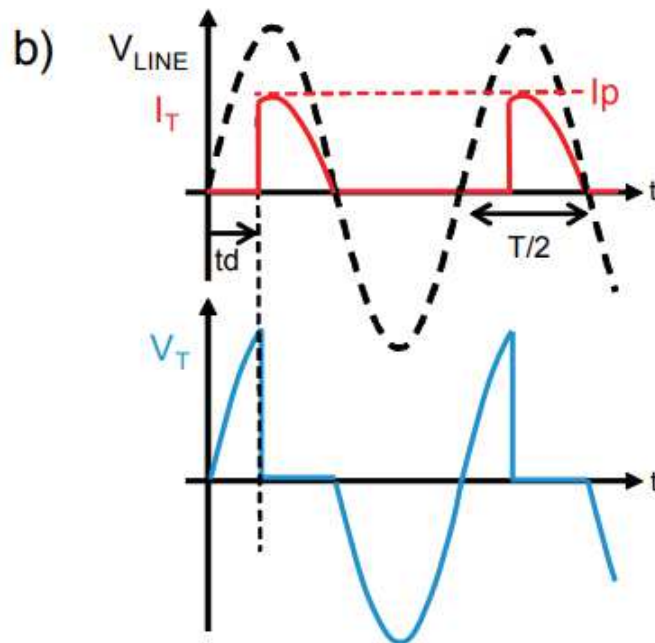
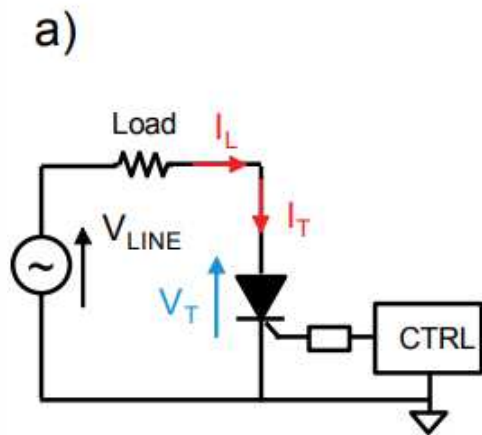
Capítulo 9 do Livro

M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014



Introdução

- Os tiristores convencionais conseguem passar de seu estado de condução para o de não condução somente quando sua corrente é levada a zero por outros meios.



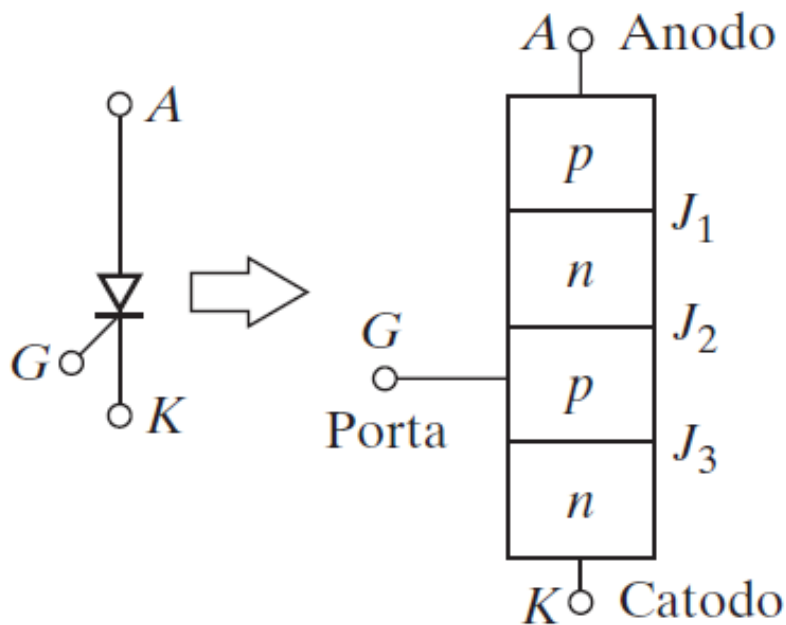
Introdução

- Os tiristores de desligamento pela porta (GTOs) são projetados para conseguir controle tanto de entrada em condução quanto de desligamento.



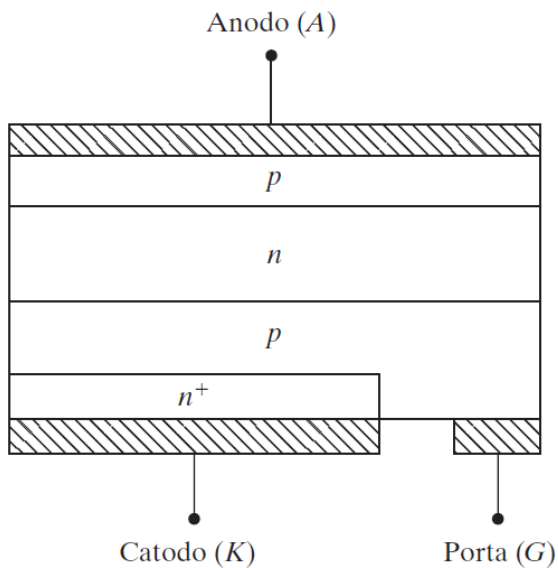
Características dos tiristores

- Símbolo do tiristor e três junções pn :

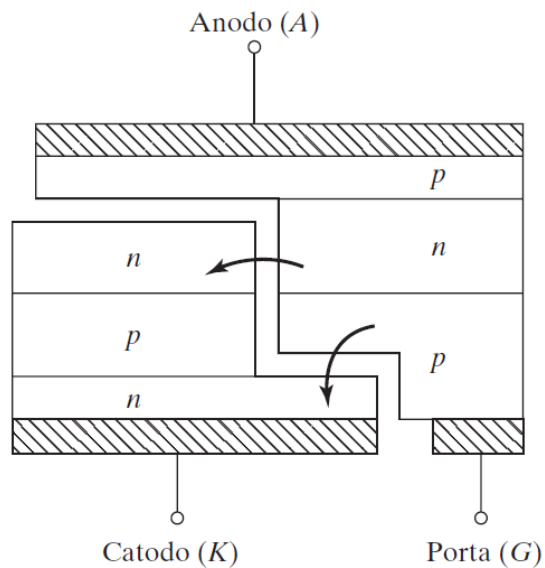


Características dos tiristores

- Seção transversal de um tiristor:



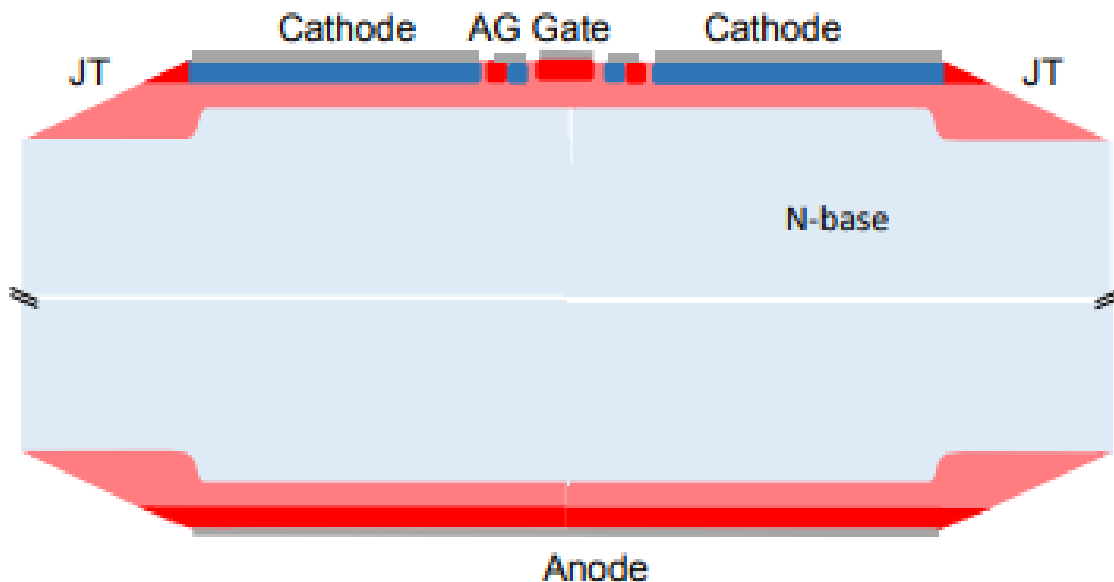
Seção transversal da estrutura *PNPN*



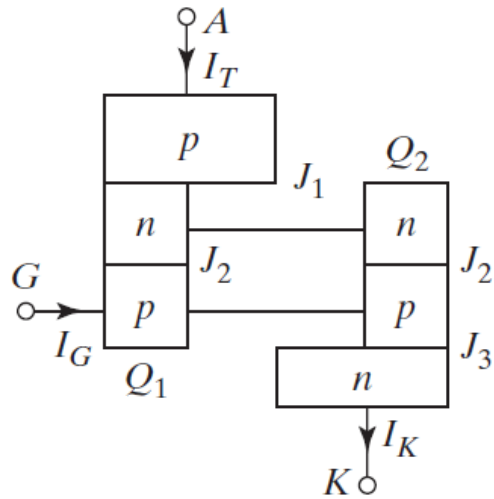
Seções *NPN* e *PNP* separadas

Características dos tiristores

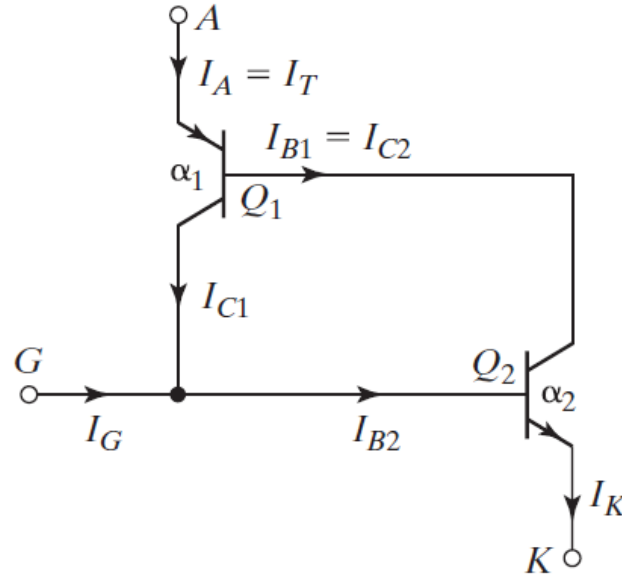
- Seção transversal de um tiristor:



Modelo de tiristor com dois transistores



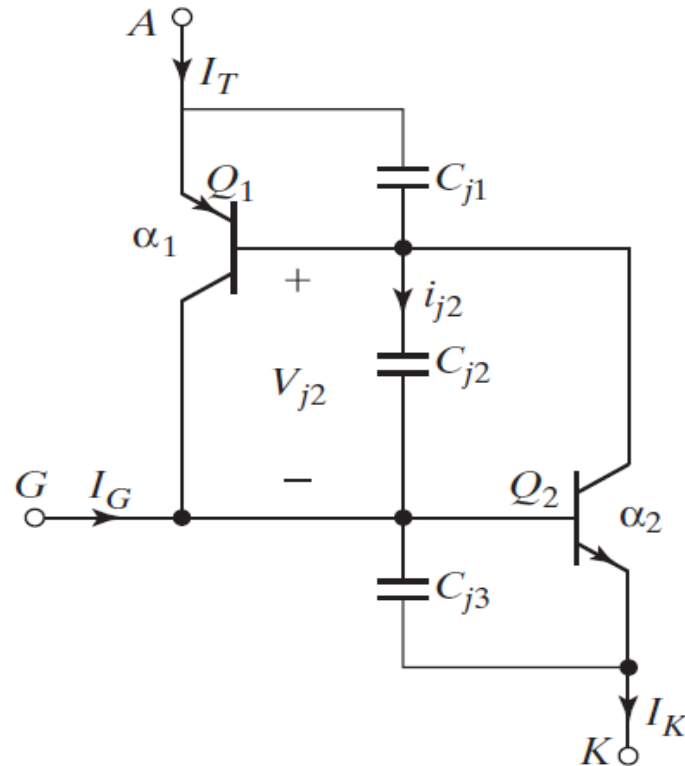
(a) Estrutura básica



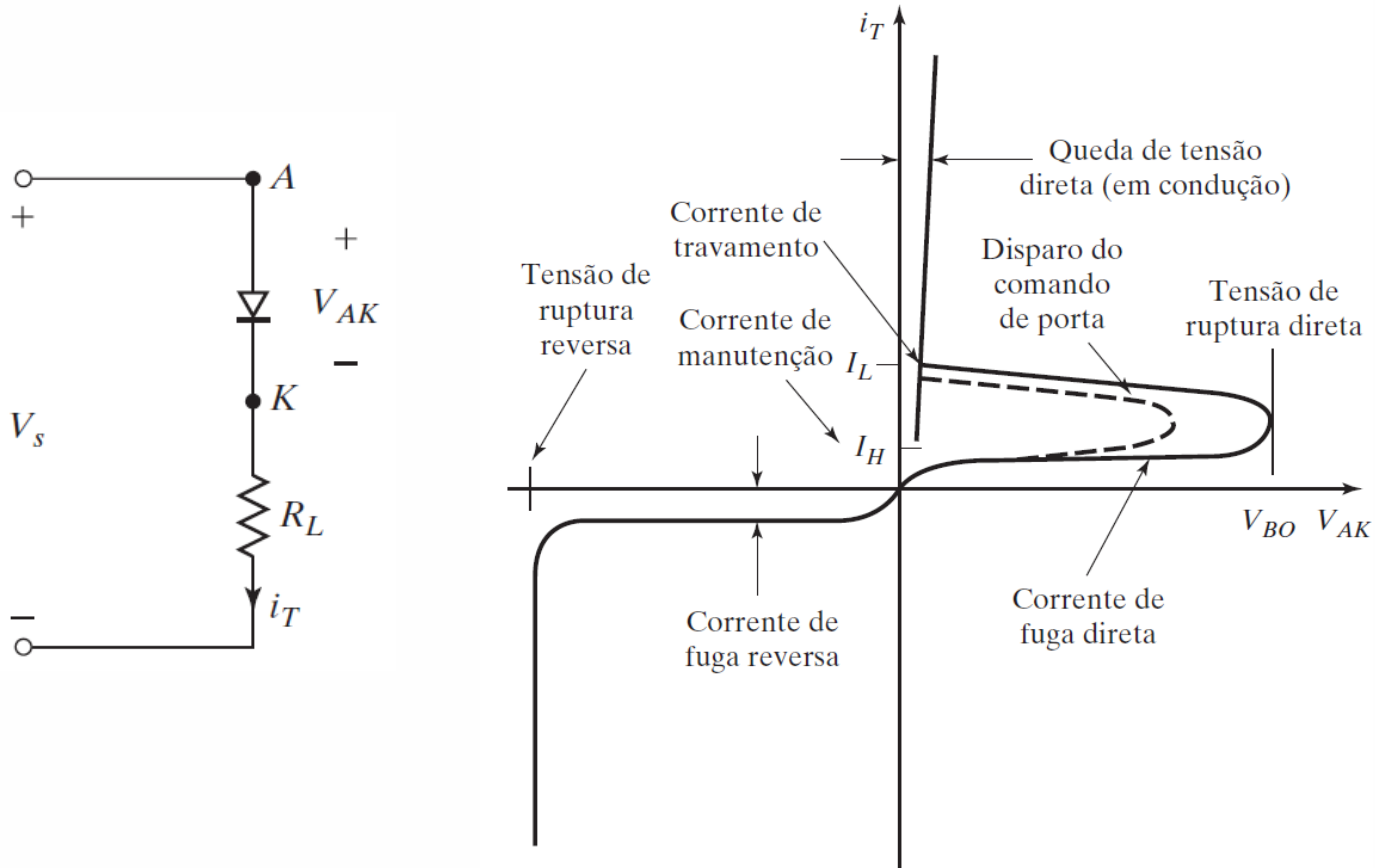
(b) Circuito equivalente

Modelo de tiristor com dois transistores

- Modelo de tiristor com dois transistores para o estado transitório:



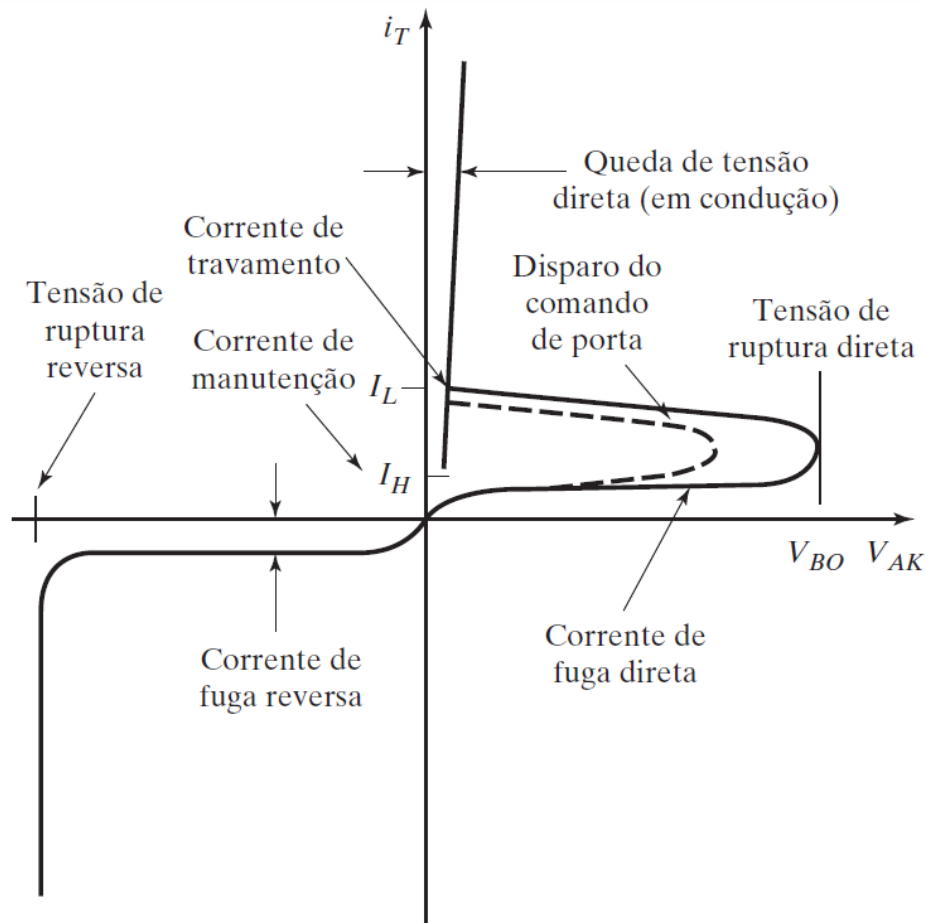
Características dos tiristores



Características dos tiristores

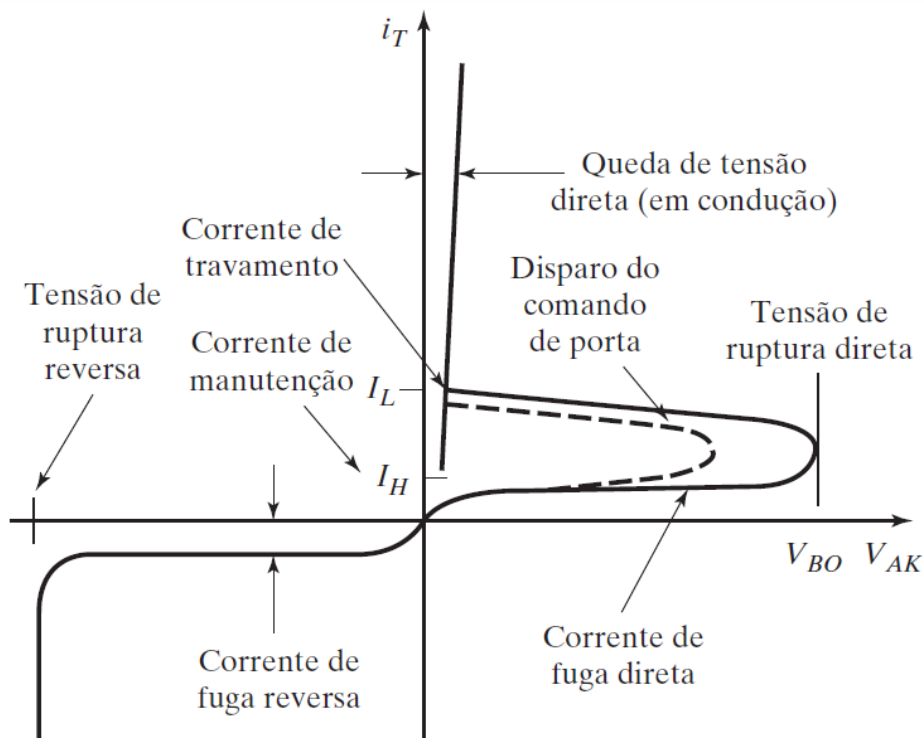
Ativação do tiristor

- Térmica
- Luz
- Tensão elevada
- dv/dt
- Corrente de acionamento



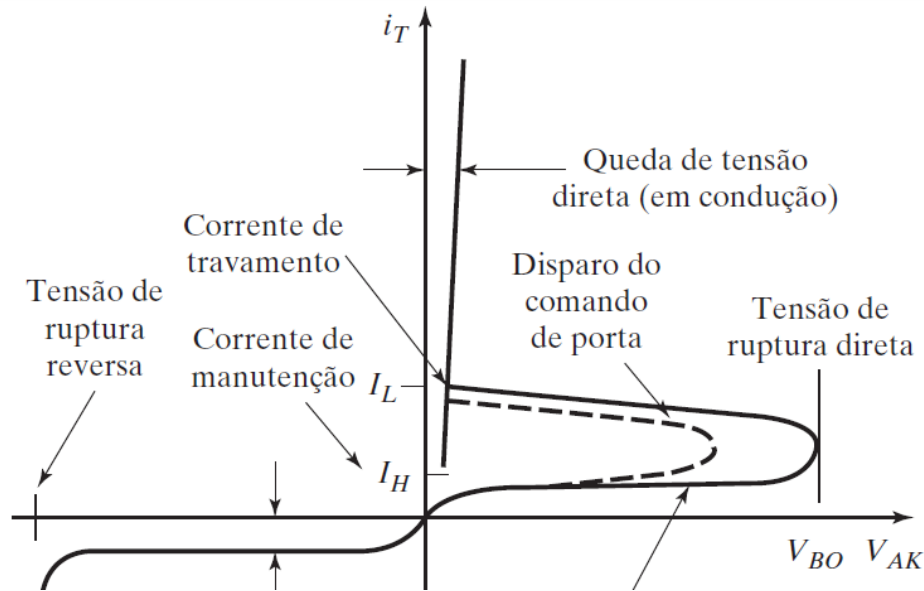
Desligamento do tiristor

- Redução da corrente direta para um nível abaixo da corrente de manutenção I_H .



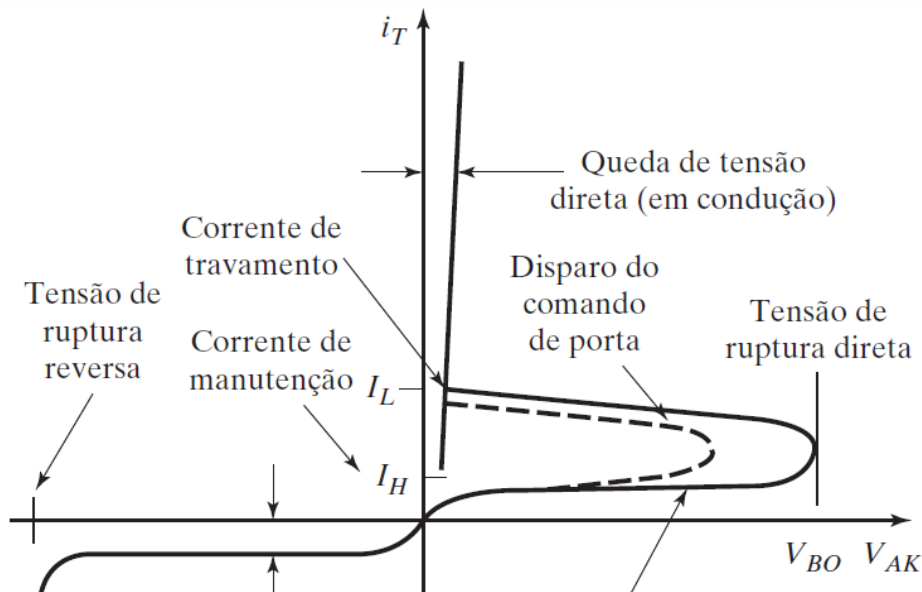
Desligamento do tiristor

- A corrente de anodo é mantida abaixo da corrente de manutenção por um tempo suficientemente longo para que todos os portadores em excesso nas quatro camadas sejam eliminados ou recombinados.



Desligamento do tiristor

- O tempo de desligamento, t_q , é o valor mínimo do intervalo de tempo entre o instante em que a corrente no estado ligado vai a zero e aquele em que o tiristor é capaz de suportar uma tensão direta sem ligar e depende do valor de pico da corrente e da tensão instantânea no estado ligado.



Tipos de tiristor

Dependendo da constituição física e do comportamento de ligar e desligar, os tiristores podem ser genericamente classificados em 13 categorias:

1. Tiristores controlados por fase (SCRs)
2. Tiristores bidirecionais controlados por fase (BCTs)
3. Tiristores assimétricos de chaveamento rápido (ASCRs)
4. Retificadores controlados de silício ativados por luz (LASCRs)
5. Tiristores tríodos bidirecionais (TRIACs)
6. Tiristores de condução reversa (RCTs)

Tipos de tiristor

7. Tiristores de desligamento pela porta (GTOs)
8. Tiristores controlados por FET (FET-CTHs)
9. Tiristores desligados por MOS (MTOs)
10. Tiristores de desligamento (controle) pelo emissor (ETOs)
11. Tiristores de comutação por porta integrada (IGCTs)
12. Tiristores controlados por MOS (MCTs)
13. Tiristores de indução estática (SITHs)

Tipos de tiristor



Bi-directionally controlled thyristors (BCT)



Phase control thyristors (PCT)

Tipos de tiristor

Tiristores controlados por fase (SCRs)

- Controle de porta: corrente para ligar.
sem controle de desligamento
- Controle: Liga com um sinal de pulso.
Desliga com comutação natural
- Frequência de chaveamento: **60 Hz**
- Queda de tensão no estado ligado: baixa
- Faixa de tensão: 1500V
- Faixa de corrente: 1000A

Tipos de tiristor

Tiristores tríodos bidirecionais (TRIACs)

- Controle de porta: corrente para ligar.
sem controle de desligamento
- Controle:
Liga com um sinal de pulso. Vantagem de conduzir nos dois sentidos.
Desliga com comutação natural
- Frequência de chaveamento: **60 Hz**
- Queda de tensão no estado ligado: baixa

Tipos de tiristor

Tiristores de desligamento pela porta (GTOs)

- Controle de porta: corrente para ligar.
corrente para desligar.
- Controle:
Liga com um sinal de pulso.
Desliga com sinal de pulso negativo.
- Frequência de chaveamento: **5000 Hz**
- Queda de tensão no estado ligado: baixa

Tipos de tiristor

Tiristores desligados por MOS (MTOs)

- Controle de porta: Duas portas
corrente para ligar.
tensão para desligar.
- Controle:
Liga com um sinal de pulso positivo de corrente na porta de acionamento.
Desliga com sinal de tensão positiva na porta MOS.
- Frequência de chaveamento: **5 kHz**
- Queda de tensão no estado ligado: baixa
- Faixa de tensão: 10 kV
- Faixa de corrente: 4 kA

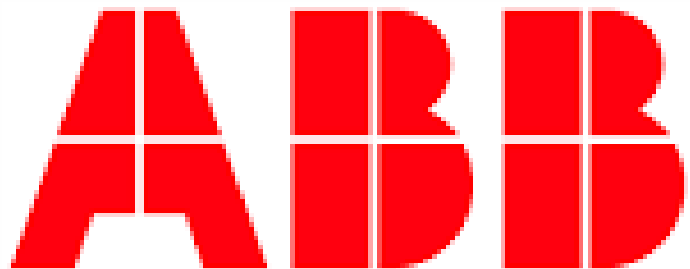
Fabricantes

SEMIKRON

innovation + service

<https://www.semikron.com/>

Fabricantes

The ABB logo, consisting of the letters "A", "B", and "B" in a bold, red, sans-serif font. Each letter is divided into four quadrants by a white cross.

<https://new.abb.com/semiconductors/thyristors>



Abraço!

Heverton Augusto Pereira

Prof. Departamento de Engenharia Eletrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

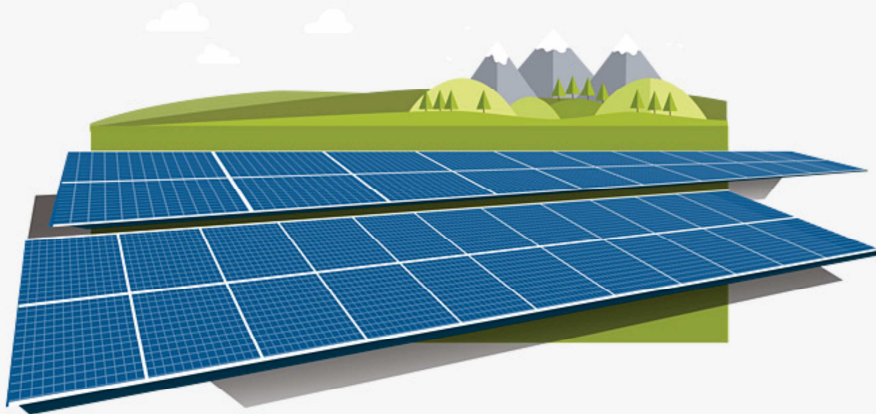
Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: heverton.pereira@ufv.br

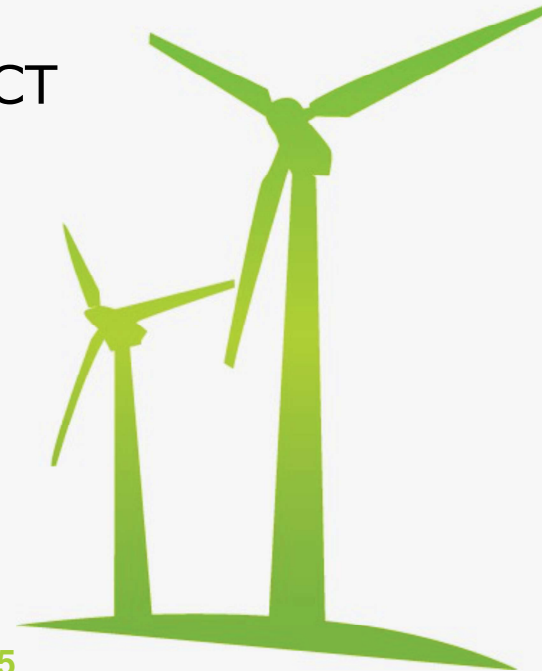
Eletrônica de Potência

Aula 06 – Tiristores

Parte 2 – DIAC, TRIAC, GTO, MCT, IGCT

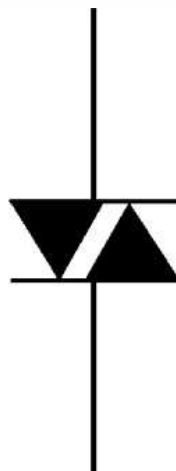
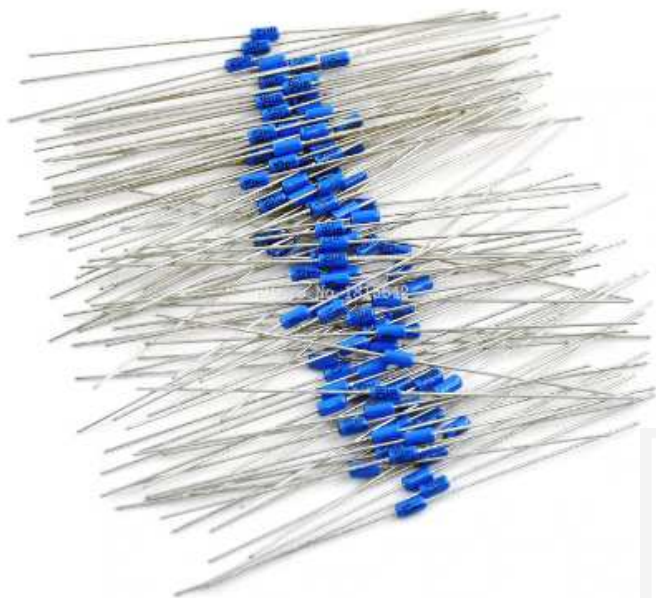


Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br



DIAC - Introdução

- “Diodo para Corrente Alternada”
- Sem terminal de porta
- Condução bidirecional



DIAC DB3



	28V
Tensão de disparo	32V
	36V

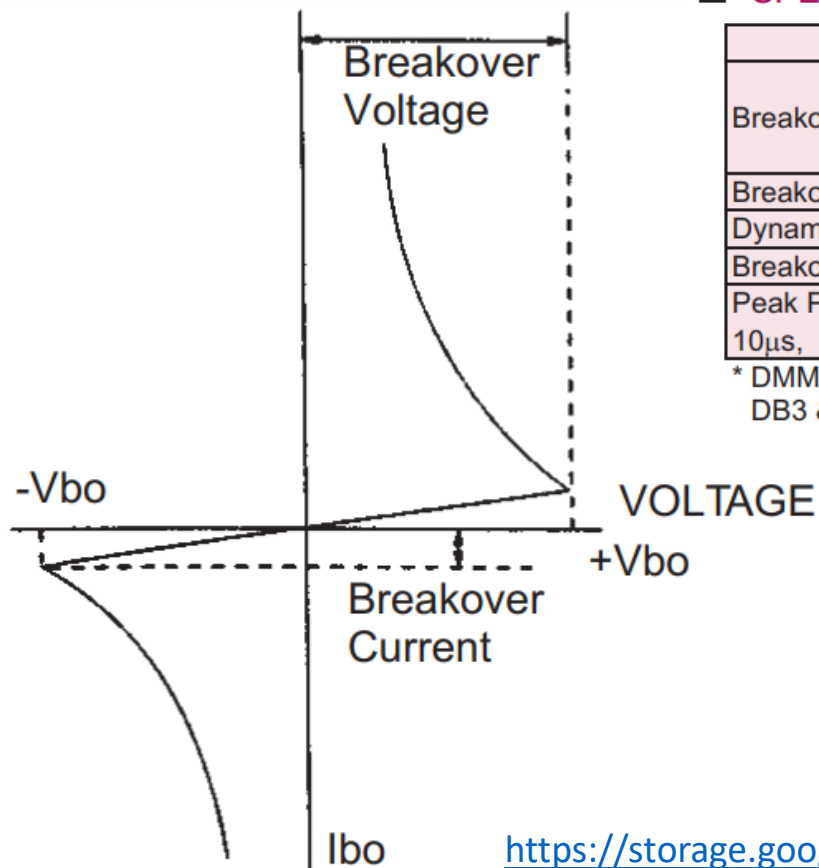
R\$ 0,13 (5% no boleto bancário)

R\$ 0,14

em até 1x de R\$ 0,14 s/ juros

Curva característica

■ SPECIFICATIONS

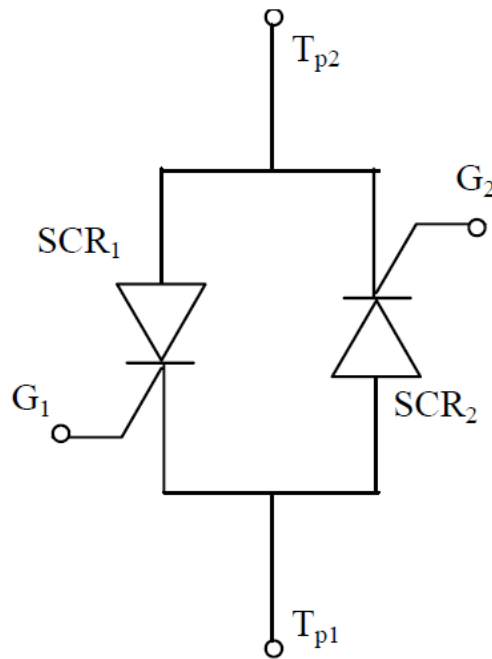
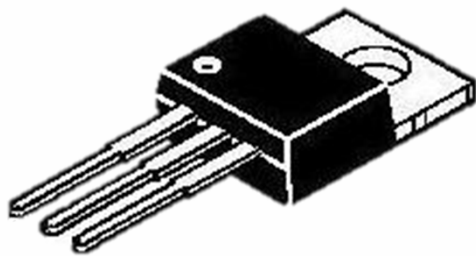
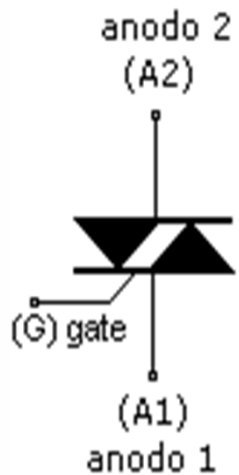


Parameters	Symbol	*(DMM)DB3	*(DMM)DB4	Units
Breakover Voltage	$V(BR)1, V(BR)2$	28	35	V min
		32	40	V typ
		36	45	V max
Breakover Voltage Symmetry	$ V(BR)1 - V(BR)2 $	3	3	V max
Dynamic Breakback Voltage	$I \pm V \Delta I$	5	5	V max
Breakover Current	$I(BR)1$ AND $I(BR)2$	50	50	μA max
Peak Pulse Current for 10 μs , 120pps, $T_A \leq 4^\circ C$	IP	2.0	2.0	A max

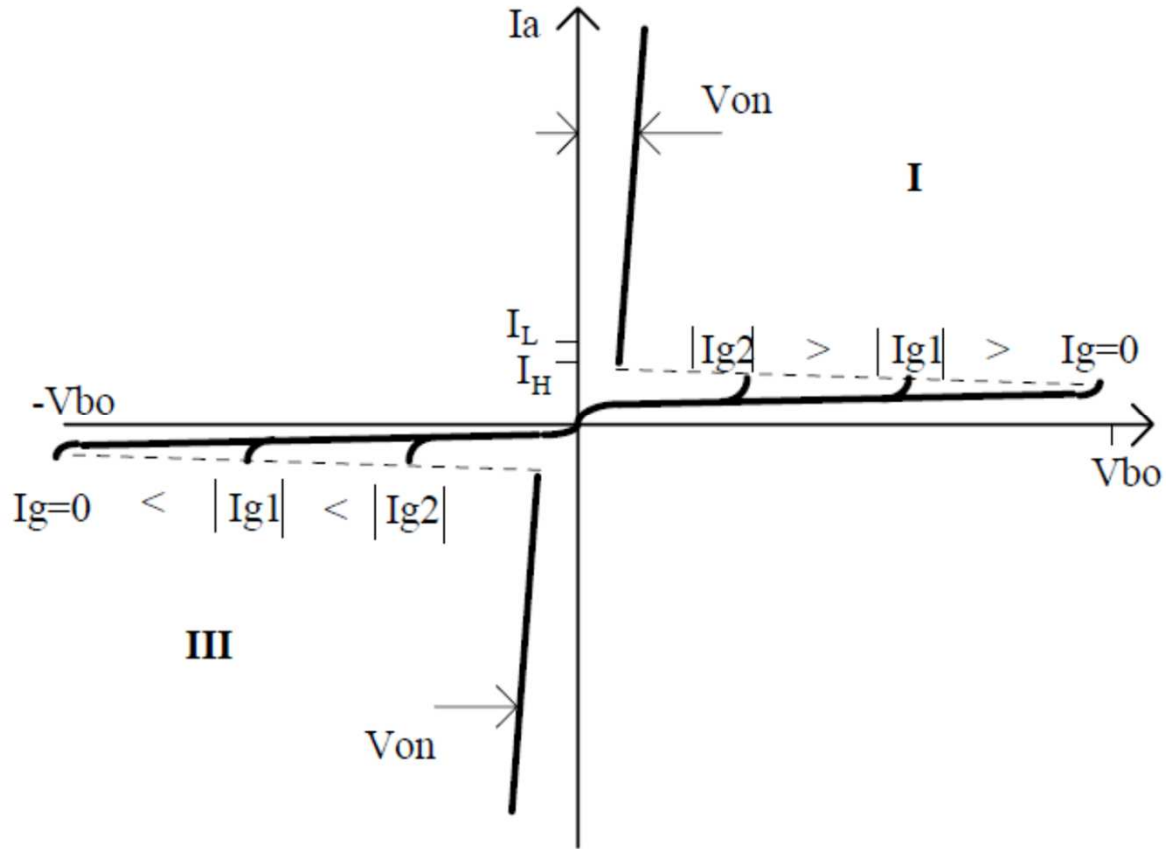
* DMMDB3 & DMMDB4 are DL-35 (mini-MELF).
DB3 & DB4 are DO-35.

TRIAC - Introdução

- “Tríodo de Corrente Alternada”
- Semelhança ao DIAC
- Gate



Curva característica



Comparação

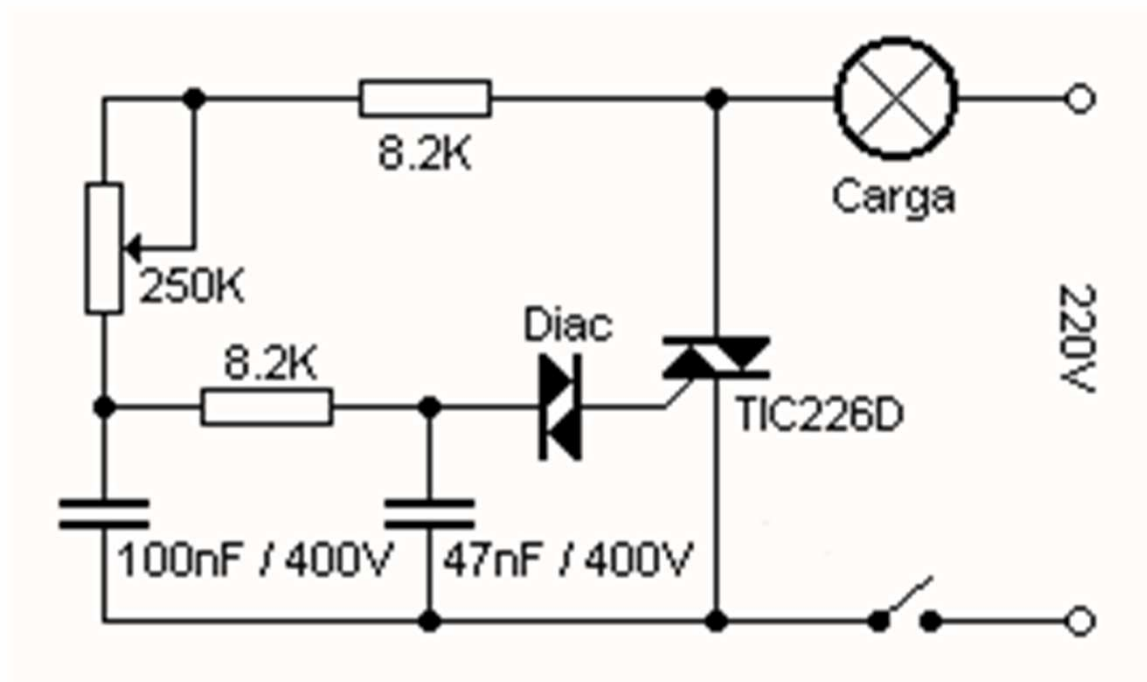
DIAC:

- Sem terminal de porta
- Sem controle de disparo
- Baixa frequência de chaveamento
- Principal Vantagem: bidirecionalidade
- Principal Desvantagem: sem controle do disparo

TRIAC:

- Apresenta terminal de porta
- Com controle de disparo
- Baixa frequência de chaveamento
- Principal Vantagem: bidirecionalidade
- Principal Desvantagem: corrente máxima inferior a outros tiristores

Aplicação



GTO – Tiristor de desligamento pela porta



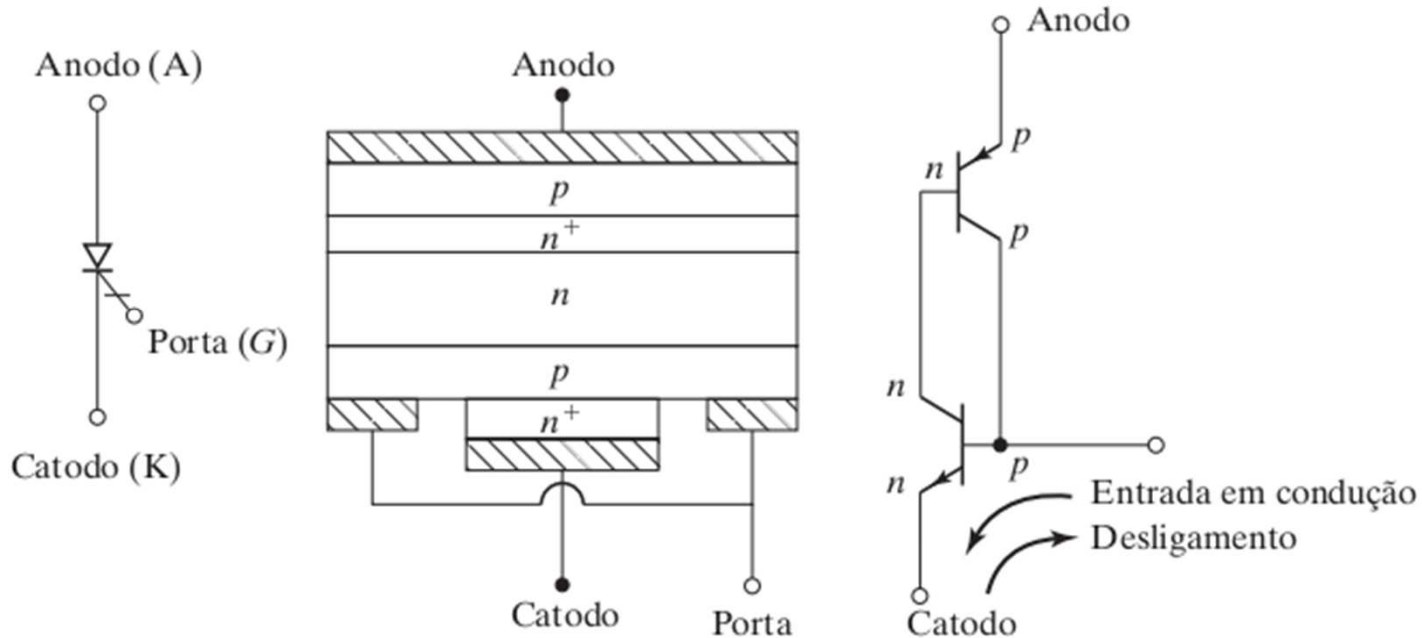
Um GTO de 200 V, 160 A (cortesia de Vishay Intertechnology, Inc.).

GTO – Tiristor de desligamento pela porta

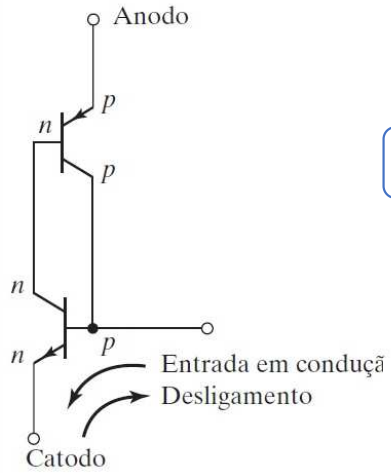
Principais características:

- Ligado por pulso positivo de curta duração na porta.
- Desligado por pulso negativo de curta duração na porta.
- Requer 1% da corrente de porta do pulso de ligação durante o estado ligado.
- Não necessita circuito de comutação forçada.
- Altas frequências de chaveamento.
- Retenção de estado ligado e desligado.

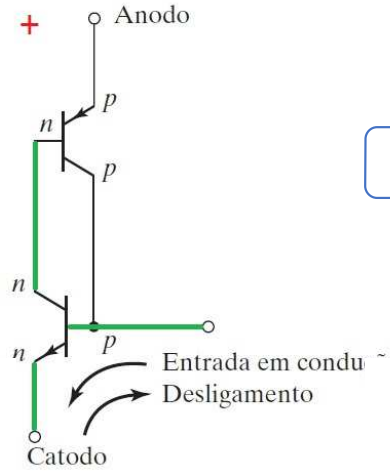
GTO – Tiristor de desligamento pela porta



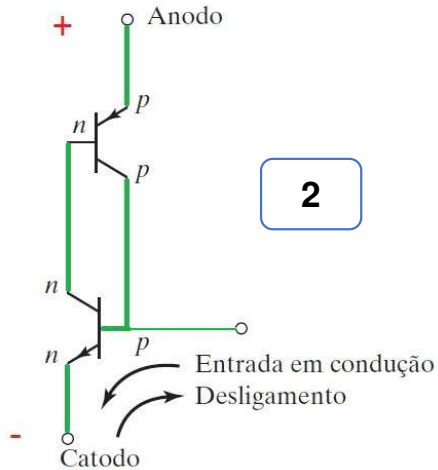
GTO – Tiristor de desligamento pela porta



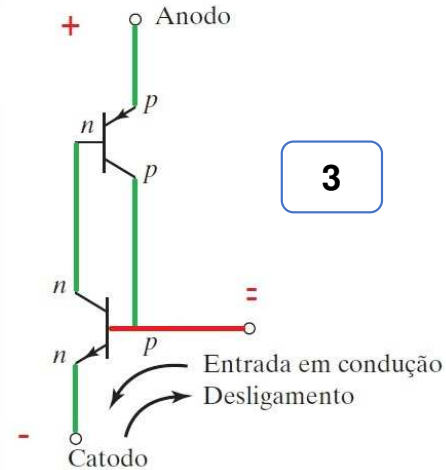
0



1



2



3

MCT – Tiristor de desligamento pela porta controlado por MOSFET

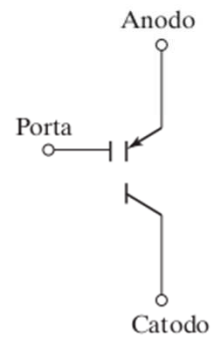
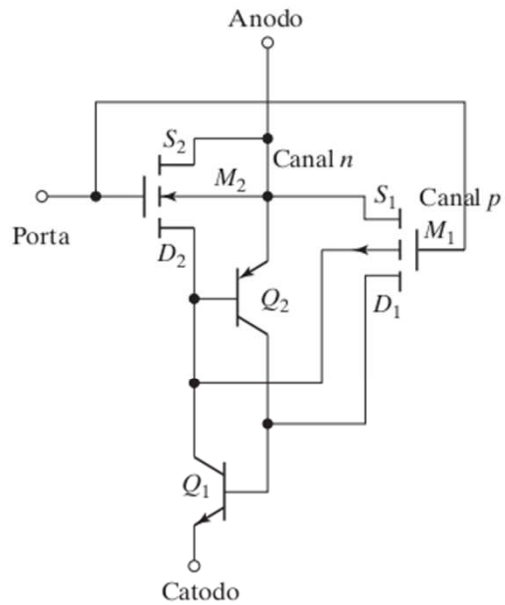
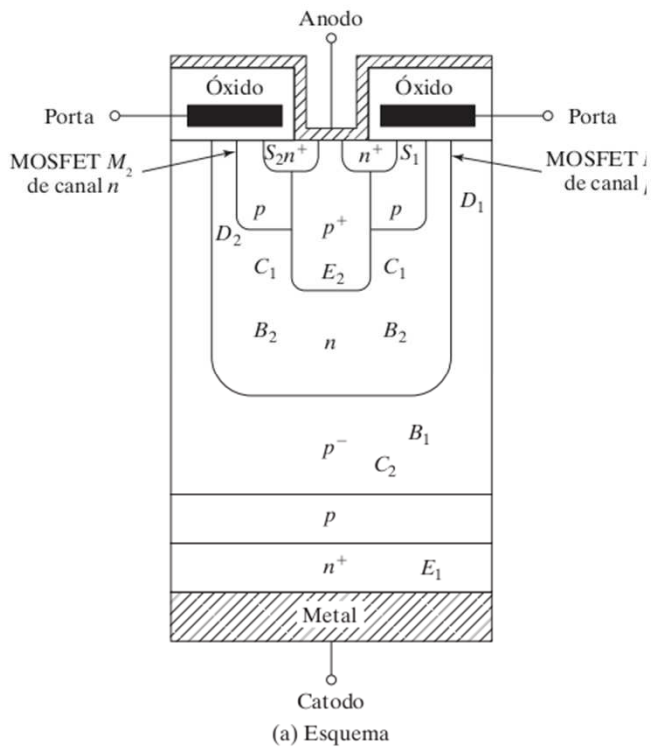
- O MCT reúne as características de um tiristor regenerativo de quatro camadas com uma estrutura de porta MOS.
- Sinal de porta referenciado ao anodo.
- Perdas de chaveamento menores se comparado ao GTO.

MCT – Tiristor de desligamento pela porta controlado por MOSFET

Principais características:

- Ligado por pulso negativo/positivo de curta duração na porta.
- Desligado por pulso positivo/negativo de curta duração na porta.
- Alta impedância na porta
- Não necessita circuito de comutação forçada.
- Altas frequências de chaveamento.
- Baixa tensão de bloqueio reversa.

MCT – Tiristor de desligamento pela porta controlado por MOSFET



IGCT



IGCT Simétrico



IGCT Assimétrico

IGCT (5SHY 35L4520)

V_{DRM}	=	4500 V
I_{TGQM}	=	4000 A
I_{TSM}	=	32×10^3 A
$V_{\text{(T0)}}$	=	1.4 V
r_{T}	=	0.325 m Ω
V_{DC}	=	2800 V

GTO (5SGA 06D4502)

V_{DRM}	=	4500 V
I_{TGQM}	=	600 A
I_{TSM}	=	3×10^3 A
V_{T0}	=	1.9 V
r_{T}	=	3.5 m Ω
V_{Dclink}	=	2800 V

GTO (5SGA 06D4502)

Turn-off switching

Maximum rated values ¹⁾

Parameter	Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit
Max. controllable turn-off current	I_{TGQM}	$V_{DM} \leq V_{DRM}$, $V_D = 0.5 V_{DRM}$			600	A
Spike Voltage	V_{DSP}	$di_{GQ}/dt = 20 A/\mu s$, $C_S = 1 \mu F$, $L_S \leq 0.15 \mu H$, RCD Snubber			≤ 650	V
Min. off-time	t_{off}		80			μs

Characteristic values

Parameter	Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit
Storage time	t_s	$V_D = 0.5 V_{DRM}$, $T_{vj} = 125^\circ C$			15	μs
Fall time	t_f	$V_{DM} \leq V_{DRM}$, $di_{GQ}/dt = 20 A/\mu s$,			5	μs
Turn-on energy per pulse	E_{off}	$I_{TGQ} = I_{TGQM}$, $R_S = 10 \Omega$, $C_S = 1 \mu F$, $L_S = 0.15 \mu H$			1.9	J
Peak turn-off gate current	I_{GQM}	RCD Snubber			300	A

IGCT (5SHY 35L4520)

Turn-off switching (see Fig. 7, 8, 10, 14, 15)

Maximum rated values ¹⁾

Parameter	Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit
Max. controllable turn-off current	I_{TGQM}	$V_{DM} \leq V_{DRM}$, $T_j = 125^\circ C$, $V_D = 2800 V$, $R_S = 0.65 \Omega$, $C_{CL} = 10 \mu F$, $L_{CL} \leq 0.3 \mu H$ $D_{FWD} = D_{CL} = 5SDF 10H4503$			4000	A

Characteristic values

Parameter	Symbol	Conditions	min	typ	max	Unit
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	$V_D = 2800 V$, $T_j = 125^\circ C$,			7	μs
Turn-off delay time status feedback	$t_{d(off) SF}$	$V_{DM} \leq V_{DRM}$, $R_S = 0.65 \Omega$ $I_{TGQ} = 4000 A$, $L_i = 5 \mu H$ $C_{CL} = 10 \mu F$, $L_{CL} = 0.3 \mu H$			7	μs
Turn-off energy per pulse	E_{off}	$D_{FWD} = D_{CL} = 5SDF 10H4503$		19.5	22	J

5SGA 06D4502 Tyrystor GTO asymetryczny | ABB



Manufacturer No.: 5SGA 06D4502

Catalog No.: C-X-X-086759

Manufacturer: ABB



Price \$ [USD] / pcs.

Quantity [pcs.]	Net price	tax_class
from 1	1.792,85	2.205,21
	\$	\$
from 10	1.361,80	1.675,01
	\$	\$
from 20	1.146,84	1.410,61
	\$	\$

Catalogue data

I_{FAV}	Voltage U_{RRM}
210 A	17-4500 V

5SHY 35L4520 Tyrystor IGCT | ABB



Manufacturer No.: 5SHY 35L4520

Catalog No.: C-X-X-086775

Manufacturer: ABB



Price \$ [USD] / pcs.

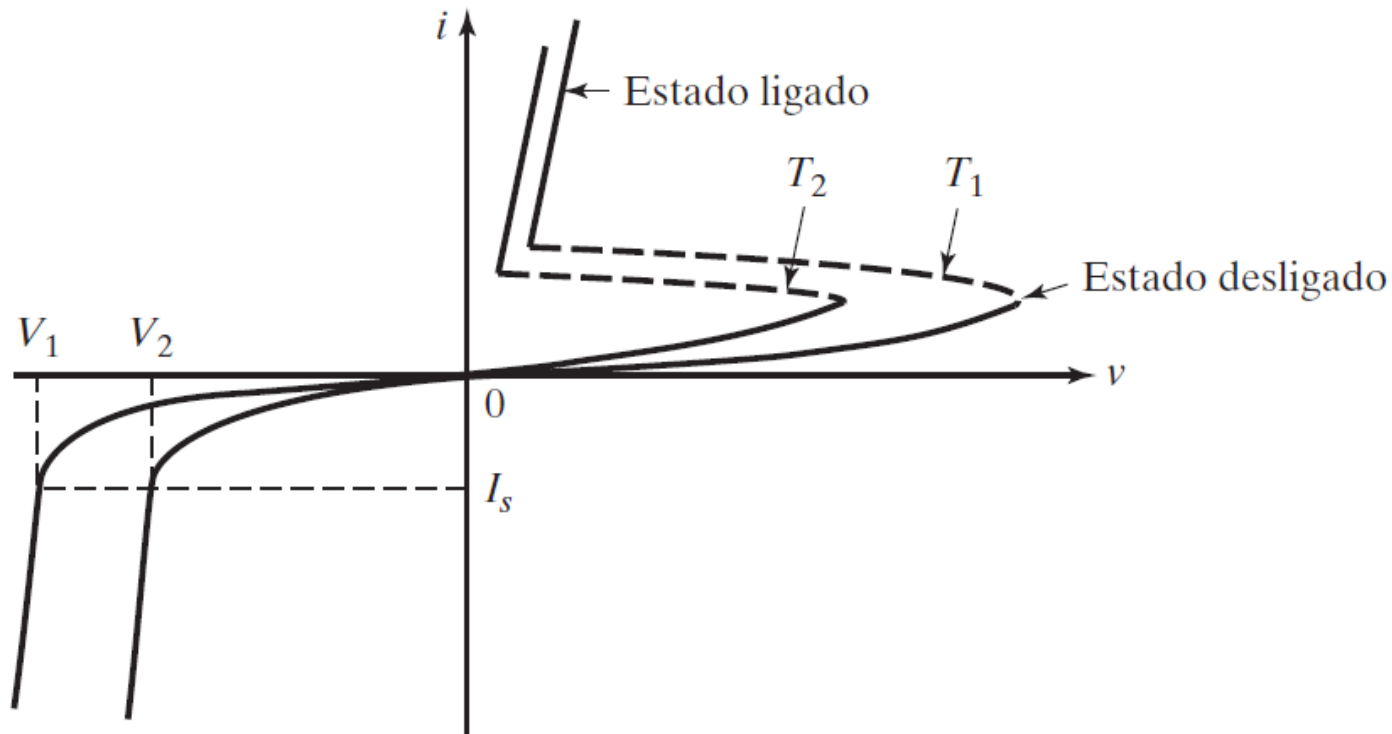
Quantity [pcs.]	Net price	tax_class
from 1	3.547,43	4.363,34
	\$	\$
from 10	2.694,34	3.314,04
	\$	\$
from 20	2.267,79	2.789,38
	\$	\$

Catalogue data

I_{FAV}	Voltage U_{RRM}
1700 A	17-4500 V

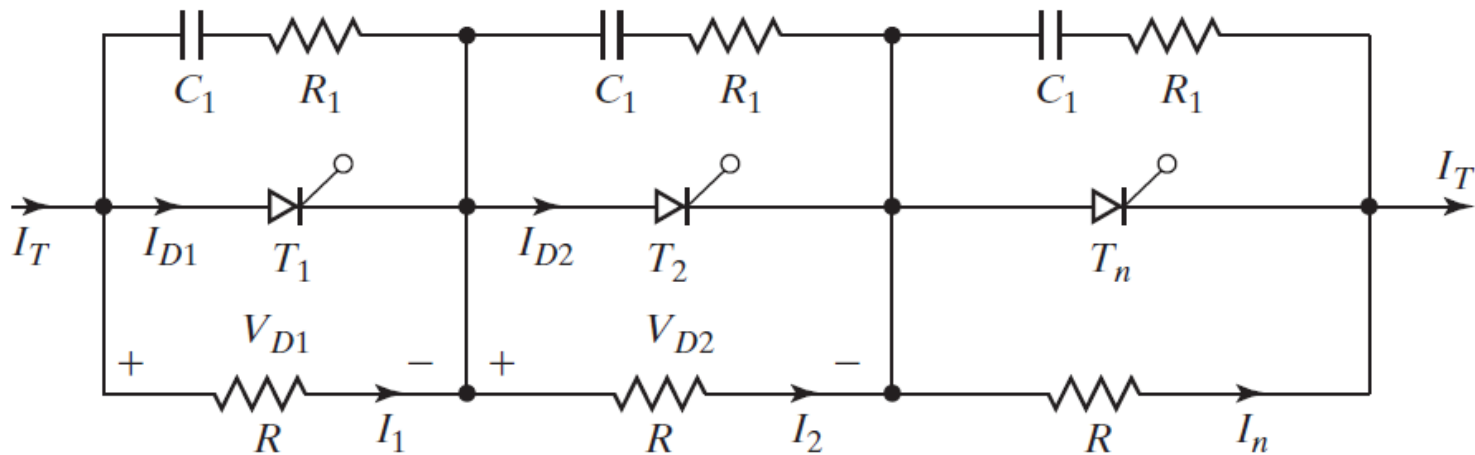
Operação em série de tiristores

- Características no estado desligado de dois tiristores:



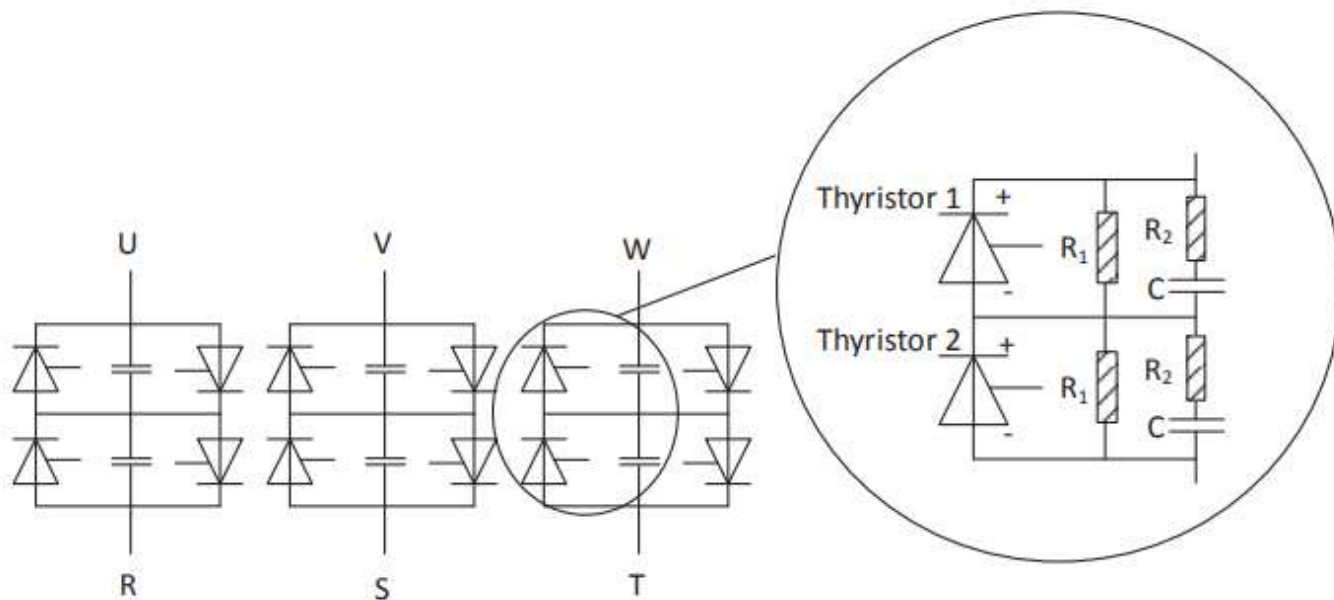
Operação em série de tiristores

- Três tiristores conectados em série:



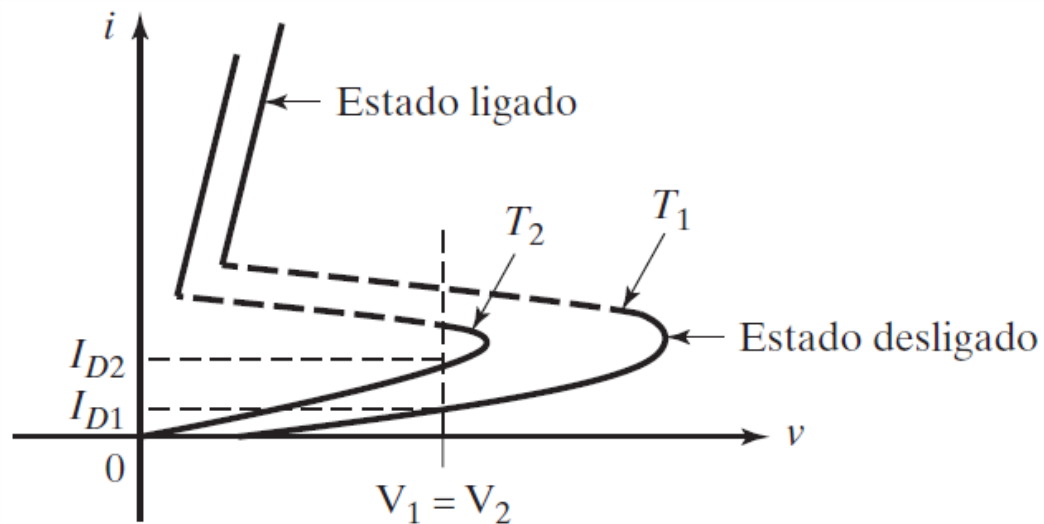
Operação em série de tiristores

- Verificar nos fabricantes 
- https://new.abb.com/semiconductors/thyristors#application_note



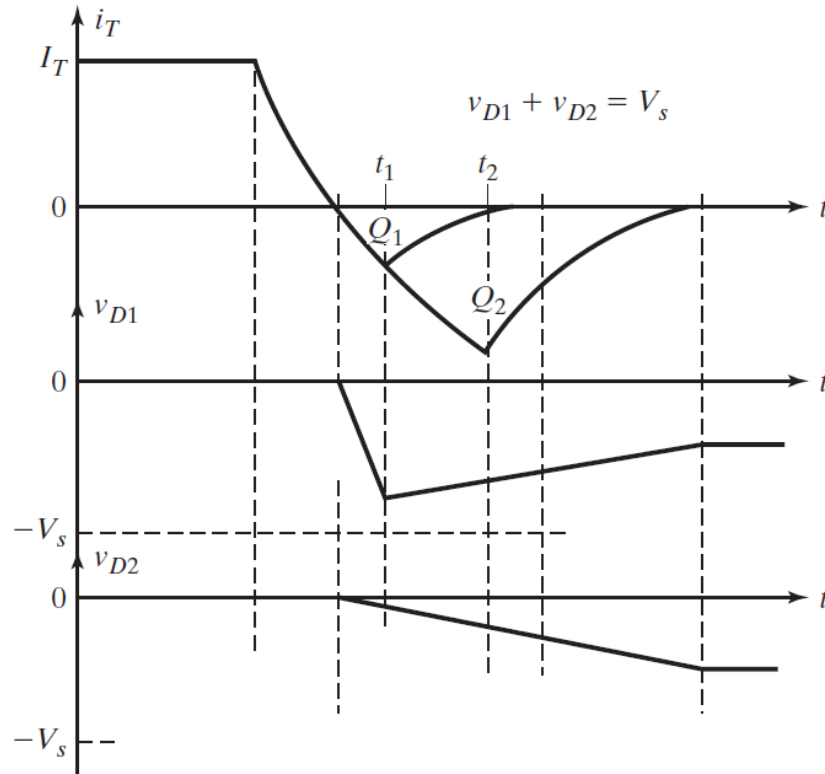
Operação em série de tiristores

- Correntes diretas de fuga com divisão igual de tensão:



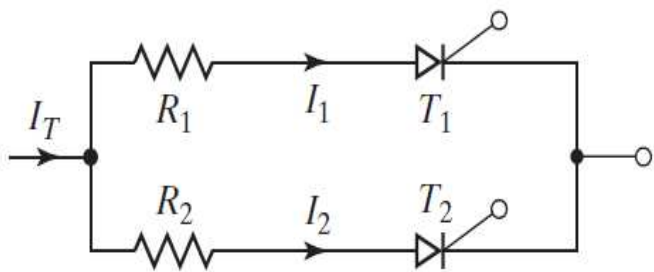
Operação em série de tiristores

- Tempo de recuperação reversa e divisão de tensão:

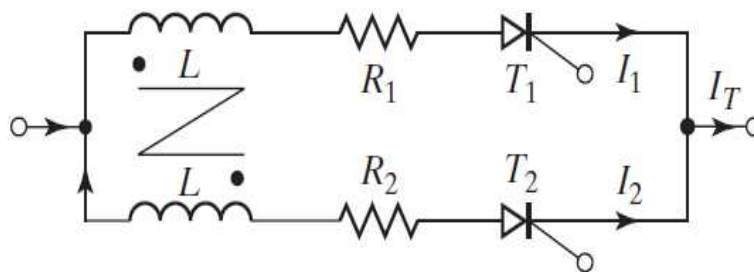


Operação em paralelo de tiristores

- Quando tiristores são conectados em paralelo, a corrente de carga não é compartilhada igualmente por conta das diferenças em suas características.
- Divisão de correntes em tiristores:



(a) Divisão estática de corrente



(b) Divisão dinâmica de corrente

Capítulo 9 do Livro

M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014



Heverton Augusto Pereira

Prof. Departamento de Engenharia Eletrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: heverton.pereira@ufv.br