



Aula 8: Tiristores: SCR, GTO e IGCT

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Sumário

- ❑ Estrutura interna;
- ❑ Física de operação;
- ❑ Características de comutação;
- ❑ Limites de operação;
- ❑ Avanços e estruturas melhoradas.

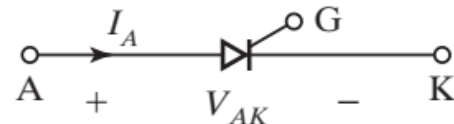


Introdução



Tiristor – Família de dispositivos

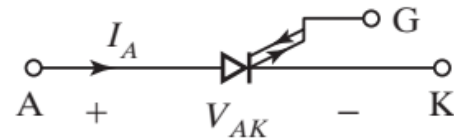
Tiristor



SITH



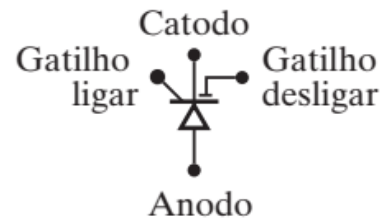
GTO



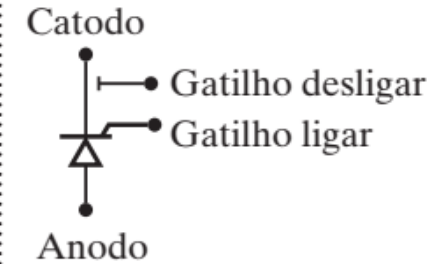
MCT



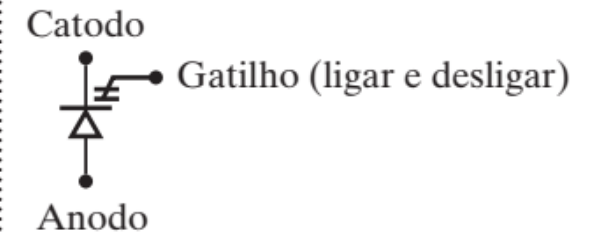
MTO



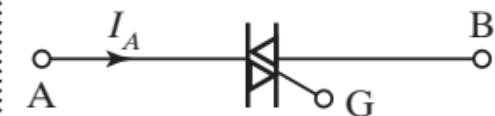
ETO



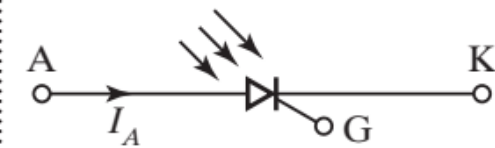
IGCT



TRIAC



LASCR



Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

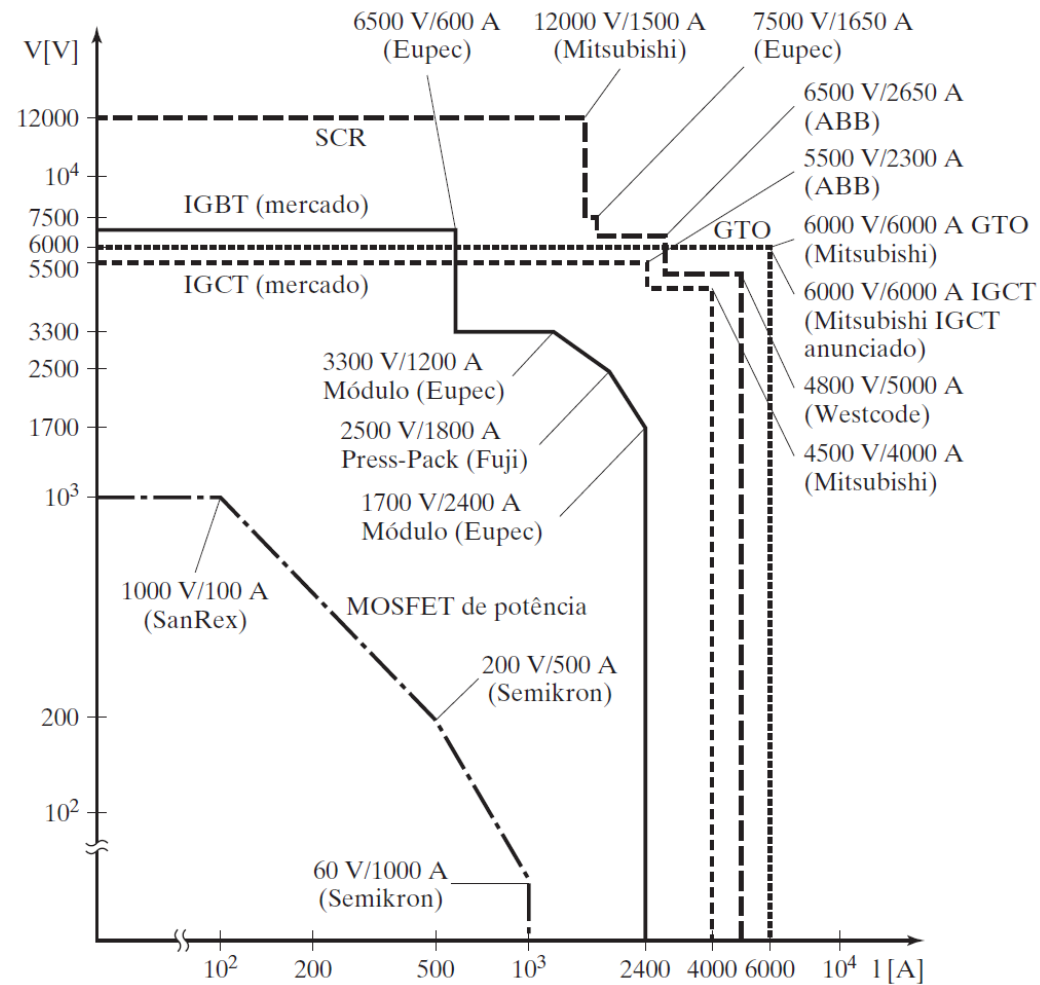
Introdução

- ❑ 1956: Transistor PNP com disparo (tiristor ou retificador controlado de silício SCR) pela Bell Telephone;
- ❑ 1958: Tiristor comercial (General Electric);
- ❑ Anos 60: GTO;
- ❑ 1980: GTO de potência é introduzido no Japão;
- ❑ 1996: IGCT comercial (ABB e Mitsubishi).



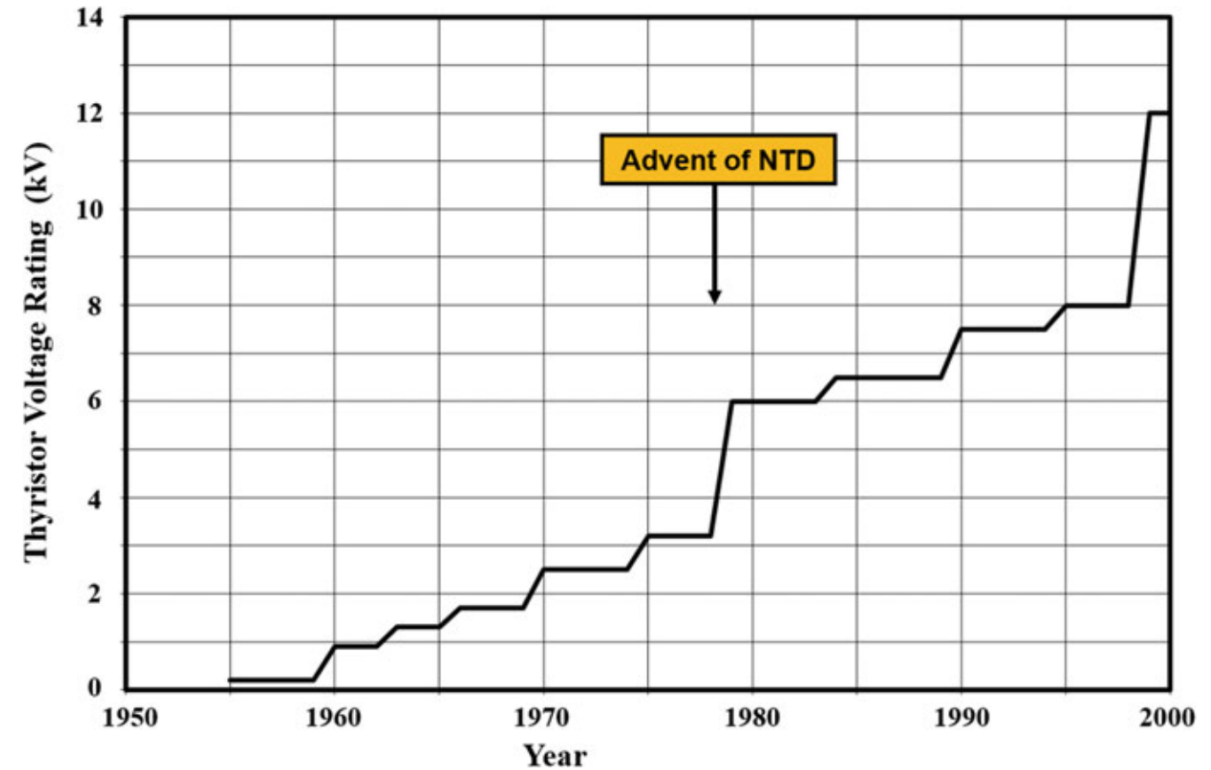
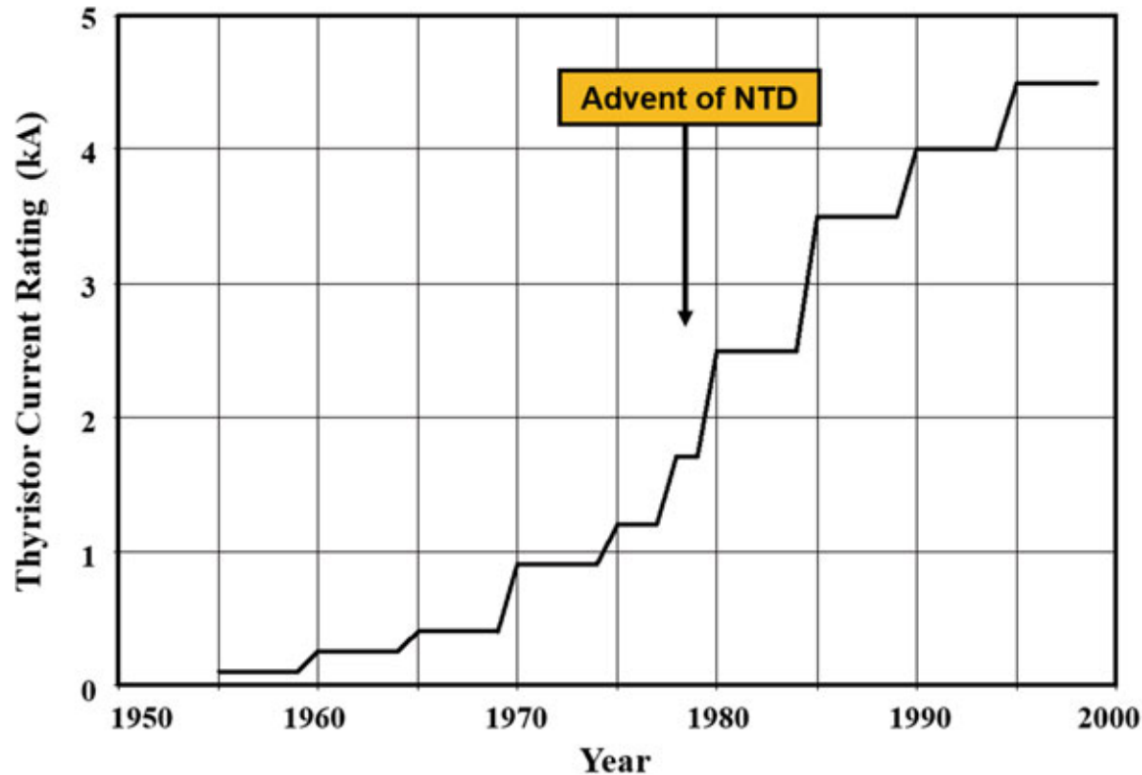
Fonte: ABB-Hitachi Power Semiconductors.

Comparativo – Tecnologias de dispositivos



Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Comparativo – Tecnologias de dispositivos



❑ NTD = Neutral Transmutation doping;

❑ Processo que permitiu pastilhas de silício grandes e com características mais uniformes.

Fonte: Baliga, B. J. “Fundamentals of Semiconductor Devices”, Springer.

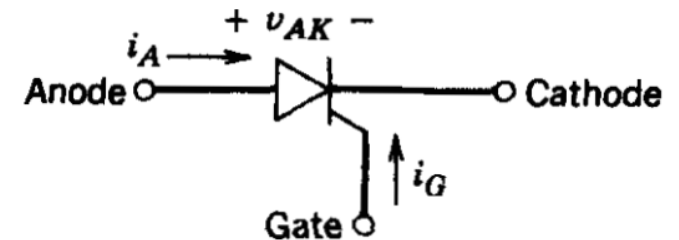
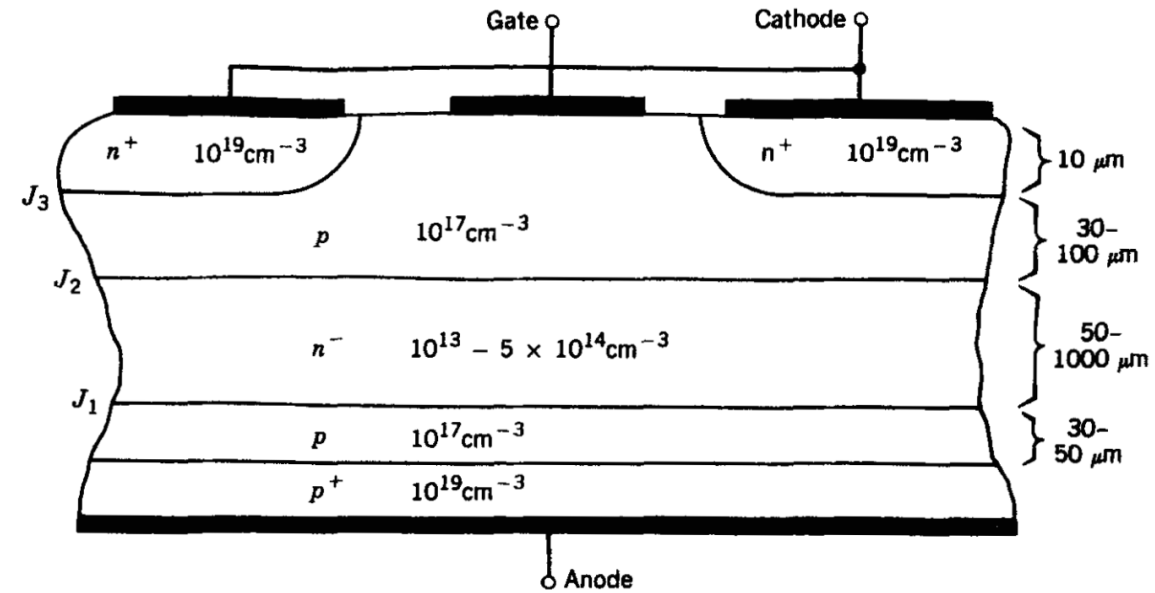


Estrutura interna - SCR



Estrutura interna

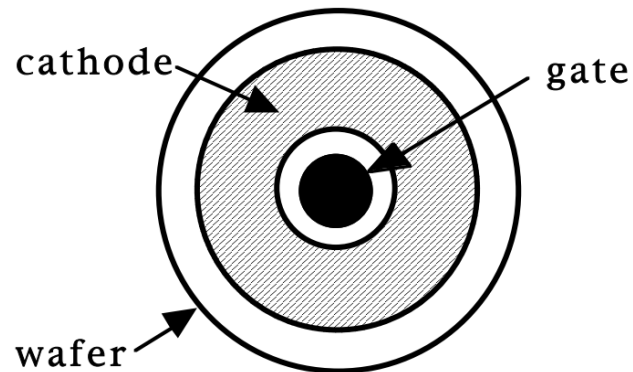
- ❑ Estrutura com 4 camadas;
- ❑ Camadas p relativamente profundas;
- ❑ Dopagem com alumínio;
- ❑ Dispositivos de kA \rightarrow 10 cm de diâmetro;
- ❑ Terminal de gate controla o dispositivo.



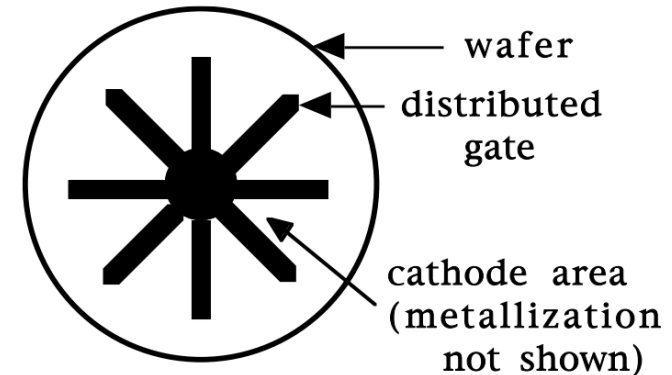
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Metalização do dispositivo

❑ SCR lento (“phase control thyristor”)



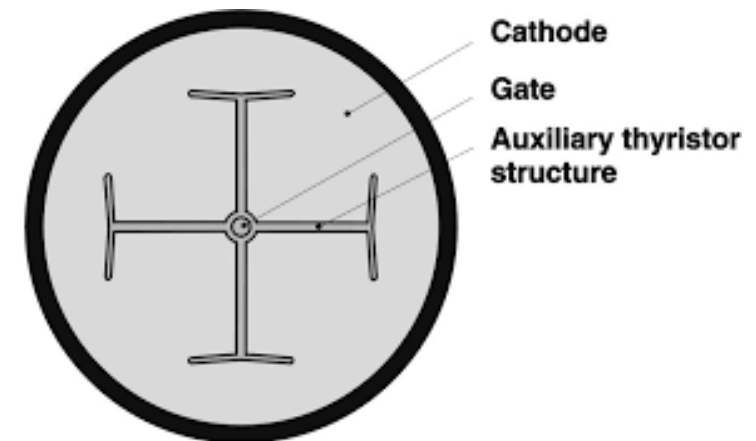
❑ SCR rápido (“inverter grade”)



❑ Layout varia de acordo com o diâmetro, capacidade de $\frac{di}{dt}$ e com o tempo de desligamento.

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

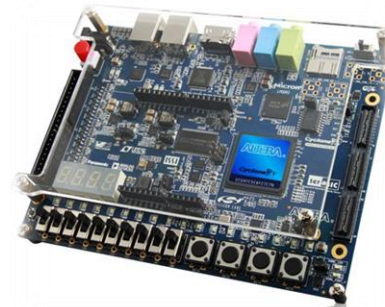
Aspecto real do dispositivo




Fonte: ABB-Hitachi Power Semiconductors.

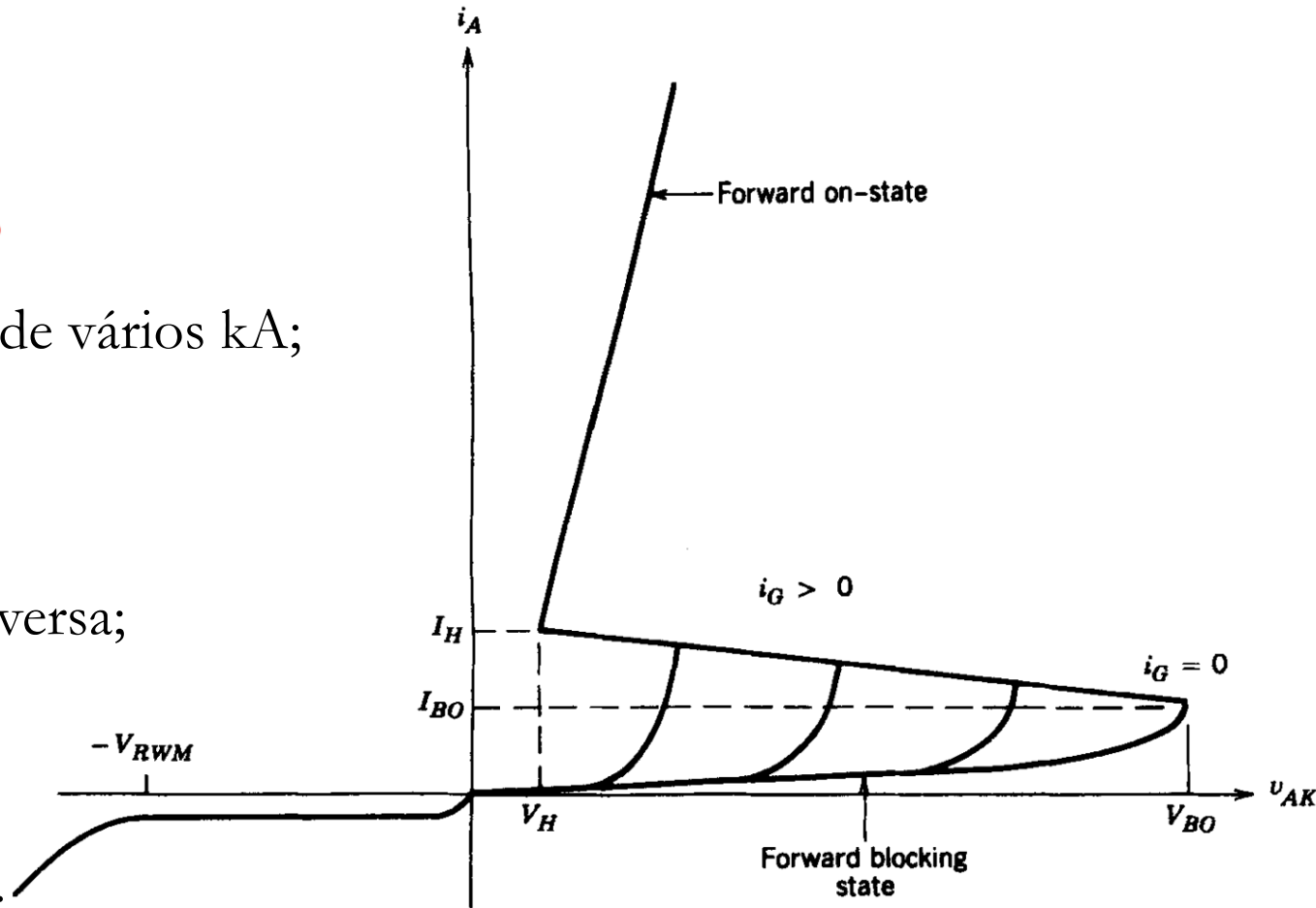


Curva I x V e física de operação




Estrutura interna

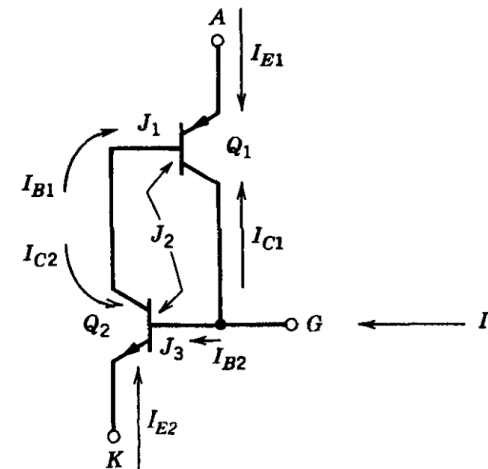
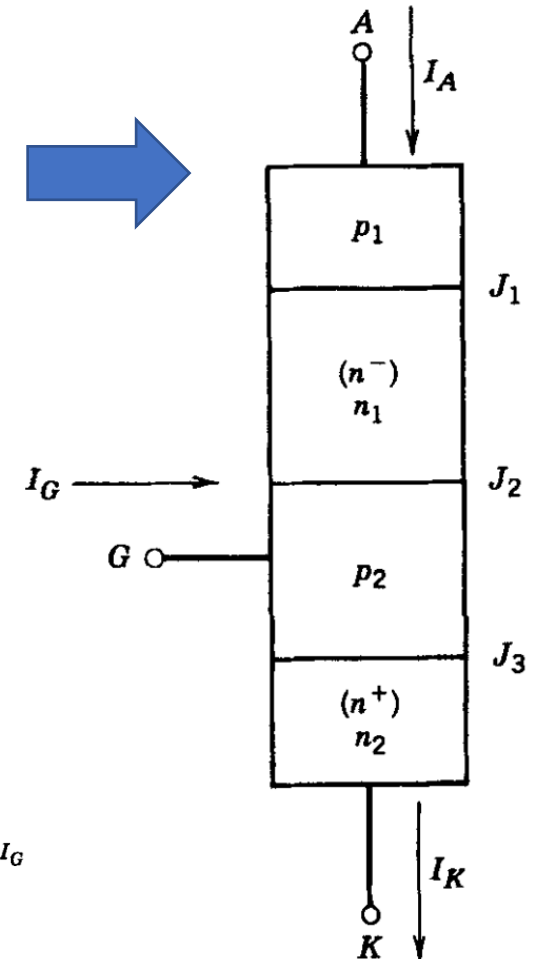
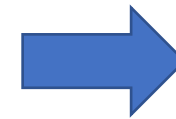
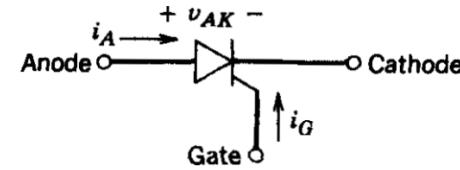
- ❑ Corrente de gate aciona o dispositivo;
- ❑ Desligamento pelo circuito externo; 
- ❑ Tensão direta de 2 a 4 V para dispositivos de vários kA;
- ❑ Tensões até 12 kV;
- ❑ V_{BO} e V_{RWM} Tensão de ruptura direta e reversa;
- ❑ Breakdown e Breakover!
- ❑ V_H e I_H : tensão e corrente de manutenção;
- ❑ Tipicamente, $V_{RWM} \approx V_{BO}$.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

SCR Bloqueado

- ❑ Estrutura do SCR: Conexão de dois TBJs;
- ❑ Presença de 3 junções: J_1, J_2 e J_3 ;
- ❑ Bloqueio reverso:
 - J_1 e J_3 reversamente polarizadas;
 - Bloqueio de tensão essencialmente por J_1 (Por quê?);
 - J_2 diretamente polarizada.
- ❑ Bloqueio direto:
 - J_1 e J_3 diretamente polarizada;
 - J_2 reversamente polarizada.
- ❑ Tensão de bloqueio para altas temperaturas. 



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Equação de Ebers-Moll

- ❑ Modelo de transistores bipolares de junção!
- ❑ A partir desse modelo, pode-se obter que:

$$I_{C1} = -\alpha_1 I_{E1} + I_{CO1}$$

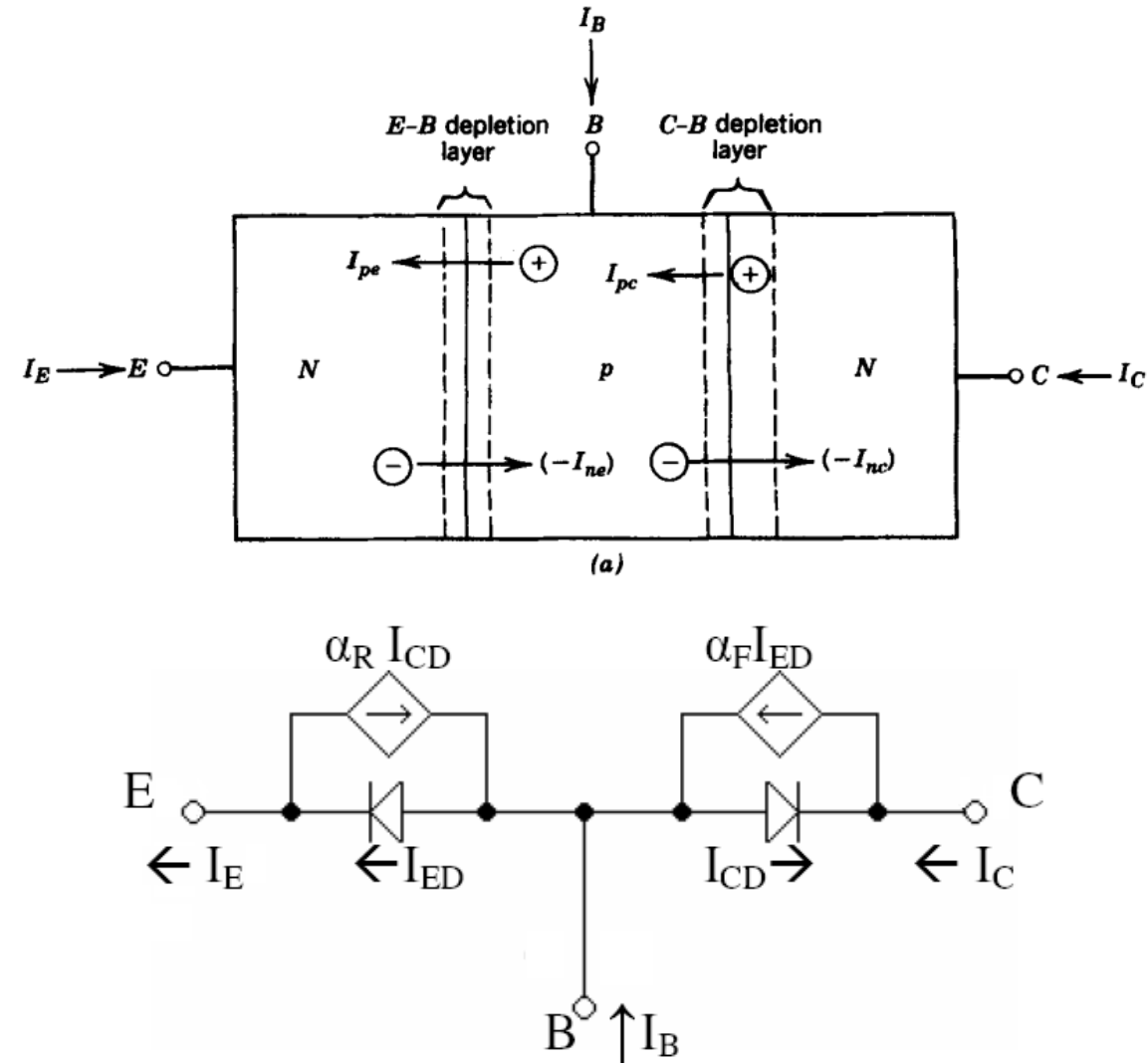
$$I_{C2} = -\alpha_2 I_{E2} + I_{CO2}$$

Onde:

$$\alpha_r = \frac{I_{nc}}{I_{ne}} \approx \frac{\beta}{\beta + 1}$$

é o coeficiente de transporte da base;

I_{CO} : Corrente na junção CB com emissor aberto!



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Equação de Ebers-Moll no SCR

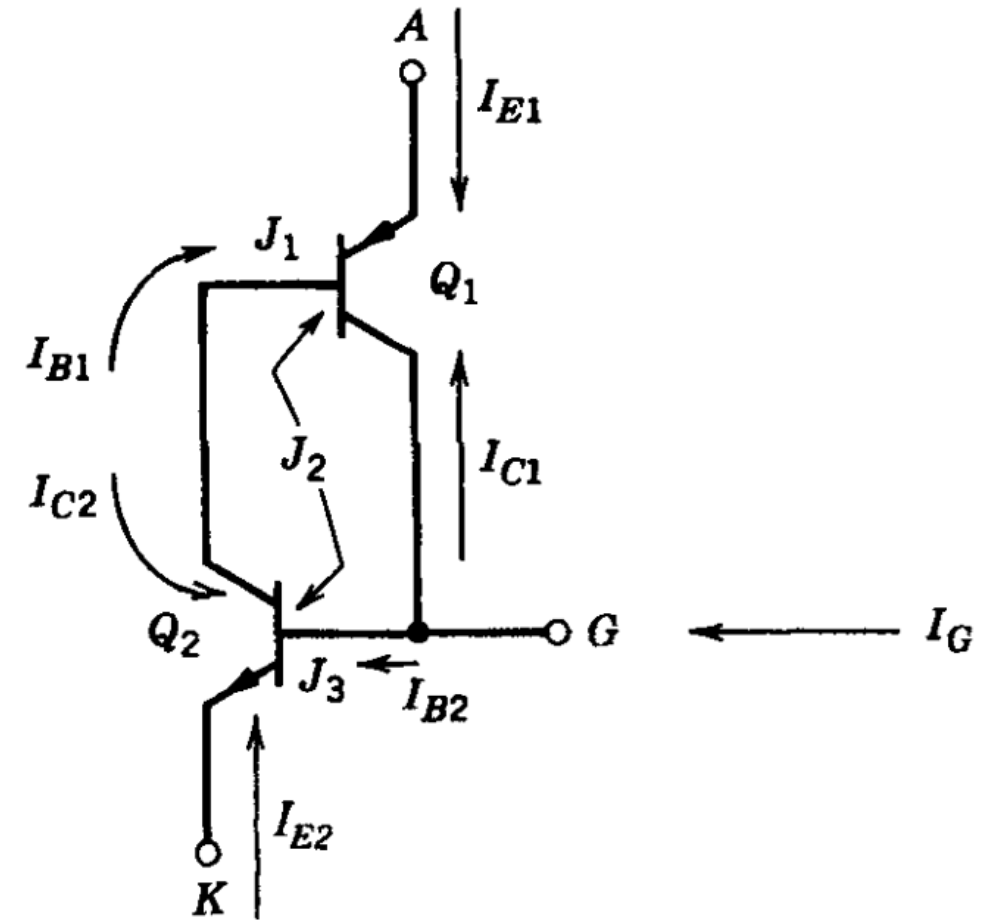
$$I_{C1} = -\alpha_1 I_{E1} + I_{CO1}$$

$$I_{C2} = -\alpha_2 I_{E2} + I_{CO2}$$

□ Note que $I_A = I_{E1}$ e $I_K = -I_{E2} = I_A + I_G$.

□ Desta forma,

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CO1} + I_{CO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

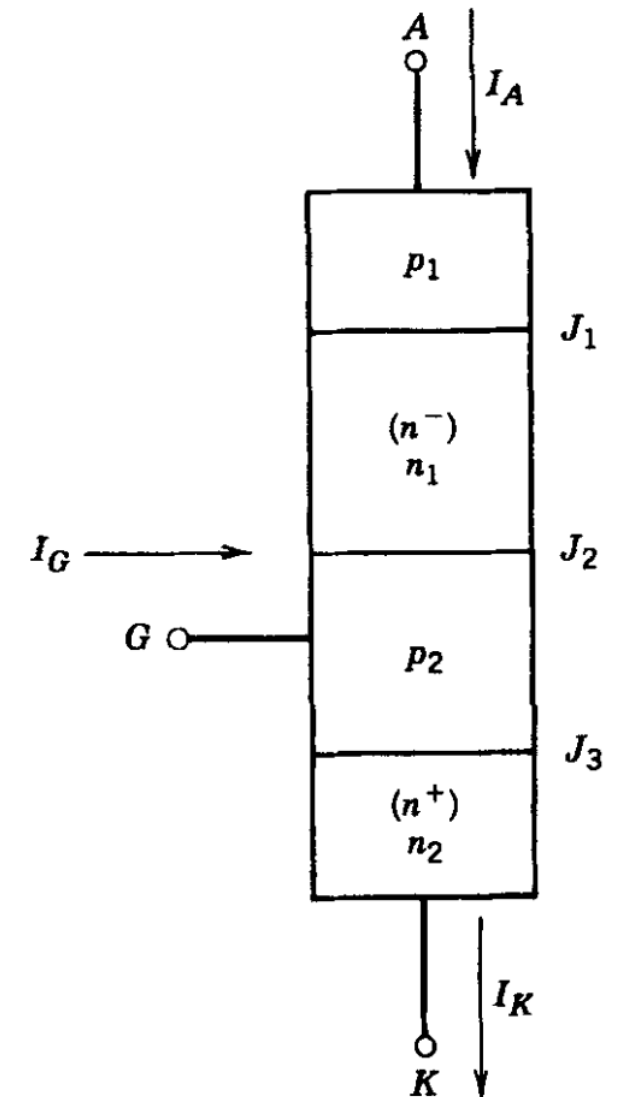


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Análise do comportamento do SCR - Breakover

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CO1} + I_{CO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

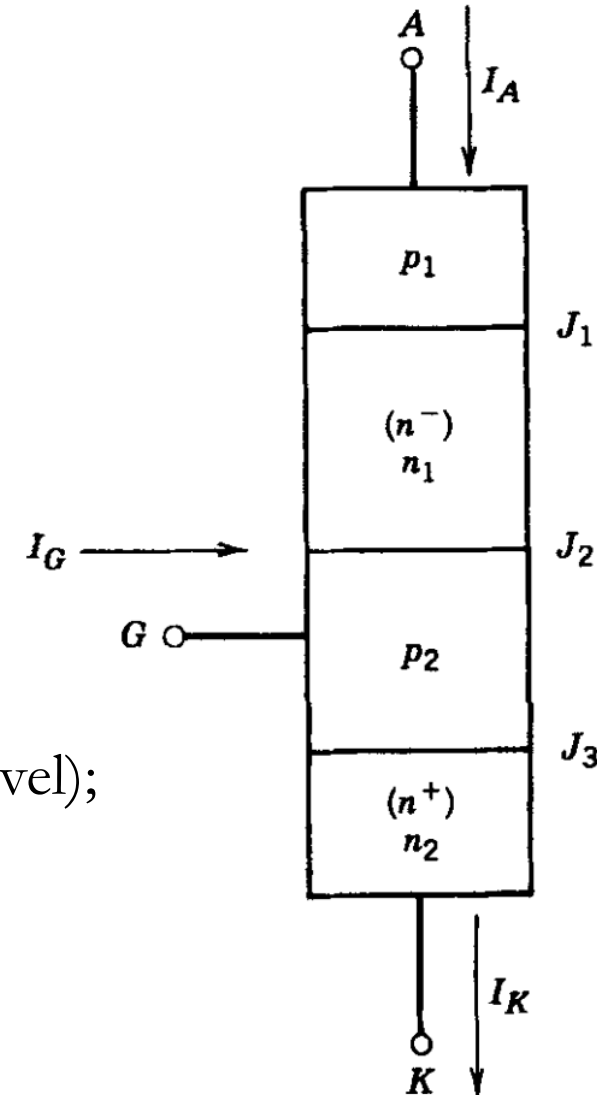
- ❑ $\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$ no estado bloqueado;
- ❑ Desta forma, I_A permanecerá na faixa de μA a mA ;
- ❑ Note que se $\alpha_1 + \alpha_2$ tende a 1, I_A cresce rapidamente;
- ❑ A grande questão é: O que faz α variar com a tensão?



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Análise do comportamento do SCR - Breakover

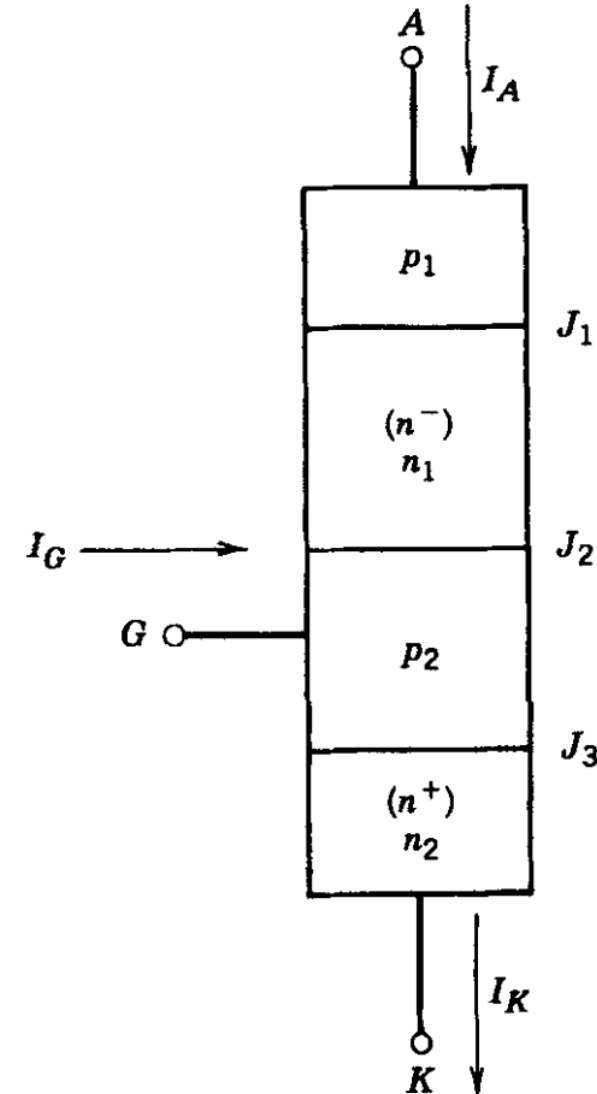
- ❑ Quando a tensão aumenta, a região de depleção aumenta;
- ❑ Redução do comprimento de base efetivo dos transistores;
- ❑ Isto gera um aumento α ;
- ❑ Aumento de β leva a operação na região de resistência negativa (instável);
- ❑ O dispositivo é rapidamente levado ao estado ligado (saturação).



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Efeito da corrente de gate

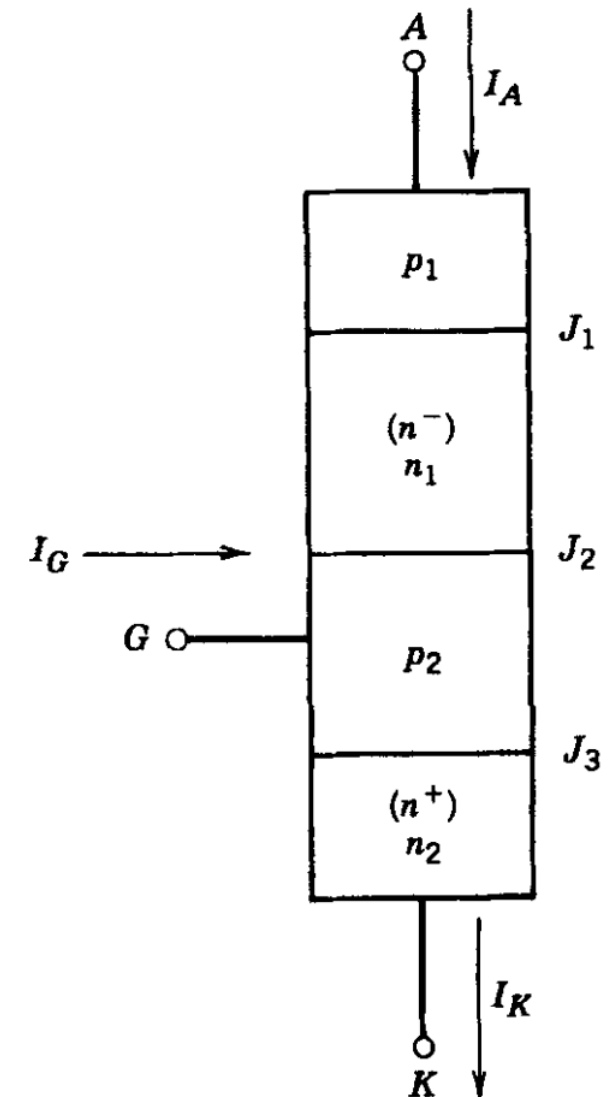
- ❑ Corrente de gate positiva: injeção de elétrons na junção J_3 ;
- ❑ Grande gradiente de carga em $p_2 \rightarrow$ difusão;
- ❑ Por deriva do campo elétrico em $J_2 \rightarrow$ elétrons atingem n_1 ;
- ❑ Neste ponto, temos 2 efeitos importantes;
 1. Aumento da região de depleção em J_2
 - Causado pelo excesso de carga negativa;
 - Crescimento do α_{pnp} ;



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

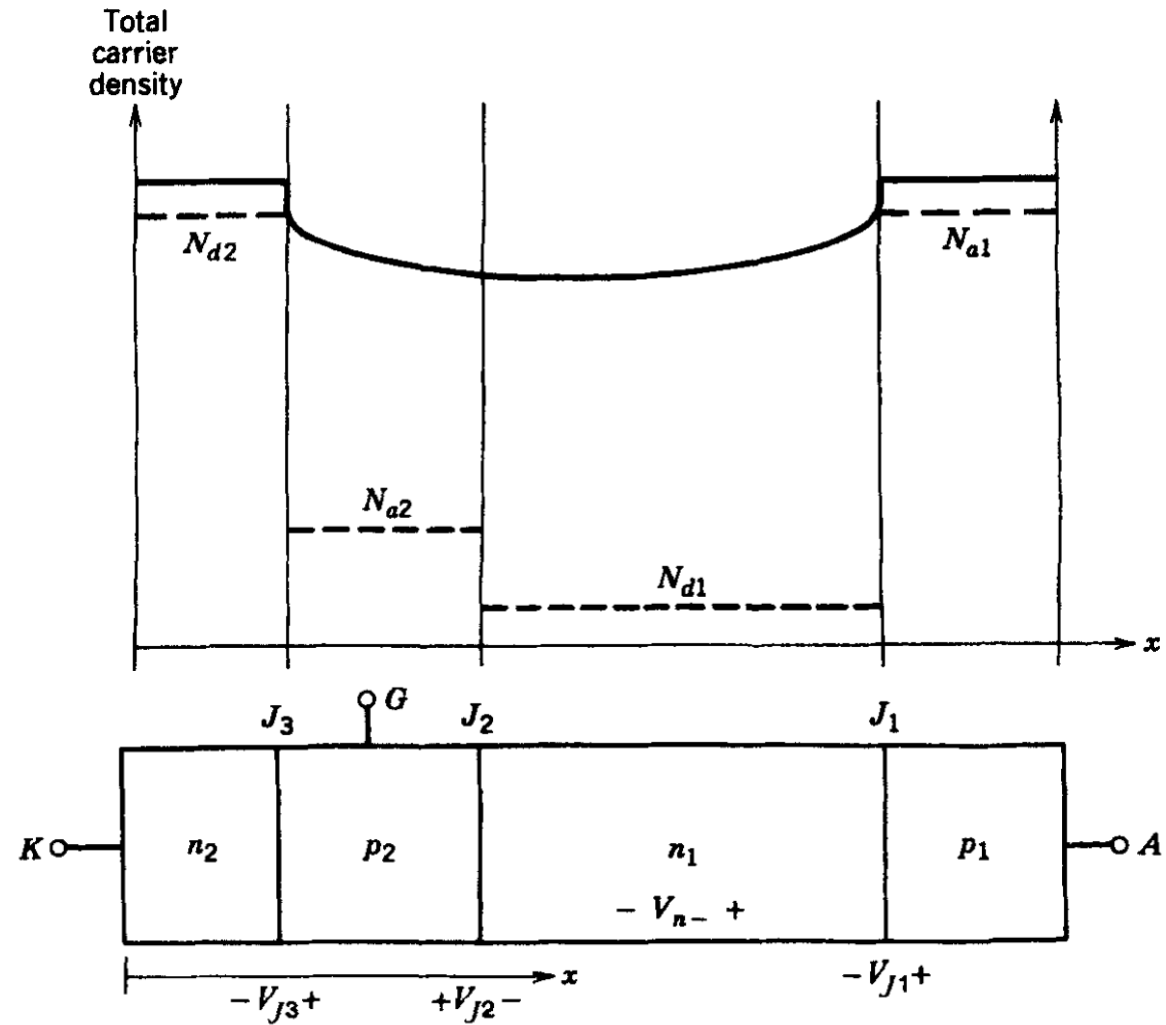
Efeito da corrente de gate

2. Injeção de carga negativa na base atrai lacunas de p_1
 - As lacunas são transportadas por deriva até p_2 ;
 - Isto atrai mais elétrons de n_2 .
- ❑ Note a existência de uma realimentação positiva;
- ❑ Isto acontece até que a corrente cresça: queda de tensão em n^- ;
- ❑ J_2 torna-se diretamente polarizada;
- ❑ As correntes I_A e I_K se tornam elevadas;
- ❑ I_G pode ser eliminada e o dispositivo continua em condução.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 200

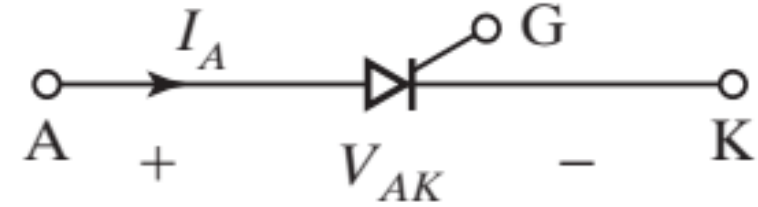
Distribuição de carga – estado ligado



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Formas de ligar o SCR

- ❑ Tensão direta elevada (breakover);
- ❑ Corrente de gate positiva;
- ❑ Taxa de variação de tensão direta;
- ❑ Temperatura (corrente de fuga aproximadamente dobra a cada 8 °C);
- ❑ Energia radiante (LASCR).



Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>

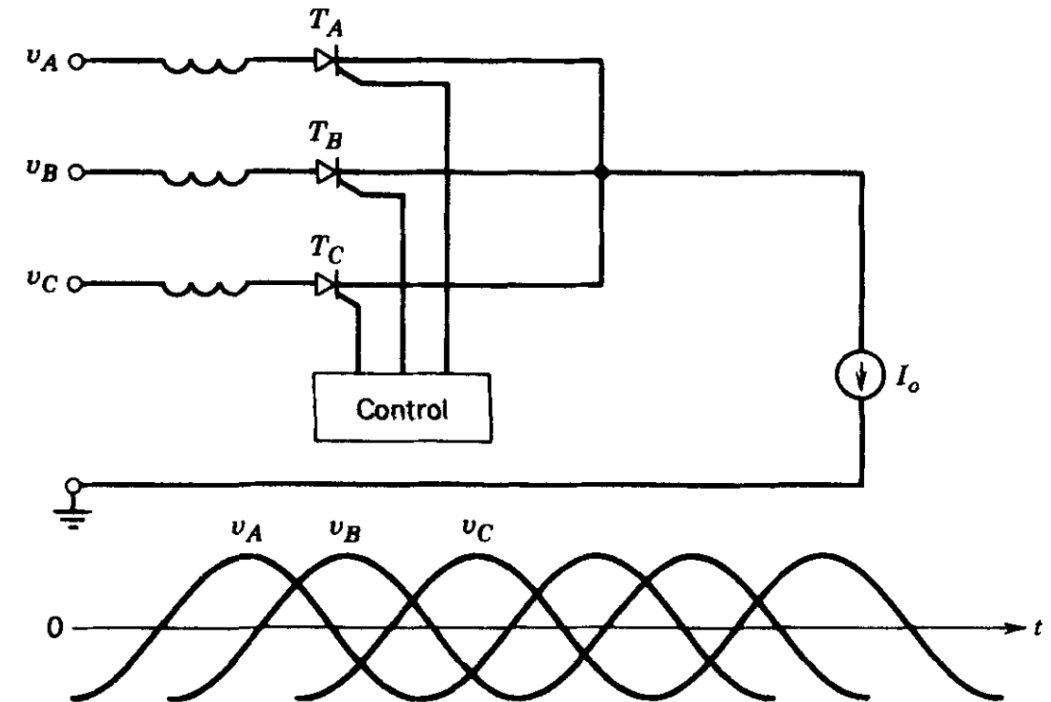


Características de comutação



Transitórios de comutação

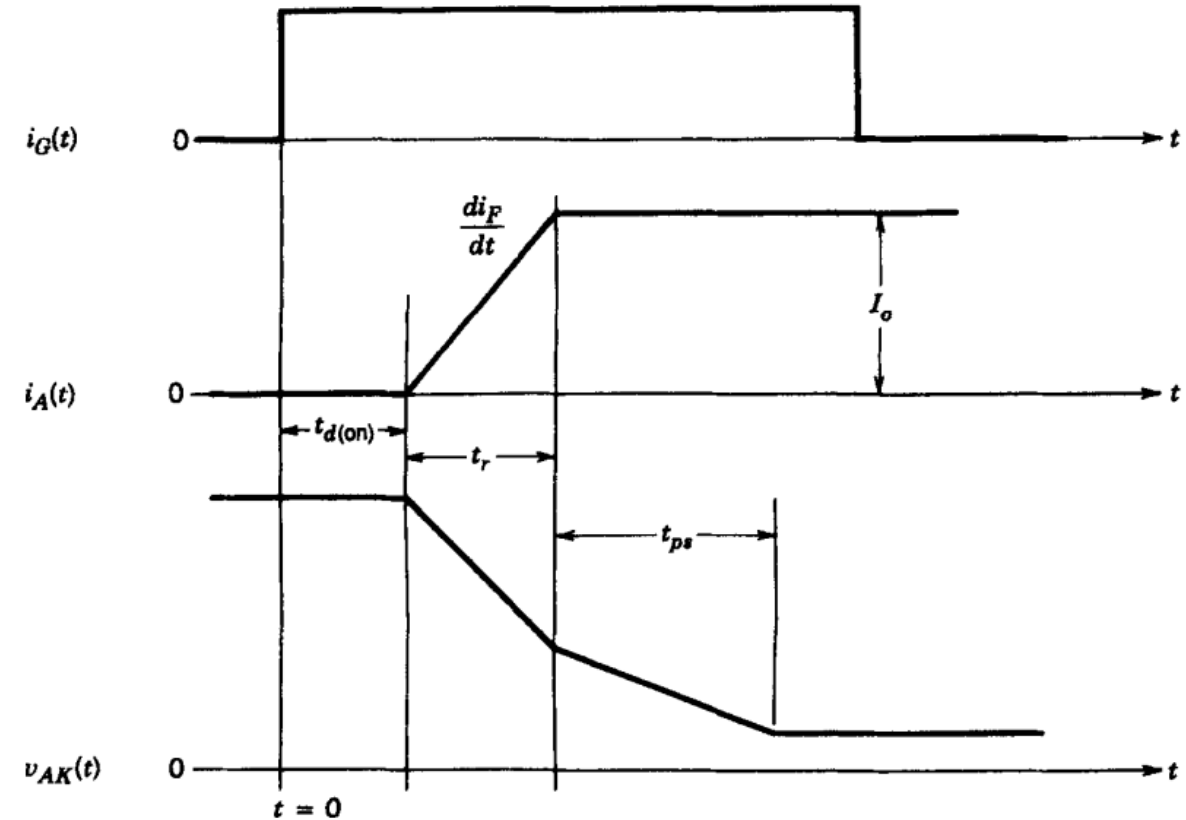
- ❑ Circuito de um retificador controlado;
- ❑ Tensões de entrada senoidais;
- ❑ Carga comportando como uma fonte de corrente;
- ❑ O circuito de controle aplica um pulso de corrente no gate do dispositivo;
- ❑ Tensão v_{AK} deve ser positiva.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Transitório de *turn-on*

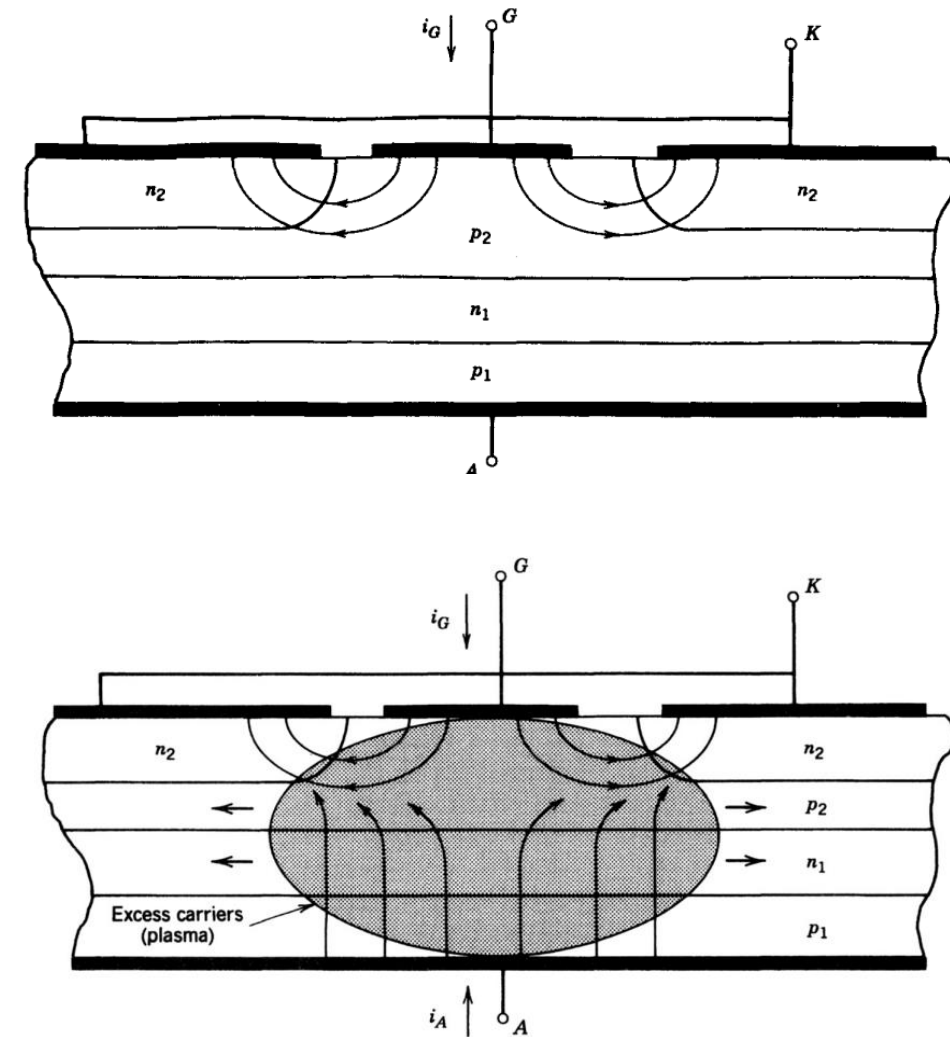
- ❑ $t_{d(on)}$: Tiristor em bloqueio direto;
- ❑ Injeção de portadores pelo gate;
- ❑ Aumento de α_1 e α_2 ;
- ❑ Injeção de elétrons e lacunas pelos emissores começa na vizinhança do contato de gate;
- ❑ A corrente i_A começa a crescer até o valor da carga.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Problema: Limitação de $\frac{di}{dt}$

- ❑ Distribuição de carga cresce lateralmente;
- ❑ Crescimento da distribuição de carga: Redução de v_{AK} ;
- ❑ Espalhamento da distribuição de carga $\rightarrow t_{ps}$;
- ❑ Velocidade de espalhamento : 20 – 200 $\mu\text{m}/\mu\text{s}$;



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Problema: Limitação de $\frac{di}{dt}$

- ❑ Problema: di/dt ;
- ❑ Deve ser suficiente para garantir o espalhamento da corrente;
- ❑ Thermal runaway;
- ❑ Especificação do componente.

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Exemplo: SCR de 12 kV e 1.5 kV

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

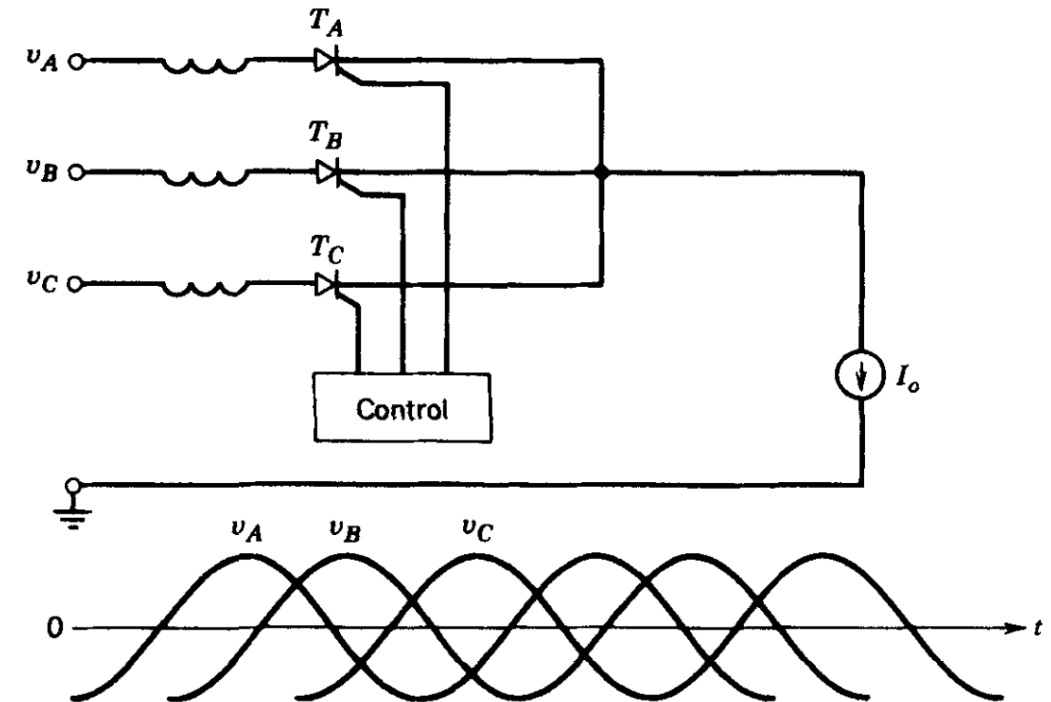
Symbol	Parameter	Voltage class	
		240	Unit
VRRM	Repetitive peak reverse voltage	12000	V
VRSM	Non-repetitive peak reverse voltage	12000	V
VR(DC)	DC reverse voltage	9600	V
VDRM	Repetitive peak off-state voltage	12000	V
VDSM	Non-repetitive peak off-state voltage	12000	V
VD(DC)	DC off-state voltage	9600	V

Symbol	Parameter	Conditions	Ratings	Unit
IT(RMS)	RMS on-state current		2360	A
IT(AV)	Average on-state current	f = 60Hz, sine wave $\theta = 180^\circ$, $T_f = 88^\circ\text{C}$	1500	A
ITSM1	Surge on-state current	One half cycle at 60Hz	34	kA
ITSM2	Surge on-state current 2	One half cycle ($t_w = 12\text{ms}$), $T_j = 125^\circ\text{C}$ start $V_{FP} = 6\text{kV}$, $V_{RP} = 6\text{kV}$	28	kA
I ² t	Current-squared, time integration	One cycle at 60Hz	4.8×10^6	A ² s
diT/dt	Critical rate of rise of on-state current	$V_D = 1/2V_{DRM}$, $I_G = 2.0\text{A}$, $di_G/dt = 1.5\text{A}/\mu\text{s}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$	100	A/ μs
PFGM	Peak forward gate power dissipation		30	W
PFG(AV)	Average forward gate power dissipation		8.0	W
VFGM	Peak forward gate voltage		20	V
VRGM	Peak reverse gate voltage		10	V
IFGM	Peak forward gate current		6.0	A
T _j	Junction temperature		-40 ~ +125	°C
T _{stg}	Storage temperature		-40 ~ +150	°C
—	Mounting force required	Recommended value 118	108 ~ 132	kN
—	Weight	Standard value	4000	g

Fonte: Mitsubishi Electric.

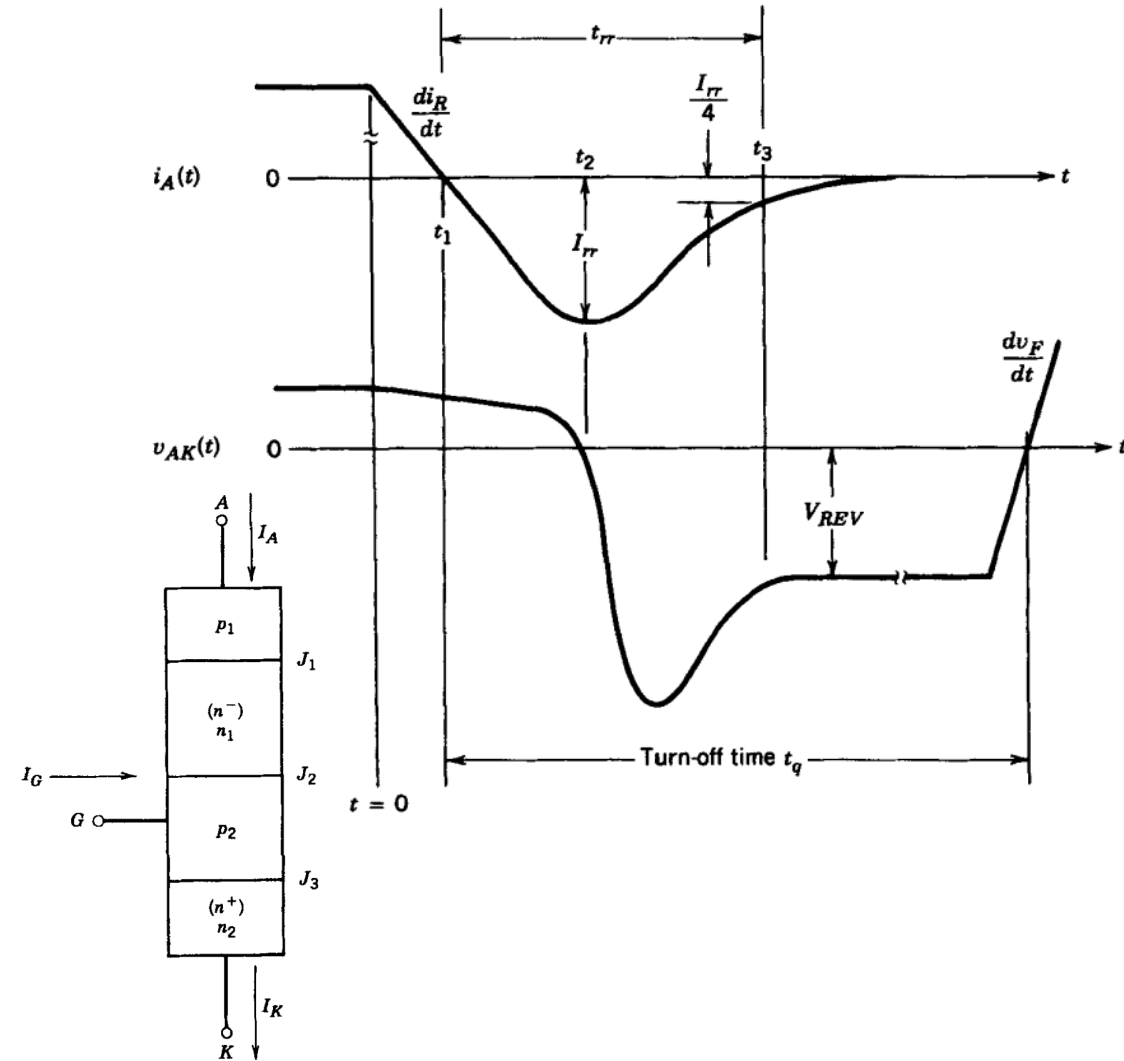
Transitório de *turn-off*

- Suponha que T_A está em condução;
- Quando T_B for acionado, T_A será reversamente polarizado ($v_B > v_A$);
- T_B será desligado.



Transitório de *turn-off*

- ❑ Similar ao diodo PIN;
- ❑ Corrente torna-se negativa;
- ❑ Eliminação dos portadores minoritários;
- ❑ Tensão fica positiva até que J_1 ou J_3 tornam-se reversamente polarizados (usualmente J_3);
- ❑ A partir daí a tensão começa a reduzir;
- ❑ Overshoot: indutâncias do circuito!

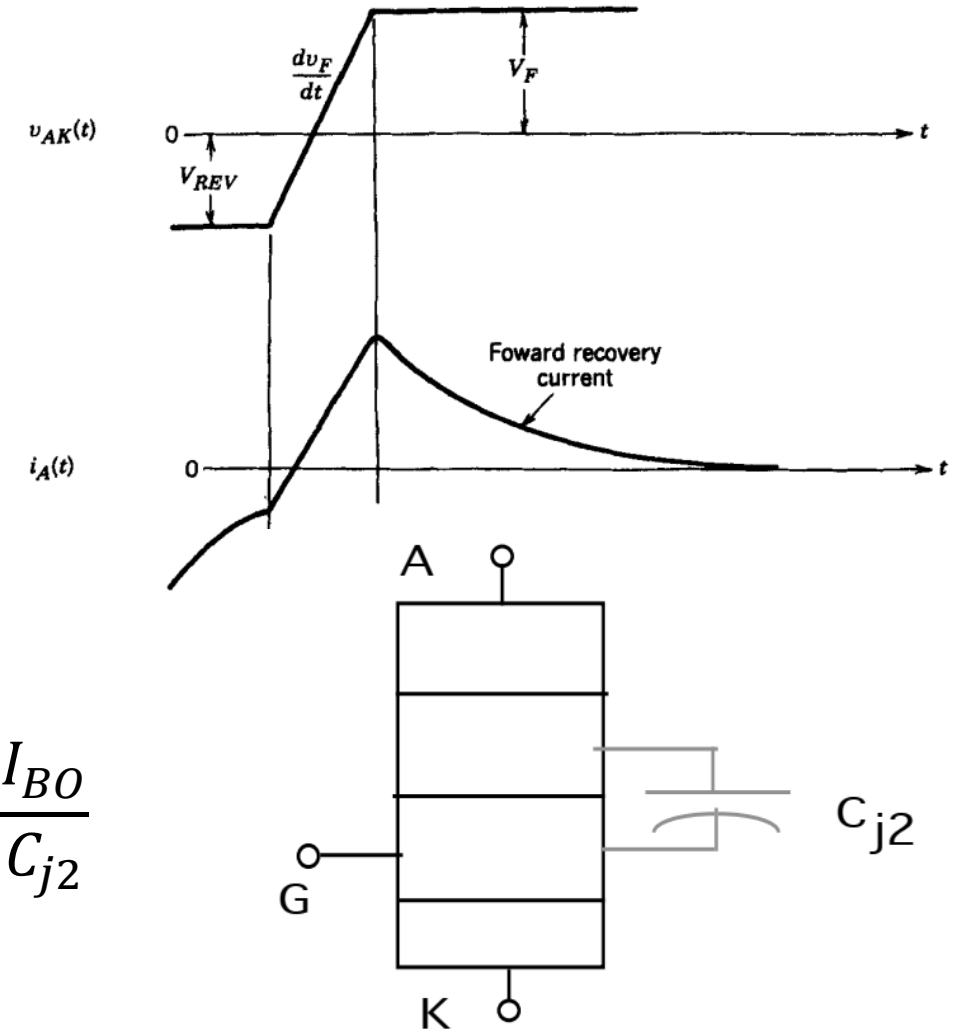


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Problema: Reaplicação de tensão direta

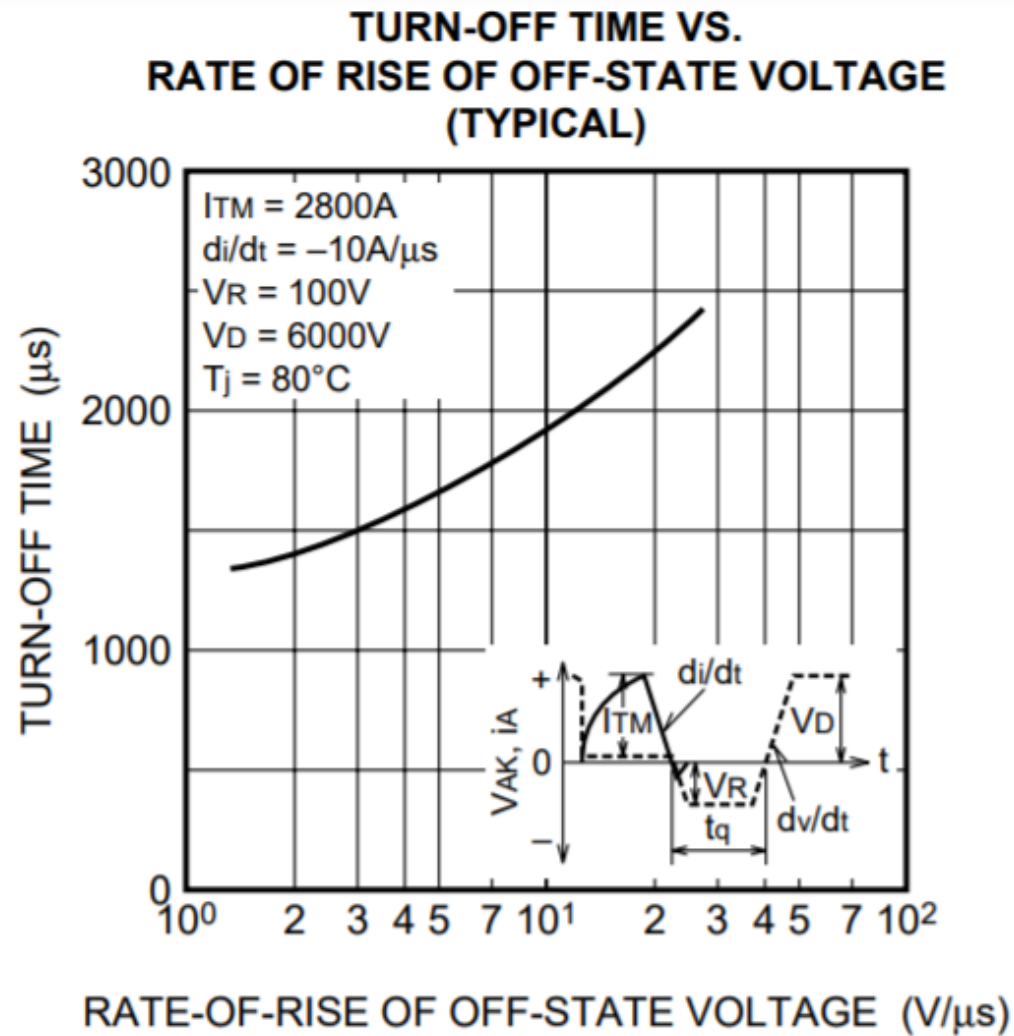
- ❑ No tempo t_3 ainda existem portadores;
- ❑ Reaplicar uma tensão direta neste instante;
- ❑ Corrente de recuperação direta;
- ❑ Se o pulso de corrente for elevado, isto pode acidentalmente ligar o SCR;
- ❑ Fabricantes:
 - $\frac{dV_F}{dt}$ versus t_q ;
 - 100 V/ μs até 2000V/ μs .

$$\frac{dV_F}{dt} < \frac{I_{BO}}{C_{j2}}$$



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

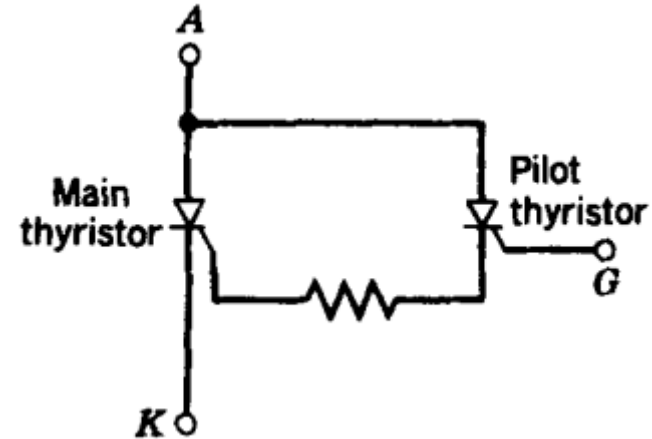
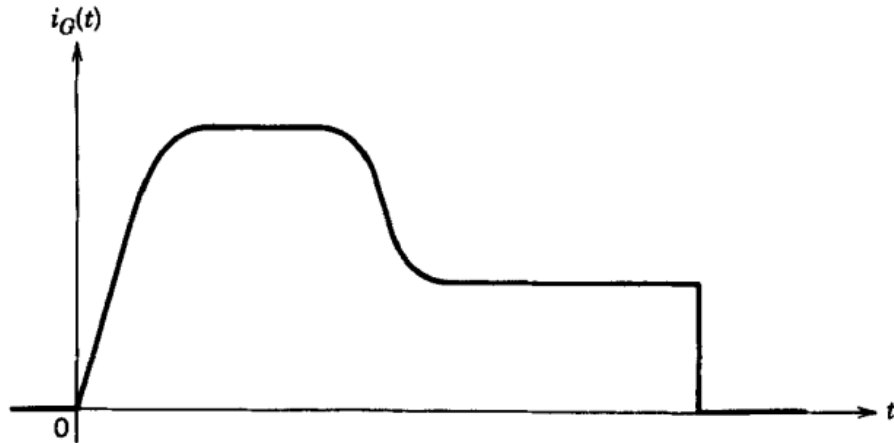
Problema: Reaplicação de tensão direta



Fonte: Mitsubishi Electric.

Métodos para melhorar $\frac{di}{dt}$

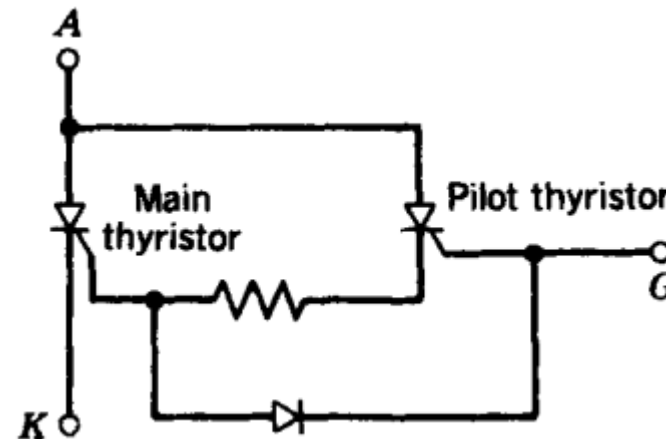
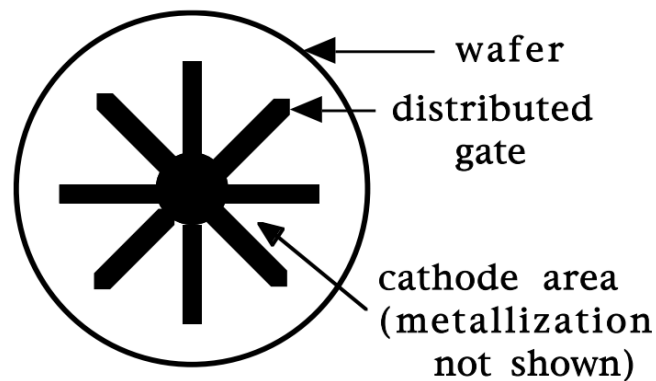
- ❑ Melhoria de $\frac{di}{dt}$: Aumento de corrente de gate aumenta a área inicial ligada;
- Pode-se usar uma corrente de gate com um valor inicial maior;
- Tiristor auxiliar (pode ser monolítico).



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Métodos para melhorar $\frac{di}{dt}$

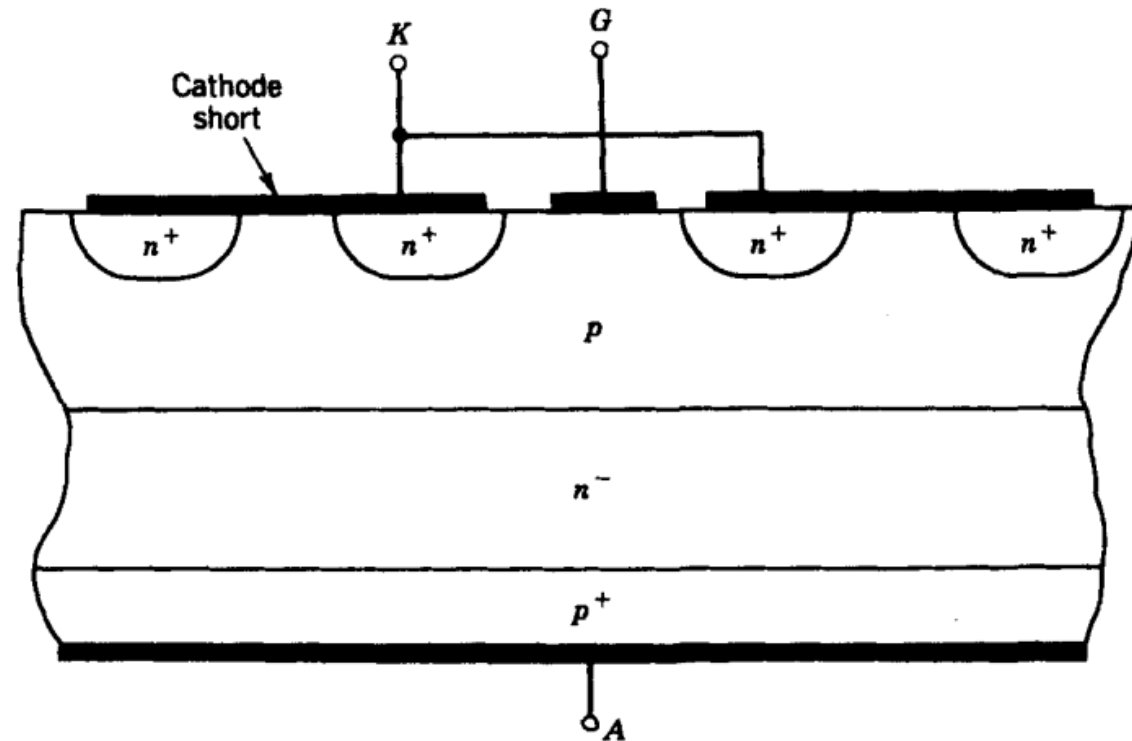
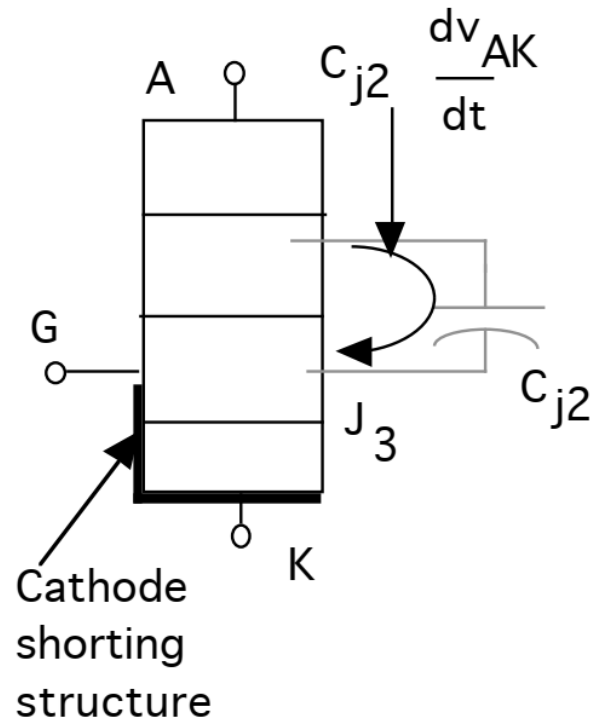
- ❑ Mudar a geometria do Gate;
- Aumenta a área efetiva de condução de corrente;
- Reduz o current crowding;
- Corrente negativa ajuda na eliminação de carga (tiristor com desligamento mais rápido);
- Diodo adicional permite aplicar corrente negativa no tiristor principal;
- GATT (Gate-assisted turn-off thyristor);
- Turn-off $\rightarrow 10 \mu s$ para 2000V, 1000-2000 A.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Métodos para melhorar $\frac{dv_F}{dt}$

- ❑ Extensão da metalização do catodo;
- Corrente gerada não atravessa a junção J_3 ;
- Extensão da capacidade de $\frac{dv_F}{dt}$.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



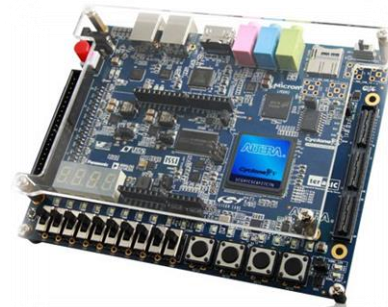
Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>

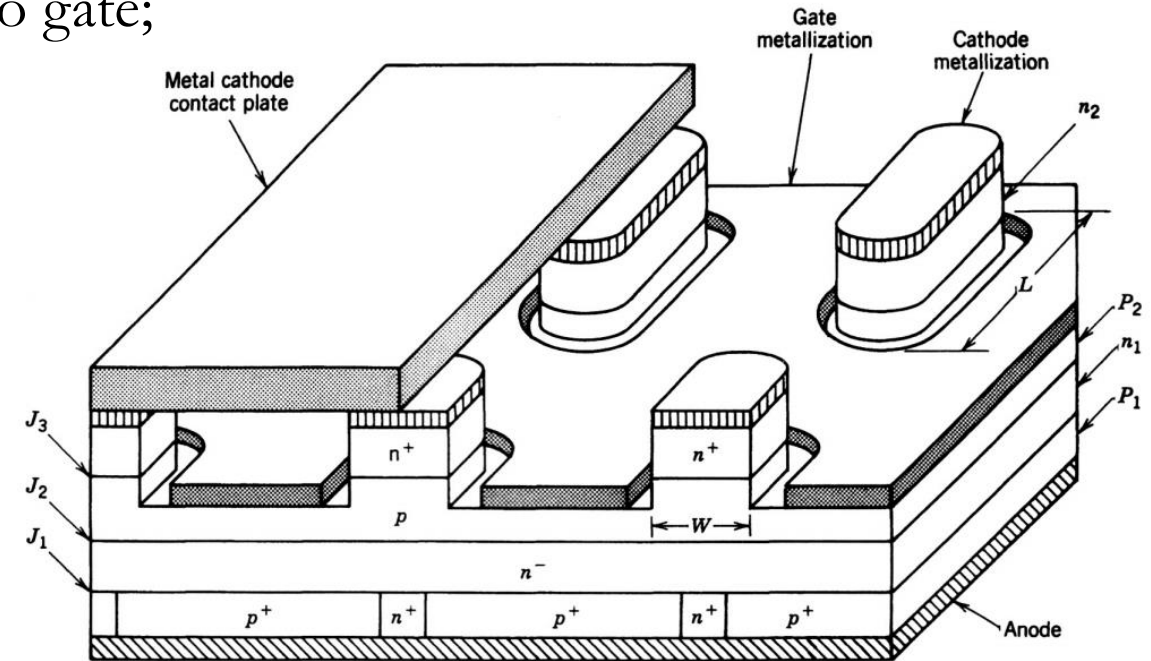


Avanços e estruturas melhoradas



Estrutura do GTO

- ❑ Possibilidade desligar o dispositivo;
- ❑ Utilização de estrutura com múltiplas regiões;
 - Minimizar a distância entre o centro do catodo e o gate;
- ❑ Os catodos aparecem como ilhas;
 - Conexão pelo dissipador de calor.
- ❑ Espessura da base P_2 menor que no SCR.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

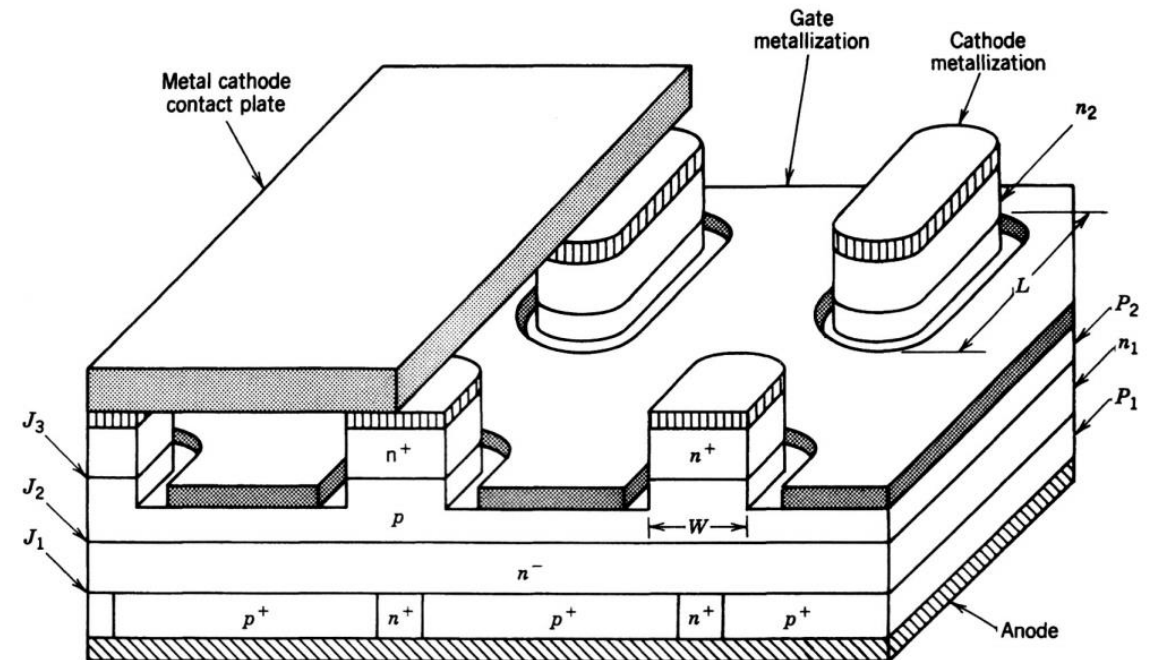
Estrutura do GTO

- ❑ Penetração de regiões n^+ na região de anodo;
- Aumenta a velocidade de desligamento;

❑ Praticamente não bloqueia tensão reversa;

❑ Reduz a tensão reversa para J_3 (10 a 30 V);

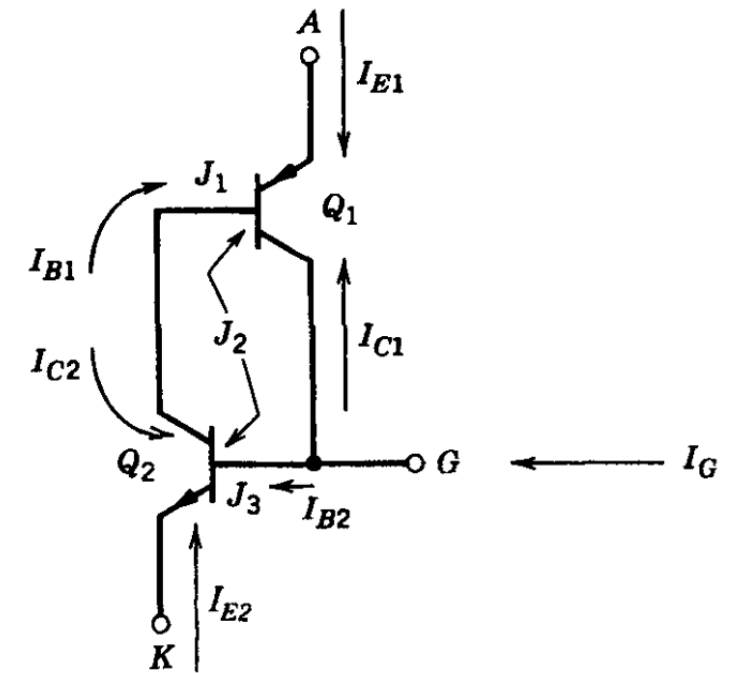
❑ Curva $V \times I$ similar ao SCR.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Física de operação do GTO

- ❑ Principal diferença em relação ao desligamento;
- ❑ Suponha que Q_1 e Q_2 estão saturados (i.e., o GTO está em condução);
- ❑ Se $I_{B2} < \frac{I_{C2}}{\beta_2}$, o transistor Q_2 entrará na região ativa;
- ❑ Nesta situação, o dispositivo poderia desligar;
- ❑ Note que $I_{B2} = \alpha_1 I_A - I'_G$ e $I_{C2} = (1 - \alpha_1) I_A$;
- ❑ $\alpha_1 I_A - I'_G < \frac{(1 - \alpha_1) I_A}{\beta_2} = \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)}{\alpha_2} I_A$;
- ❑ $I'_G > \frac{I_A}{\beta_{off}}$, onde $\beta_{off} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}$.

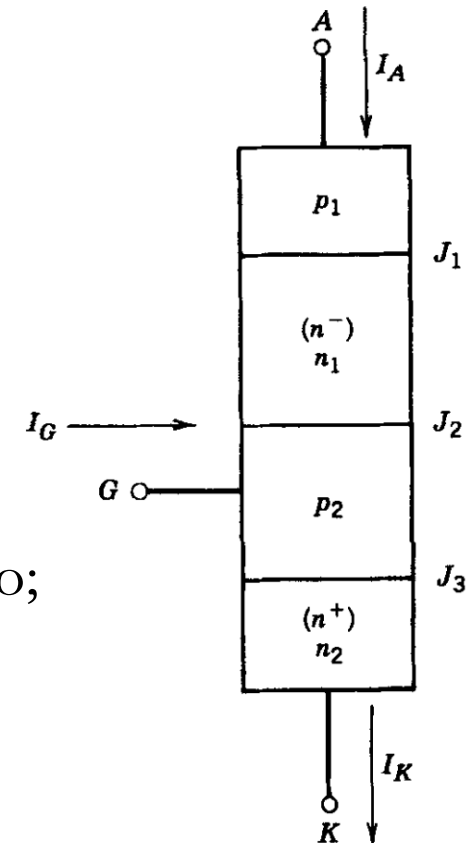


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Física de operação do GTO

$$\beta_{off} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}$$

- ❑ Deve ser tão grande quanto possível para minimizar I'_G ;
- ❑ Isto pode ser obtido se α_2 tende a 1 e se α_1 é pequeno;
- ❑ Para aumentar α_2 deve-se tornar a base p_2 estreita e n_2 fortemente dopado;
- ❑ Passos normais para aumentar o ganho de TBJ e tiristores;
- ❑ Para reduzir α_1 deve-se ter a base n_1 larga e o lifetime deve ser baixo;
- ❑ Essa solução leva a uma maior queda de tensão diretamente polarizado.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

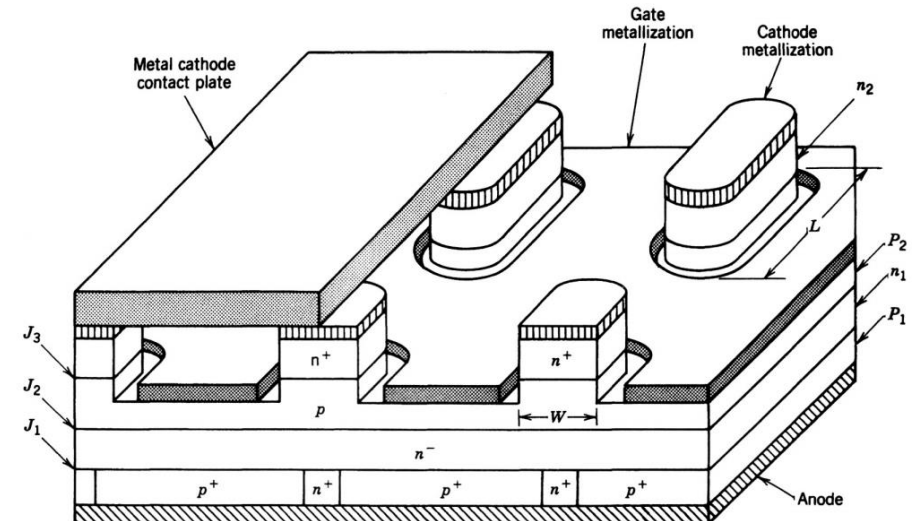
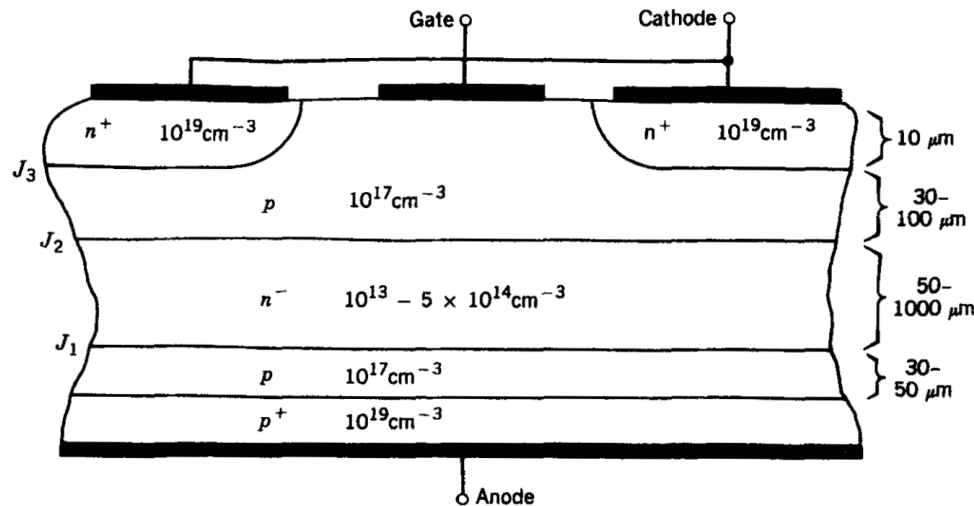
Física de operação do GTO

- ❑ Durante o desligamento, as lacunas devem ser removidas da região n^- ;
- ❑ Esta carga é removida essencialmente por recombinação;
- ❑ A camada N^+ adicional funciona como uma camada de acoplamento, absorvendo as lacunas durante o desligamento por difusão;
- ❑ Isto acelera o processo de desligamento!

Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Física de operação do GTO

- ❑ O último detalhe é a distribuição espacial dos contatos de Gate e Catodo;
- ❑ Isso reduz a distância efetiva entre o gate e o centro das regiões de catodo;
- ❑ Assim minimiza-se as quedas de tensão lateral e é possível desligar o dispositivo por meio de uma corrente de gate negativa.



Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

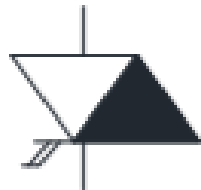
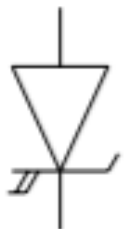
Desvantagens do GTO

- ❑ Desvantagem do GTO: circuitos adicionais volumosos!
- ❑ GTO convencional: 50 nH no circuito de acionamento;
- ❑ 200 V durante o transitório e 20 V após o desligamento;
- ❑ Década de 90: GTO com ganho de desligamento unitário;
- ❑ Hard Drive GTO → Nome de mercado: GCT;
- ❑ Para as mesmas dimensões, maior capacidade de desligamento;
- ❑ E como reduzir a indutância (e.g. 5 nH)?

Fonte: Anderson Vagner Rocha. “Confiabilidade e Resiliência de Conversores de Média Tensão Baseados em IGCT”. Tese de doutorado. 2014

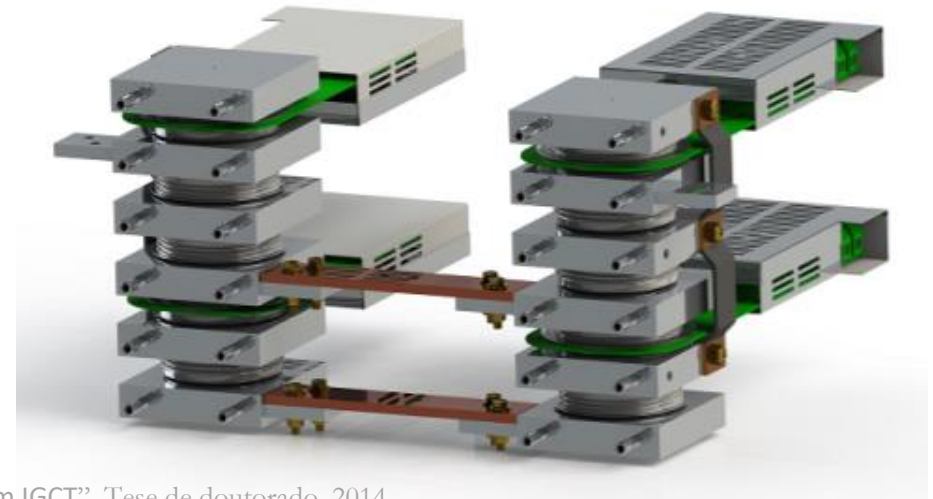
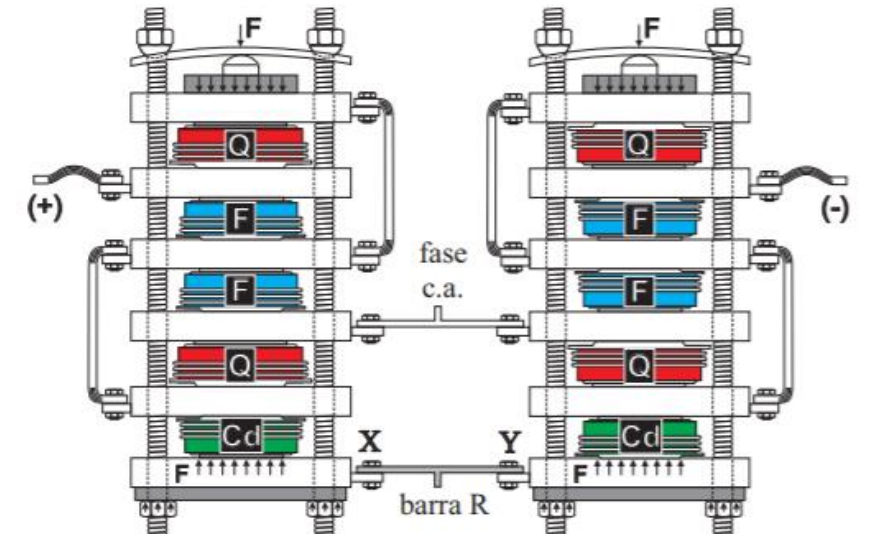
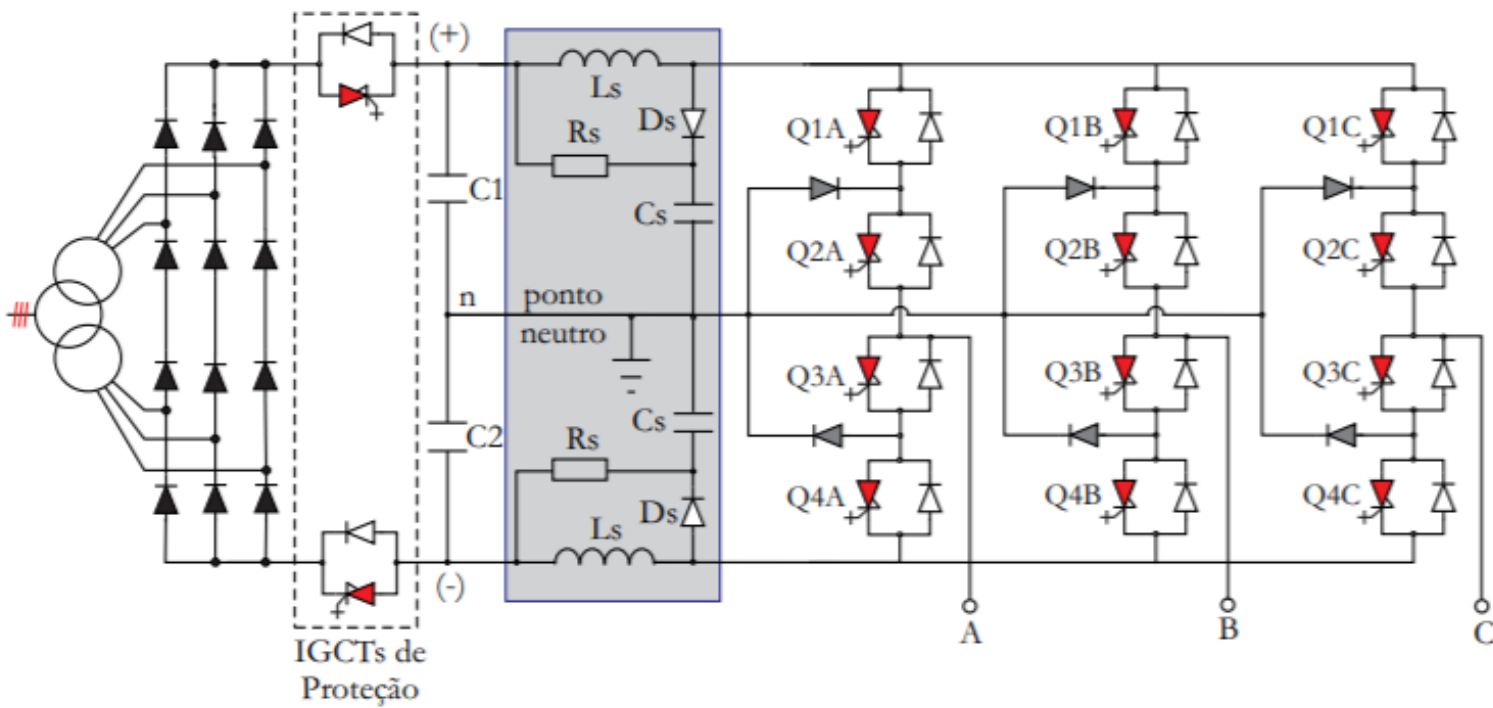
IGCT

- ❑ Integrated gated-comutated thyristor;
- ❑ Integra a estrutura de acionamento ao dispositivo;
- ❑ IGCT assimétrico e IGCT simétrico;
- ❑ Pode incluir diodo anti-paralelo.



Fonte: ABB-Hitachi Power Semiconductors.

Inversor NPC com IGCTs



Fonte: Anderson Vagner Rocha. "Confiabilidade e Resiliência de Conversores de Média Tensão Baseados em IGCT". Tese de doutorado. 2014

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>