



Eletrônica Industrial para Controle e Automação I

<http://www.dee.feis.unesp.br/docentes/?id=105>
Prof. Dr. Flávio Alessandro Serrão Gonçalves
E-mail: flavioasg@sorocaba.unesp.br



Sorocaba (SP), 2010.

Materiais Semicondutores

- Materiais:
 - **Isolante:** material que oferece um nível muito baixo de condutividade quando submetido a uma fonte de tensão.
 - **Condutor:** material que sustenta um grande fluxo de carga ao se aplicar através de seus terminais uma fonte de tensão de amplitude limitada. (*condutividade elevada*);



Resistividade (ρ)

- Condutor: $\rho = 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ (cobre)
- Isolante: $\rho = 10^{+12} \Omega\text{-cm}$ (mica)
- Semicondutor: $\rho = 50 \Omega\text{-cm}$ (Germânio)
 $\rho = 50 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ (Silício)

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Materiais Semicondutores

- Materiais Semicondutores

- *Evolução da Fabricação de Materiais Semicondutores*

- Alto grau de pureza (1: 10 bilhões).
 - Inserção de impurezas (1:1 milhão) em uma *wafers* de silício:
 - Transformar condutor ruim em ótimo;

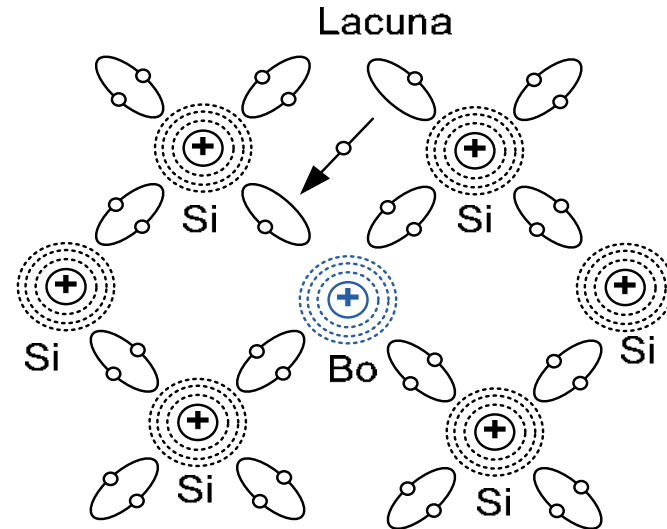
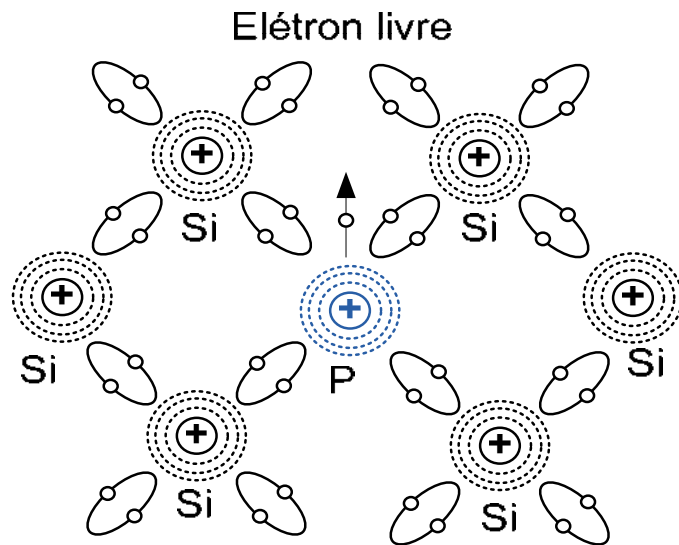
- **Dopagem**: processo de fabricação que altera as características do material, por meio da modificação da pureza pela inserção de outros componentes “impurezas”);

- Boro ou Alumínio : 3 átomos na camada de valência;
 - Fósforo: 5 átomos na camada de valência;

- **Germânio e Silício**

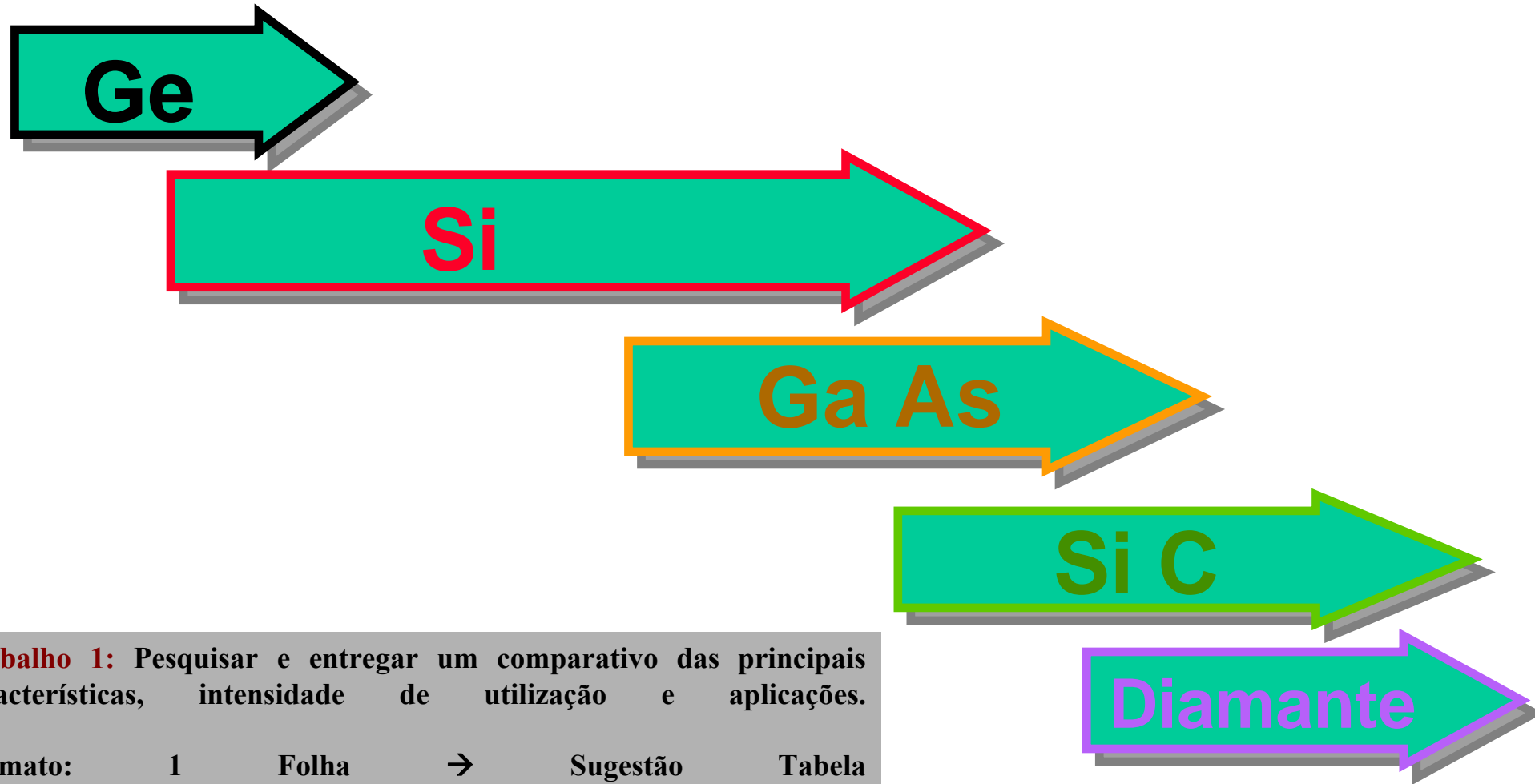
- Materiais com estruturas *crystalinas singulares*;
 - **Átomos tetravalentes** : possuem 4 elétrons na camada de valência;
 - Dopagem → Materiais do tipo P e do tipo N;

Ligações: Material do tipo P e Material do tipo N



- Ligações covalentes incompletas ou com excesso de elétrons;
- O material permanece eletricamente neutro?
 - a quantidade total de elétrons e prótons é a mesma!
- Material do **tipo N**: **portadores majoritários** são os **elétrons** e **minoritários** as **lacunas**;
- Material do **tipo P**: **portadores majoritários** são as **lacunas** e **minoritários** os **elétrons**;

Tendência atuais dos materiais semicondutores



Trabalho 1: Pesquisar e entregar um comparativo das principais características, intensidade de utilização e aplicações.

Formato: 1 Folha → Sugestão Tabela

Data: Próxima aula 9/agosto/2010

Introdução

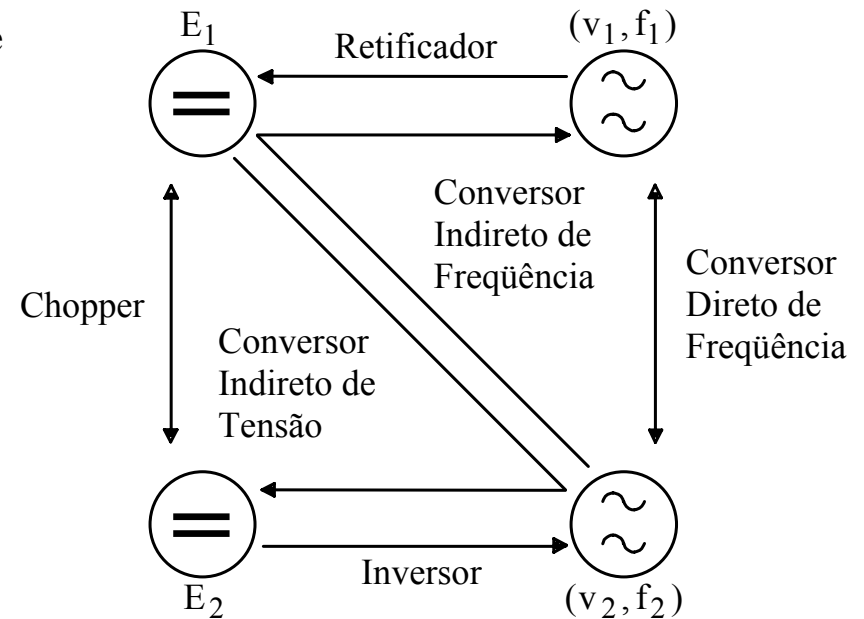
Conversores Estáticos: Controle do fluxo de energia entre dois ou mais sistemas elétricos com características distintas.

Área de Estudo: Eletrônica de Potência

Sub-áreas:

- ◆ **Eletrônica de Potência Básica**
 - Comutação Natural, tensões ≤ 2 kV, correntes ≤ 1 kA e frequências ≤ 1 kHz.
- ◆ **Elevadas correntes**
 - Aplicações com correntes > 1 kA
- ◆ **Elevadas tensões**
 - Aplicações com tensões > 2 kV
- ◆ **Elevadas Frequências**
 - Aplicações com frequências > 1 kHz
- ◆ **Elevadas Potências**
 - Aplicações com tensões > 2 kV e correntes > 1 kA
- ◆ **Comutação forçada**
 - Inversores de tensão autônomos à SCR.
- ◆ **Técnicas Especiais de Controle e Filtragem.**

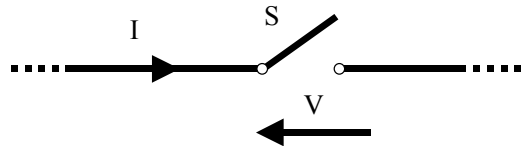
Principais Aplicações



- ◆ **Fontes de alimentação, Controle de máquinas elétricas, Aquecimento indutivo, Alimentação de segurança e emergência, Transmissão em corrente contínua, Interligação de sistemas com frequências diferentes, Carregadores de baterias, Retificadores em geral, etc...**

Princípio Básico da Conversão Estática

Ação dos dispositivos de processamento de energia ⇒ INTERRUPTORES



INTERRUPTOR IDEAL (S)

- **Tempos de comutação nulos** (entrada em condução e bloqueio instantâneo);
- **Resistência nula em condução;**
- **Resistência infinita quando bloqueado.**

EVOLUÇÃO DOS DISPOSITIVOS INTERRUPTORES

- **Relés** ⇒ • **Contatores** ⇒ • **Reatores com núcleos saturáveis** ⇒ • **Retificadores à arco** ⇒
- **Válvulas Tiraton** ⇒ • **SCR** (anos 60 pela General Electric e Bell Telephone Laboratory), etc...

Conversão Estática: Revolução no processamento de energia elétrica, possibilitando:

- ⇒ **Redução de peso, volume e custos;**
- ⇒ **Redução das perdas e aumento da densidade de potência;**
- ⇒ **Operação com frequências maiores;**
- ⇒ **Aumento do rendimento.**

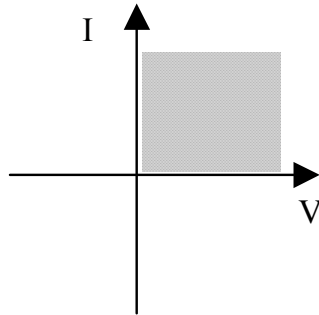
Características de Atuação para os Interruptores

Processamento Estático de Energia: Requer em diversas aplicações, ações diferentes de controle para os dispositivos interruptores.

Operações Básicas Desejadas

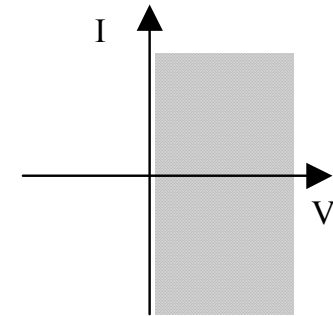
Operação em um quadrante

- ◆ Diodos (bloqueio reverso)
- ◆ SCR (bloqueio direto)
- ◆ Transistor Bipolar
- ◆ IGBT



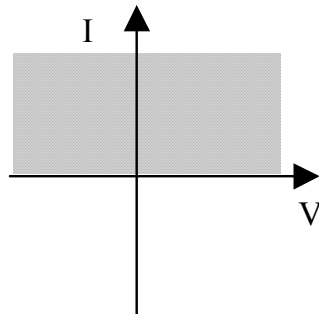
Operação em dois quadrantes com corrente bidirecional

- ◆ MOSFET
- ◆ SCR + diodo em anti-paralelo
- ◆ IGBT + diodo em anti-paralelo
- ◆ Transistor Bipolar + diodo em anti-paralelo



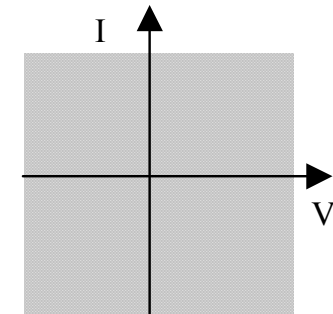
Operação em dois quadrantes com tensão bidirecional

- ◆ SCR (bloqueio direto e reverso)
- ◆ Transistor Bipolar + diodo em série



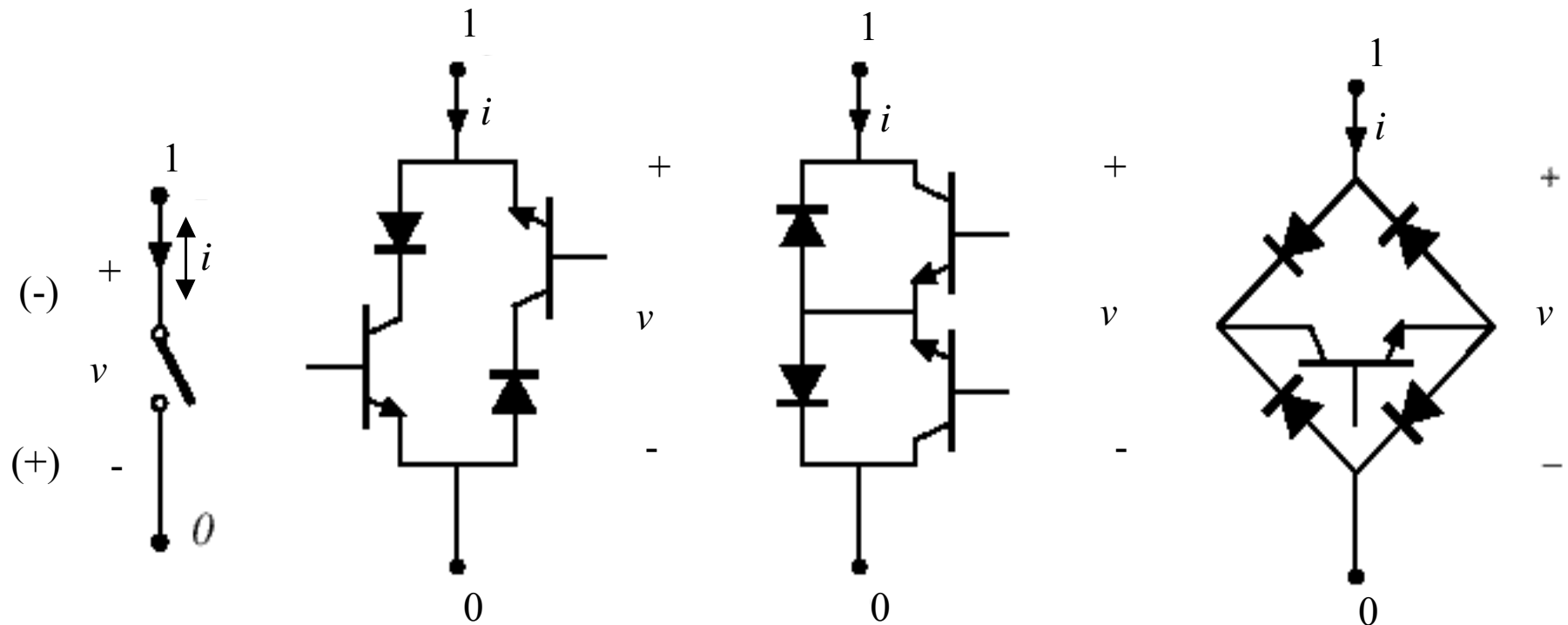
Operação em quatro quadrantes

- ◆ Arranjo de diodos com transistores bipolares

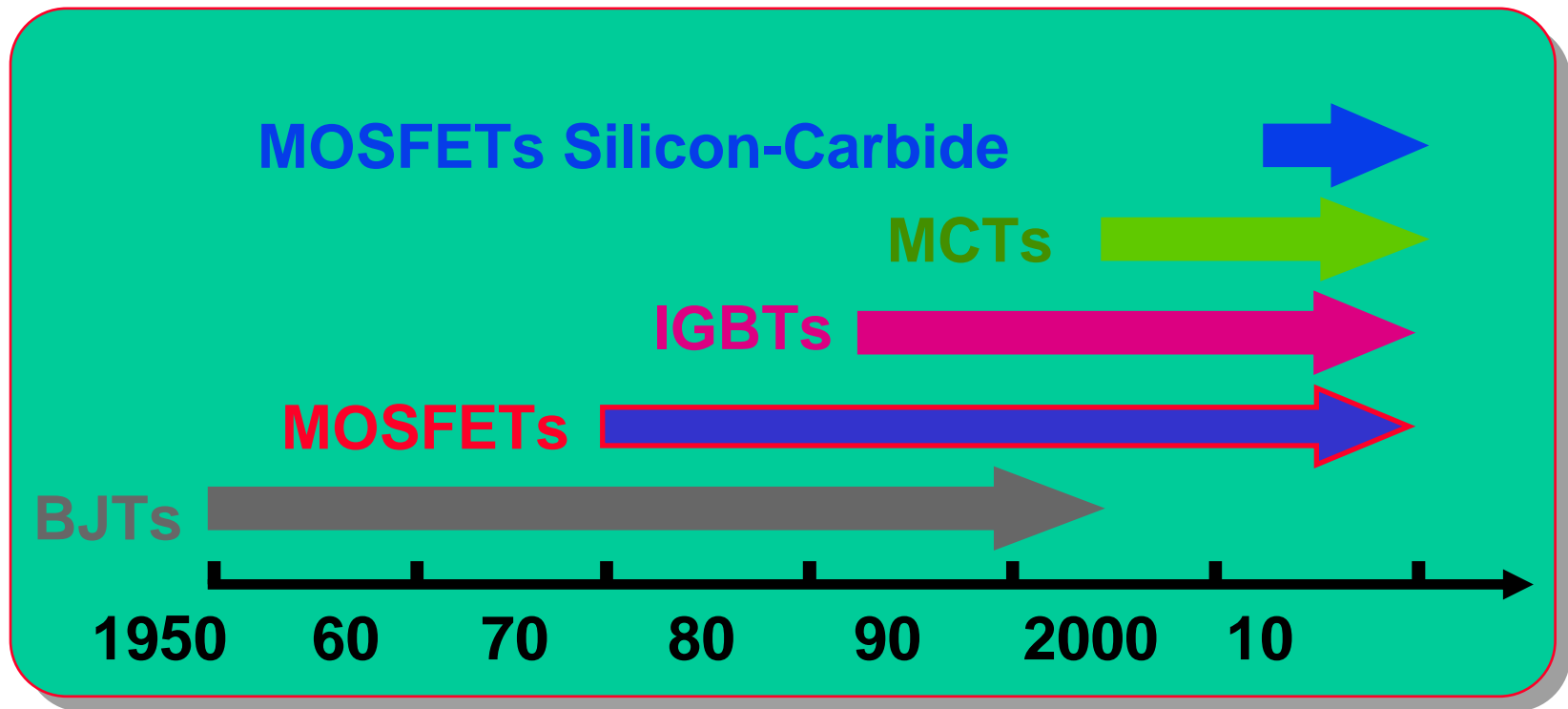


Interruptor para Operação em Quatro Quadrantes

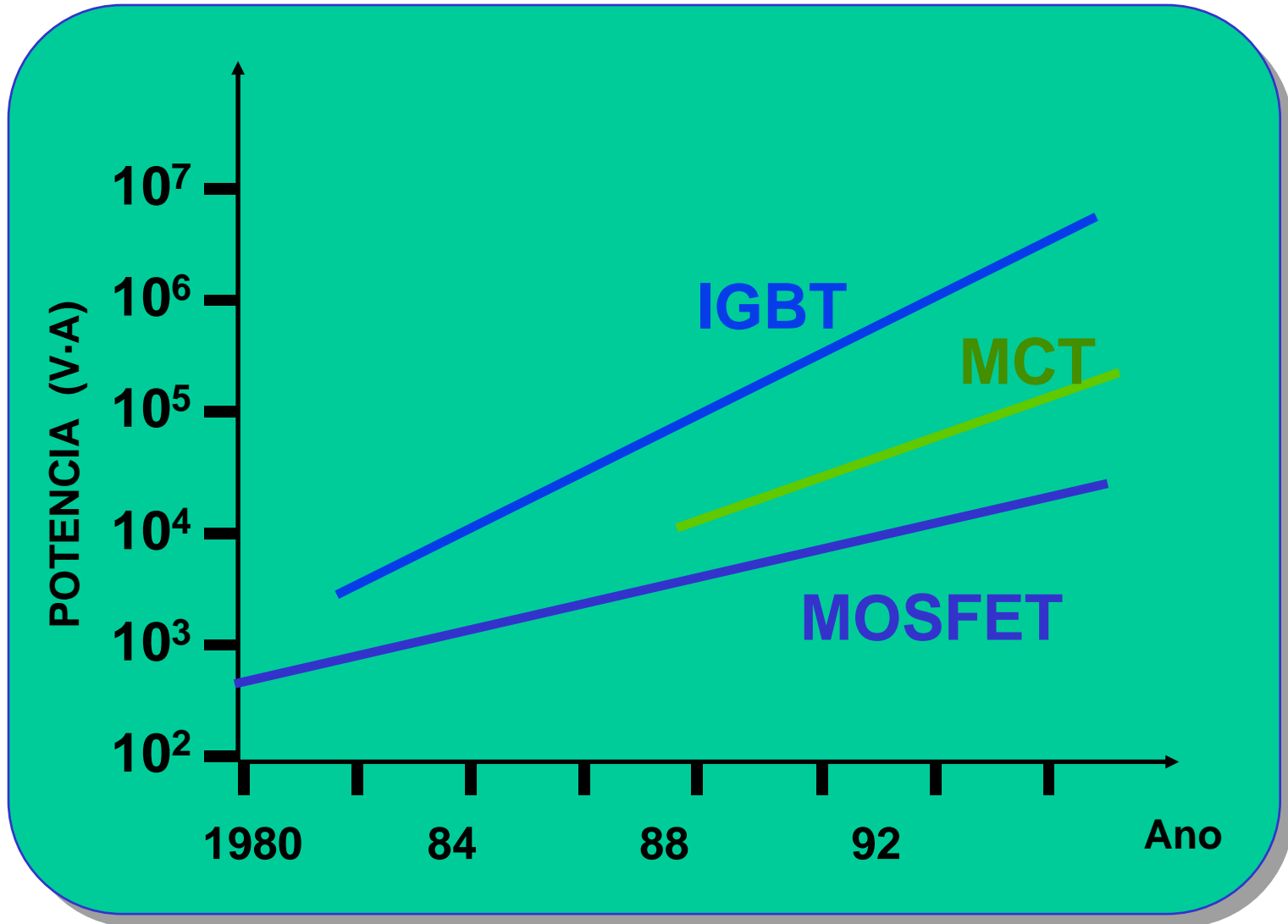
Implementações:



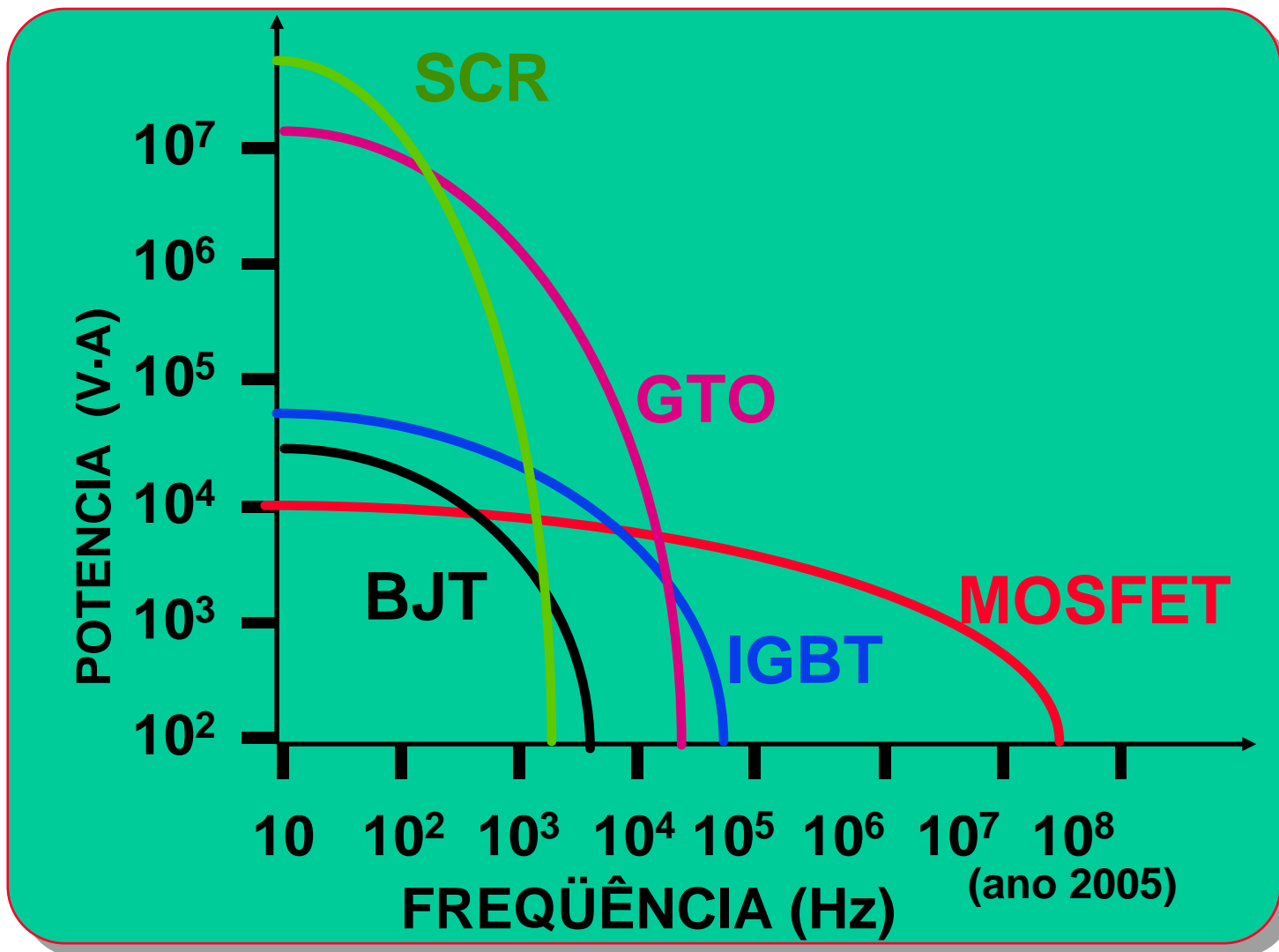
Evolução temporal dos principais dispositivos semicondutores



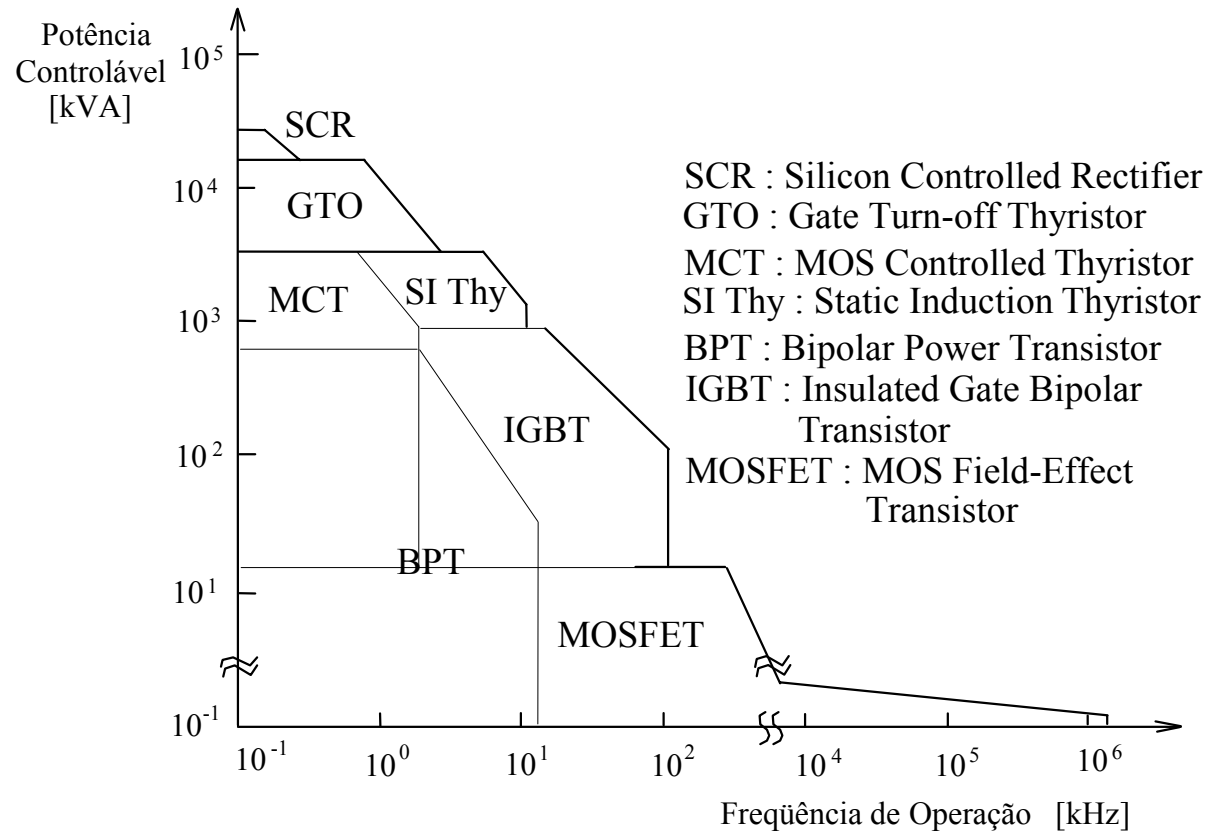
Aumento da potência



Potência (versus) frequência



Área de Atuação (Potência x Freqüência) - 2007



- Observa-se que as dificuldades do processamento estático de energia aumentam com a potência processada e freqüência de operação dos interruptores.

Características Gerais dos Principais Dispositivos Interruptores

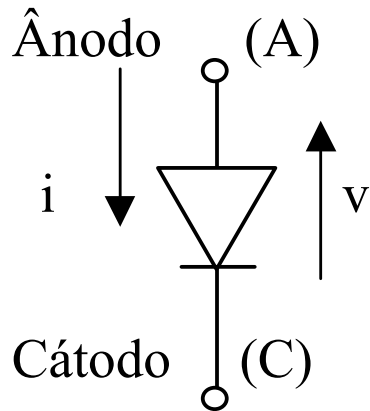
Principais interruptores em Eletrônica de Potência

⇒ Análise das características básicas de funcionamento, para os seguintes interruptores:

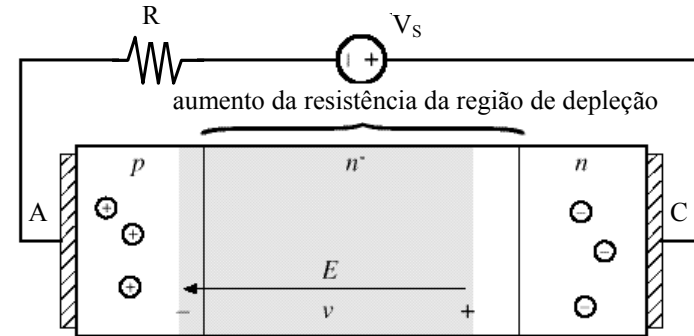
- Diodos de Potência (Diodo)
- Transistores Bipolares de Potência (BPT)
- MOSFETs de Potência (MOSFET)
- Transistores tipo IGBT (IGBT)
- Tiristores (Diodo PNPN, SCR, TRIAC, DIAC e GTO)

O Diodo de Potência

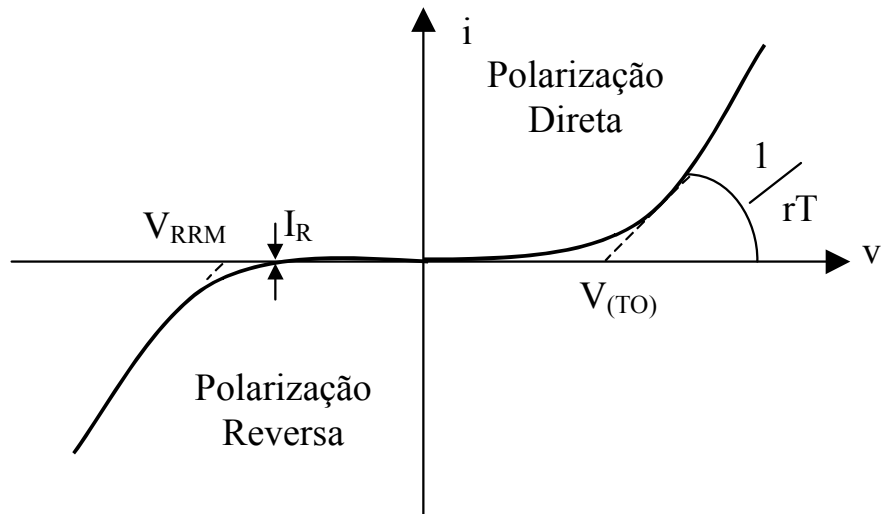
Símbolo



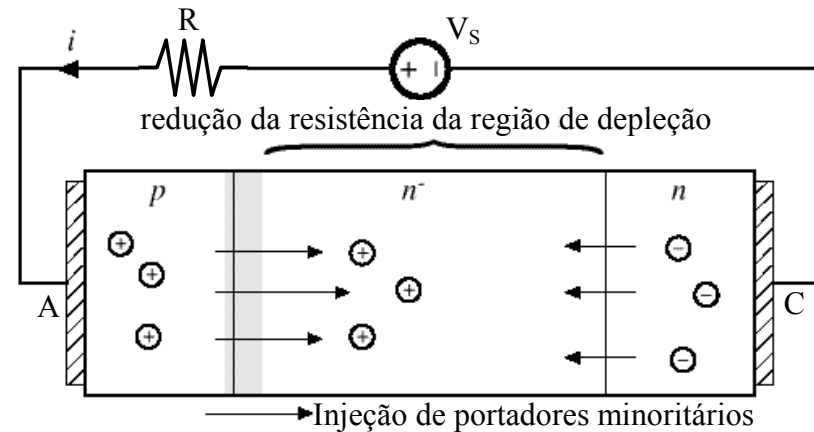
Polarização Reversa (Bloqueio)



Característica Volt-Ampère



Polarização Direta (Condução)



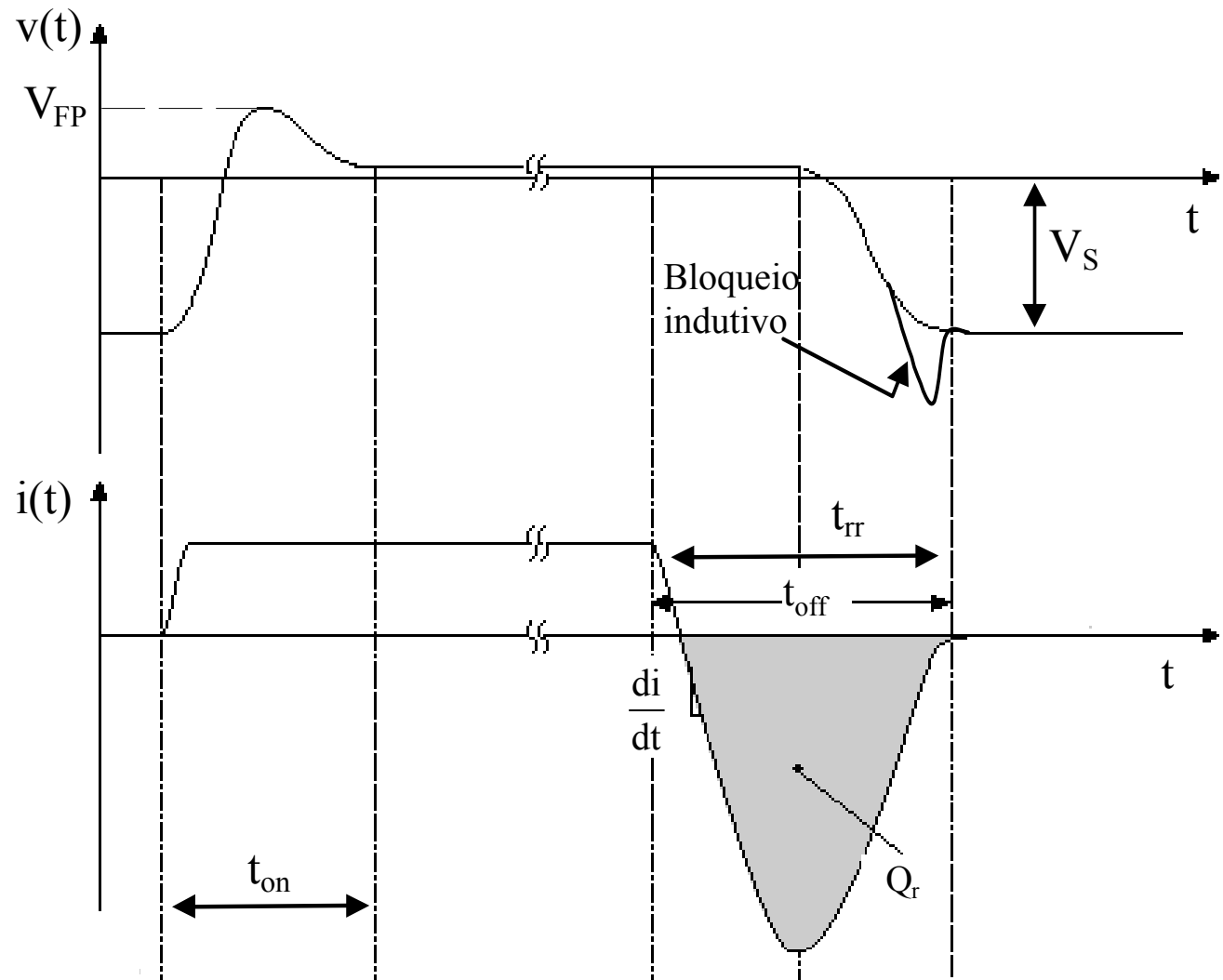
Características Dinâmicas do Diodo de Potência

Onde:

V_{FP} : Máxima tensão direta na entrada em condução

t_{rr} : Tempo de recuperação reversa

Q_r : Carga armazenada na capacitância de junção



Tipos de Diodos de Potência

◆ Diodos Convencionais (Standard)

Tempo de recuperação reversa não é especificado.

Operação normalmente em 50 ou 60 Hz.

◆ Diodos Rápidos e Ultra-rápidos (Fast/Ultra-fast)

Tempo de recuperação reversa e carga armazenada na capacitância de junção são especificados.

Operação em médias e elevadas frequências.

◆ Diodos tipo Schottky

Praticamente não existe tempo de recuperação (carga armazenada praticamente nula).

Operação com frequências elevadas e baixas tensões (poucos componentes possuem capacidade de bloqueio superior à 100 V).

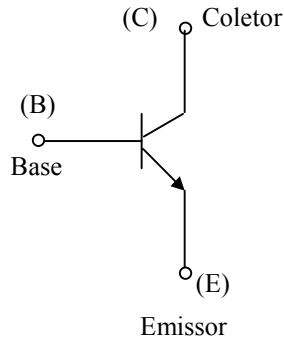
Filme metálico em contato direto com o semicondutor.

Características de Alguns Diodos de Potência Existentes no Mercado

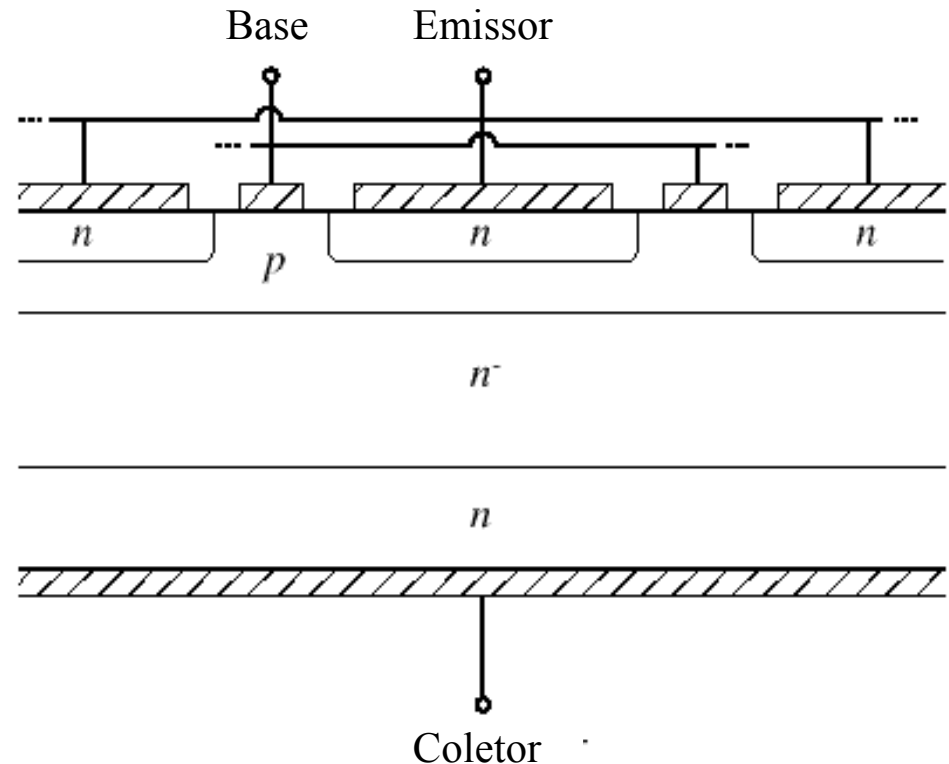
Componente	Máxima Tensão	Corrente Média	Tensão em Condução	Tempo Recuperação
Diodos Rápidos				
1N3913	400 V	30 A	1,1 V	400 ns
SD453N25S20PC	2500 V	400 A	2,2 V	2 μ s
Diodos Ultra-rápidos				
MUR815	150 V	8 A	0,975 V	35 ns
MUR1560	600 V	15 A	1,2 V	60 ns
RHRU100120	1200 V	100 A	2,6 V	60 ns
Diodos Schottky				
MBR6030L	30 V	60 A	0,48 V	
444CNQ045	45 V	440 A	0,69 V	
30CPQ150	150 V	30 A	1,19 V	

Transistor Bipolar De Potência (BPT)

Símbolo



Construção Básica

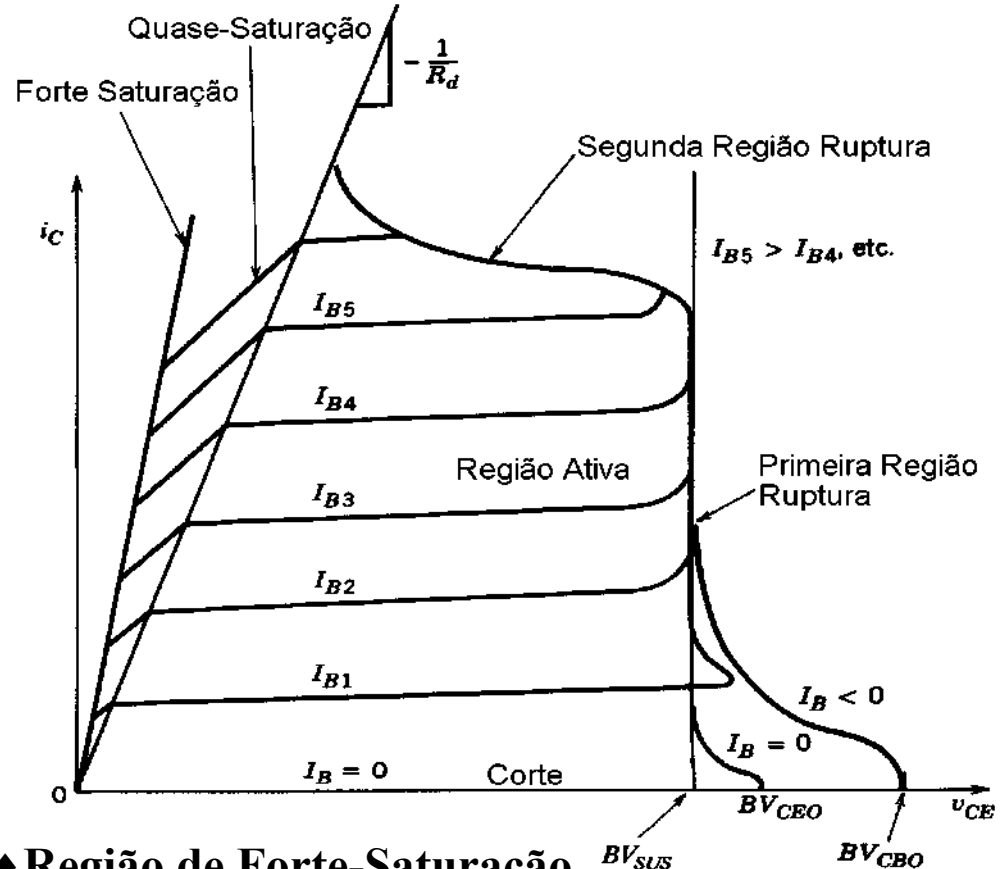


- ◆ **O BPT é sempre do tipo NPN**
- ◆ Componente com portadores minoritários
- ◆ Corrente flui através do BPT verticalmente/transversalmente
- ◆ Base e emissor são distribuídos em seções interconectadas
- ◆ **Em condução:** Junções Base-Emissor e Coletor-Base são polarizadas diretamente.

- ◆ **Bloqueio:** corrente de Base nula ou junção Base-Emissor polarizada reversamente.

Características Estáticas do BPT

Característica Volt-Ampère



◆ Região de Forte-Saturação

Elevados tempos envolvidos durante o bloqueio (aumento tempo “estocagem”).

◆ Como interruptor: Região de quase-saturação (em condução) e corte (bloqueio).

◆ Região Ativa:

Boa regulação de corrente e elevadas perdas em condução.

◆ Região de Corte:

$$I_B = 0$$

◆ Em condução:

$$I_B > I_C / \beta$$

β : Ganho de Corrente $\left(\frac{I_C}{I_B} \right)$

β_F : Ganho forçado $\left(\frac{I_{Csat}}{I_{Bsat}} \right)$

◆ Região Quase-Saturação

Reduzido valor de V_{CE} em condução.

Para $I_B \geq I_{Bsat}$ e $I_C \leq I_{Csat}$

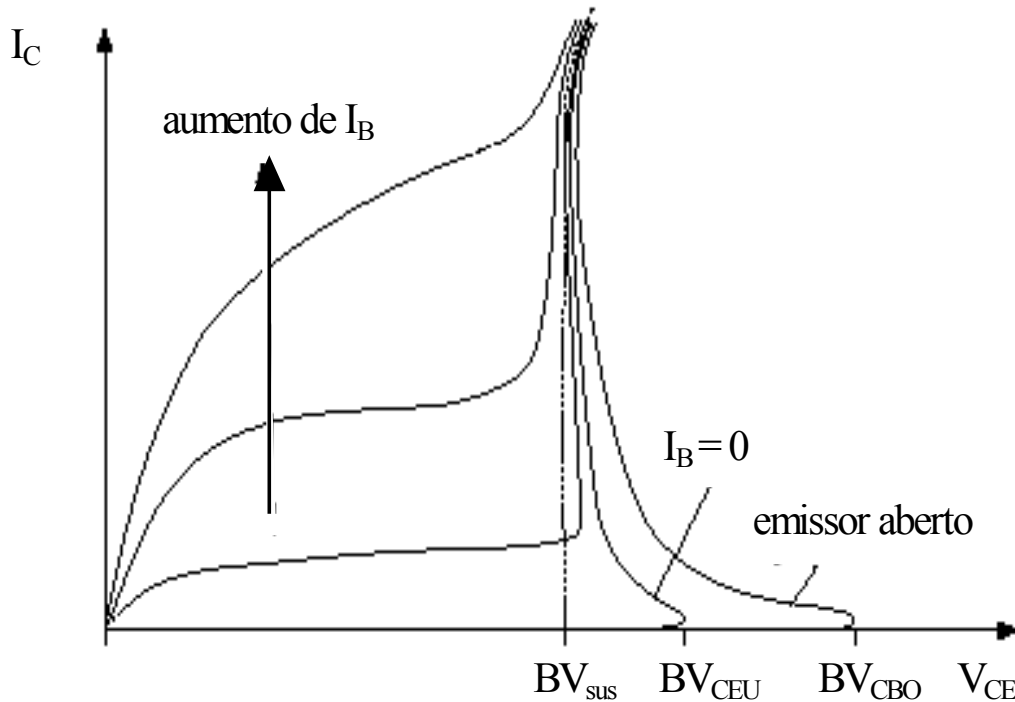
Garante-se que: $V_{CE} \leq V_{CEsat}$.

Operação com: β_F de 5 a 10.

O ganho β reduz rapidamente para elevadas correntes.

Limites de Operação Segura para o BJT

Primeira Avalanche



Primeira Avalanche (Ruptura)

BV_{CBO} : Máxima tensão entre coletor e base com emissor aberto.

BV_{CEO} : Máxima tensão entre coletor e emissor com base aberta (bloqueado).

BV_{sus} : Máxima tensão suportável entre coletor e emissor com corrente de base positiva (em condução).

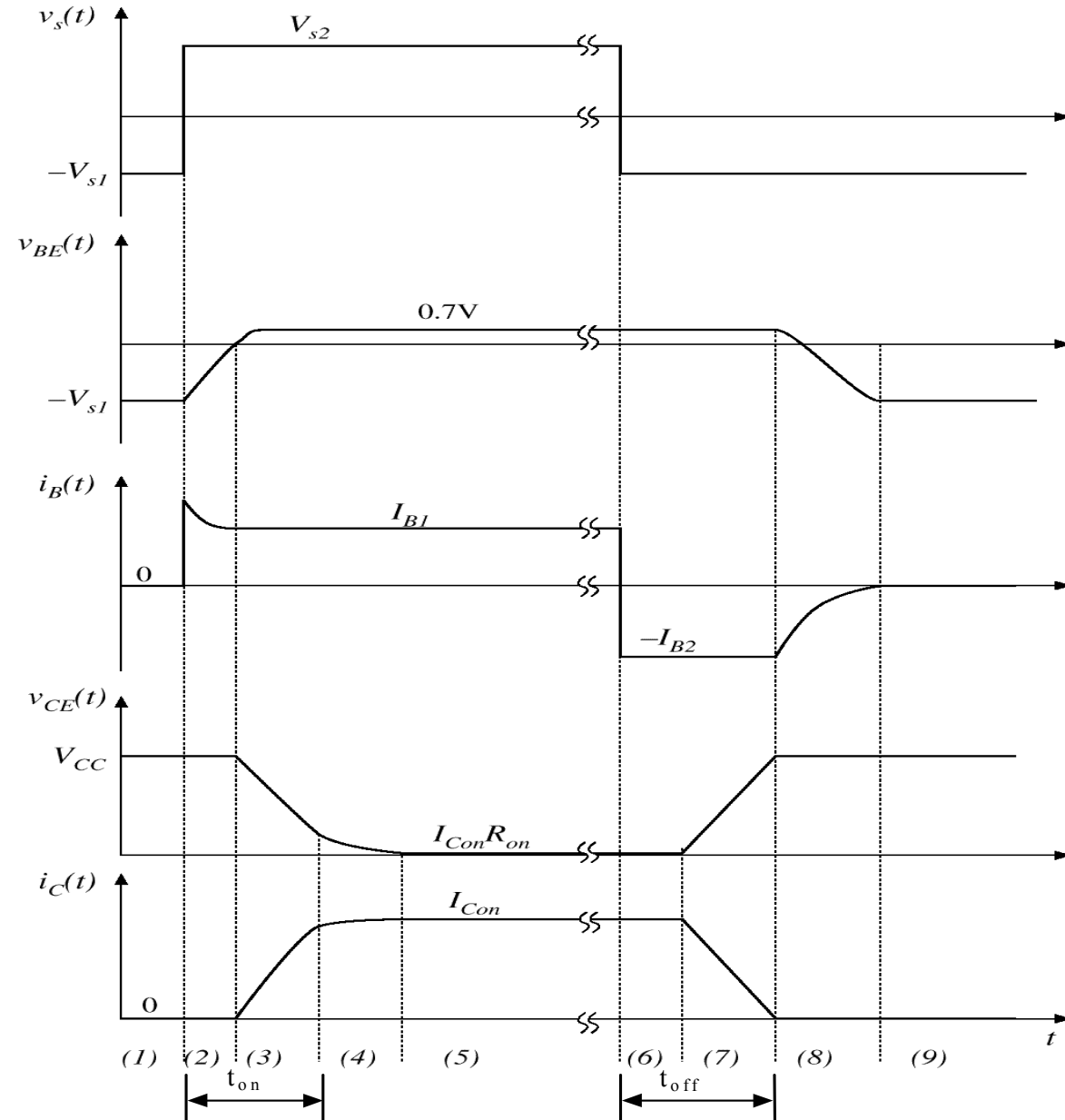
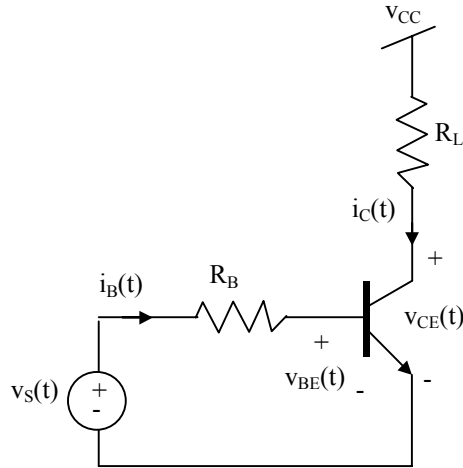
Segunda Avalanche (Ruptura)

Devido elevadas concentrações de corrente numa determinada região (elevadas tensões ou correntes aplicadas durante reduzido tempo). Devido característica de *coeficiente negativo de temperatura*, o aumento da corrente reduz a resistência do componente que aumenta a corrente e a temperatura, e, assim sucessivamente até a ruptura.

• Tensão V_{CE} permanece praticamente constante (e elevada), com o rápido crescimento da corrente de coletor (I_C).

Características Dinâmicas do BJT

• Carga Resistiva

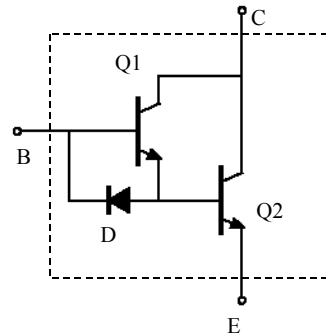


- (1) Bloqueio
- (2) Atraso de entrada em condução (carga capacitância base-emissor)
- (3) Tempo de subida da corrente.
- (4-5) Em condução
- (6) Atraso do bloqueio (Tempo de “estocagem”)
(descarga da capacitância base-emissor).
- (7) Tempo de descida da corrente
- (8-9) Bloqueado

• Extração de corrente reversa de base reduz o tempo de “estocagem”.

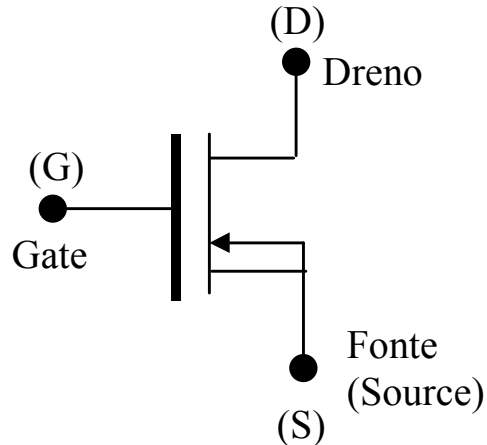
Conclusões Gerais para o BPT

- **O BPT tem sido substituído nos últimos anos por interruptores mais eficientes**
 - Para baixas tensões ($< 500\text{ V}$) o BPT tem sido substituído pelo MOSFET.
 - Para tensões acima de 500 V o BPT tem sido substituído pelo IGBT.
 - Comparado com o MOSFET, o BPT apresenta maiores tempos durante as comutações (operação em menores frequências). Contudo, o BPT apresenta menores perdas em condução.
 - Comparado com o IGBT, o BPT apresenta maiores tempos envolvidos nas comutações (maiores perdas nas comutações) e menor capacidade de corrente.
- Para aplicações em tensões mais elevadas ($> 500\text{ V}$), o BPT aparece em alguns casos em configuração “Darlington”:

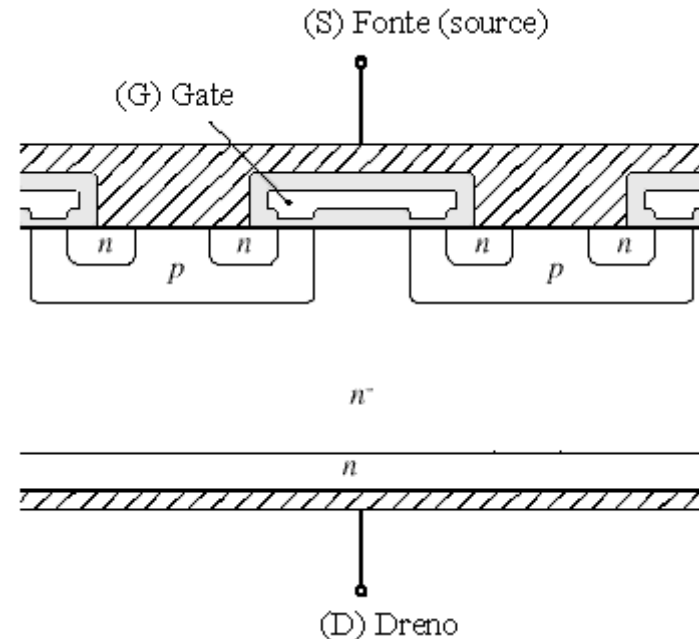


O MOSFET de Potência

Símbolo



Configuração Básica

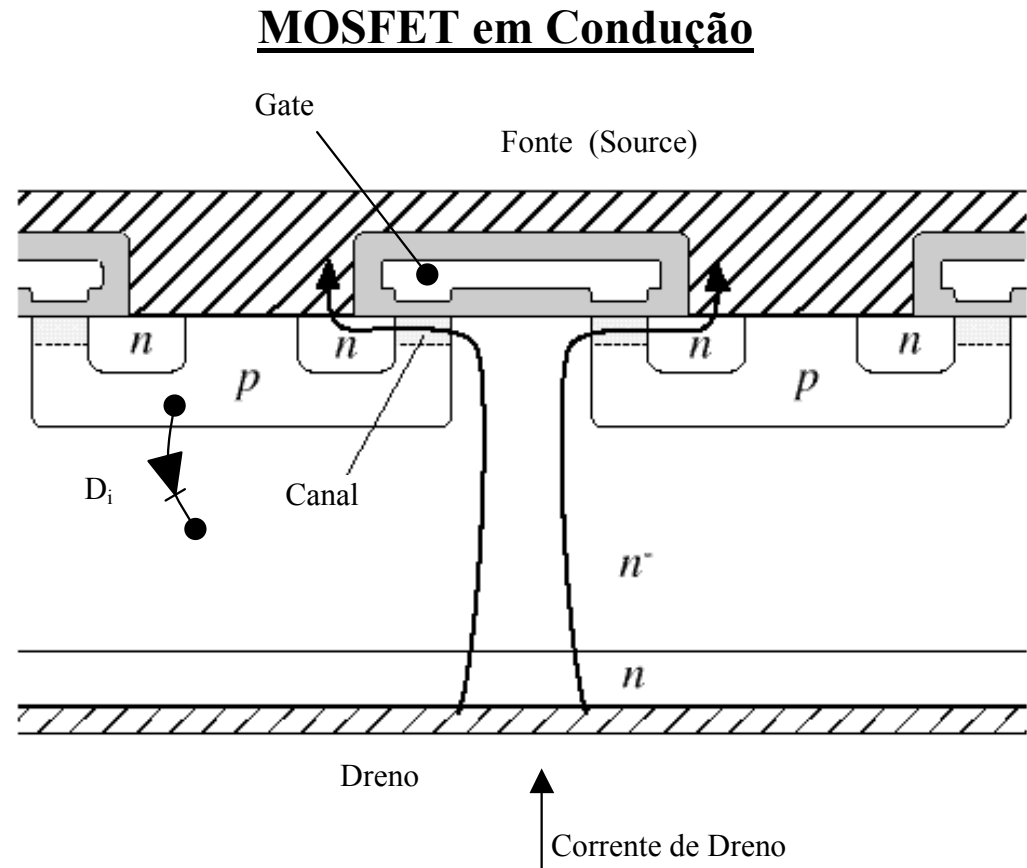


- **MOSFET de Potência** é normalmente do tipo **CANAL N**.
- Comprimento da região de gate é muito pequeno ($\cong 1$ micron)
- O fluxo de corrente é vertical através da seção do dispositivo.

- **Bloqueado**: Junção P- n^- reversamente polarizada (sem tensão de gate).
— **Resistência elevada** (grande área de depleção)

O MOSFET em Condução

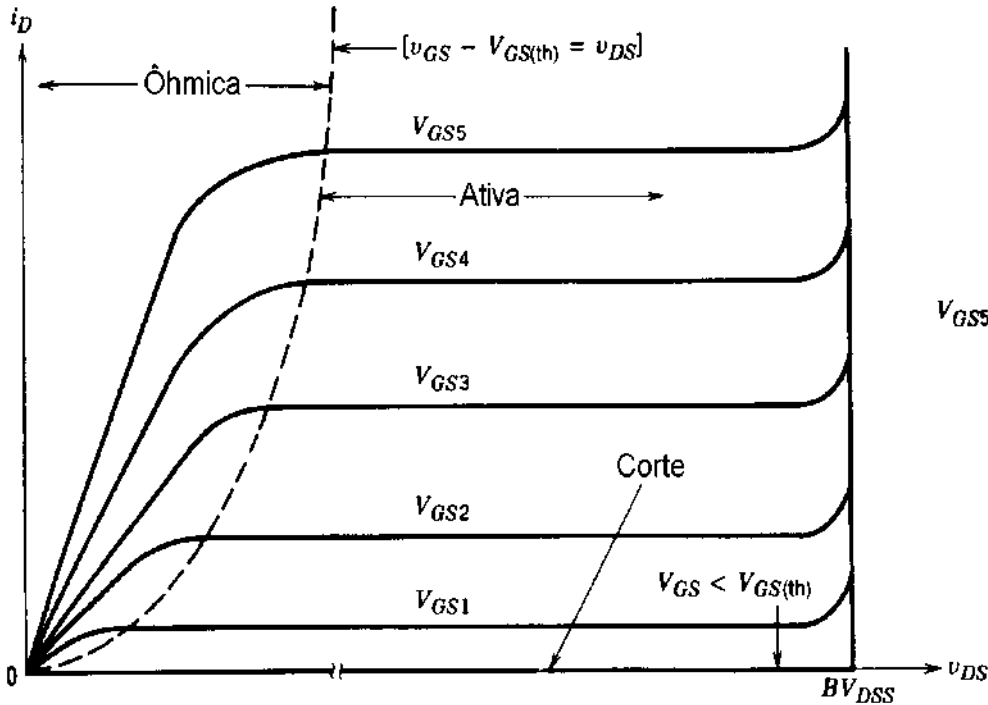
- Tensão positiva de gate induz a condutividade do canal
- A corrente flui através da seção vertical do dispositivo.
- A resistência total em condução é dada pelo somatório das resistências da região n^- , do canal, terminais de contato de dreno e fonte (source).
- Junção p- n^- resulta num diodo D_i em anti-paralelo com o sentido de condução dreno-source.
- Tensão negativa dreno-source polariza diretamente o diodo D_i



Obs: O diodo intrínseco D_i apesar de suportar tensões e correntes nominais, possui tempos de comutação maiores do que aqueles para o próprio MOSFET

Características Estáticas do MOSFET

Característica Volt-Ampère



- **Entrada em Condução**

$V_{GS} \gg V_{GS(th)}$
tipicamente: $10 \leq V_{GS} \leq 20$

- **Bloqueio**

$V_{GS} < V_{GS(th)}$

- **A resistência em Condução**

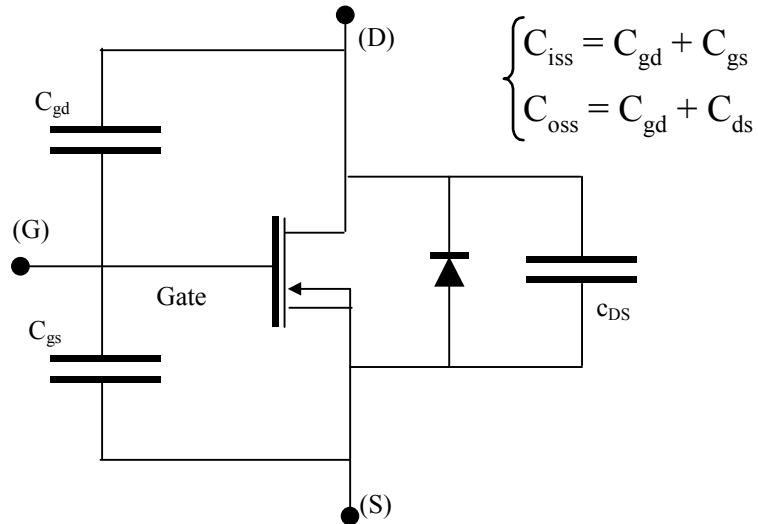
($R_{DS(on)}$) possui coeficiente de temperatura positivo, facilitando a operação em paralelo de MOSFETS.

- **Região ôhmica:** Região de interesse para operação como interruptor.
- **Região Ativa:** Regulação de corrente melhor do que o BPT.
- **Região Corte:** $V_{GS} < V_{GS(th)}$
 - $V_{GS(th)}$, tensão (G-S) mínima para entrada em condução.

- **Circuito de Comando,** com características de fonte de tensão, mais simples do que aqueles para o BPT (comando com características de fonte de corrente).

Características Dinâmicas para os MOSFETs

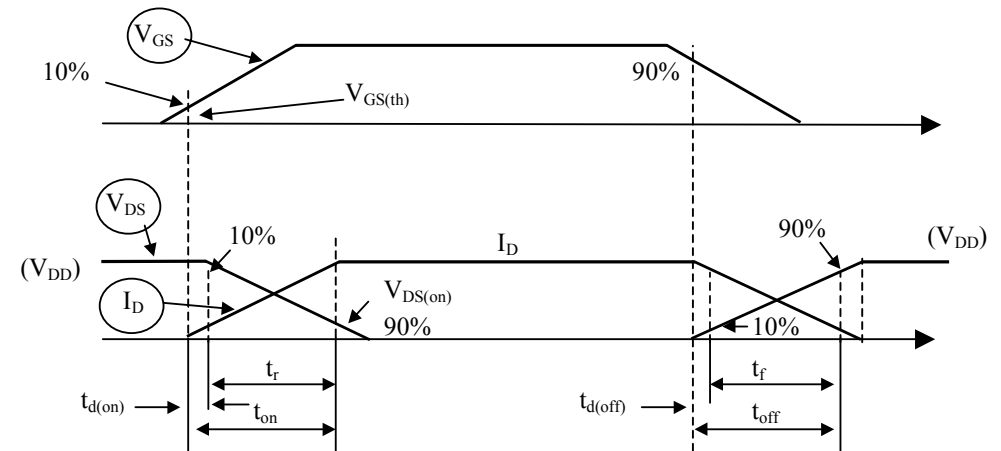
Capacitâncias Equivalentes dos MOSFETs



- C_{gd} : Pequena e altamente não linear.
- C_{gs} : Elevada e praticamente constante.
- C_{ds} : Média e altamente não linear
- ◆ Os tempos de comutação são determinados pelas taxas de carga e descarga de C_{gs} e C_{gd} (C_{iss}).

Características Dinâmicas - Carga Resistiva

Normalmente : $\begin{cases} t_{d(on)} \ll t_r \\ t_{d(off)} \ll t_f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_{on} \cong t_r \\ t_{off} \cong t_f \end{cases}$



- $t_{d(on)}$: Tempo de carga de C_{iss} até $V_{GS(th)}$.
 $I_D \cong 0$ e $V_{DS} \cong V_{DD}$
- t_r : Tempo de descarga de C_{oss} até $V_{DS(on)}$.
- $t_{d(off)}$: Tempo de descarga de C_{iss} .
- t_f : Tempo de crescimento da tensão V_{DS} (Carga C_{ds}).

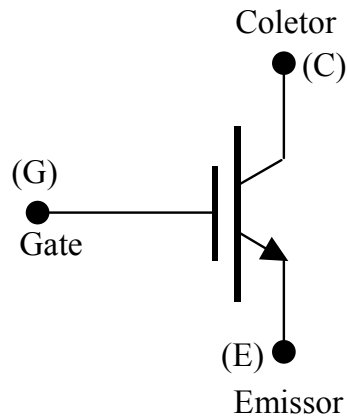
Alguns Dados Técnicos para Diferentes MOSFETs

Componente	V_{DSmax}	Corrente Média (I_d)	R_{DSon}
IRFZ48	60 V	50 A	0,018 Ω
IRF510	100 V	5,6 A	0,54 Ω
IRF540	100 V	28 A	0,077 Ω
APT10M25BNR	100 V	75 A	0,025 Ω
IRF740	400 V	10 A	0,55 Ω
MTM15N40E	400 V	15 A	0,3 Ω
APT5025BN	500 V	23 A	0,25 Ω
APT1001RBNR	1000 V	11 A	1,0 Ω

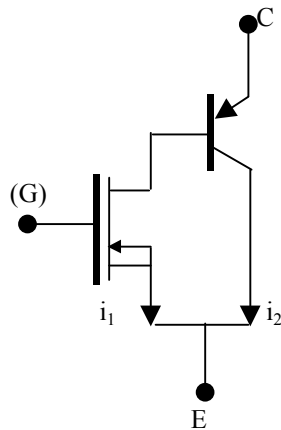
- ◆ **MOSFETs possuem características de reduzidos tempos durante as comutações (frequências típicas de dezenas à centenas de kHz).**
- ◆ **R_{DSon} rapidamente aumenta com o aumento de V_{DSmax} suportável.**
- ◆ **Circuito de comando de gate muito simples.**
- ◆ **A escolha dos MOSFETs normalmente são para aplicações com $V_{DSmax} < 500$ V.**
- ◆ **Aplicações de MOSFETs com capacidade de bloqueio em torno de 1000 V são para baixas potências (não superior à 100 W).**

O Transistor IGBT

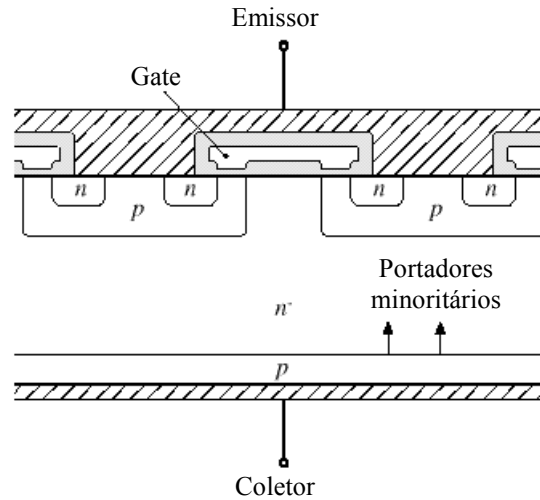
Símbolo



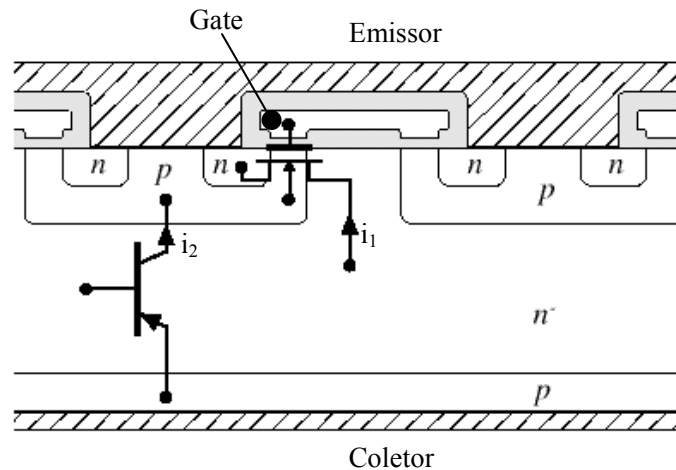
Circuito Equivalente



Construção Básica



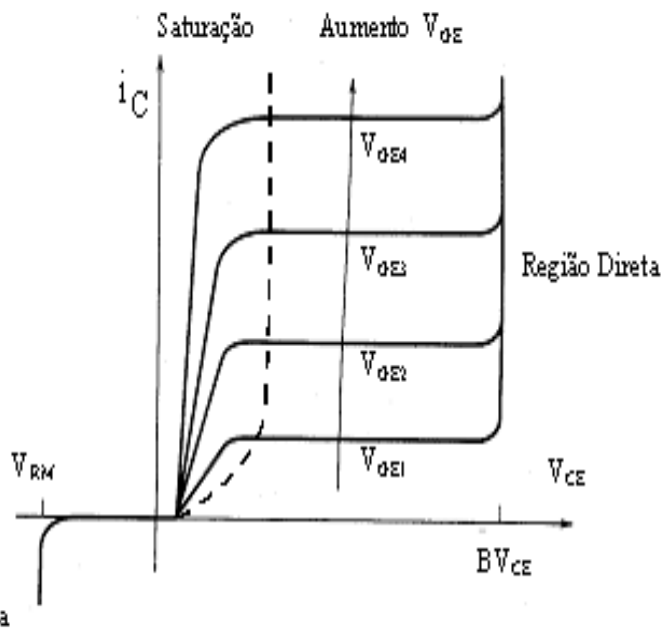
Localização do circuito equivalente



- Construção similar ao MOSFET, exceto devido à região p adicional.
- Condução de portadores minoritários, como nos BPTs.
- Tempos de comutação maiores do que os MOSFETs e menores do que os BPTs.
- Aplicável onde se deseja elevadas tensões V_{CE} .

Características Estáticas e Dinâmicas do IGBT

Características Estáticas



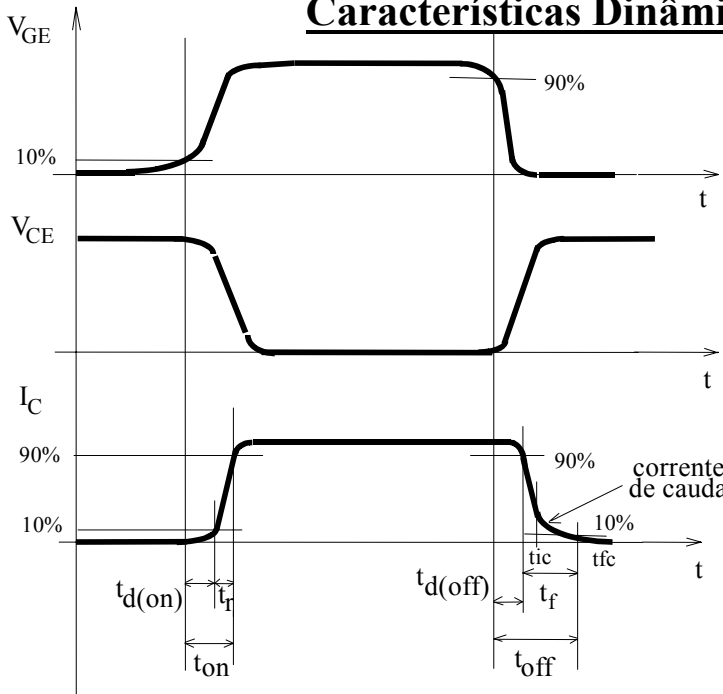
- Comando com características de fonte de tensão (similar ao MOSFET)

- **Região de trabalho:** V_{GE} tipicamente entre 12V - 20V, resultando em V_{CEon} reduzida (redução perdas em condução).

- Dispositivo com características de coeficiente positivo de temperatura, facilitando o paralelismo.

* Observa-se que existem IGBTs com coeficiente negativo.

Características Dinâmicas



- $t_{d(on)}$: Retardo na entrada em condução

- t_r : Tempo de subida de I_C

- $t_{d(off)}$: Retardo no bloqueio

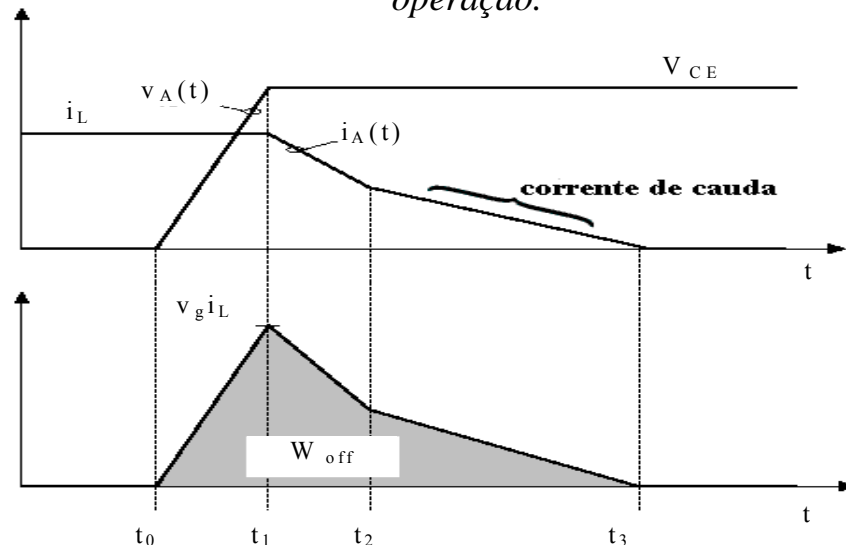
- t_f : Tempo de descida de I_C

Obs: A corrente de cauda pode envolver 20% de t_{off} limitando o aumento da frequência de operação.

Detalhe das Perdas Durante o bloqueio

presença da corrente de cauda "current tail" (W_{off})

$$p_A(t) = v_A i_A$$



Alguns Dados Técnicos para Diferentes IGBTs

Componente	V_{CEmax}	Corrente Média	$V_{CE(on)}$	t_f
HGTG32N60E2	600 V	32 A	2,4 V	0,62 μ s
HGTG30N120D2	1200 V	30 A	3,2 V	0,58 μ s
Módulos				
CM400HA-12E	600 V	400 A	2,7 V	0,3 μ s
CM300HA-24E	1200 V	300 A	2,7 V	0,3 μ s

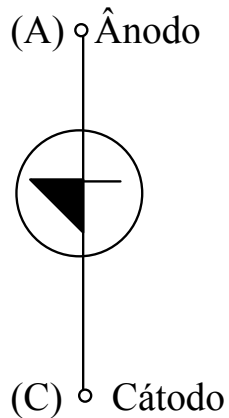
- As aplicações para o IGBT normalmente encontram-se para elevados níveis de tensão V_{CE} (500 a 1700 V) e elevadas potências (1-1000 kW), 1998.
- *IGBTs com coeficiente positivo de temperatura facilitam o paralelismo.*
- IGBTs com coeficiente negativo de temperatura apresentam reduzidas perdas em condução.
- Circuitagem de controle muito simples (similar aos MOSFETs).
- Mais lentos do que os MOSFETs, contudo, mais rápidos do que os BPTs, GTOs e SCRs.
- Frequências típicas de utilização: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Comutação dissipativa: 3-30 kHz} \\ \text{Comutação não dissipativa: até 200 kHz} \end{array} \right.$
(1998)

TIRISTORES (Diodo PNP, SCR, TRIAC, DIAC, GTO)

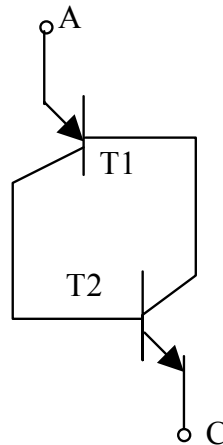
Definição IEC: Tiristor é qualquer dispositivo semicondutor biestável, contendo três ou mais junções (P-N), com capacidade de conduzir ou bloquear uma corrente num ou nos dois sentidos.

O diodo PNP (Diodo Schokley)

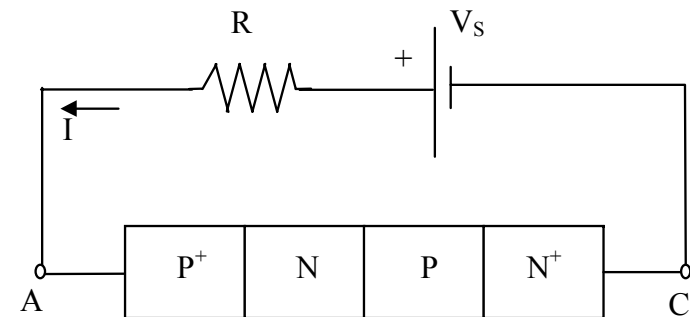
Símbolo



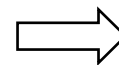
Circuito Equivalente



Construção Básica



- Em condução (Resistência tipicamente $\leq 10 \Omega$)
- Bloqueado (Resistência tipicamente $\geq 100 M\Omega$)

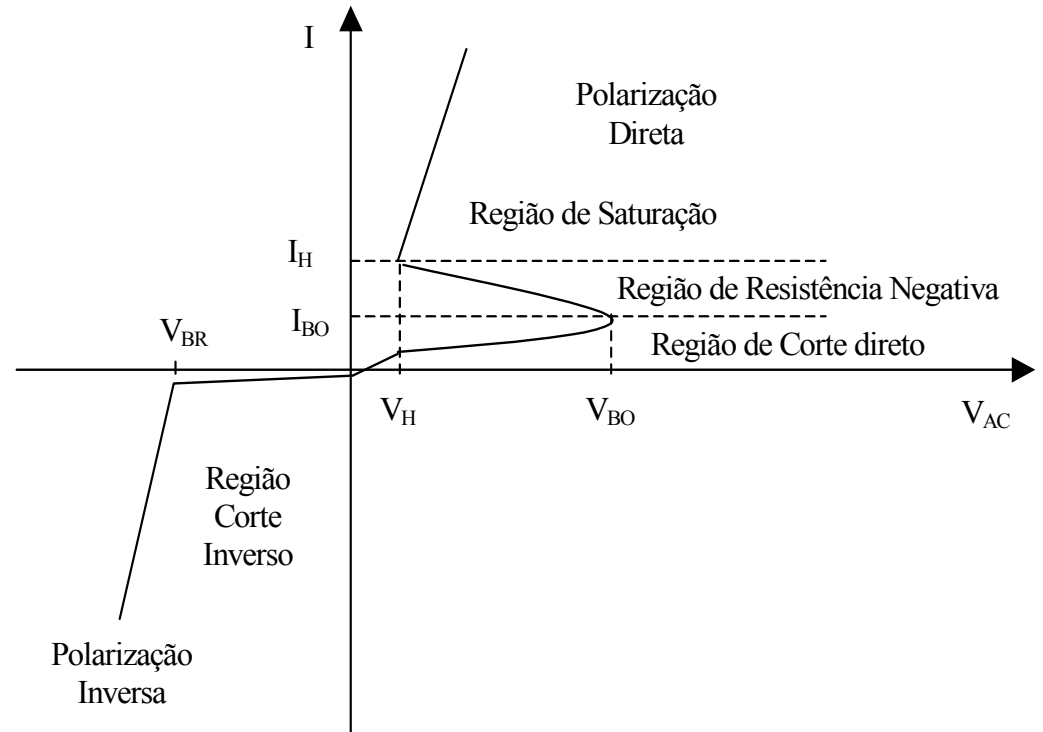


Utilização em Baixa Potência

O diodo PNP

- $V_{AC} \geq V_{BO}$ → Entra em condução
— Passa pela região de resistência negativa e opera em regime na região de saturação ($V_{AC} \cong 1V$)
- Em condução e com $I < I_H$ → Bloqueio
— I_H e V_H : Corrente e tensão de manutenção em condução.
- V_{BO} : ordem de alguns volts até centenas de volts.
- I_{BO} : ordem de centenas de μA .
- Dispositivo para operação em baixas potências.
- Não existem diodos PNP de germânio (impossibilidade de bloqueio).

Característica Volt-Ampère



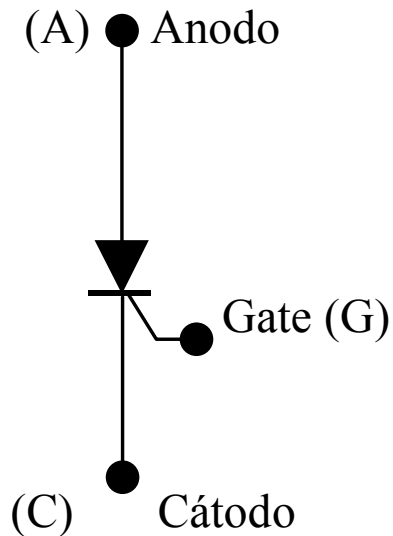
$$* I = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \begin{cases} \alpha_1 : \text{ganho de } T_1 \\ \alpha_2 : \text{ganho de } T_2 \\ I_{CO} : \text{corrente de saturação reversa} \end{cases}$$

$$* (\alpha_1 + \alpha_2) = 1 \text{ (condução)}$$

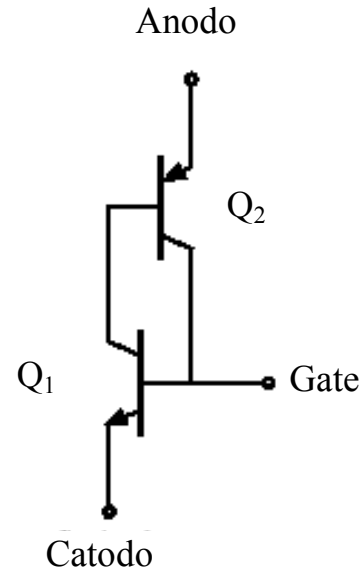
$$* (\alpha_1 + \alpha_2) < 1 \text{ (bloqueio)}$$

O SCR

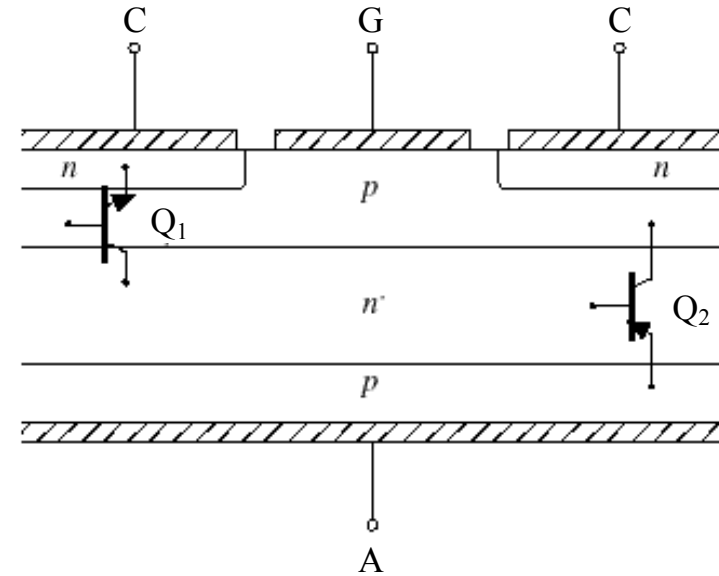
Símbolo



Circuito Equivalente



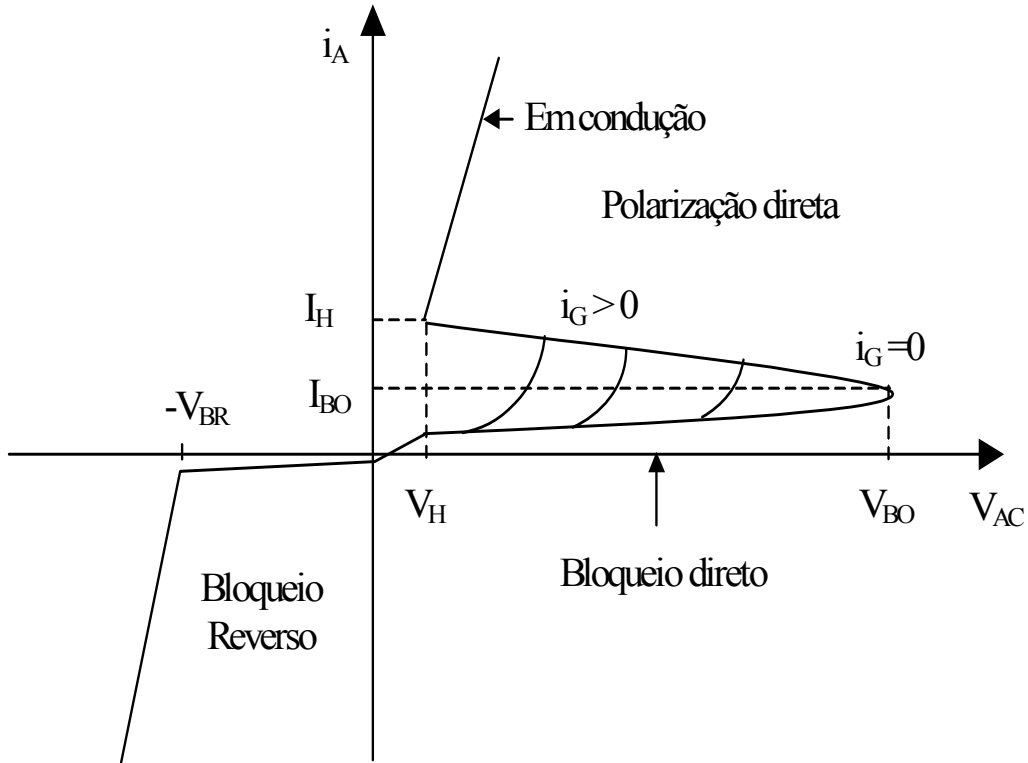
Construção Básica



- O SCR foi desenvolvido em 1965 pelo Bell Telephone Laboratory (EUA).
- É ainda hoje (1998) um dos principais dispositivos interruptores para elevadas tensões e potências (operação em baixas frequências, tipicamente menores que 2 kHz).
- A DIFERENÇA em relação ao Diodo Schokley é a presença do terminal de GATE, com a finalidade de modificar a tensão de entrada em condução (V_{BO}).

Características Estáticas para o SCR

Característica Volt-Ampère

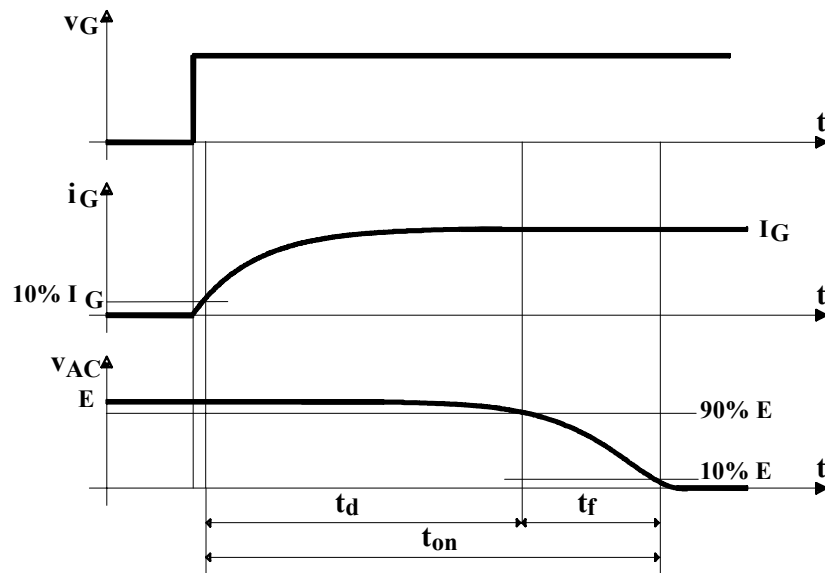


- Dispositivo com características em condução de portadores minoritários.
- Características de reduzidas resistências e tensões em condução, permitindo a aplicação em elevadas tensões e potências (5000 - 6000 V e 1000 - 2000 A) - 1998.
- Bloqueio através da redução da corrente à valores inferiores à I_H (corrente de manutenção), uma vez que, mesmo com a inversão da corrente de gate, não é possível bloquear o SCR.

- Com o aumento da corrente de gate, diminui a tensão direta de entrada em condução (V_{BO}).
- Em condução a característica é similar ao diodo PN.
- Não existe capacidade de bloqueio pelo terminal de gate após a entrada em condução.

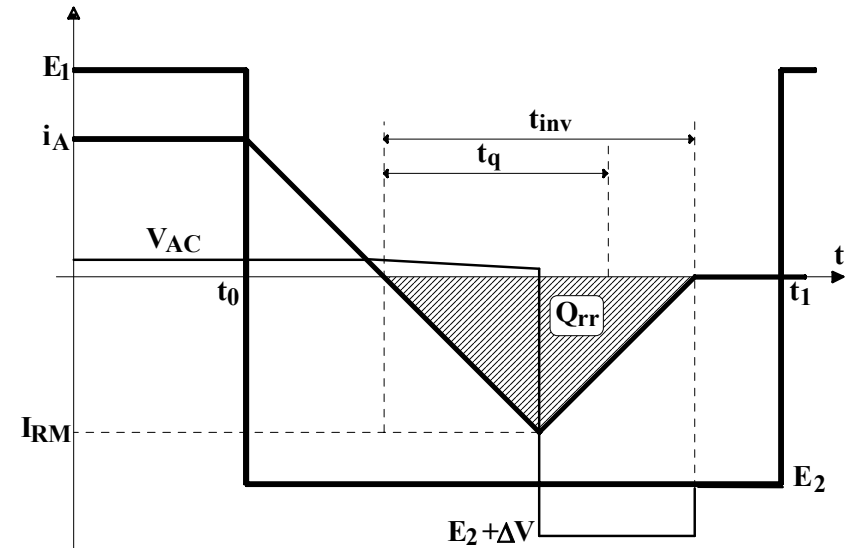
Características Dinâmicas para o SCR

Entrada em Condução



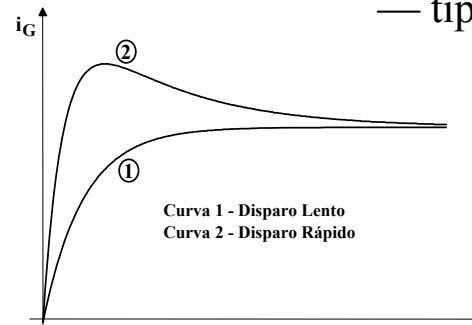
- t_d : Tempo de retardo
- t_f : Tempo de descida de V_{AC}
- t_{on} : Tempo de entrada em condução
- t_d é a maior parcela e depende da amplitude e velocidade de crescimento de i_G .
- t_f independe de i_G .
- t_{on} (tipicamente entre $1\mu s$ - $5\mu s$)

Bloqueio



Característica Comando

- t_q : Tempo mínimo de aplicação de tensão reversa durante o processo de bloqueio.
- tipicamente : ($10\mu s < t_q < 200\mu s$).

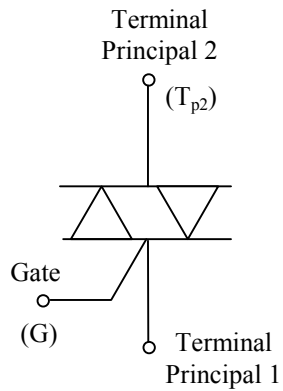


■ Portanto, o SCR é um dispositivo para operação em baixas frequências.

O Triodo CA (TRIAC)

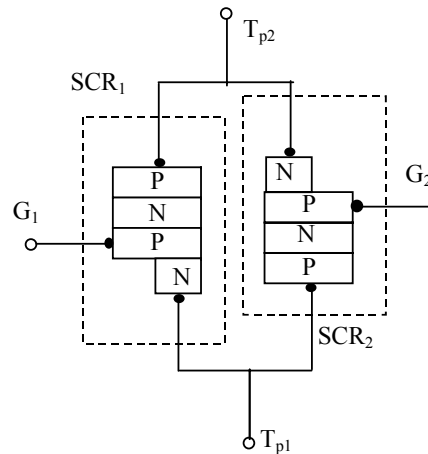
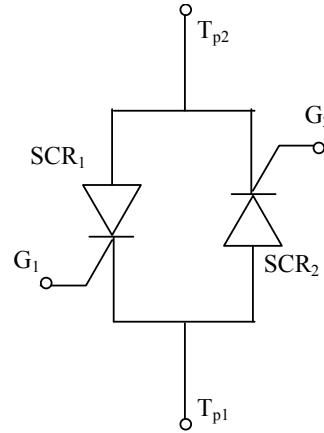
O TRIAC

Símbolo

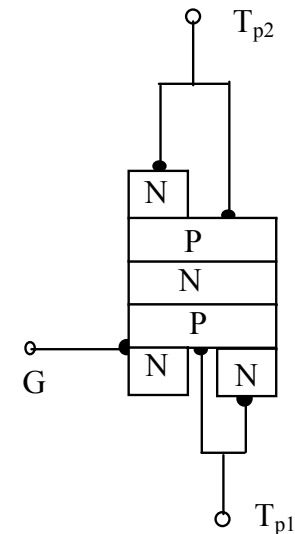


- O TRIAC permite o controle de corrente nas duas direções.
- Equivalente à dois SCRs conectados em anti-paralelo.

Circuito Equivalente



Construção Básica



O TRIAC

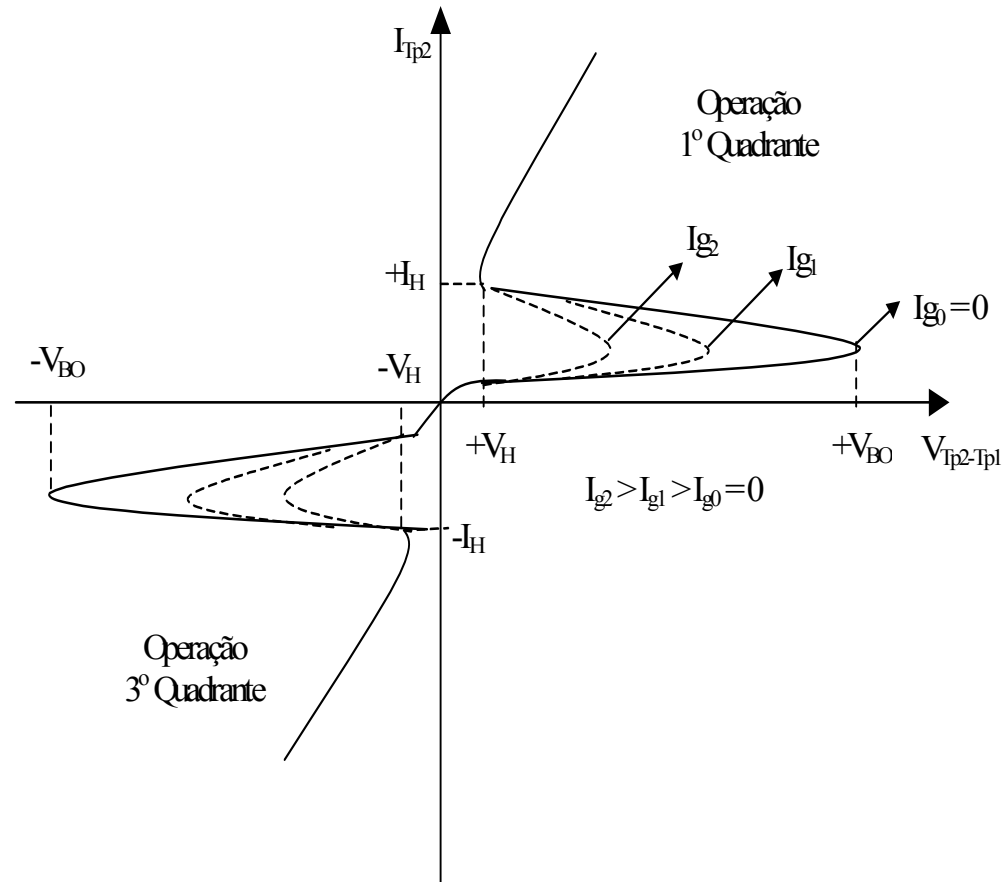
- Operação em dois quadrantes, com corrente de gate positiva ou negativa.

I_g	$V_{TP2-TP1}$	V_{G-TP1}	Quadrante	Sensibilidade
+	+	+	1º	\gg
-	+	-	1º	$<$
+	-	+	3º	\ll
-	-	-	3º	$>$

- Embora seja bidirecional, sua sensibilidade é maior operando no 1º quadrante com $I_g > 0$ e tensões positivas ($G - T_{P1}$ e $T_{P2} - T_{P1}$).

- Operação em baixas potências
 - Tipicamente para correntes eficazes inferiores à 40 A
- Operação em baixas frequências
 - Tipicamente inferiores à 400 Hz.

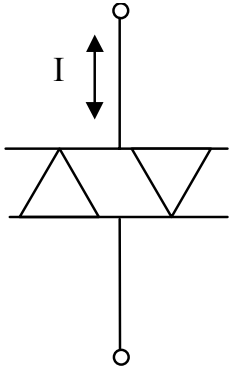
Característica Volt-Ampère



O Diodo CA (DIAC)

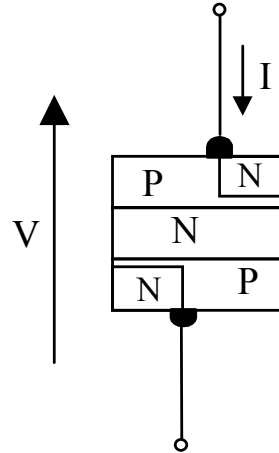
O DIAC

Símbolo



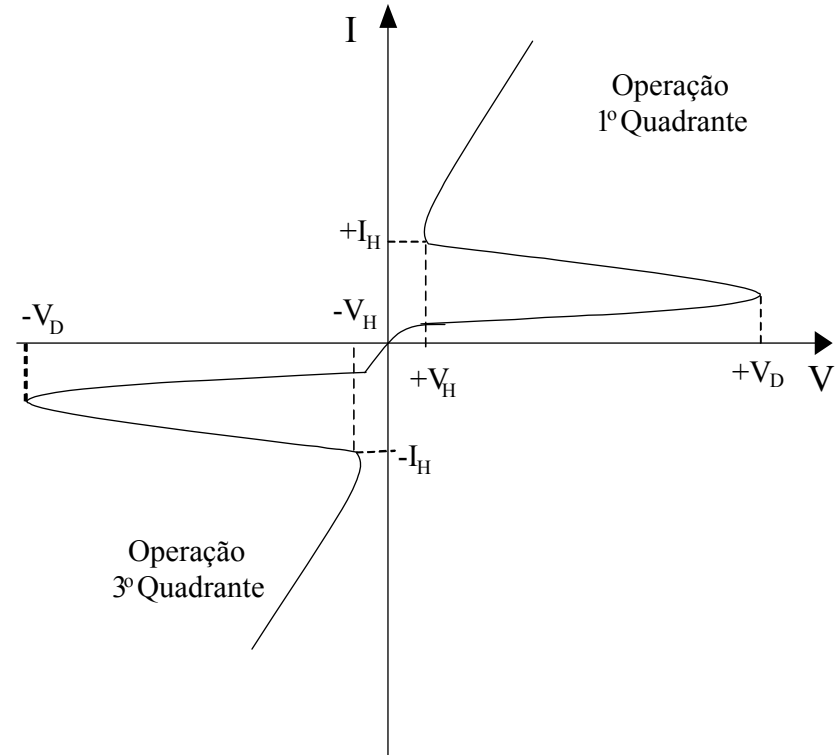
- **Permite corrente nos dois sentidos.**
- **Não há designação de terminais devido simetria** (na prática ocorre pequena assimetria).
- **Aplicações em baixa potência**

Construção Básica



- $V \geq V_D \rightarrow$ **Condução**
— $I > 0$ (1º Quadrante)
- $V \leq -V_D \rightarrow$ **Condução**
— $I < 0$ (3º Quadrante)
- **Bloqueio** $\left\{ \begin{array}{l} I < I_H \\ \text{(1º Quadrante)} \\ I > -I_H \\ \text{(3º Quadrante)} \end{array} \right.$

Característica Volt-Ampère



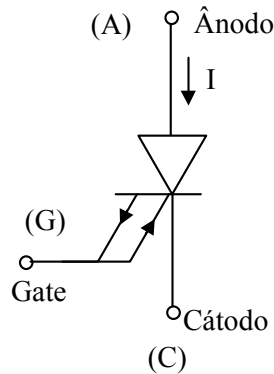
- I_H : **corrente de manutenção em condução.**
- V_D : **Tensão de disparo** (entrada em condução)

O Tiristor Controlado pelo Gate (GTO)

O GTO: Tiristor especialmente projetado de modo que a corrente de gate possa alterar de modo apreciável a corrente de manutenção (I_H), permitindo o bloqueio pelo gate.

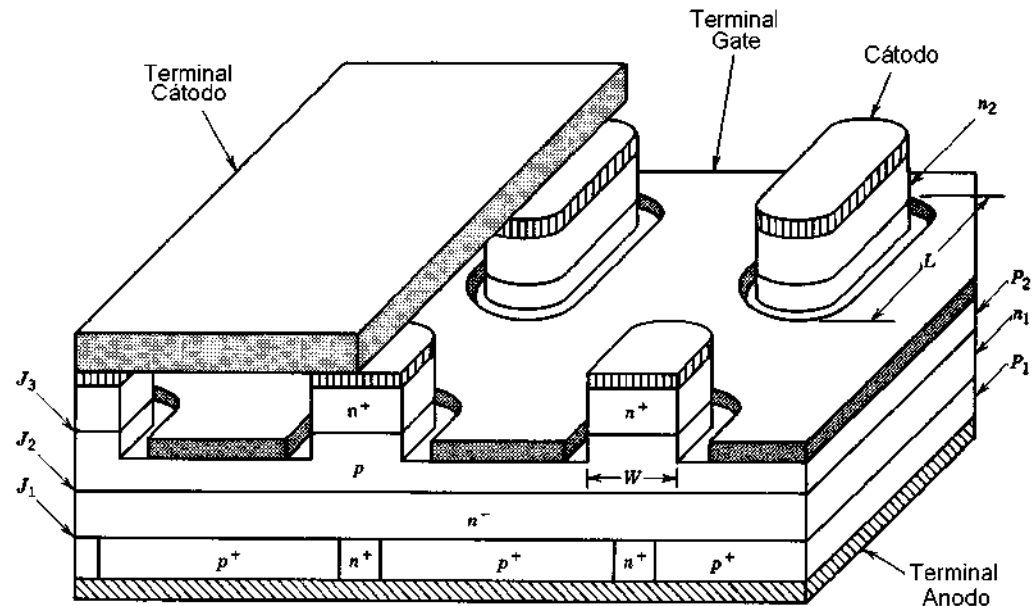
O processo de entrada em condução é análogo ao SCR.

Símbolo



- Corrente de gate positiva controla entrada em condução.
- Corrente de gate negativa controla o bloqueio:
 - Aplicação tensão negativa gate-cátodo.

Construção Básica

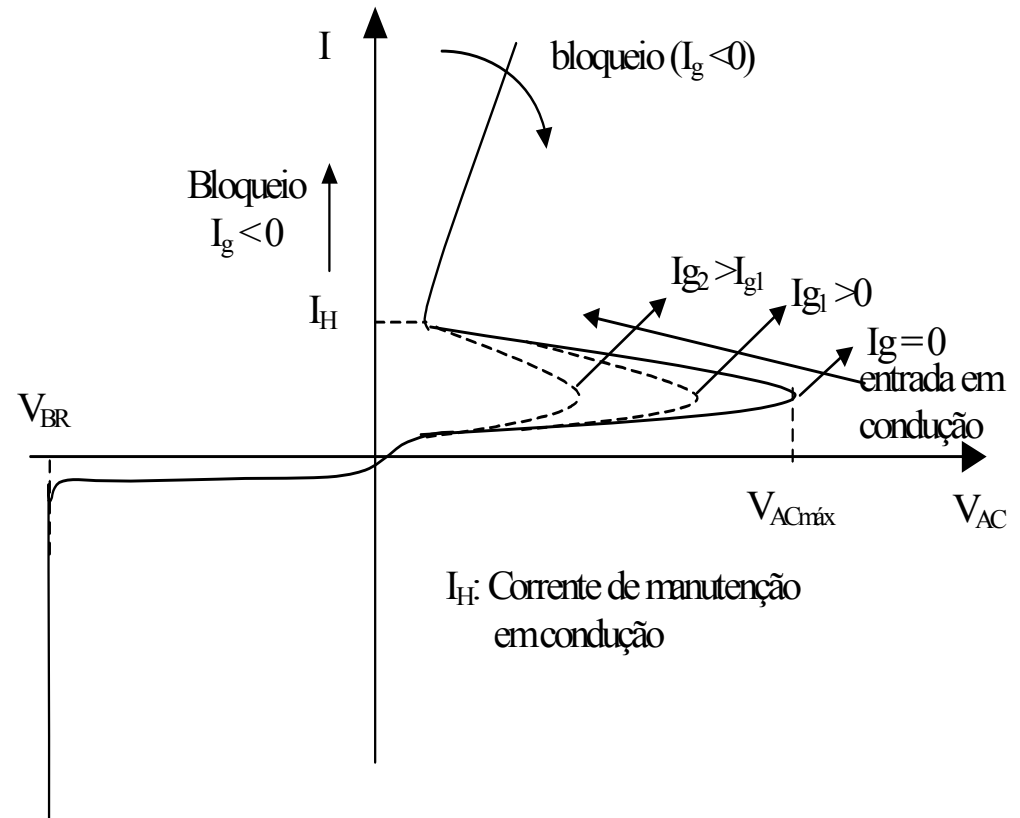


- A estrutura de gate e cátodo são fortemente intercaladas, possibilitando uma forte ação de gate.

O GTO

Característica Volt-Ampère

- A entrada em condução é tipicamente análoga ao SCR.
- Quando em condução, a corrente de gate pode ser suprimida (como no SCR), não afetando sua operação.
- O ganho de corrente de gate para o bloqueio é tipicamente baixo (entre 2 - 5), implicando em elevadas correntes de gate reversas.
- Capacidade de bloqueio de elevadas tensões (acima de 4,5 kV).
- Tensão em condução (2 - 3 V) maior do que o SCR.
- Operação em baixas frequências (tipicamente inferiores à 10 kHz).



- O bloqueio ocorre pela alteração de I_H através do gate. Com corrente de gate negativa modifica-se I_H até que seja superior à corrente de carga, provocando o bloqueio.

Comparações Gerais Entre os Principais Interruptores em Eletrônica de Potência

	Dispositivos					
	Diodo Potência	BPT	MOSFET	IGBT	SCR	GTO
Característica de Ataque	----	Em corrente	Em tensão	Em tensão	Em corrente	Em corrente
Potência envolvida no comando	----	Média para Elevada	Muito Baixa	Muito Baixa	Média para Elevada	Elevada
Complexidade do Circuito de Comando	----	Elevada	Muito Baixa	Muito Baixa	Baixa	Elevada
Densidade de Corrente	Média para Elevada	Média	Elevada para Baixa	Elevada	Elevada	Média para Elevada
Máxima Tensão Suportável	Média	Média	Média para Baixa	Média para Elevada	Elevada	Elevada
Frequência de Operação	Média para Elevada	Baixa para Média	Elevada	Média para Baixa	Baixa	Baixa
Perdas nas comutações (circuitos convencionais)	Baixa para Média	Média para Elevada	Muito Baixa	Média para Elevada	Elevada	Elevada
Dificuldade de Paralelismo	Muito Baixa	Média para Elevada	Baixa	Baixa (coef. positivo)	Média	Média