



Eletrônica de Potência

**Professor
Fernando Antunes**

Semestre 2007.2



Programa da Disciplina

- **Unidade I – Introdução**
 - Objetivo, histórico e aplicações da Eletrônica de potência ;
 - Semicondutores de potência: diodos, Transistor Bipolar e Tiristores;
 - Classificação dos conversores estáticos;
 - Cálculo térmico.
- **Unidade II – Conversores CC-CC Abaixadores e Elevadores**
 - Princípio de operação;
 - Regulador CC-CC Abaixador (Conversor Buck);
 - Regulador CC-CC Elevador (Conversor Boost);
 - Regulador CC-CC Abaixador / Elevador (Conversor Buck / Boost);
 - Operação com cargas RLE.
- **Unidade III – Retificadores Monofásicos a Diodo**
 - Retificadores monofásicos de meia onda;
 - Retificadores Monofásicos de onda completa.
- **Unidade IV – Retificadores Trifásicos não controlados**
 - Retificadores em Meia Ponte e Ponte Completa;
 - Comutação
- **Unidade V – Retificadores Controlados Monofásicos e Trifásicos**
 - Retificadores em Meia ponte e Ponte Completa;
 - Fator de potência
 - Comutação
 - Pontes mista



Programa da Disciplina

- **Unidade VI – Transistor para Alta Frequência**
 - MOSFET;
 - IGBT.
- **Unidade VII – Conversores CC-CA**
 - Estrutura Básica – VSI;
 - Princípio de modulação por largura de pulso – PWM;
 - Estruturas monofásica
 - Estrutura trifásicas



Programa da Disciplina

- **Aulas de Laboratório**
 - **Característica de chaveamento de diodos e tiristores;**
 - **Conversores ca-cc monofásicos a diodo;**
 - **Conversores ca-cc trifásicos a diodo;**
 - **Conversores ca-cc de monofásico controlado a tiristor;**
 - **Conversores ca-cc trifásico controlado a tiristor;**
 - **Conversores ca-cc de 12 pulsos;**
 - **Conversor Buck a MOSFET/IGBT;**
 - **Conversor Boost a MOSFET/IGBT;**
 - **Inversor monofásico;**
 - **Inversor trifásico .**



Unidade I - Introdução

Definição de Eletrônica de Potência

- É uma nova tecnologia que trata da aplicação de dispositivos eletrônicos e componentes associadas para **conversão, controle e condicionamento da energia elétrica**;
- Controle da Energia Elétrica, meio usado para se obter controle de grandezas não elétricas como: velocidade de máquinas girantes, controles de temperatura de fornos, processo eletromecânicos, intensidades de iluminação, etc.



Unidade I - Introdução

Definição de Eletrônica de Potência

- De uma maneira geral pode ser considerada como uma tecnologia multidisciplinar que envolve:
 - Dispositivos Semicondutores de Potência;
 - Circuitos Conversores;
 - Máquinas Elétricas;
 - Teoria de Controle;
 - Microprocessadores;
 - Sistemas Elétricos.



Histórico

- Retificador a Arco de Mercúrio – início do século passado;
- Estrutura Retificadoras – Anos 30;
- Tiristor – Grande evolução:
 - Laboratório Bell, 1956;
 - Comercializado pela GE, 1958;
- Anos 70 – diodos, Transistores de potência e GTO;
- Anos 80 – MOSFET e IGBT;
- Anos 90 – Encapsulamento de Potência.



Aplicações

- **Fontes Estabilizadas**
- **Controles de Motores**
- **Equipamentos de soldagem**
- **Veículos Elétricos**
- **Tração Elétrica**
- **Controle de Trânsito**
- **Utilização de fontes não Convencionais de Energias**
- **Utilização Aeroespacial**
- **Carregadores de bateria**
- **Alimentação de Emergência (UPS)**
- **Sistema Elétricas de Potência**

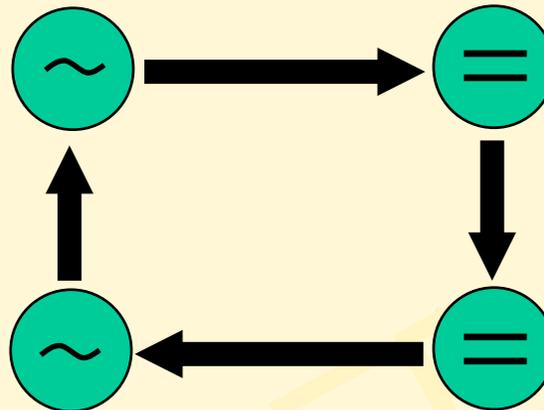


Conversores Estáticos

- Circuito projetados para processamento da energia;
- Convertem energia elétrica da forma como é fornecida por uma fonte, na forma requerida por uma carga;
- Alto rendimento (99% em grandes conversores);
- Usam semicondutores como chaves;
- Estrutura formada basicamente por chaves, capacitores e indutores.



Conversores Estáticos



- Conversores ca-cc (Retificadores)
- Conversores cc-cc (Choppers e fontes cc chaveadas)
- Conversores cc-ca (Inversores)
- Conversores ca-ca (Chaves ca)

Vantagens :

Espaço físico
Resposta rápida
Baixa manutenção

Desvantagens :

Harmônicos
Interferências



Chaves Semicondutoras

- **Idealmente possuem apenas dois estados: Apresentam completo bloqueio ou oferecem irrestrita condução à passagem de corrente.**
- **Podem ser:**
 - **Diodos;**
 - **Tiristores;**
 - **Chaves controladas:**
 - **BJT – 1kV, 300A, 20kHz, 200kVA;**
 - **MOSFET – 1kV, 100A, 50kHz;**
 - **IGBT – 1,7kV e 2kA, 20kHz; 6,5kV, 600A, 800Hz**
 - **MCT.**
 - **IGCT**



Unidade I - Introdução

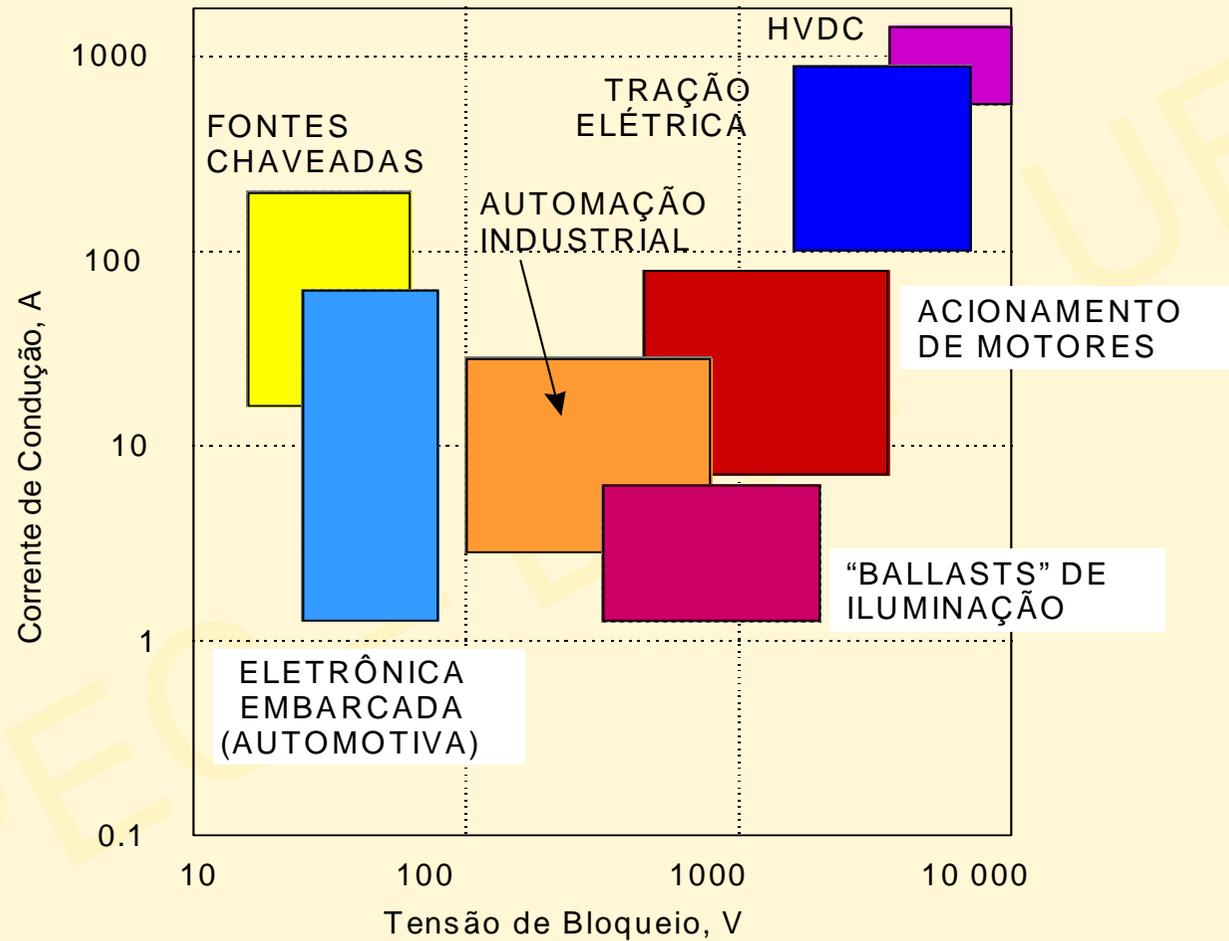
IGBT de alta potência

No.	IGBT	V_{CE} [V]	I_{CE} [A]	Switching frequency [Hz]
1	FZ2400R17KE3	1700	2400	2000
2	FZ3600R17KE3	1700	3600	2000
3	CM2400HC-34H	1700	2400	2000
4	5SNA 2400E170100	1700	2400	2000
5	5SNA 3600E170300	1700	3600	2000
6	DS FZ1500R33HE3*	3300	1500	1500
7	DS FZ1500R33HL3*	3300	1500	1500
8	CM1200HA-66H	3300	1200	1500
9	5SNA 1500E330300*	3300	1500	1500
10	FZ 600 R 65 KF1	6500	600	800



Unidade I - Introdução

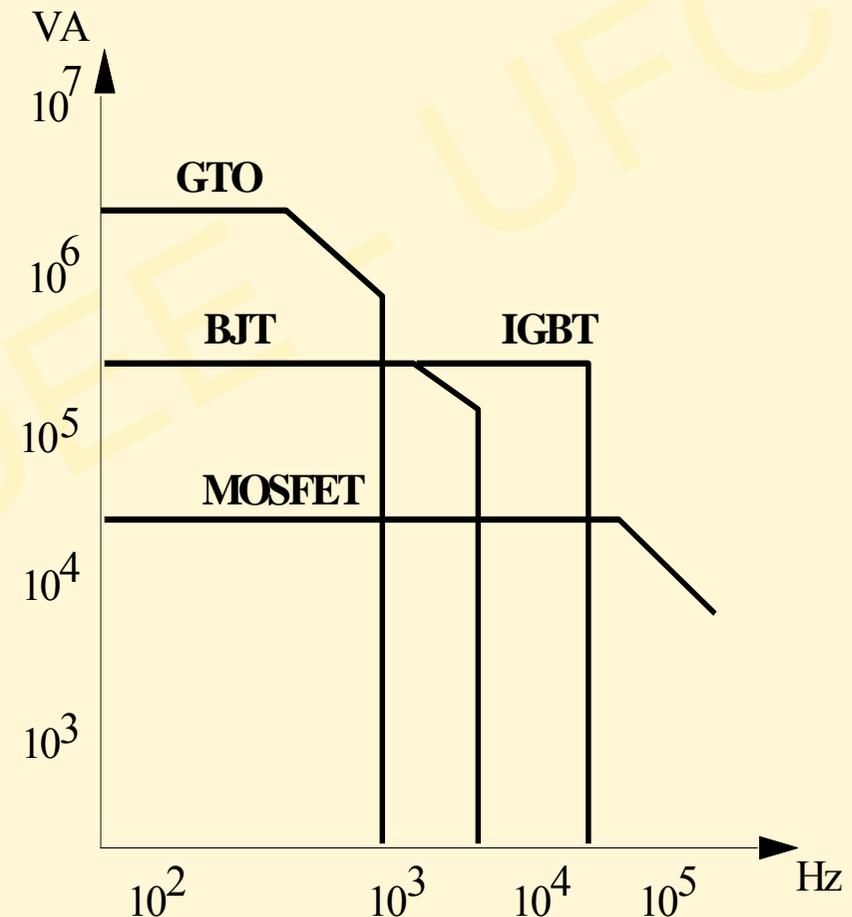
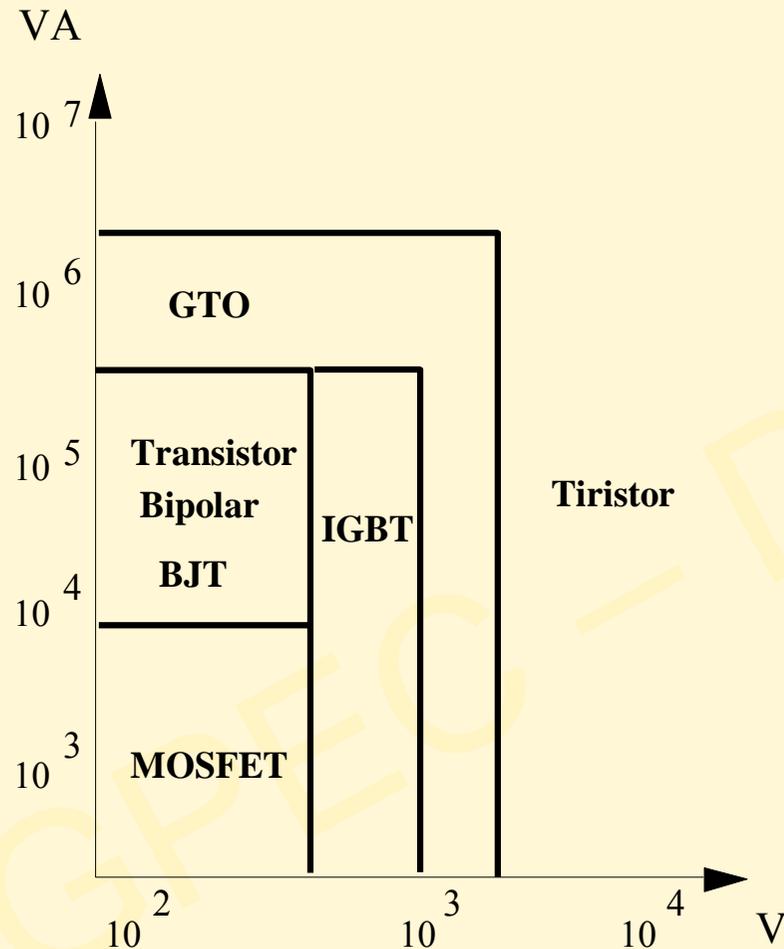
Aplicações típicas da Eletrônica de Potência





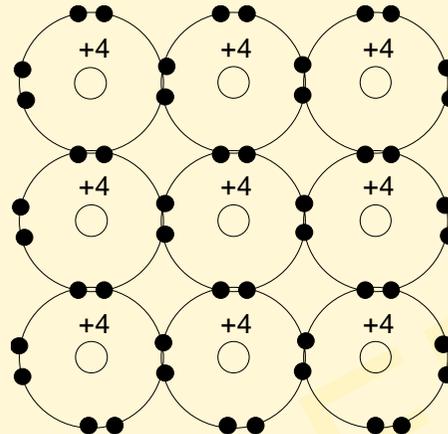
Unidade I - Introdução

Características Potência x Tensão e Potência x Frequência



Junção PN

- Formam a base para o estudo dos diodos transistores e tiristores de potência.

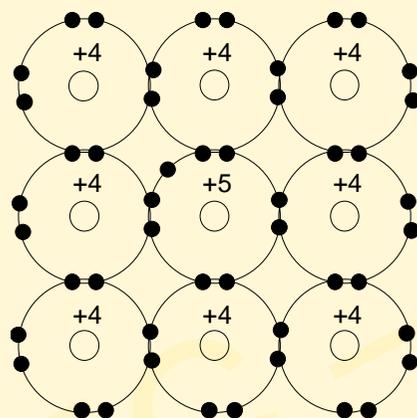


Cristal de Silício e Elétons de Valência

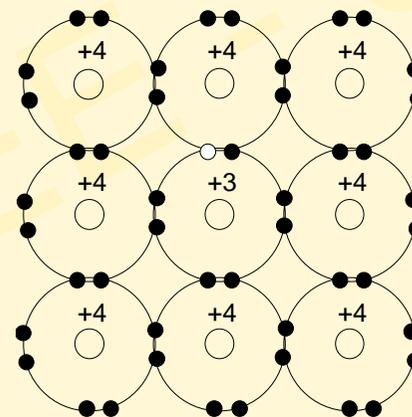
- Cristal de Silício:
 - Pureza – em 10^9 átomos de silício há apenas um átomo estranho;
 - Isolante em baixas temperaturas;
 - Apresentam elétrons livres em altas temperaturas;
 - Condutividade natural à temperatura ambiente, cerca de 2×10^{10} elétrons livres(Buracos) por cm^3 ;
 - Quando sujeito a campo elétrico os buracos movimentam se na direção do campo comportando-se como portadores de carga positiva.

Dopagem

- Átomos estranhos substituem os de silício em varias posições da cadeia do cristal alterando enormemente a habilidade de condução do cristal. A dopagem não deve alterar a estrutura original do cristal.



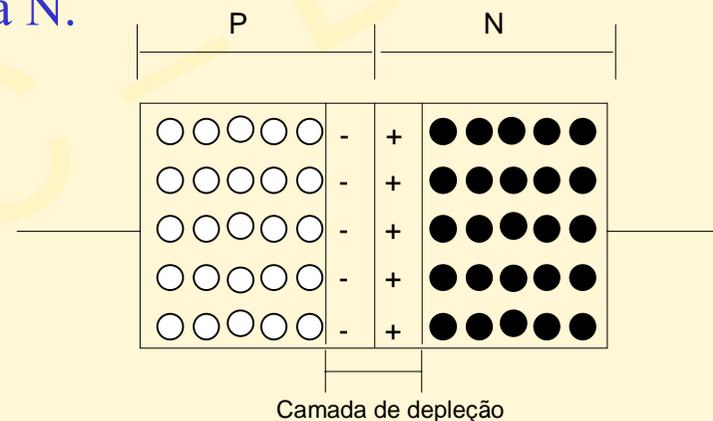
Cristal Tipo N



Cristal Tipo P

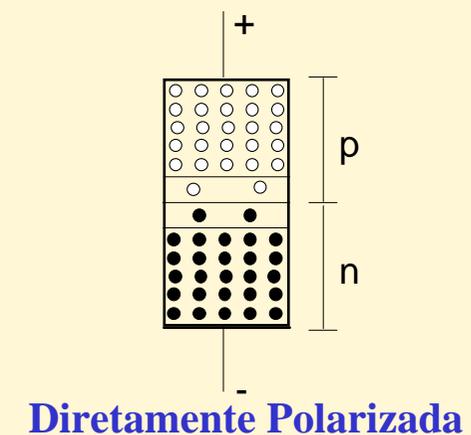
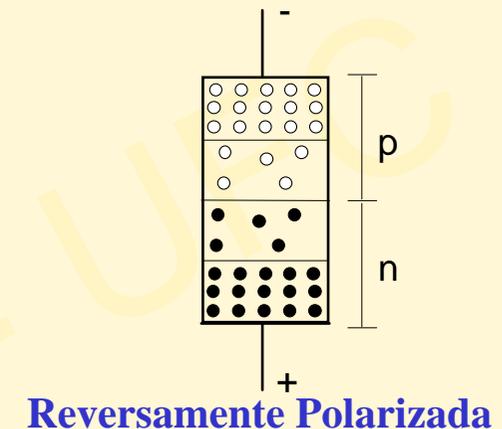
União do Cristal P com o Cristal N

- Na junção os elétrons do cristal N se difundem no cristal P ocupando os buracos formando uma região de depleção na junção.
- Campo elétrico na junção:
 - Fica mais forte à medida que mais cargas atravessam a junção;
 - Atrasa o processo de formação da camada de depleção;
 - Age no sentido de empurrar os elétrons na região de depleção de volta para a camada N.



União do Cristal P com o Cristal N

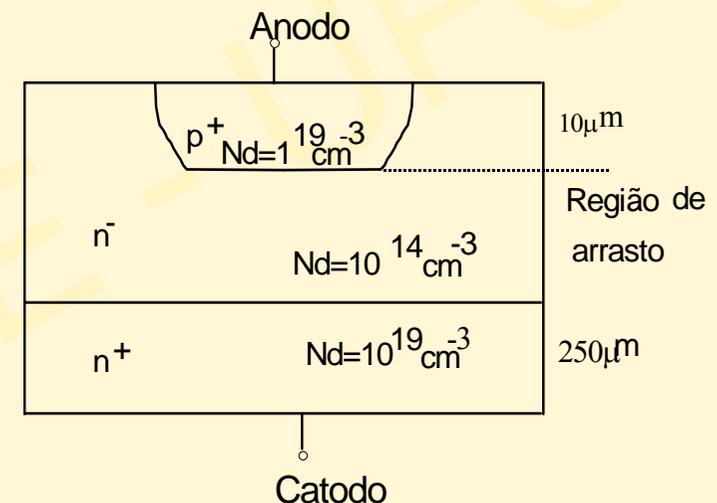
- Junção PN inversamente polarizada
 - Aumento da camada de depleção;
 - Ausência de portadores majoritários na junção;
 - Tensão reversa máxima é determinada pela camada de depleção.
- Junção PN diretamente polarizada
 - Portadores majoritários saturam a junção;
 - Colapso de camada de depleção – cristal conduz;
 - Condutividade consideravelmente menor que dos metais;
 - Perdas causam aquecimento excessivo para o tamanho do cristal.





Diodo de Potência

- Região de arrasto:
 - Camada n^- não é encontrada nos diodos de sinal;
 - Estabelece a tensão reversa máxima suportada pelo diodo;
 - Alta resistividade devido à baixa dopagem;
 - Onde se estabelece a camada de depleção
 - Resistividade reduz quando em polarização direta devido à saturação da região por portadores majoritários;
 - Esta modulação da condutividade reduz bastante a perda por condução.

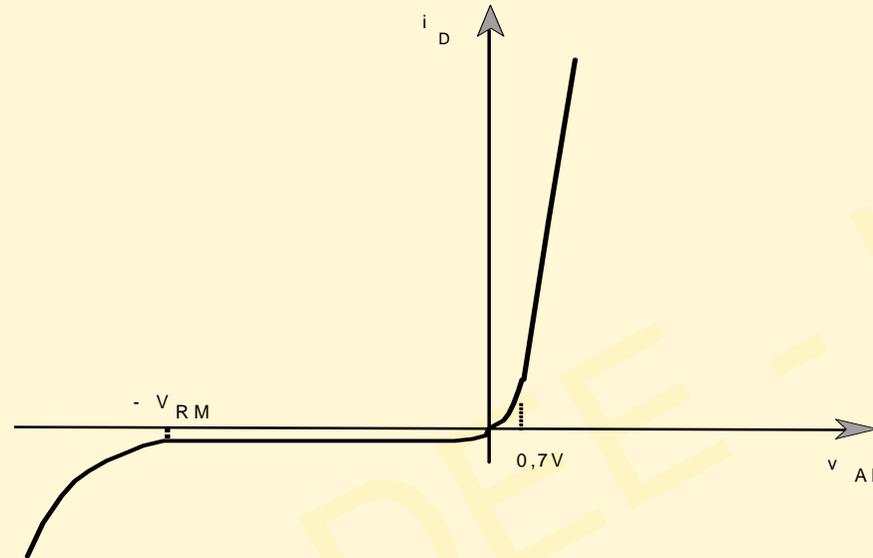


Seção Transversal de um Diodo de Potência



Unidade I - Introdução

Característica $V \times I$ de um diodo de potencia

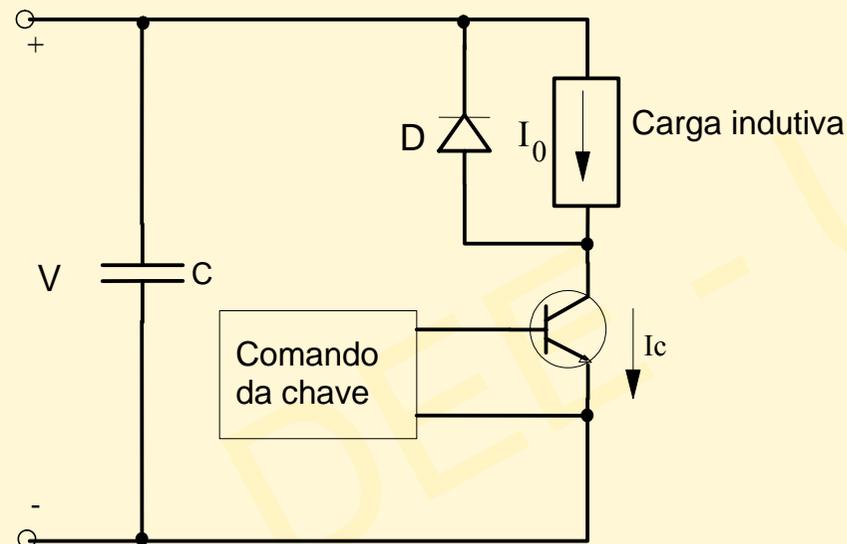


- Com altas correntes a característica ôhmica mascara a exponencial;
- Quando polarizado inversamente, apenas uma pequena corrente de fuga circula;
- Requer tempo finito para mudar estado bloqueio / condução;
- Tempo de transição e formas de ondas são afetadas pela característica intrínseca do diodo.



Unidade I - Introdução

Característica de chaveamento de um diodo de potência



Circuito para análise na característica de chaveamento do diodo de potência

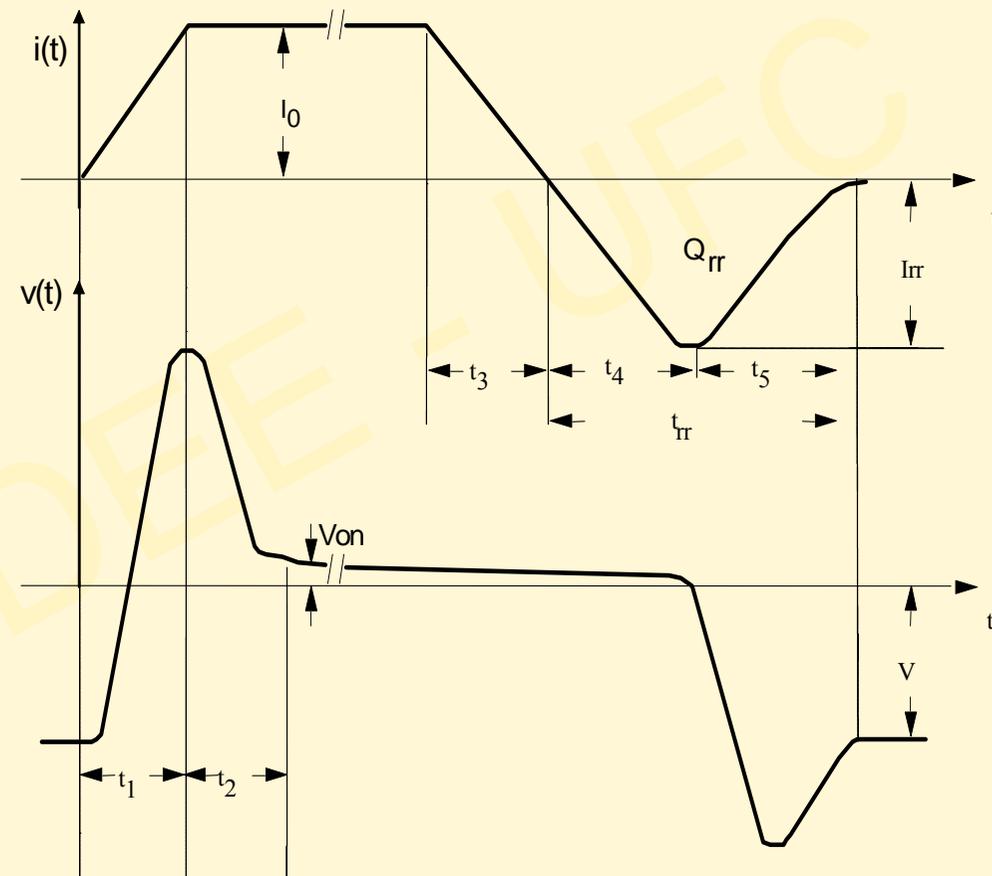


Característica de chaveamento de um diodo de potencia

- Condução:

t_1 – Remoção da carga armazenada na camada de depleção com o aumento da condução. Camada de depleção ainda presente, queda ôhmica na região de arrasto e indutâncias presentes no circuito são causas da sobretensão;

t_2 – Saturação da junção (neutralização da camada de depleção) e da região de arrasto e estabelecimento da corrente em regime fazem a tensão cair para V_{on} .

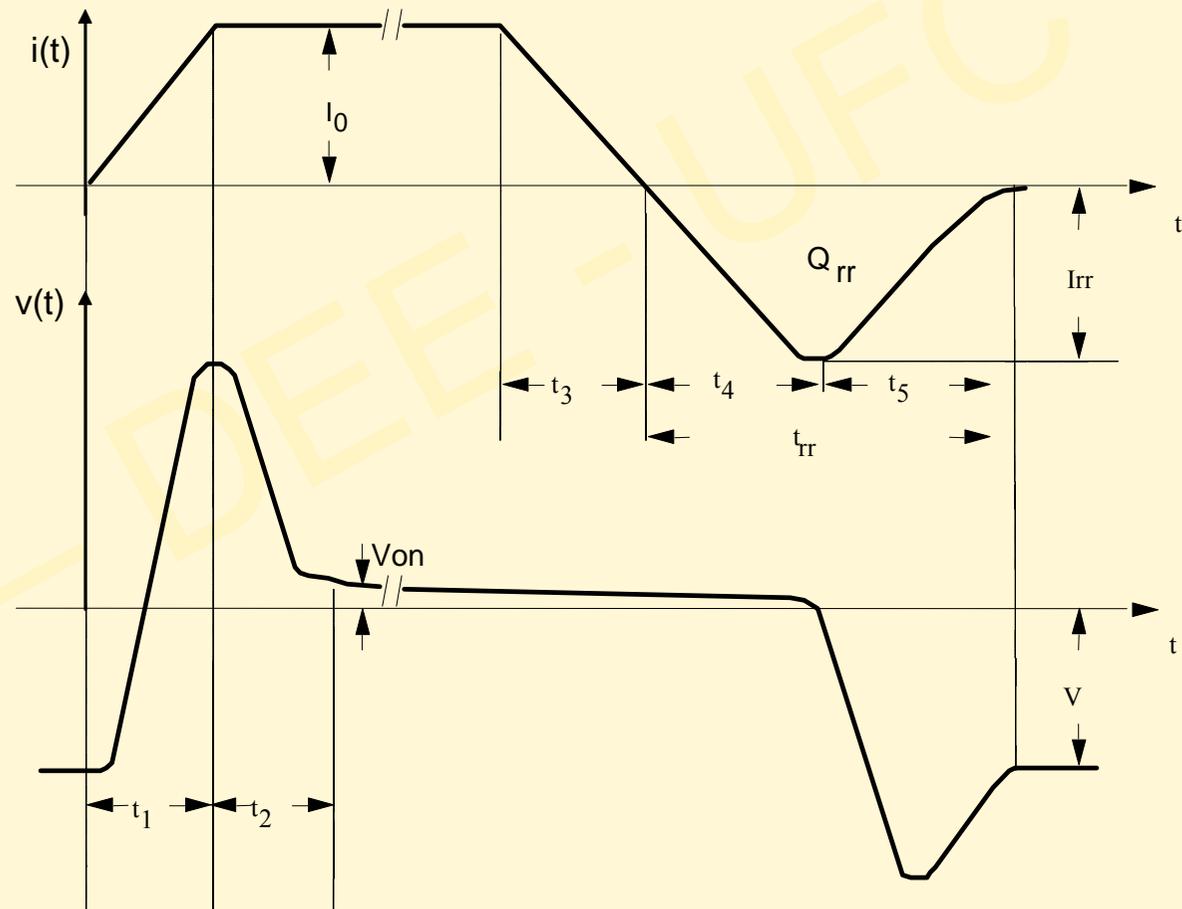




Característica de chaveamento de um diodo de potência

Bloqueio:

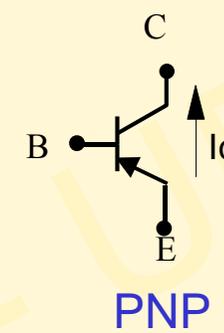
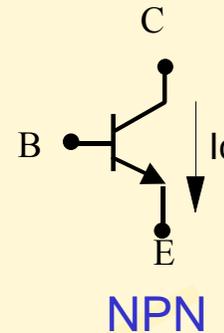
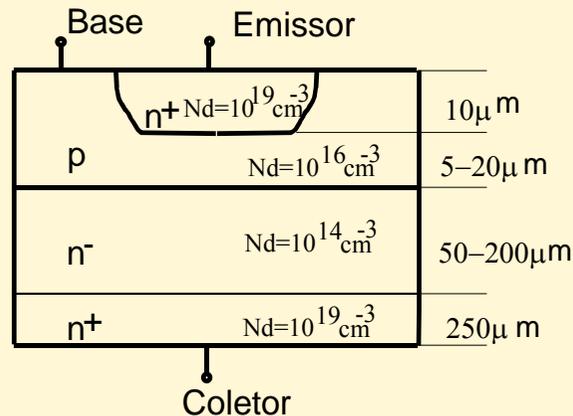
- A carga em excesso na região de arrasto passa a ser removida por recombinação e arrasto. Cessada a recombinação $i(t)$ reduz a zero;
- Fluxo de minoritários na formação da camada de depleção inverte $i(t)$. As junções p-n permanecem polarizadas diretamente devido excesso de portadores nas junções;
- Retirados os portadores em excesso da junção, esta polariza inversamente e logo adquire substancial valor negativo. Os minoritários passam a ter crescimento negativo reduzindo a corrente reversa a zero.





Unidade I - Introdução

Transistor de potência

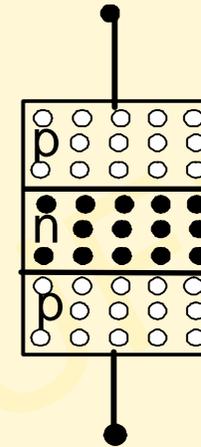


- Nível de dopagem influencia as características do dispositivos;
- Região de arrasto possui dopagem leve e determina a tensão de ruptura do transistor;
- A espessura da base é feita menor possível, para maior ganho de corrente;
- Uma menor espessura de base limita a tensão reversa máxima que pode ser aplicada ao transistor.



Transistor de potência Junções PNP e NPN

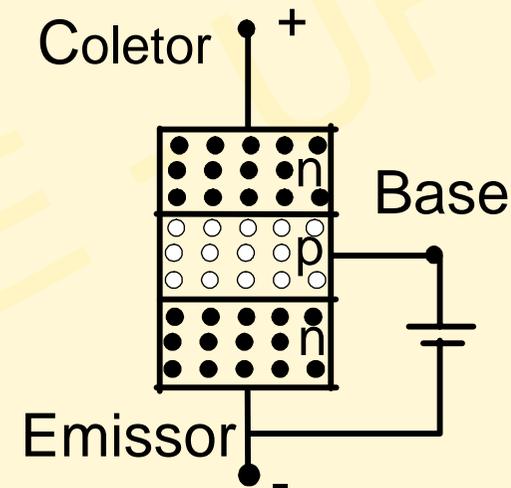
- Emissor – cristal de alta dopagem;
- Base – cristal de media dopagem;
- Coletor - cristal de alta dopagem.
- Processo de condução:
 - Pequena corrente é introduzida na base através de circuito de controle;
 - Algumas cargas alcançam a camada de depleção (ausente de carga) coletor-base e são arrastados para o circuito externo através do coletor, iniciando se uma condução;
 - A corrente de base satura a junção coletor-base tornando o transistor condutor;
 - Para um certo valor de corrente de base o transistor comporta-se como uma chave fechada, para corrente de base nula comporta-se com uma alta resistência .



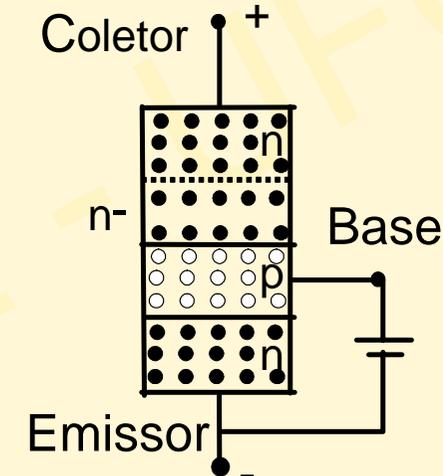
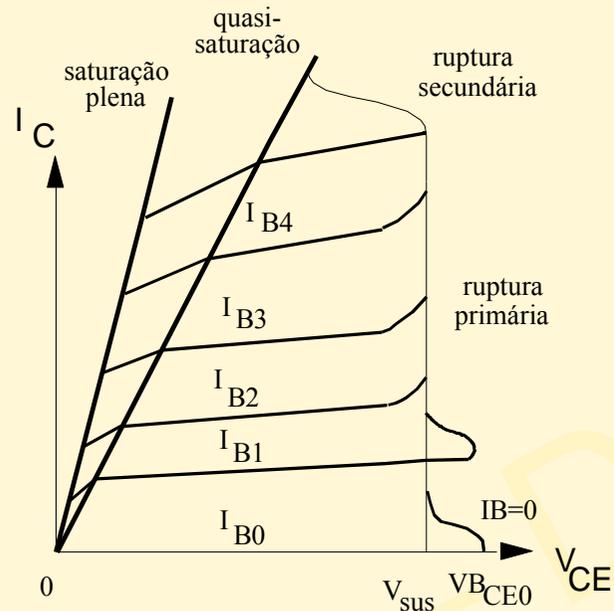


Introdução – Transistor NPN

- Condução no transistor NPN (O mais usado):
- Início de condução - os elétrons fluem do emissor para base (sentido real de corrente).
- A grande maioria dos elétrons atingem a camada de depleção base-coletor (inversamente polarizada).
- O campo elétrico da tensão de polarização externa atrai os elétrons para camada de depleção, saturando-a.
- Inicia-se um fluxo de elétrons no sentido emissor coletor, isto é corrente elétrica no sentido coletor emissor.



Característica V x I do transistor de potência

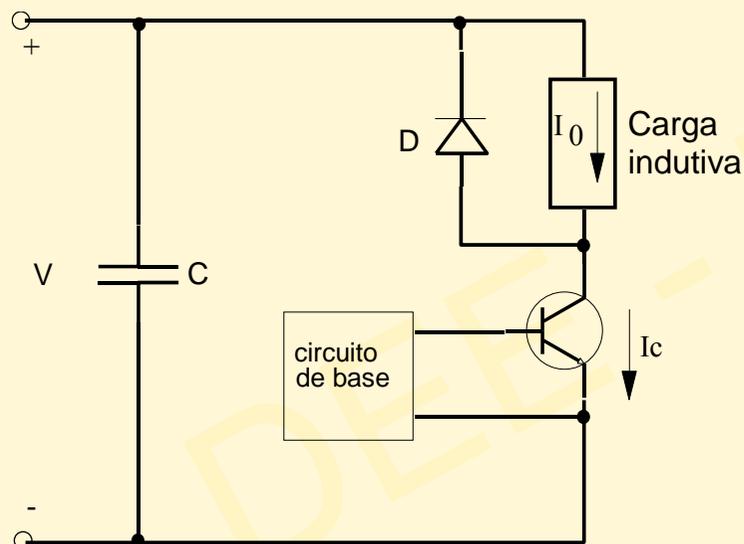


- V_{sus} : tensão máxima emissor-coletor quando o dispositivo está conduzindo;
- Ruptura primária: avalanche convencional na junção;
- Ruptura secundária: alta dissipação de potência em pontos localizados no cristal



Unidade I - Introdução

Característica de chaveamento de um transistor de potência

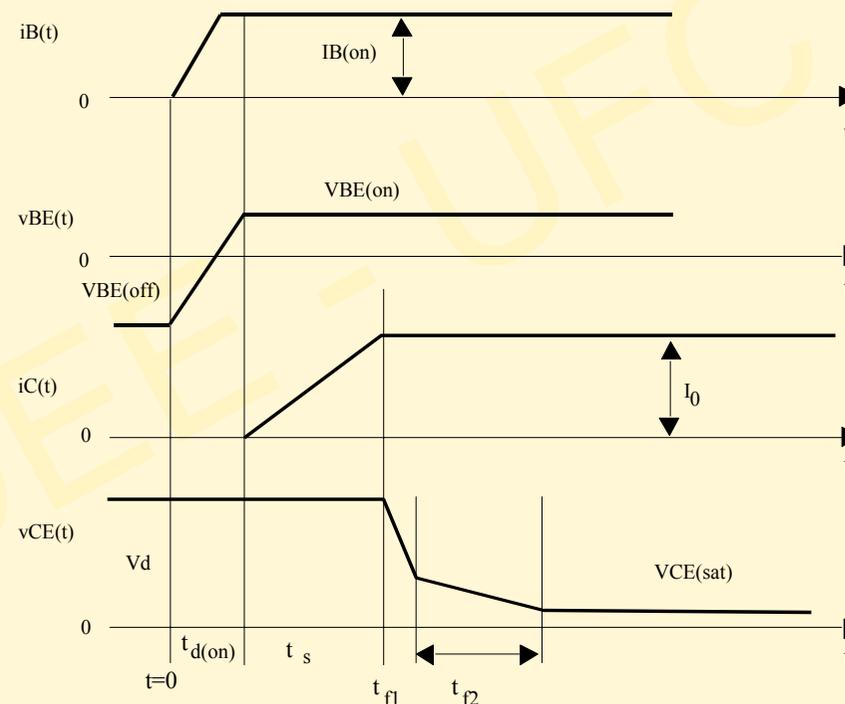


Circuito para análise na característica de chaveamento do transistor bipolar



Característica de chaveamento de um transistor de potência

- **Condução:**
 - Início do processo de retirada da camada de depleção. Vce não é alterada;
 - Vce na se altera pois o diodo em paralelo com a carga esta conduzindo;
 - O diodo em paralelo deixa de conduzir;
 - O ganho do transistor diminui reduzindo a taxa de queda de Vce.



td(on)

ts

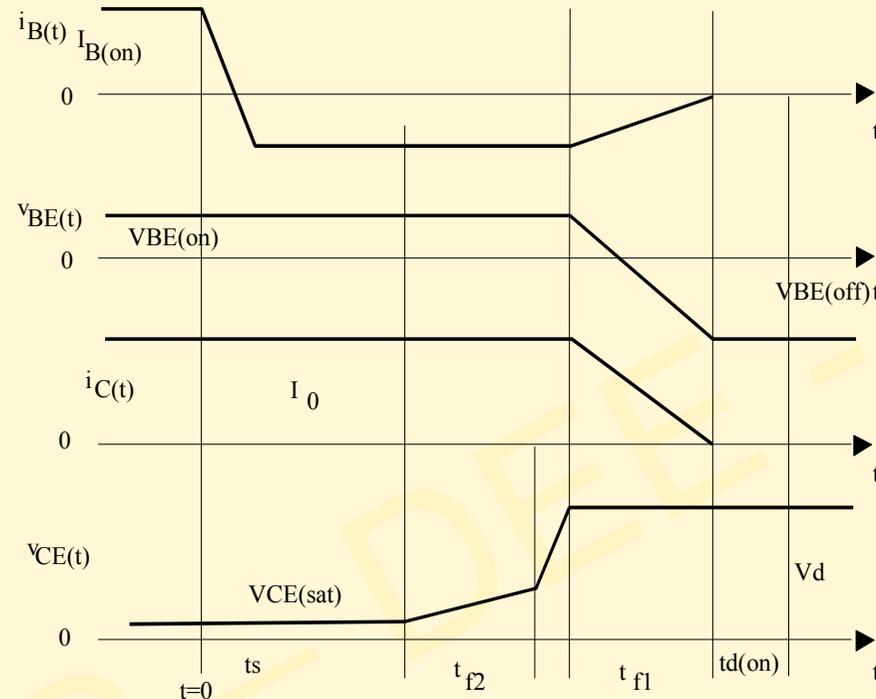
tfl

tf2



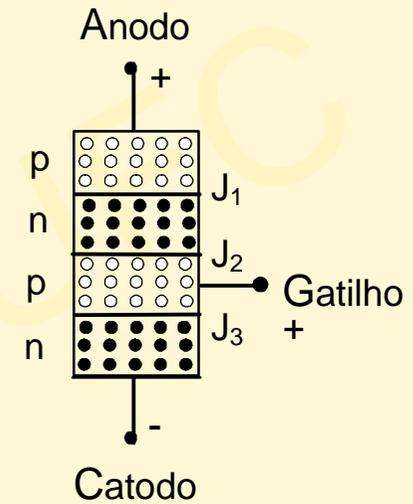
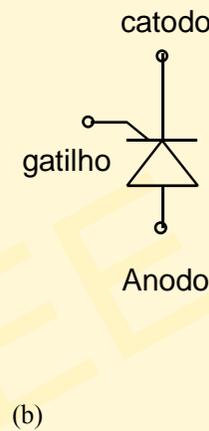
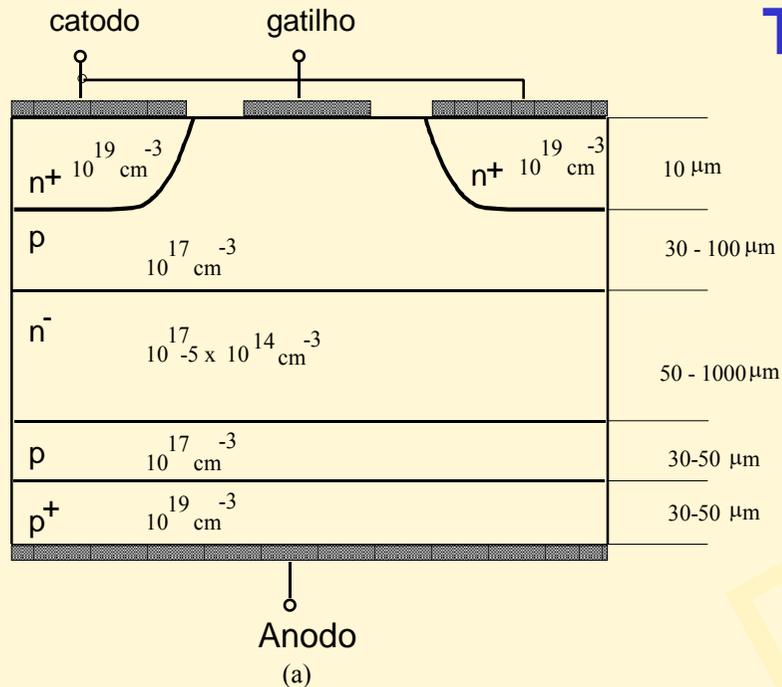
Unidade I - Introdução

Característica de chaveamento de um transistor de potência



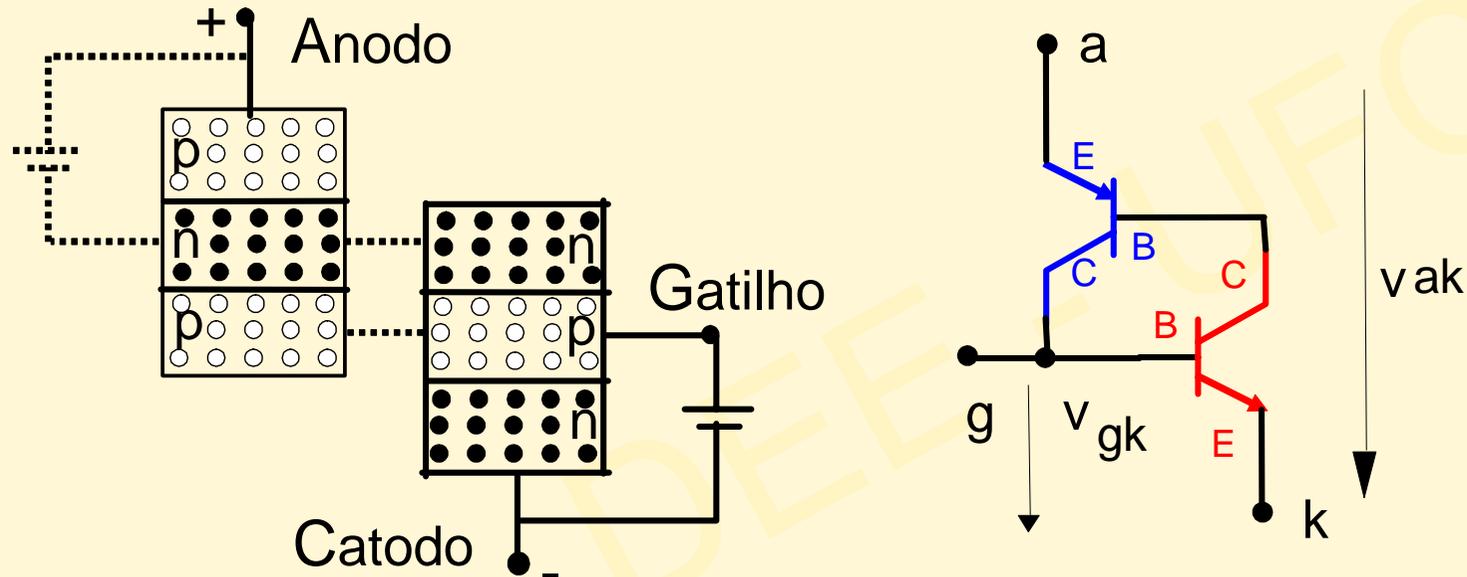
- Bloqueio:
 - Para bloquear um transistor tem se que remover toda carga armazenada na junção;
 - Após t_s o transistor deixa a região de saturação e passa a de quase saturação;
 - Redução de carga na região de arrasto

Tiristor



- Também chamado de SCR;
- Mais antigo dispositivo de potência em estado sólido
- É um dispositivo de quatro camadas

Junções PNP

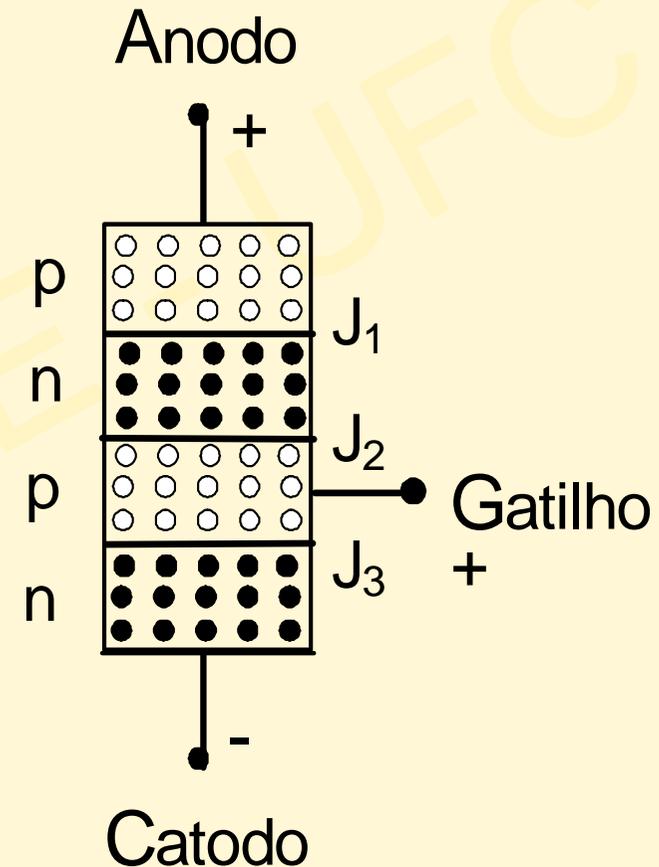


- NPN inicia a condução;
- Circula corrente pela junção base-emissor do transistor PNP;
- Há uma realimentação positiva;
- Corrente através do dispositivo é autosustentada.



Junções PNPN

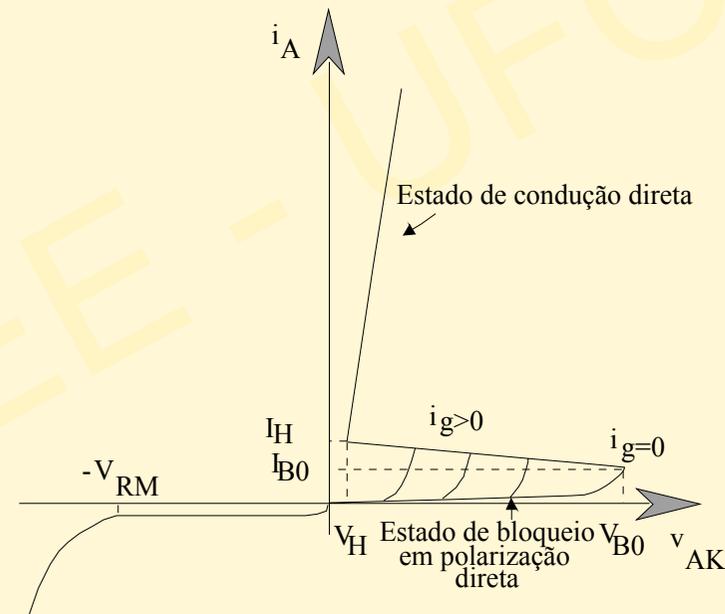
- J_1 e J_3 são polarizadas diretamente e J_2 inversamente;
- A ação dos dois emissores saturam a junção J_2 ;
- A camada n absorve a camada de depleção;
- Logo J_2 determina a tensão máxima aplicável ao tiristor.





Característica $V \times I$ de um tiristor

- Sob tensão inversa o tiristor comporta-se similarmente a um diodo polarizado inversamente, que conduz pouca corrente até que avalanche ocorra.
- A região de alta tensão e baixa corrente é a região de bloqueio em polarização direta

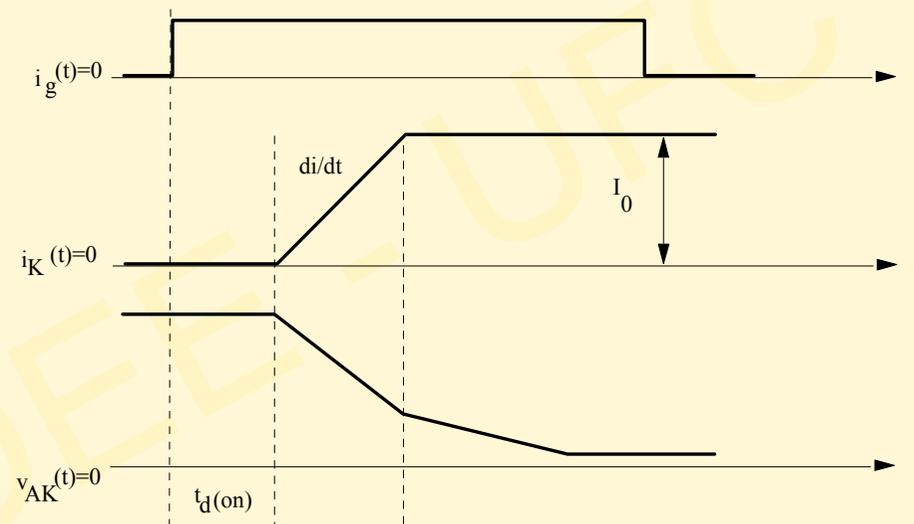




Característica de chaveamento

- Condução:

- Durante $t_d(\text{on})$ a corrente de gatilho injeta portadores na camada p2;
- Condução inicia se em torno de gatilho devido excesso de portadores na região;
- Excesso de portadores na região do gatilho reduz sensivelmente a capacidade de bloqueio do tiristor;
- di/dt em torno do gatilho pode ter efeito destruidor;
- Finalmente o **plama** se espalha por toda secção transversal do tiristor;
- Grande quantidade de energia liberada nas adjacências do gatilho;
- Deve se controlar a taxa de crescimento da corrente de anodo.



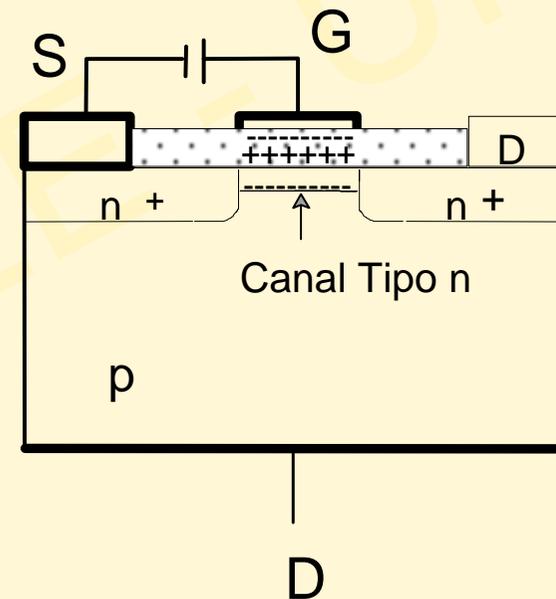


Característica de chaveamento

- Bloqueio:
 - Bloquear um tiristor requer a aplicação de uma tensão negativa entre anodo e catodo por um período de tempo mínimo;
 - Processo similar ao de um diodo;
 - Dispositivo bloqueia quando J_1 ou J_3 ficar inversamente polarizada.
- Condução acidental do tiristor:
 - O tempo que o tiristor é mantido sob tensão reversa deve ser suficientemente longo para garantir um real bloqueio;
 - A taxa de crescimento dv/dt da tensão de polarização direta deve ser mantida abaixo de um máximo valor especificado pelo fabricante.

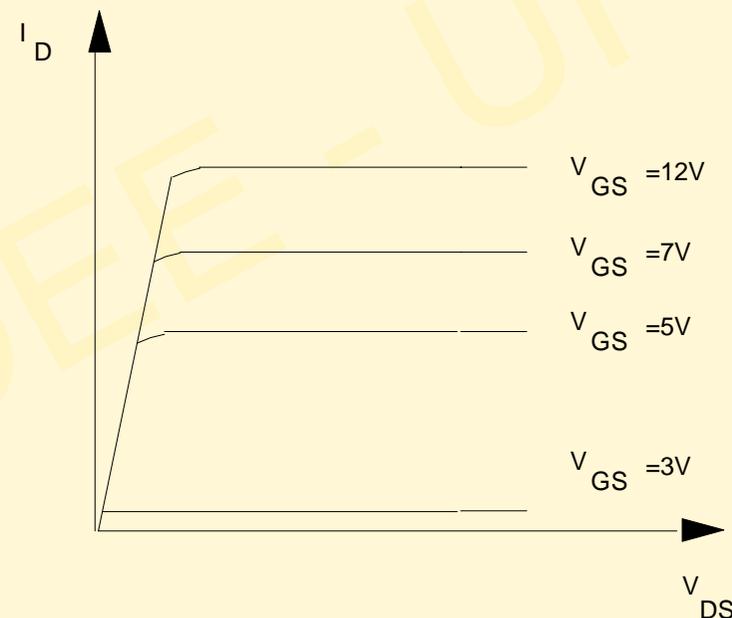
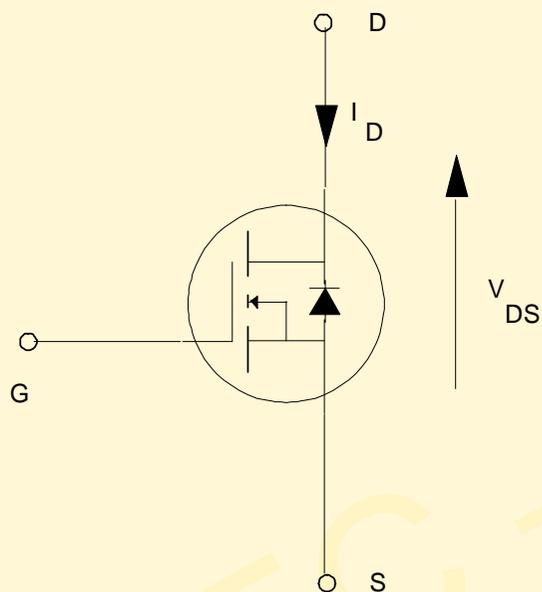
Transistor MOSFET

- **Metal Oxide Semiconductor Field- Effect Transistor;**
- **Acionados por tensão;**
- **Operam em altas frequências.**



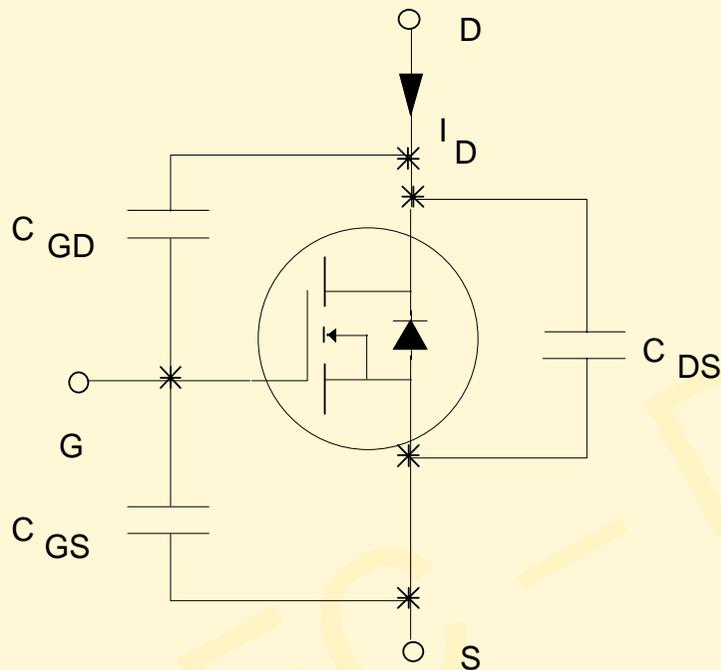
Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET

Tipo e característica de condução

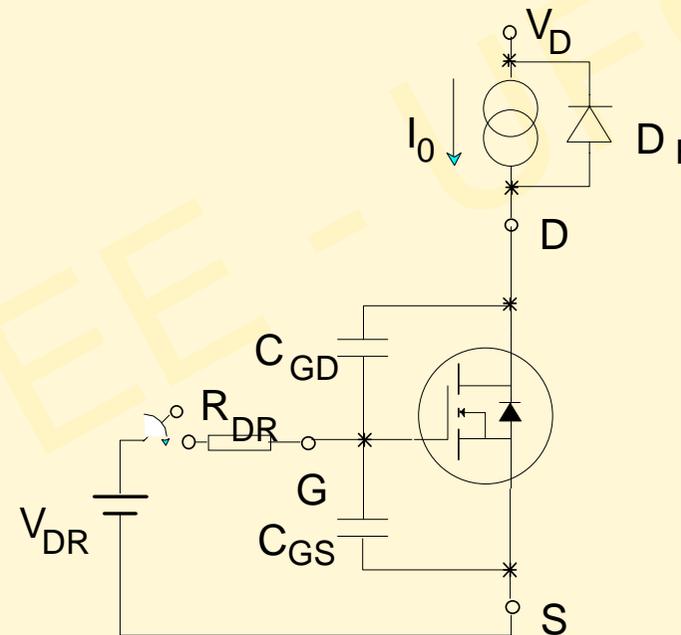


- ^(a) **Essencialmente resistivo em condução;**
- **Resistência de condução relativamente alta.** ^(b)

Característica de chaveamento



Capacitâncias parasitas

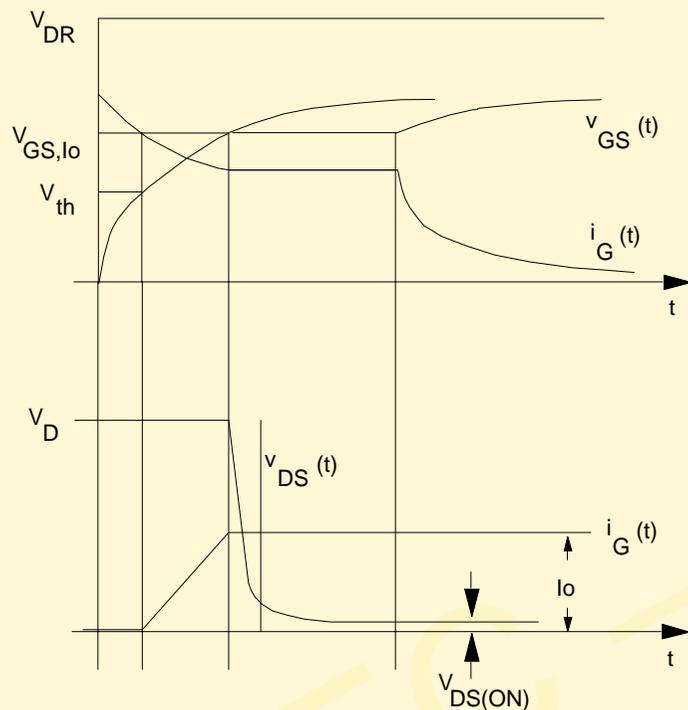


Modelo para análise de chaveamento

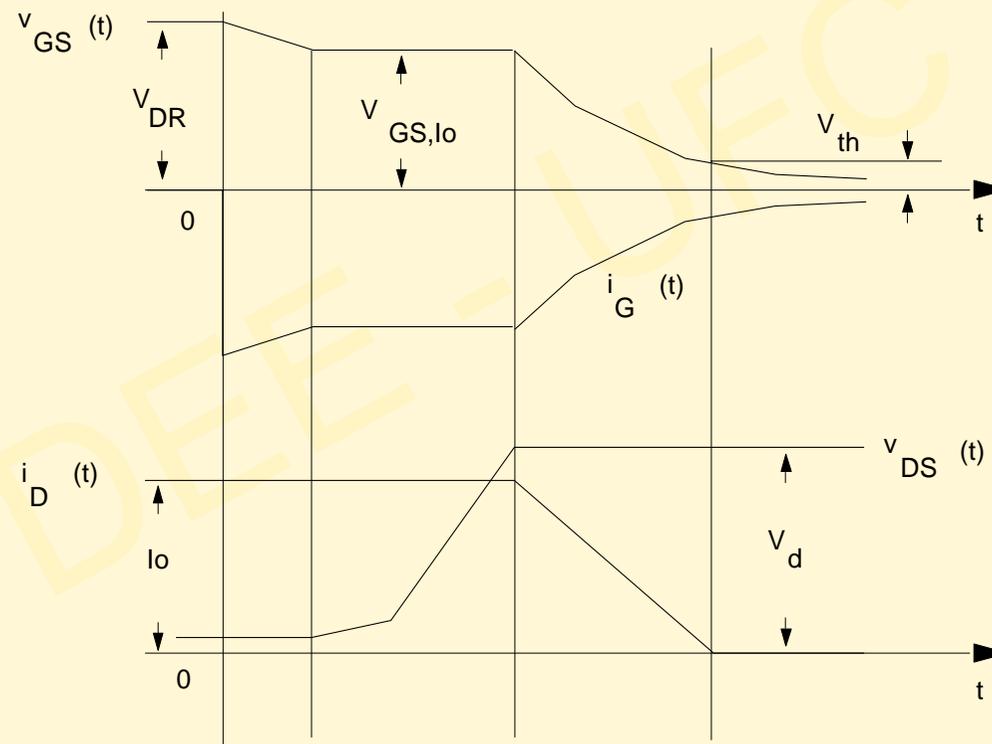


Unidade I - Introdução

Característica de chaveamento



Forma de onda durante o bloqueio

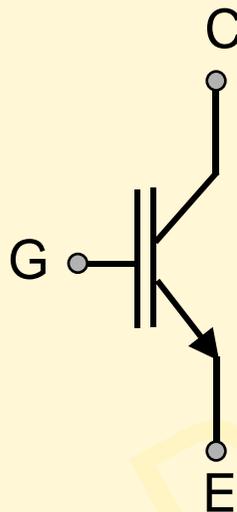


Forma de onda durante a condução



Unidade I - Introdução

Isolated Gate Bipolar Transistor - IGBT

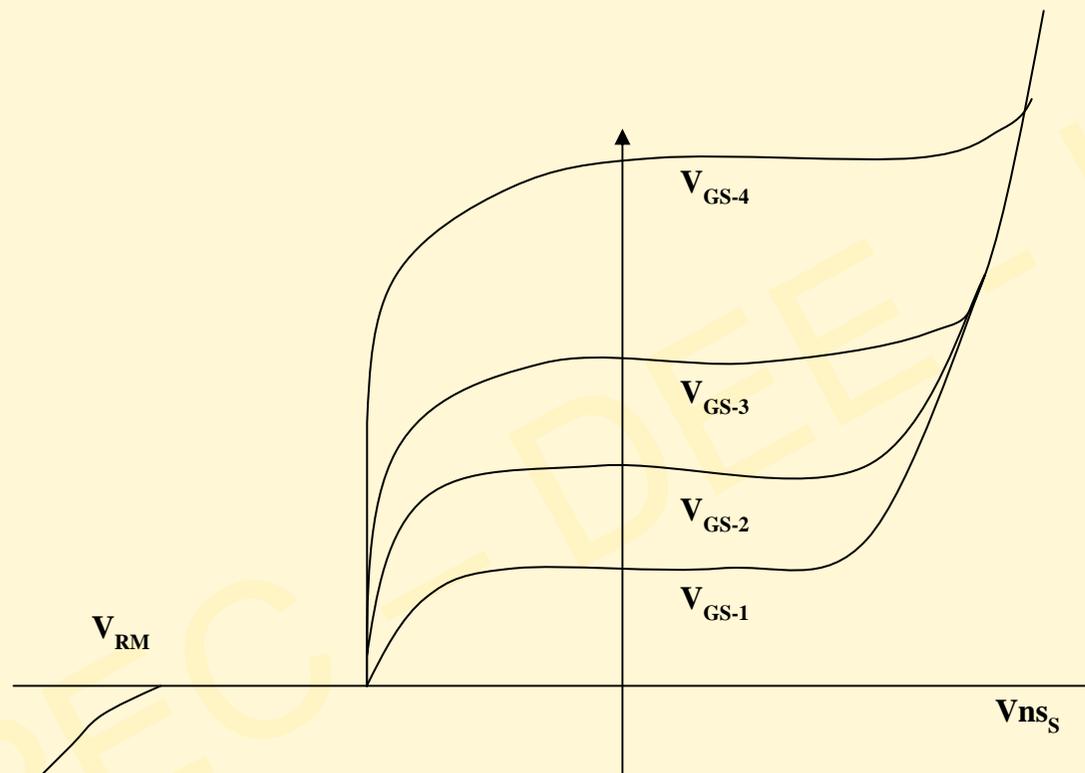


- **Transistor Bipolar de Gatilho Isolado;**
- **Atuação rápida (transitório efeito de campo);**
- **Alta capacidade de potência (Transistor Bi-polar);**
- **Controle por tensão;**



Unidade I - Introdução

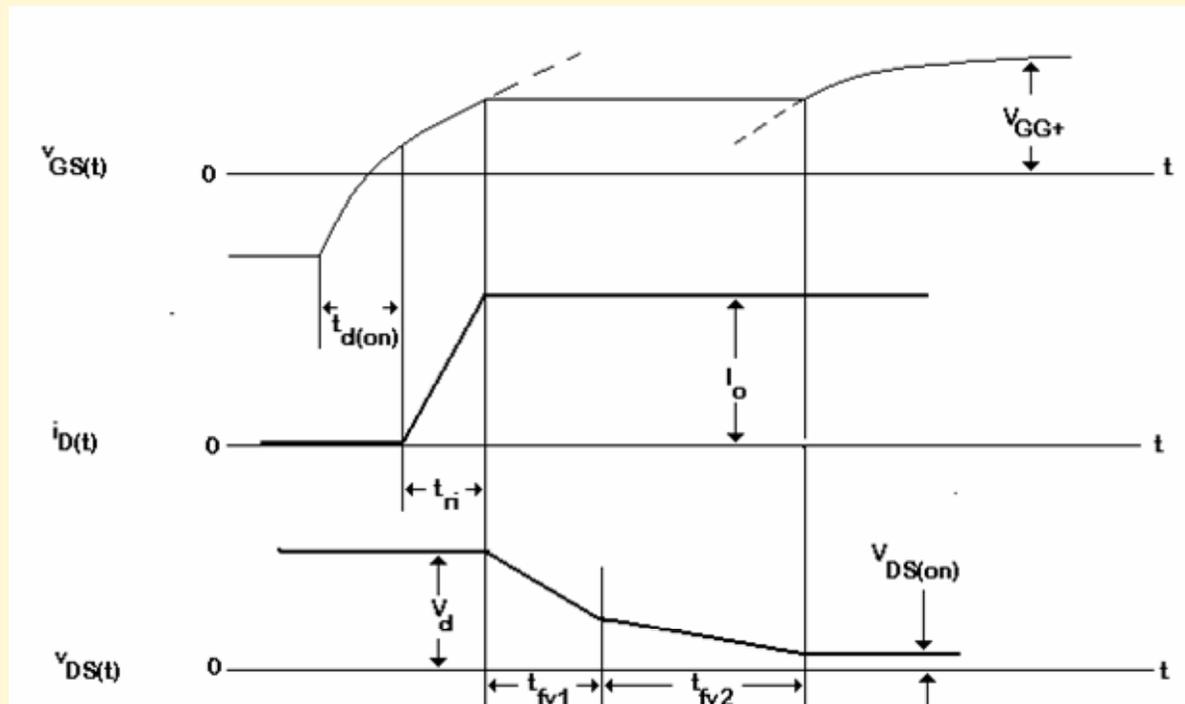
Característica I-V





Unidade I - Introdução

Característica de chaveamento

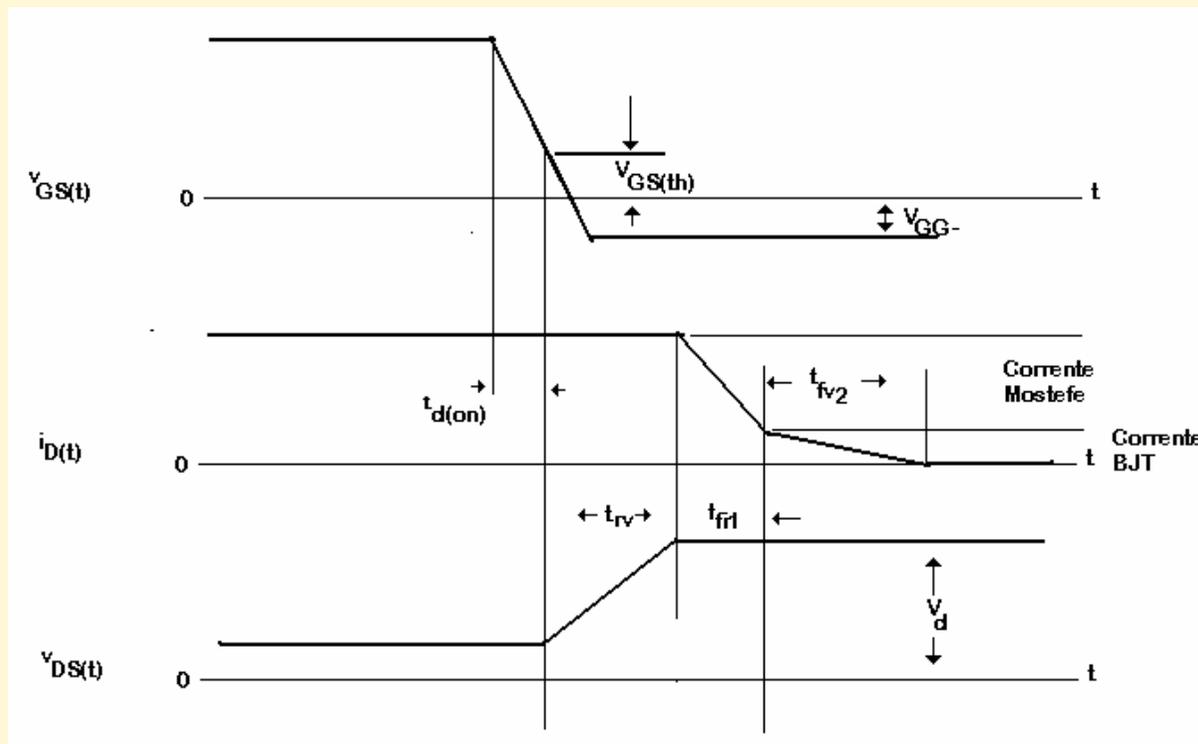


Formas de onda da Corrente e da Tensão no IGBT em Condução



Unidade I - Introdução

Característica de chaveamento



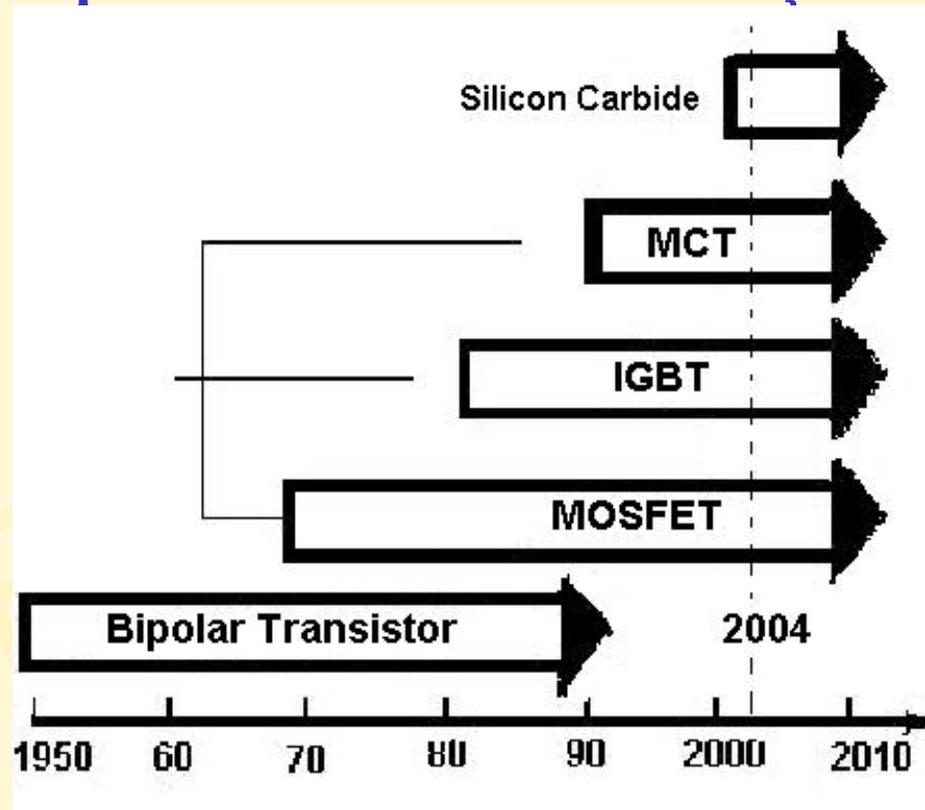
Formas de onda da Corrente e da Tensão no IGBT em Bloqueio



Unidade I - Introdução

Futuro das chaves

- Dispositivos a base de carbono de silício;
- Suportam altos gradientes de tensão;
- Reduzida queda de tensão em condução.



Evolução



Especificação de chaves semicondutoras

- Corrente média de condução direta, I_d
 - Valor médio da corrente que o dispositivo pode conduzir continuamente repetidas as condições de resfriamento.
- Corrente eficaz de condução direta, I_{rms}
 - Valor máximo permitido para corrente eficaz. Isto limita a potência máxima dissipada devido $i^2.R$.
- Corrente de pico repetitiva, I_{frm}
 - Valor máximo da corrente que pode ser aplicada repetitivamente, geralmente é especificada para um pico a cada meia senoide.
- Corrente de pico não repetitiva, I_{fsm}
 - Valor máximo da corrente que pode ser aplicada, a repetição é permitida apenas após um intervalo de tempo que permita resfriar a junção.



Especificação de chaves semicondutoras

- Tensão de pico inversa, V_{rpm}
 - Valor instantâneo de tensão máxima permitida da direção positiva ou negativa do dispositivo.
- Queda de tensão em condução direta, V_f
 - Queda de tensão apresentada pelo dispositivo quando em condução direta.
- Temperatura da junção, $T_j(\max)$
 - Valor máximo de temperatura que o dispositivo pode operar, acima deste valor o dispositivo pode danificar se por avalanche térmica.



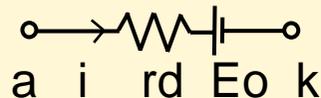
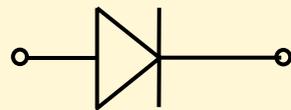
Perdas e Cálculo Térmico

- A perda total de um dispositivo é dada por:
 - Perda durante a condução;
 - Perda no chaveamento;
 - Perda no estado de bloqueio.
- Estas perdas que se transforma em calor, devem ser liberadas para o meio ambiente, caso contrário a temperatura da junção se eleva acima do limite permitido, provocando destruição de dispositivo.
- A elevação de temperatura na junção provoca mudanças químicas e metálicas no dispositivos. Estas mudanças variam exponencialmente com a temperatura.



Perda durante a condução

Seja uma junção de um dispositivo qualquer, aqui representada por um diodo



$$P_{on} = \frac{1}{T} \int_0^T i v . dt$$

$$v = r_d i + E_0$$

$$P_{on} = \frac{1}{T} \int_0^T i (r_d i + E_0) dt$$

$$P_{on} = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 r_d dt + \frac{1}{T} \int_0^T E_0 . i . dt$$

$$P_{on} = i_{ef}^2 r_d + E_0 i_{med}$$

Para não danificar o semicondutor, P_{on} deve ser transferida para o ambiente. Como que esta potência é transferida?



Perdas nos dispositivos semicondutores

- Quando duas superfícies sólidas paralelas a temperaturas uniformes, T_j e T_o , são justapostas, uma certa quantidade de calor Q (joules/s- m^2) fluirá por unidade de área da superfície de maior temperatura (T_j) para a de menor temperatura (T_o).

$$Q = 1/K (T_j - T_o) \text{ [Joules/s-}m^2\text{]}$$

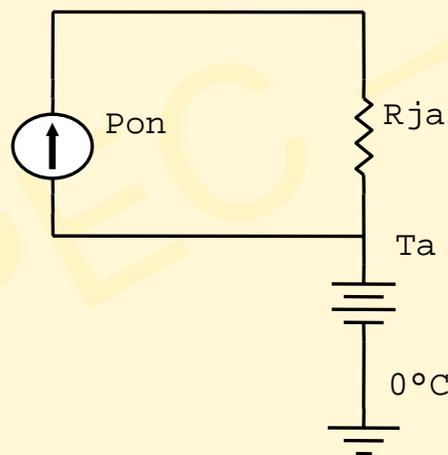
- No caso de um dispositivo semicondutor, a corrente através da junção inversamente polarizada produz calor quando os portadores majoritários perdem energia ao atravessar a barreira de potencial. A energia elétrica na junção se transforma em energia térmica no cristal.

Perdas nos dispositivos semicondutores

- A potência dissipada na junção por segundo fluirá para o ambiente segundo a equação abaixo:

$$P_{on} = 1/R_{ja} (T_j - T_a) \text{ [joules/s]}$$

- T_j – Temperatura na junção
 - T_a – Temperatura ambiente
 - R_{ja} – resistência térmica entra a junção e o ambiente
- Fazendo se uma analogia com um circuito elétrico:



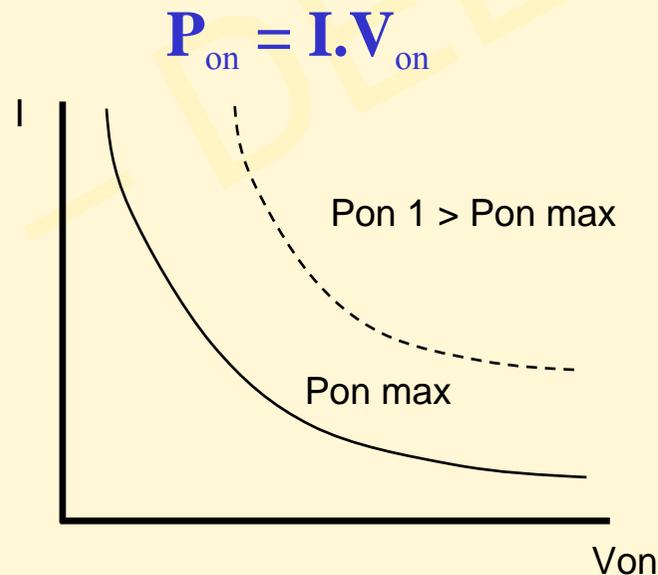
Quando o semicondutor não está conduzindo, $P_{on} = 0$, logo $T_j = T_a$. A temperatura da junção se eleva acima da ambiente e há um fluxo de calor para o ambiente. Quando menor R_{ja} , menor será ΔT



Unidade I - Introdução

Perdas nos dispositivos semicondutores

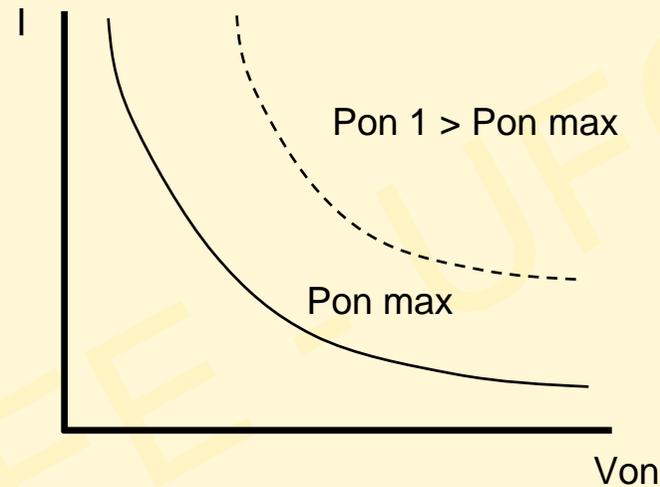
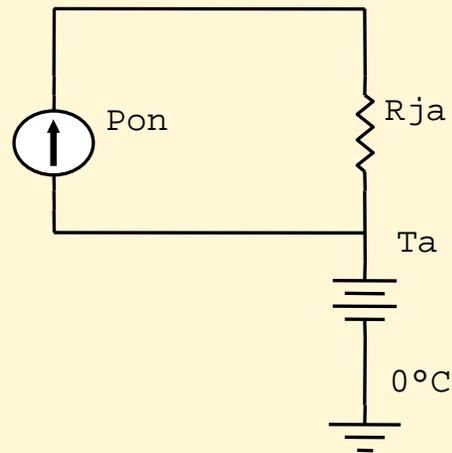
- Para uma certa resistência térmica R_{ja} e temperatura ambiente T_a , há uma máxima potência $P_{on\ max}$ que pode ser dissipada, sem que se exceda à máxima temperatura admissível na junção, $T_{j\ max}$.
- Desprezando se a influência da resistência interna.





Unidade I - Introdução

Hipérbole de dissipação de potência



- Para a temperatura ambiente T_a , qualquer combinação de V_{on} e I que fique de $P_{on\ max}$ não danificará o dispositivo.
- Um ventilador ou qualquer refrigeração que venha a reduzir a temperatura ambiente T_a nas proximidades do dispositivo, uma potência $P_{on\ 1}$ maior que $P_{on\ max}$ pode ser dissipada sem risco para o dispositivo.



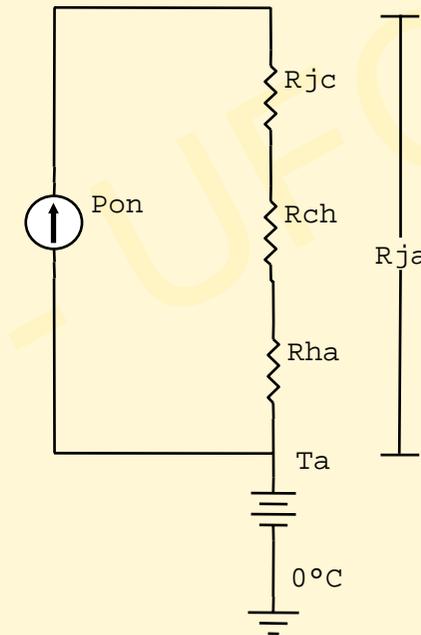
Dissipação do calor

- Falha na operação de um dispositivo semicondutor está, quase que sempre, ligada à elevação de temperatura do dispositivo.
- O fabricante normalmente especifica a máxima temperatura para a junção, mesmo nos piores transitórios.
- A dissipação de calor nos semicondutores está diretamente ligada aos trocadores de calor.
- Um trocador de calor é um metal irradiador de calor projetado para retirar do dispositivo o excesso de calor por convecção.
- O calor flui da junção para a carcaça do semicondutor, da carcaça para o trocador de calor através de uma pasta térmica, e do trocador de calor para o ambiente.



Dissipação do calor

- A transferência de calor pode ser representada pelo circuito elétrica ao lado.
- A temperatura da junção dependerá da potência dissipada e das resistências térmicas associadas ao dispositivos.
- Um cálculo adequando do trocador de calor permitirá ao projetista determinar a máxima potência que poderá ser dissipada pelo dispositivo, e, ainda conservar a temperatura máxima na junção a baixo de um valor escolhido



$$T_j - T_a = R_{ja} \cdot P_{on}$$

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{ch} + R_{ha}$$

$$R_{ha} = R_{ja} - R_{jc} - R_{ch}$$