



## 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.



# Unidade I - Introdução

## 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**



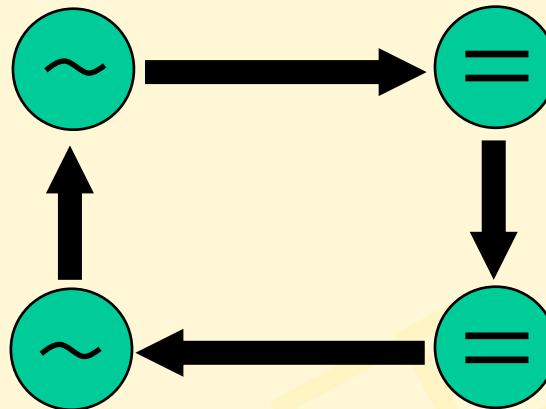


## Conversores Estáticos

- 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

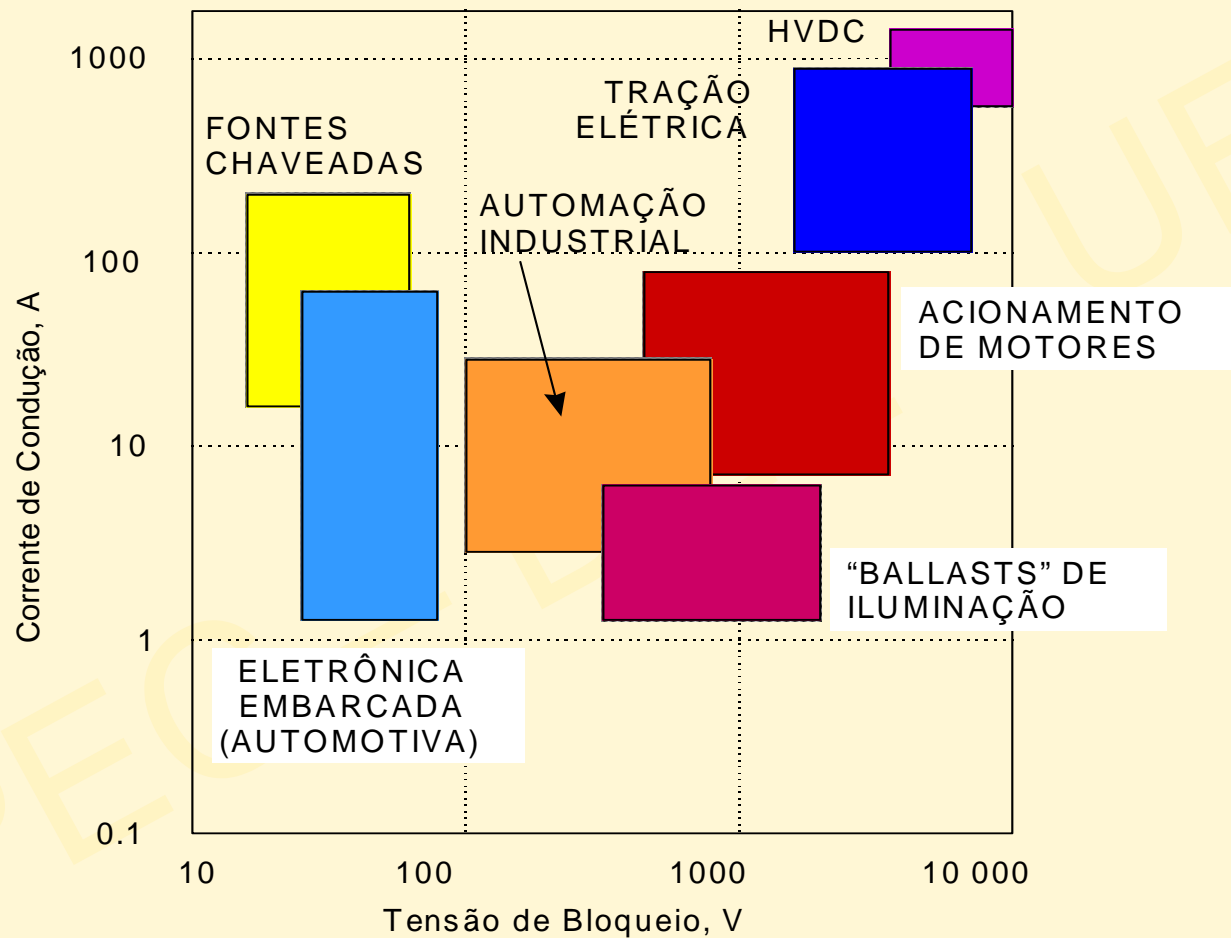
## IGBT de alta potência

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

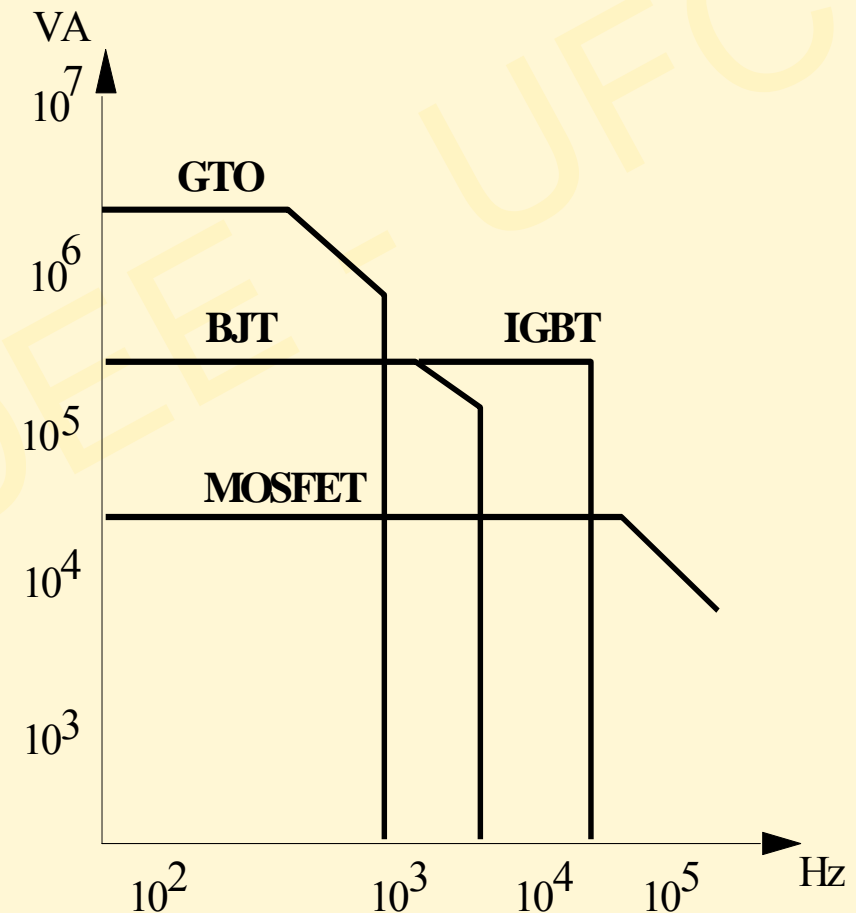
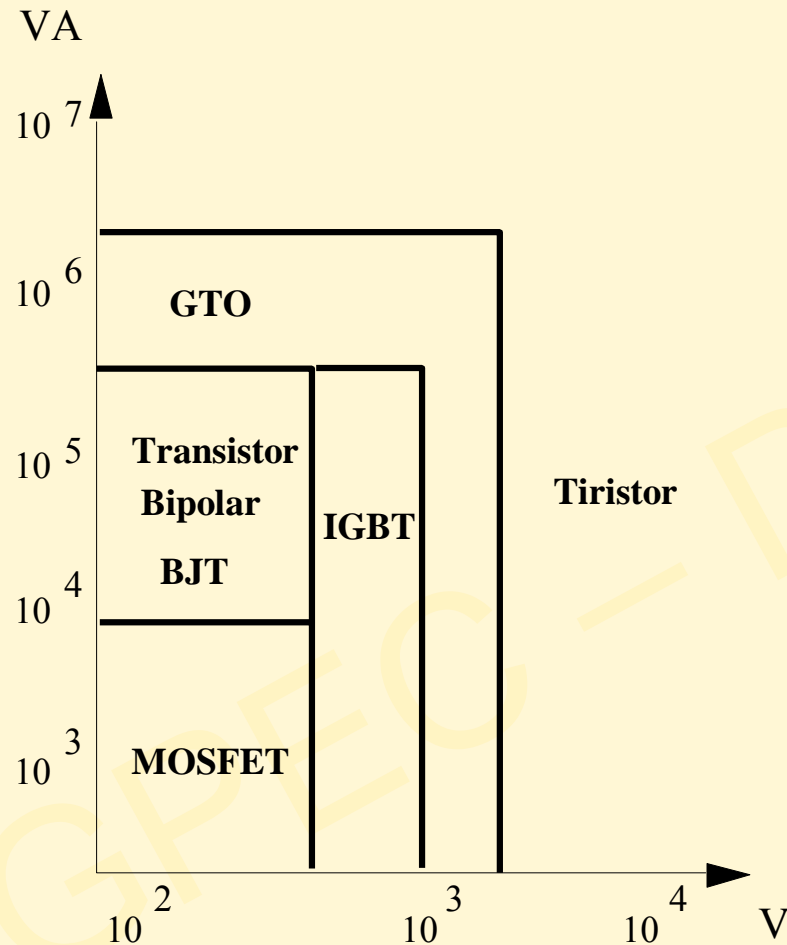
## Aplicações típicas da Eletrônica de Potência





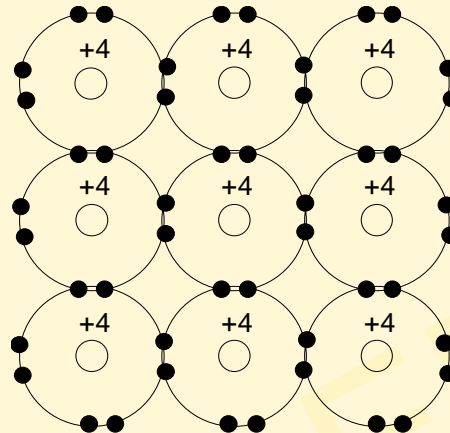
# Unidade I - Introdução

## Características Potência x Tensão e Potência x Frequência



## Junção PN

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

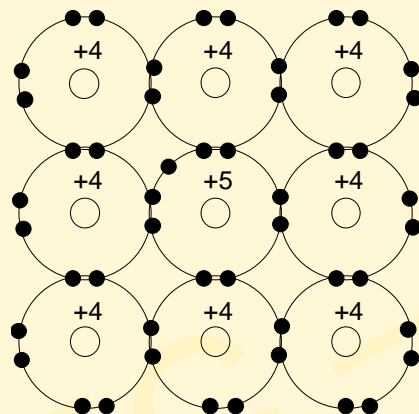


Cristal de Silício e Elétons de Valência

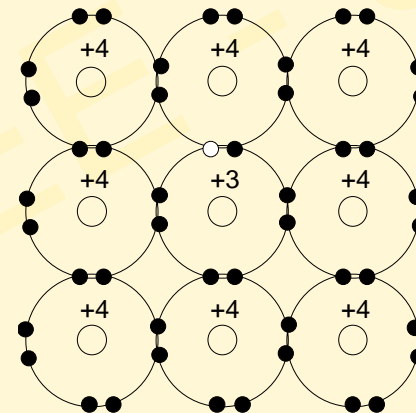
- Cristal de Silício:
  - Pureza – em  $10^9$  átomos de silício há apenas um átomo estranho;
  - Isolante em baixas temperaturas;
  - Apresentam elétrons livres em altas temperaturas;
  - Condutividade natural à temperatura ambiente, cerca de  $2 \times 10^{10}$  elétrons livres(Buracos) por  $\text{cm}^3$ ;
  - 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**

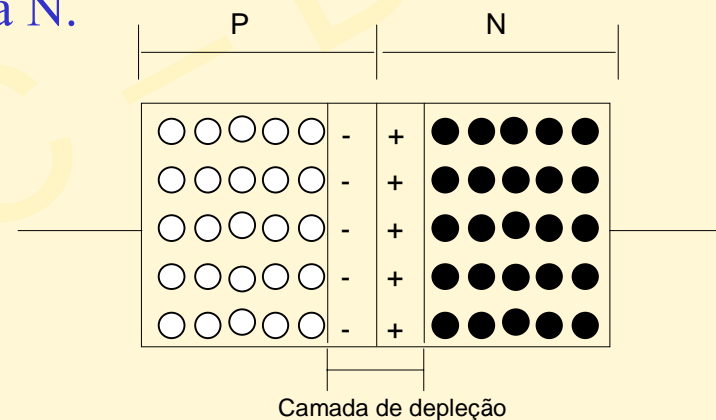


**Cristal Tipo P**



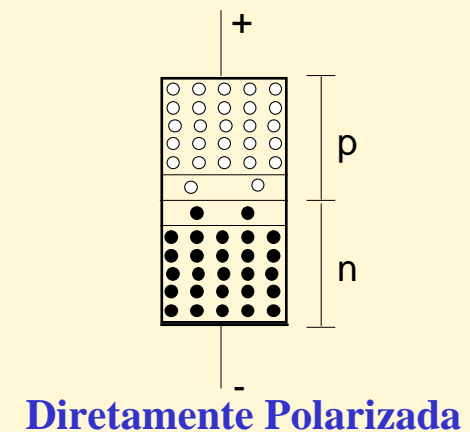
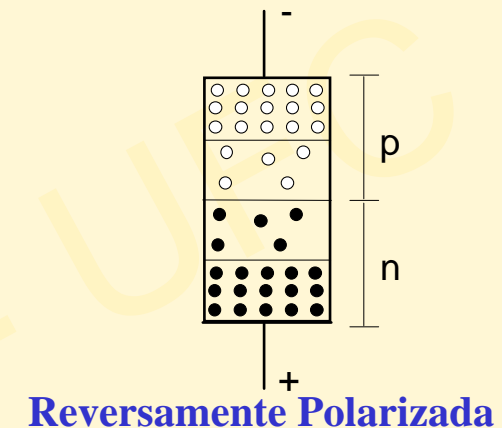
## União do Cristal P com o Cristal N

- 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

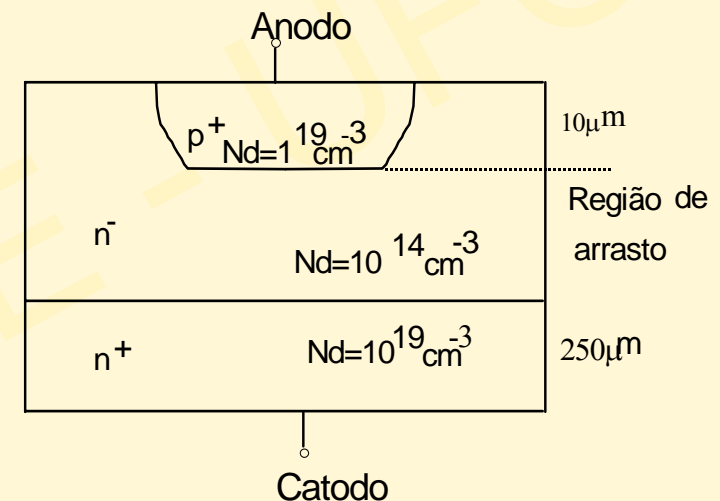
- Junção PN inversamente polarizada
  - Aumento da camada de depleção;
  - Ausência de portadores majoritários na junção;
  - Tensão reversa máxima é determinada pela camada de depleção.
- Junção PN diretamente polarizada
  - Portadores majoritários saturam a junção;
  - Colapso de camada de depleção – 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.

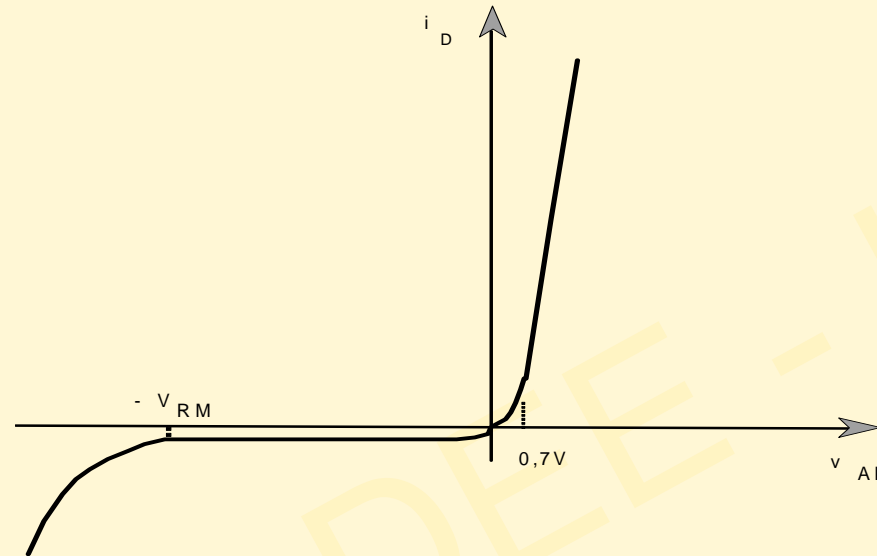


Seção Transversal de um Diodo de Potência



# Unidade I - Introdução

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

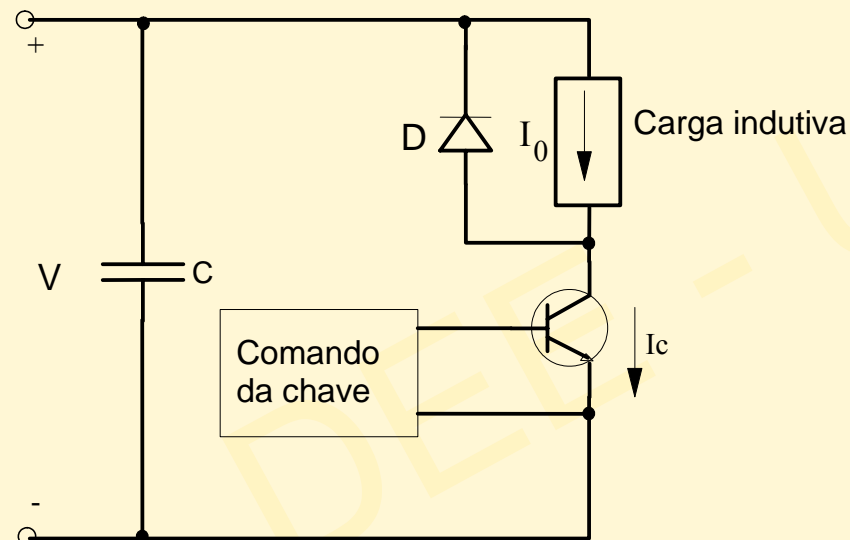


- Com altas correntes a característica ôhmica mascara a exponencial;
- Quando polarizado inversamente, apenas uma pequena corrente de fuga circula;
- Requer tempo finito para mudar estado bloqueio / condução;
- Tempo de transição e formas de ondas são afetadas pela característica intrínseca do diodo.



# Unidade I - Introdução

## Característica de chaveamento de um diodo de potência



Circuito para análise na característica de chaveamento do diodo de potência

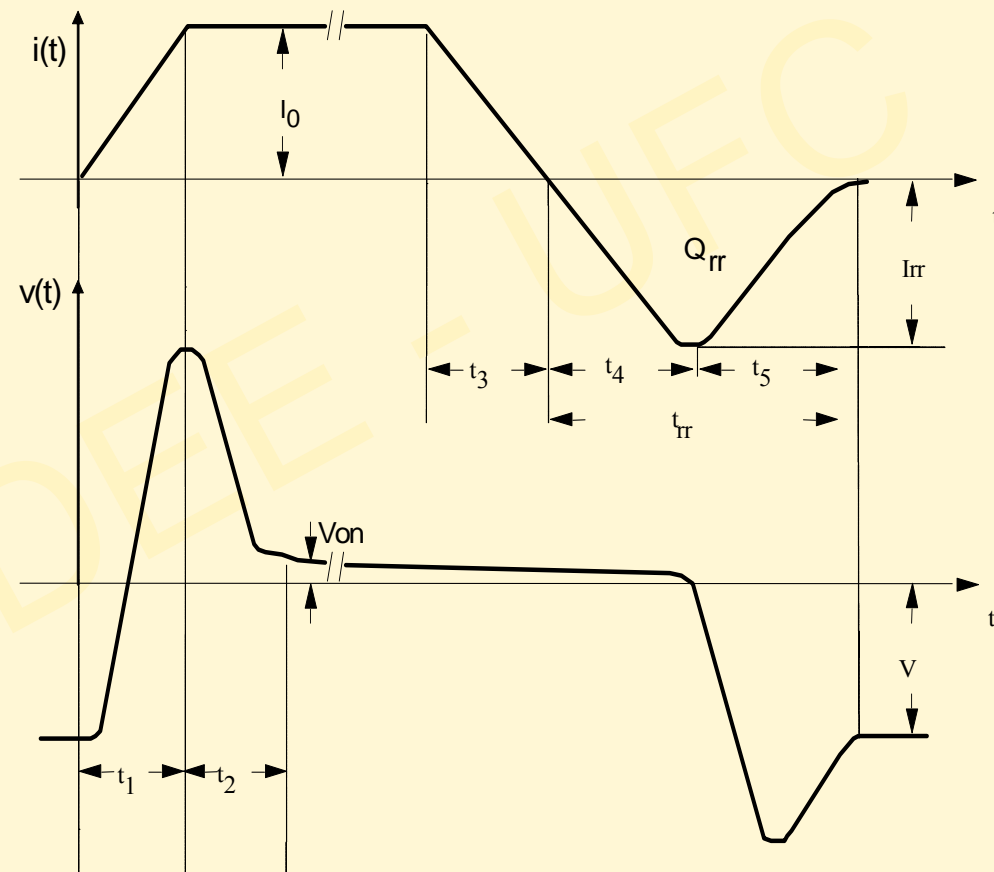


## Característica de chaveamento de um diodo de potencia

- 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  $V_{on}$ .

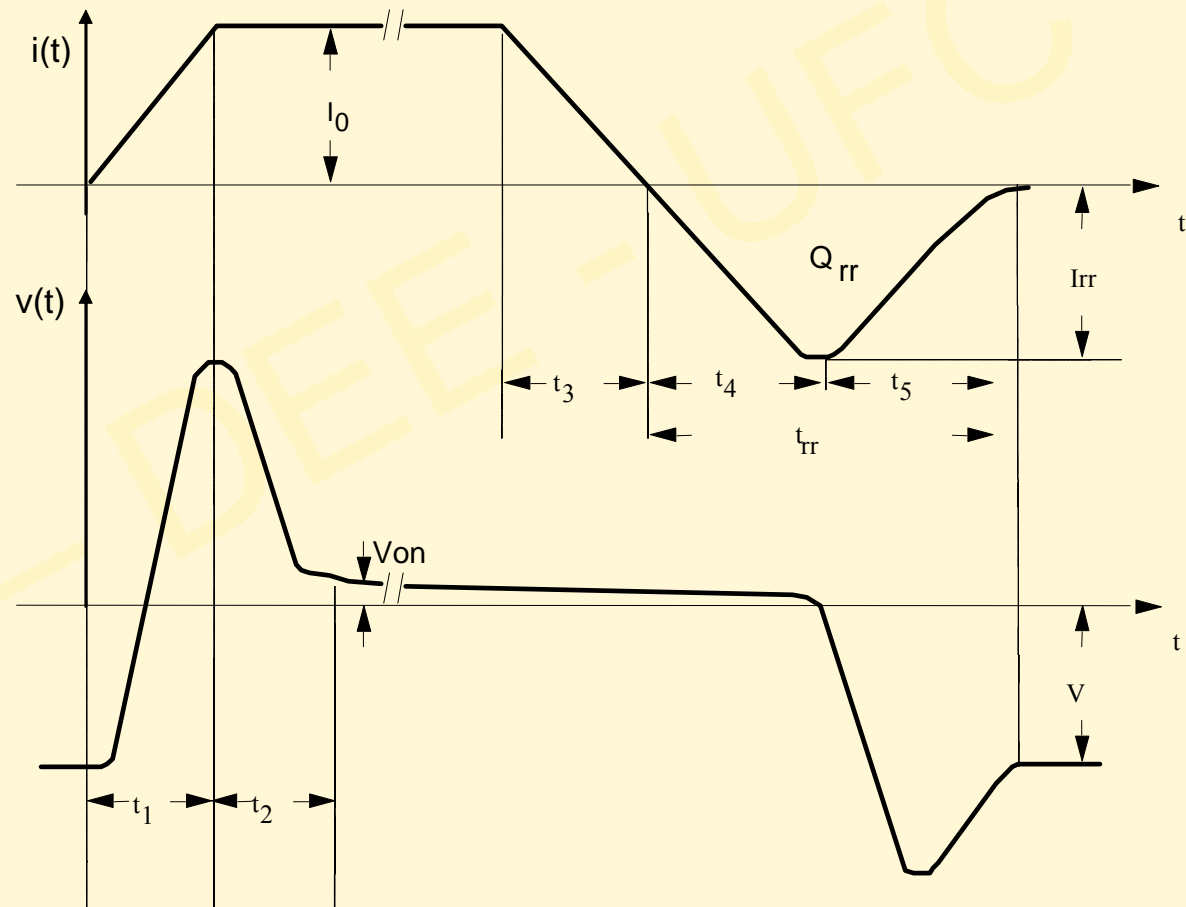




## Característica de chaveamento de um diodo de potência

Bloqueio:

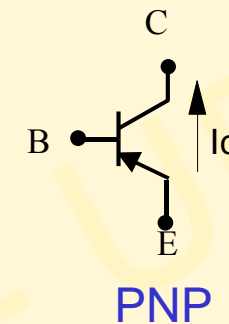
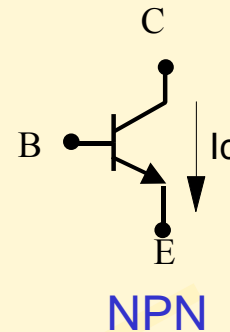
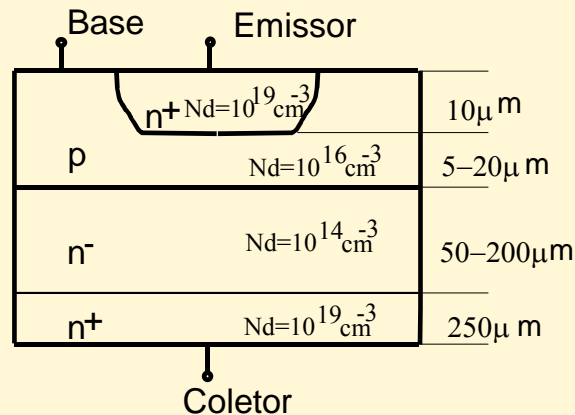
- A carga em excesso na região de arrasto passa a ser removida por recombinação e arrasto. Cessada a recombinação  $i(t)$  reduz a zero;
- Fluxo de minoritários na formação da camada de depleção inverte  $i(t)$ . As junções p-n permanecem polarizadas diretamente devido excesso de portadores nas junções;
- 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.

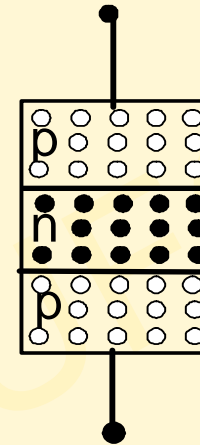




# Unidade I - Introdução

## Transistor de potência Junções PNP e NPN

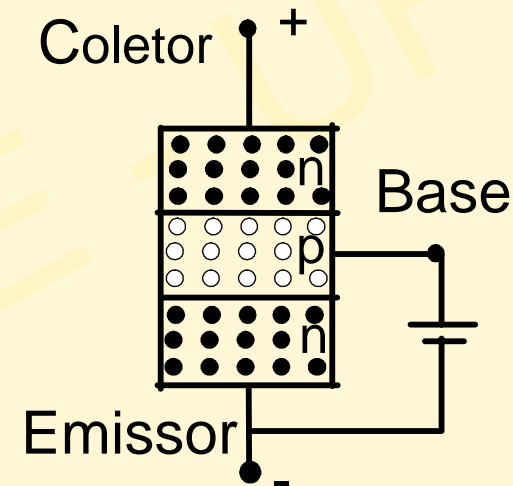
- **Emissor – cristal de alta dopagem;**
- **Base – cristal de media dopagem;**
- **Coletor - cristal de alta dopagem.**
- **Processo de condução:**
  - Pequena corrente é introduzida na base através de circuito de controle;
  - Algumas cargas alcançam a camada de depleção (ausente de carga) coletor-base 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 .



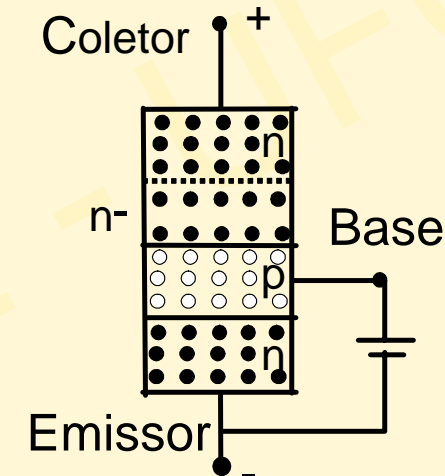
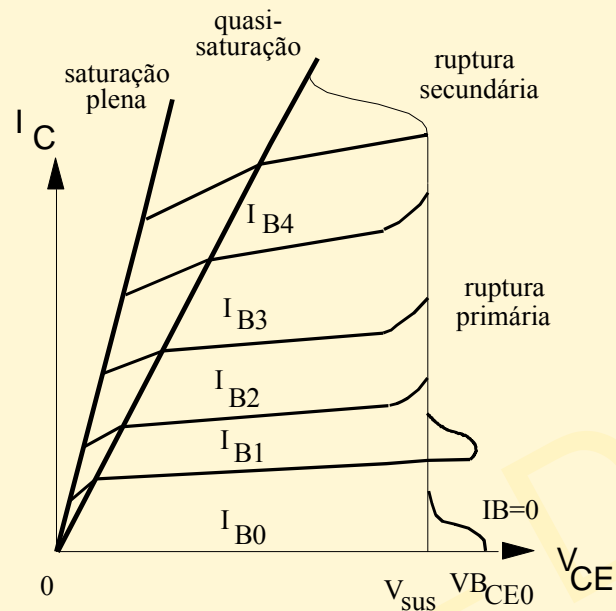


# Introdução – Transistor NPN

- 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

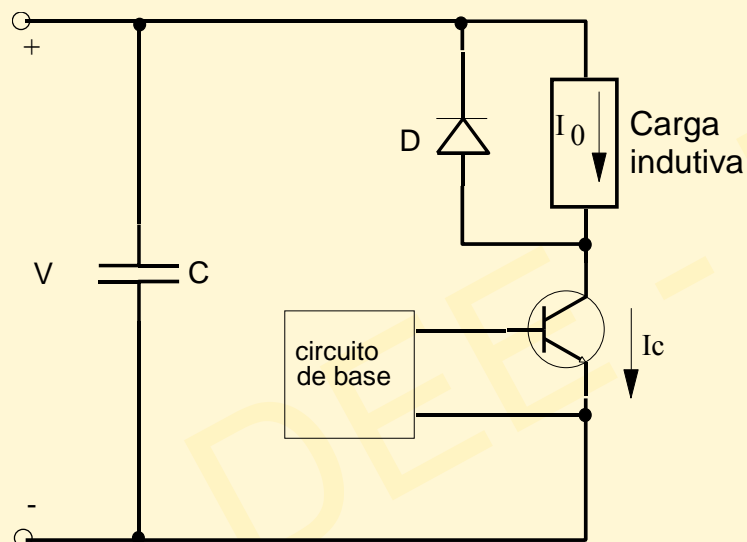


- $V_{sus}$ : tensão máxima emissor-coletor quando o dispositivo está conduzindo;
- Ruptura primária: avalanche convencional na junção;
- Ruptura secundária: alta dissipação de potência em pontos localizados no cristal



# Unidade I - Introdução

## Característica de chaveamento de um transistor de potência



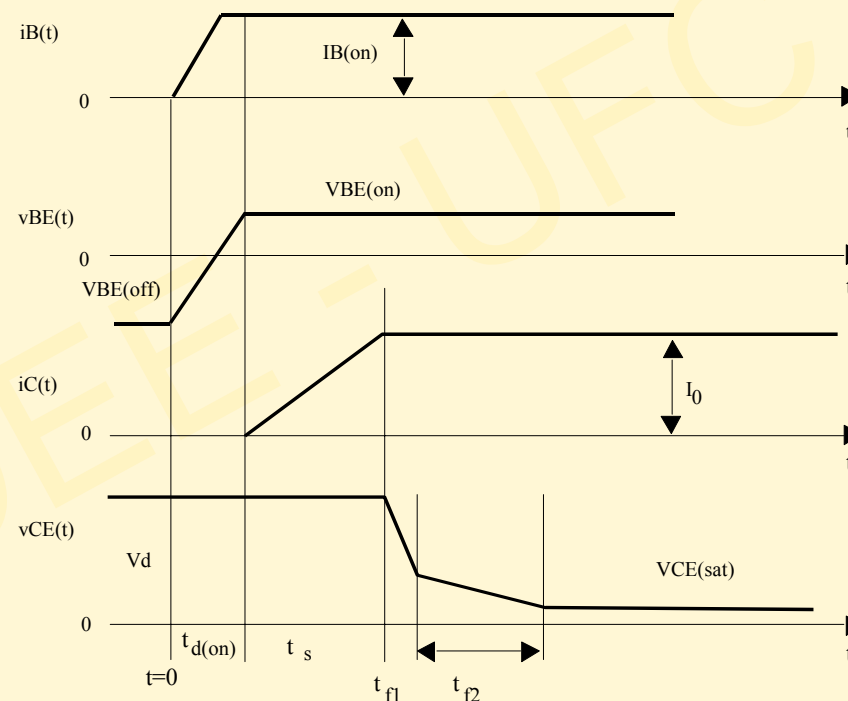
Circuito para análise na característica de chaveamento do transistor bipolar



# Unidade I - Introdução

## Característica de chaveamento de um transistor de potência

- **Condução:**
  - Início do processo de retirada da camada de depleção.  $V_{ce}$  não é alterada;
  - $V_{ce}$  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  $V_{ce}$ .



$t_{d(on)}$

$t_s$

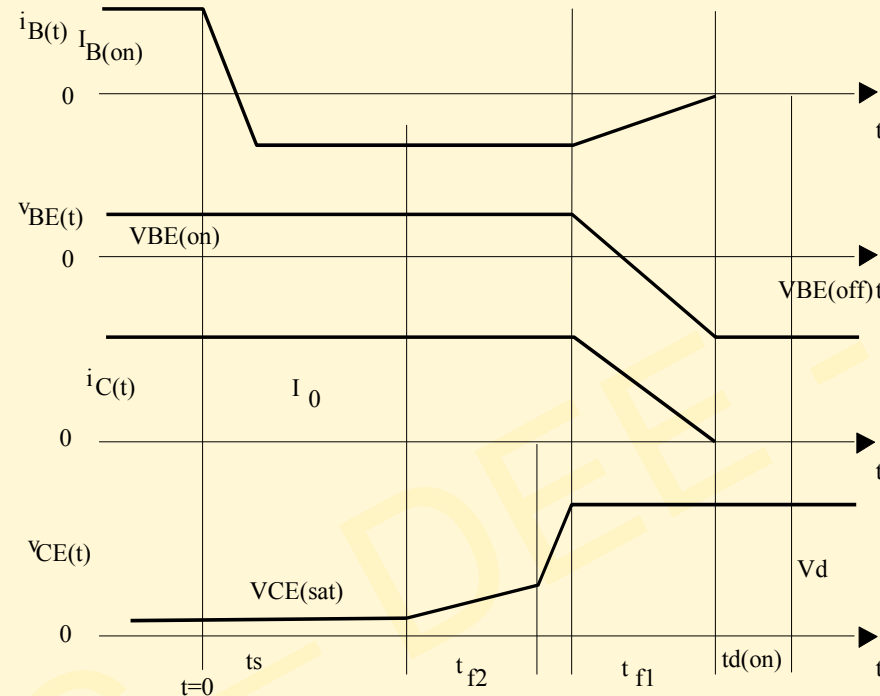
$t_{f1}$

$t_{f2}$



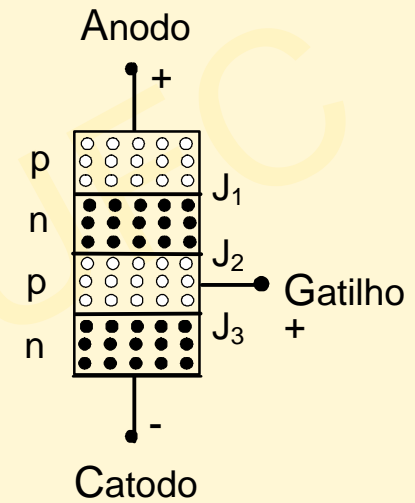
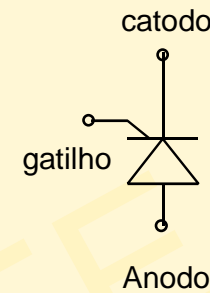
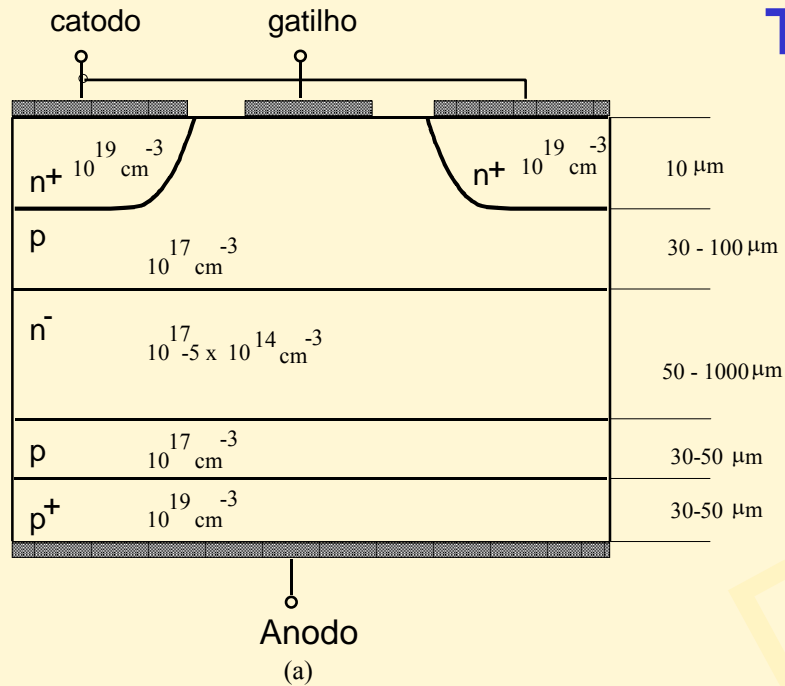
# Unidade I - Introdução

## Característica de chaveamento de um transistor de potência



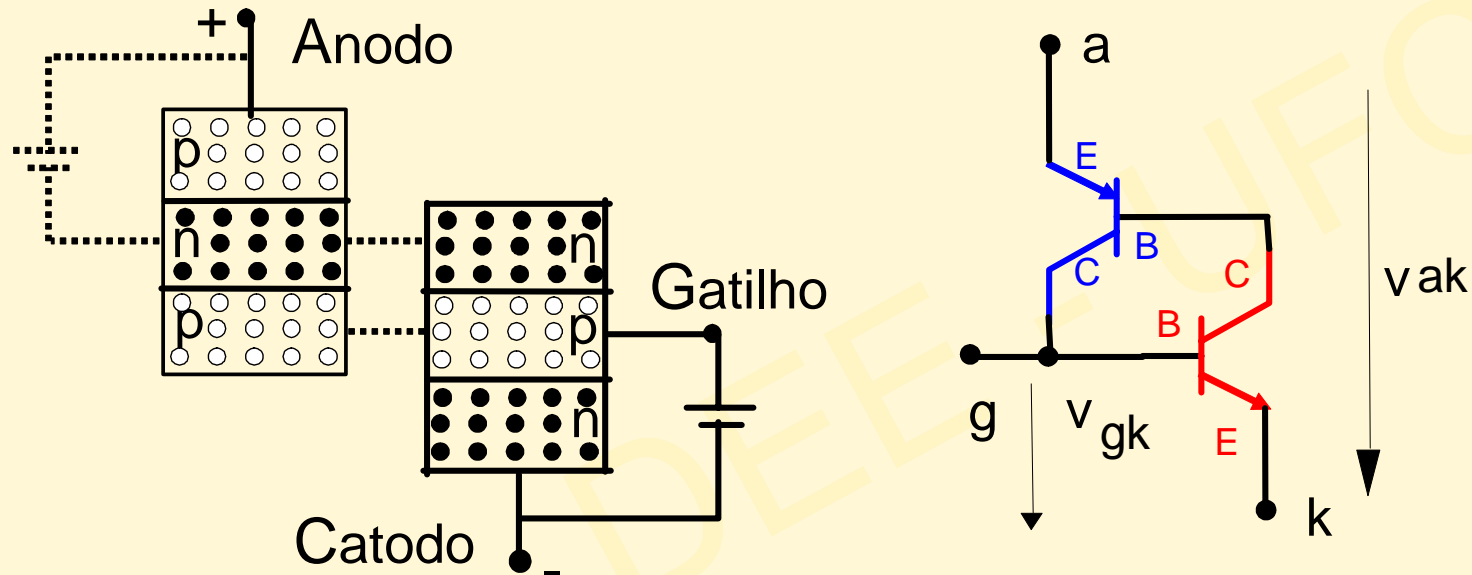
- Bloqueio:
  - Para bloquear um transistor tem se que remover toda carga armazenada na junção;
  - Após  $t_s$  o transistor deixa a região de saturação e passa a de quase saturação;
  - Redução de carga na região de arrasto

## Tiristor



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

## Junções PNP



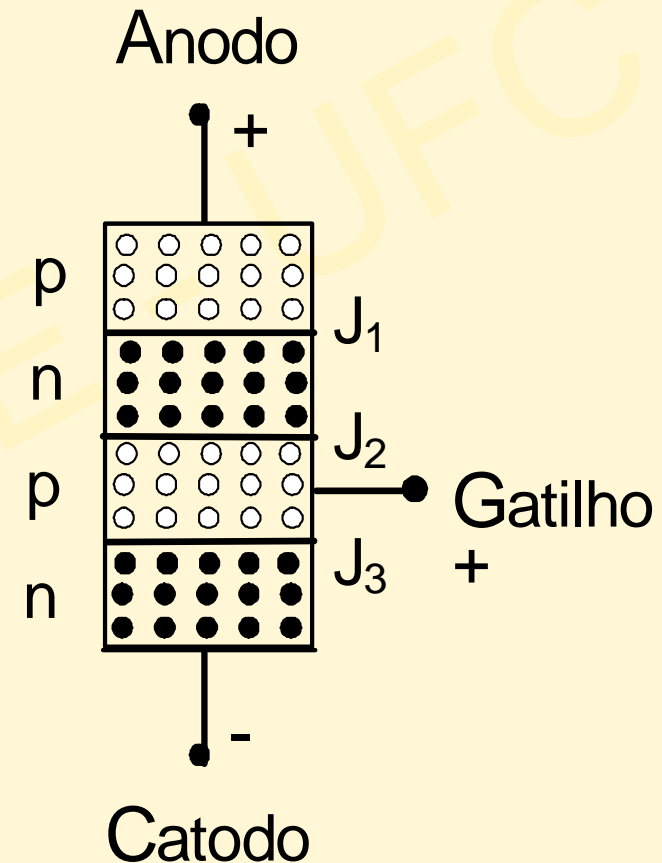
- NPN inicia a condução;
- Circula corrente pela junção base-emissor do transistor PNP;
- Há uma realimentação positiva;
- Corrente através do dispositivo é autosustentada.





## Junções PNPN

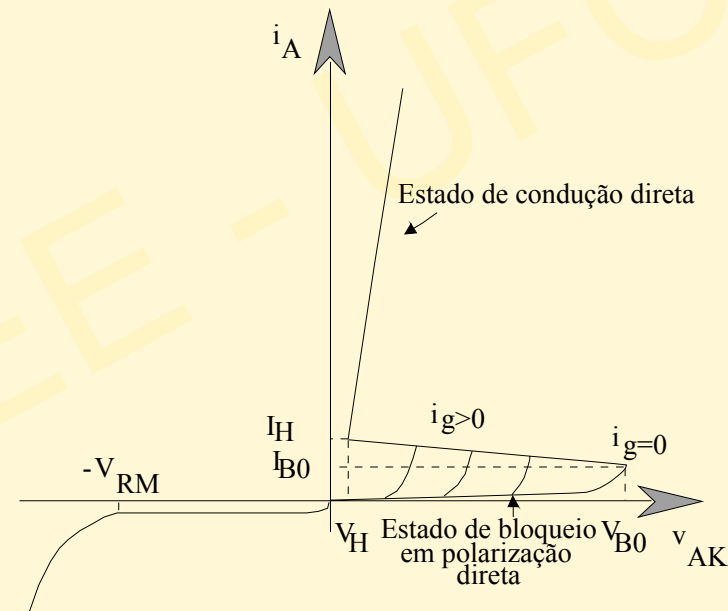
- $J_1$  e  $J_3$  são polarizadas diretamente e  $J_2$  inversamente;
- A ação dos dois emissores saturam a junção  $J_2$ ;
- A camada n absorve a camada de depleção;
- Logo  $J_2$  determina a tensão máxima aplicável ao tiristor.





## 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

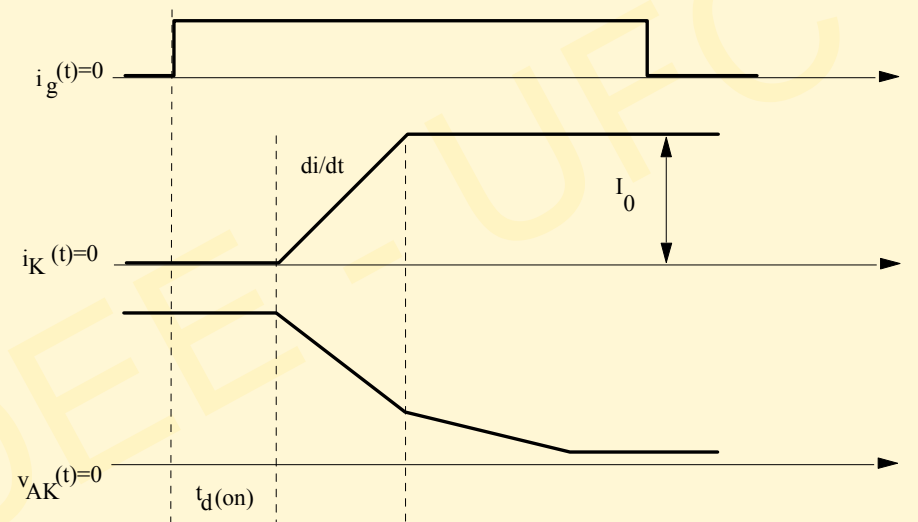




## Característica de chaveamento

- 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.



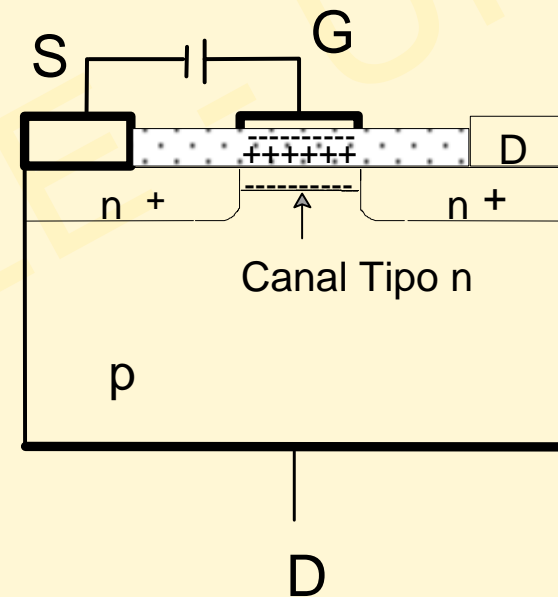


## Característica de chaveamento

- 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.

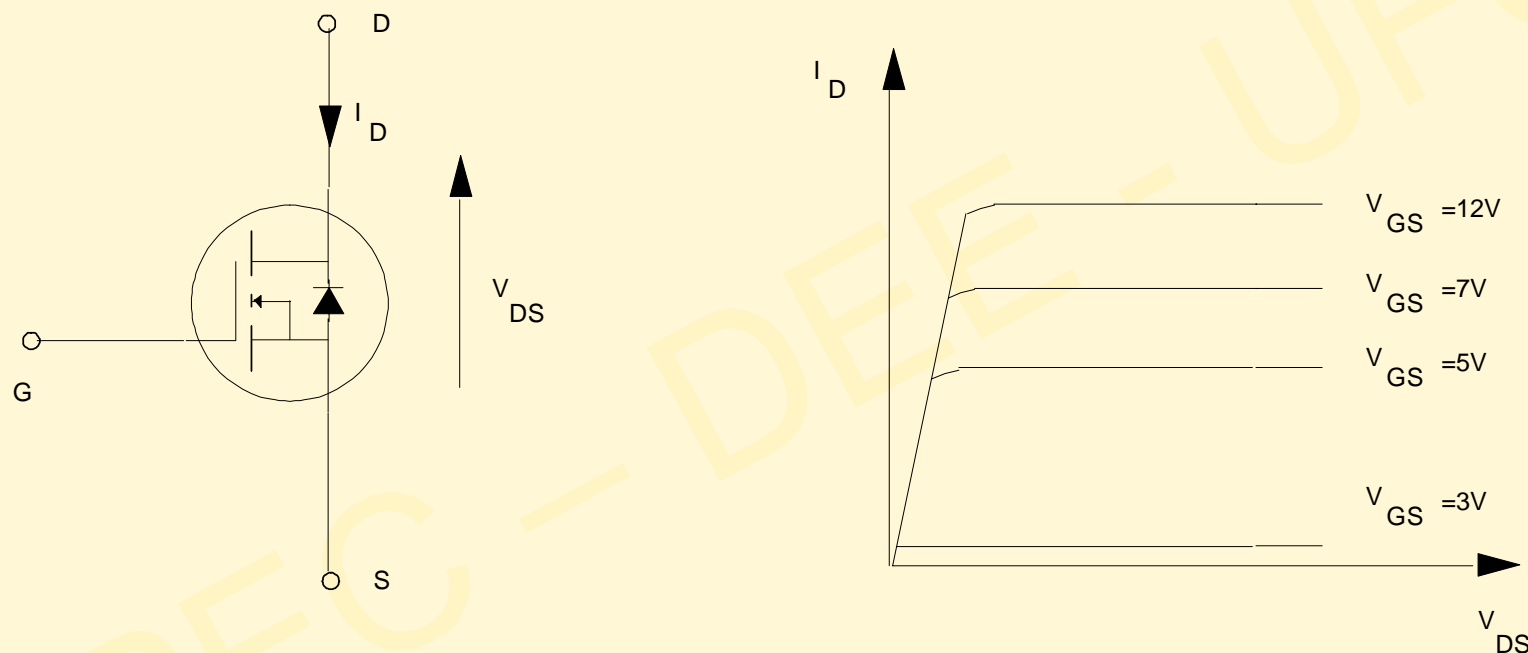
## Transistor MOSFET

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



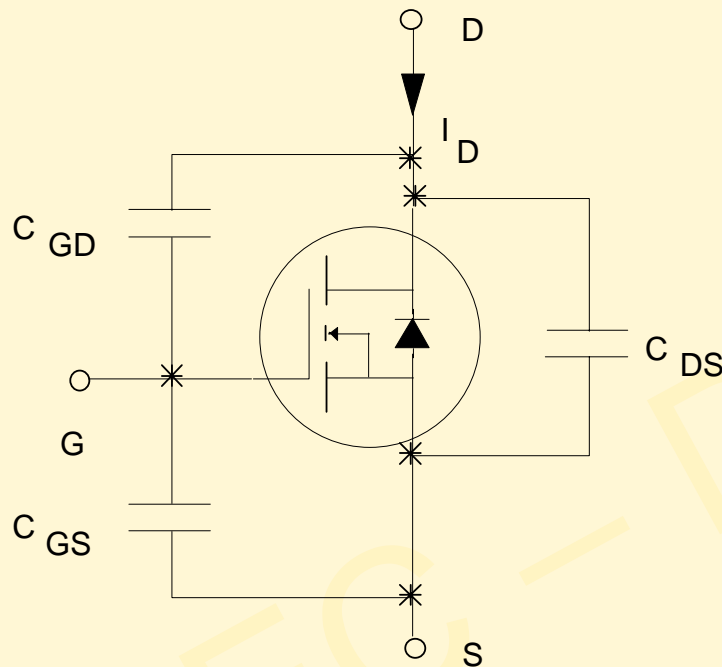
## Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET

Tipo e característica de condução

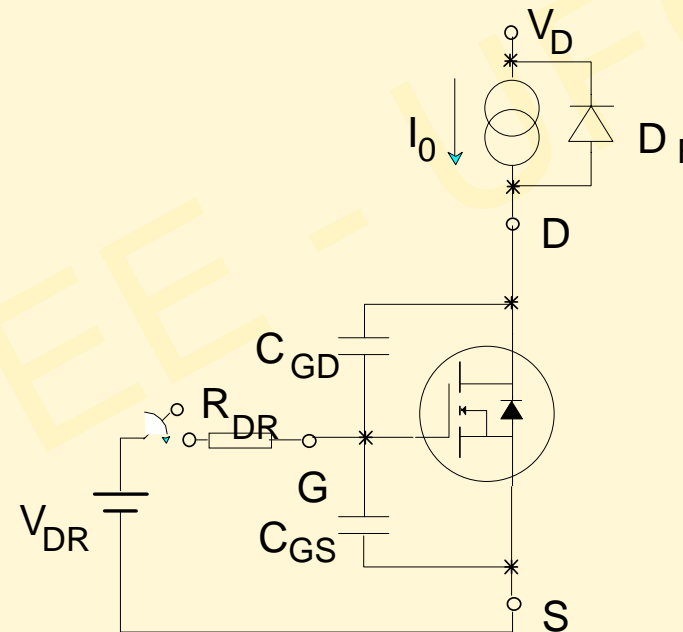


- **Essencialmente resistivo em condução;**
- **Resistência de condução relativamente alta.**

## Característica de chaveamento



Capacitâncias parasitas

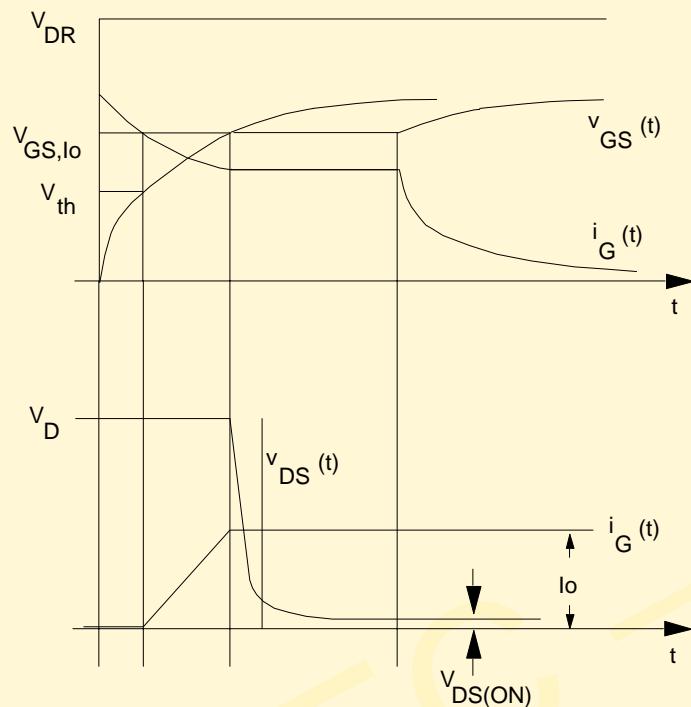


Modelo para análise de chaveamento

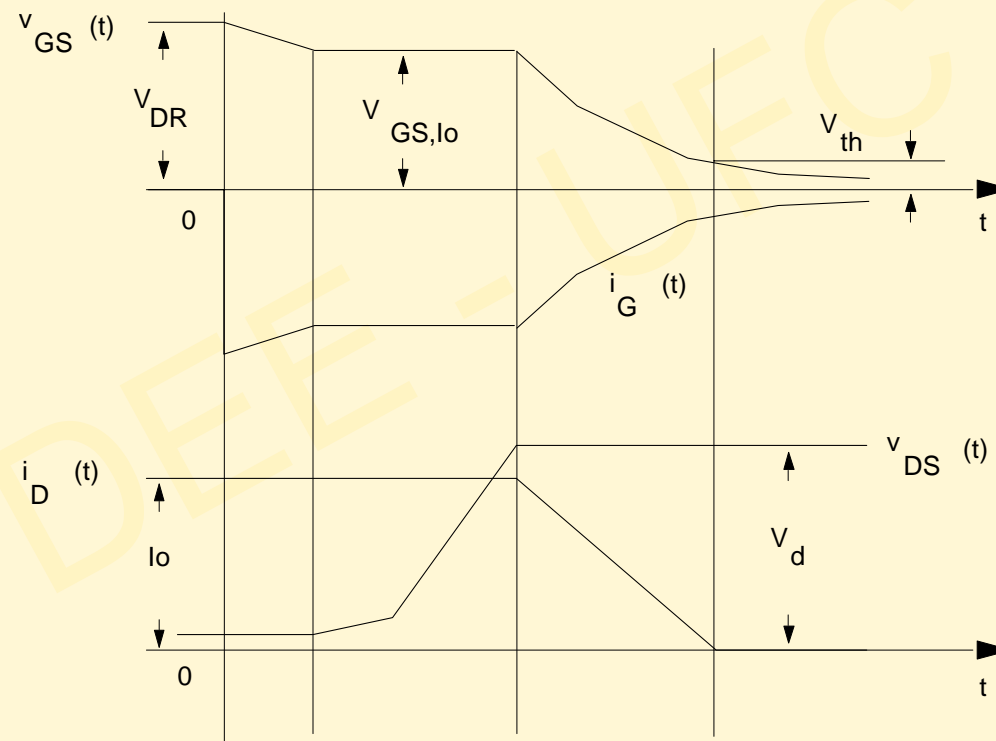


# Unidade I - Introdução

## Característica de chaveamento



Forma de onda durante o bloqueio



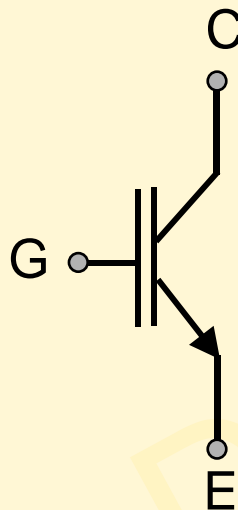
Forma de onda durante a condução





# Unidade I - Introdução

## Isolated Gate Bipolar Transistor - IGBT

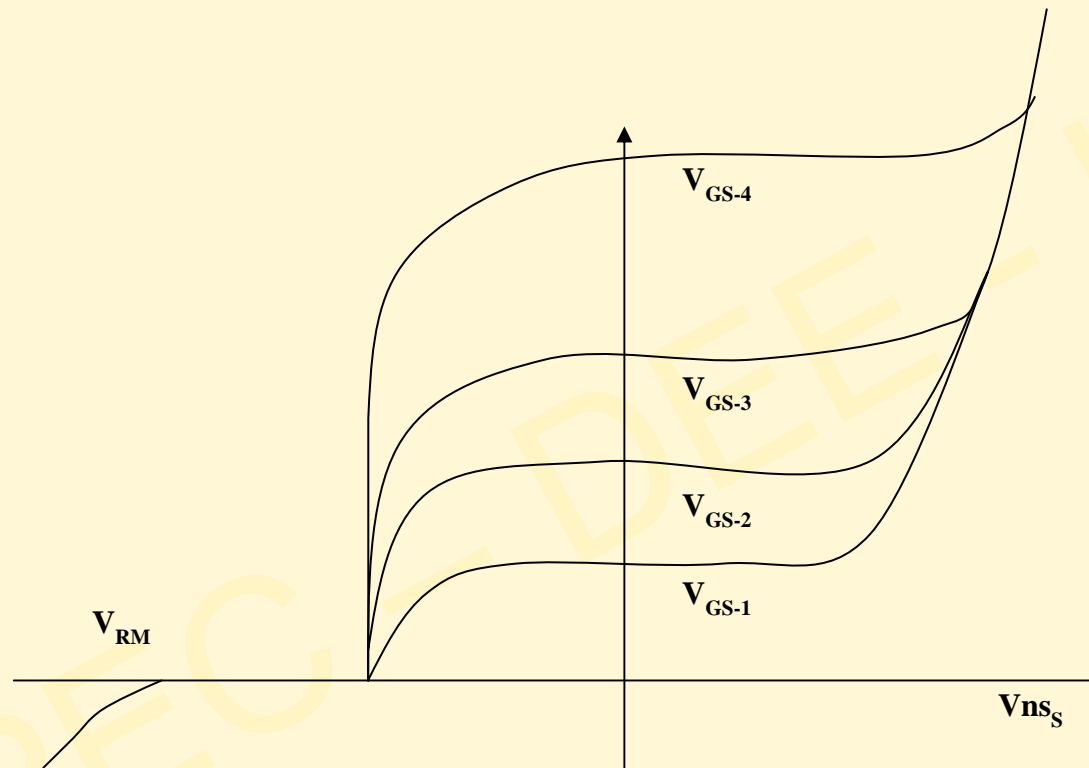


- **Transistor Bipolar de Gatilho Isolado;**
- **Atuação rápida (transitório efeito de campo);**
- **Alta capacidade de potência (Transistor Bi-polar);**
- **Controle por tensão;**



# Unidade I - Introdução

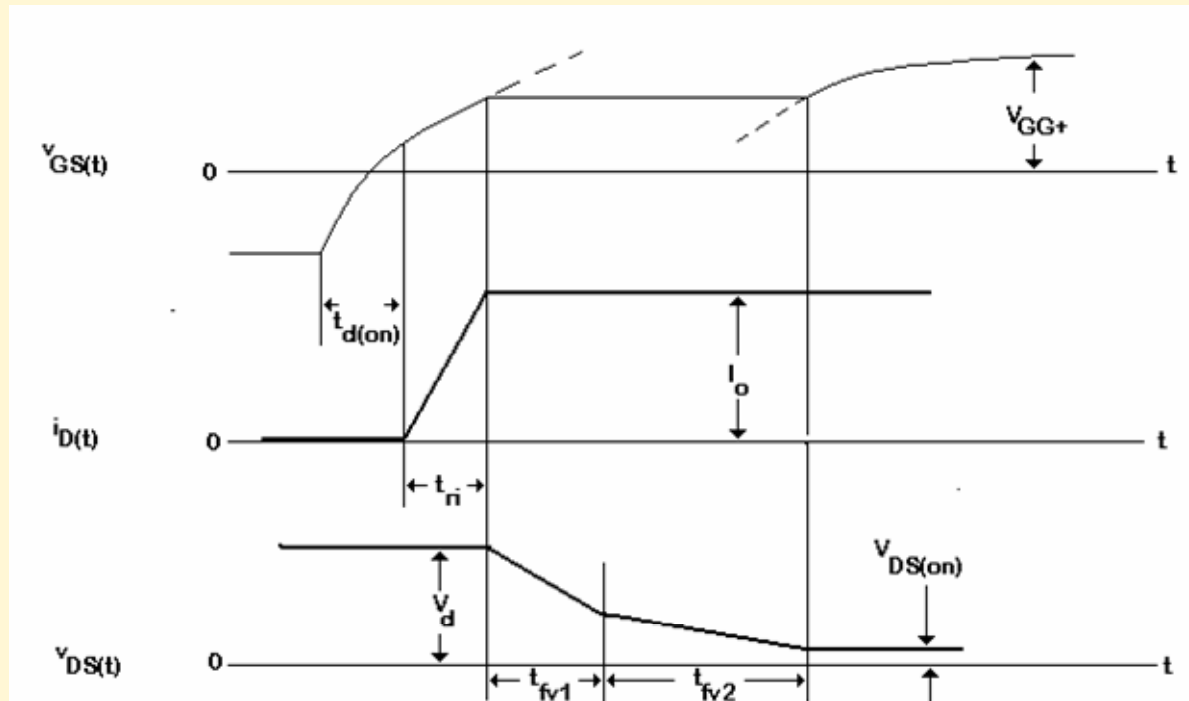
## Característica I-V





# Unidade I - Introdução

## Característica de chaveamento

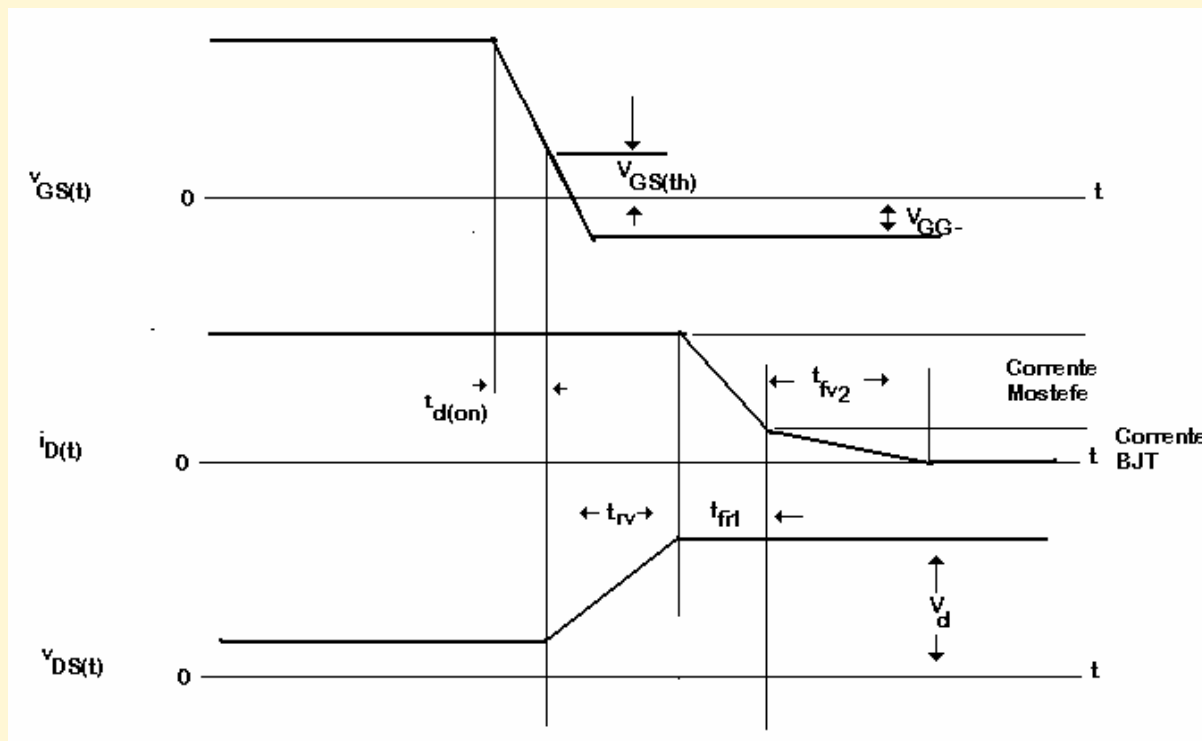


**Formas de onda da Corrente e da Tensão no IGBT em Condução**



# Unidade I - Introdução

## Característica de chaveamento



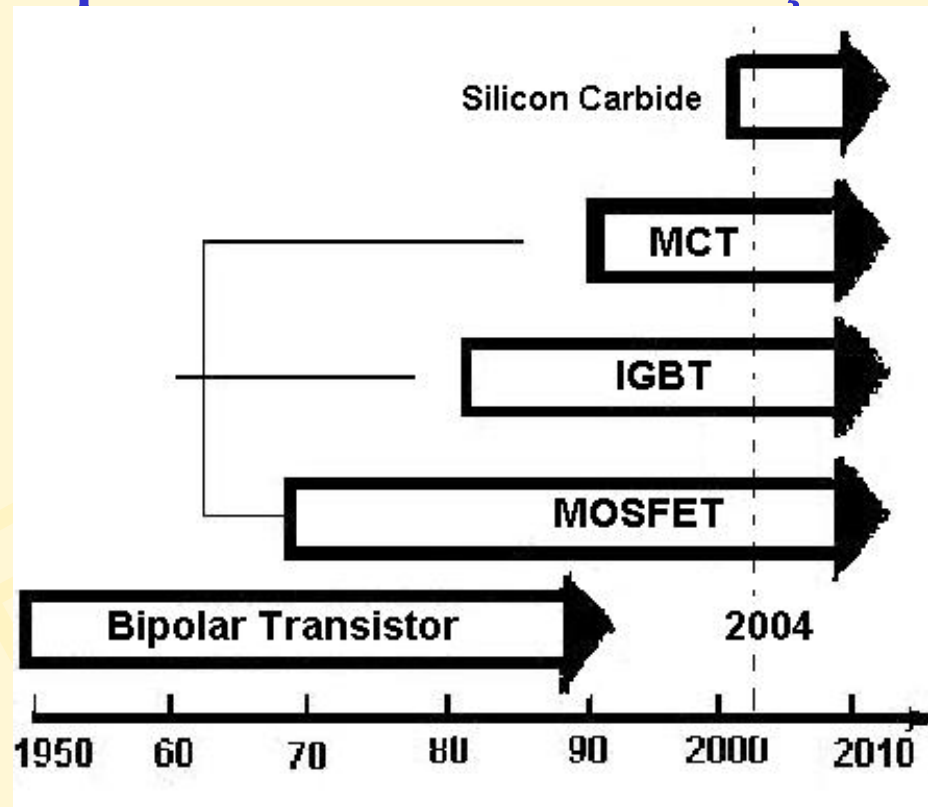
**Formas de onda da Corrente e da Tensão no IGBT em Bloqueio**



# 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

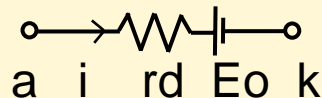
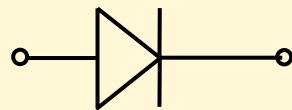
- A perda total de um dispositivo é dada por:
  - Perda durante a condução;
  - Perda no chaveamento;
  - Perda no estado de bloqueio.
- Estas perdas que se transforma em calor, devem ser liberadas para o meio ambiente, caso contrário a temperatura da junção se eleva acima do limite permitido, provocando 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 ( $T_o$ ).

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

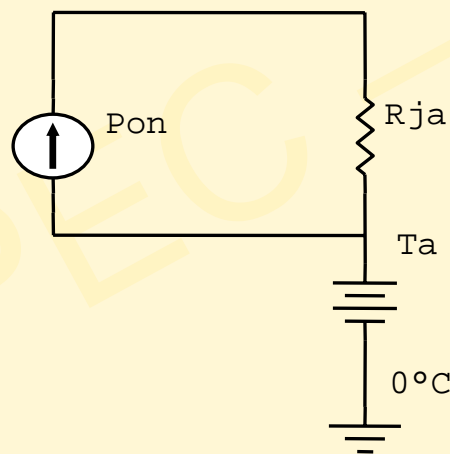
- No caso de um dispositivo semicondutor, a corrente através da junção inversamente polarizada produz calor quando os portadores majoritários perdem energia ao atravessar a barreira de potencial. A energia elétrica na junção se transforma em energia térmica no cristal.

## 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:



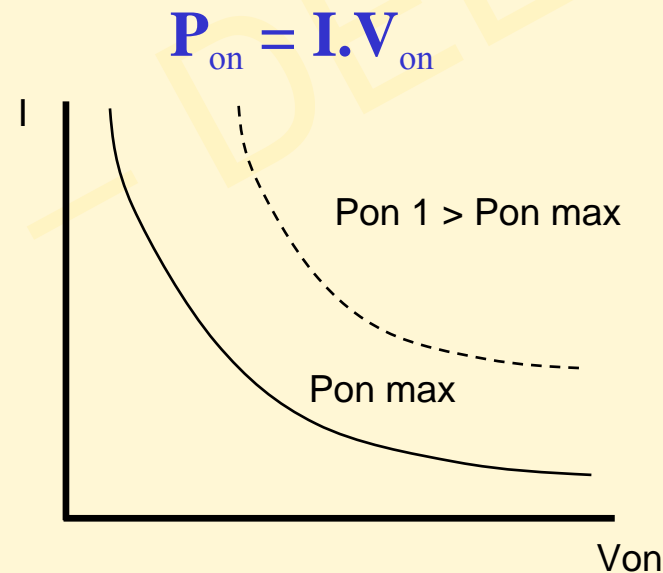
Quando o semicondutor não está conduzindo,  $P_{on} = 0$ , logo  $T_j = T_a$ . A temperatura da junção se eleva acima da ambiente e há um fluxo de calor para o ambiente. Quando menor  $R_{ja}$ , menor será  $\Delta T$



# Unidade I - Introdução

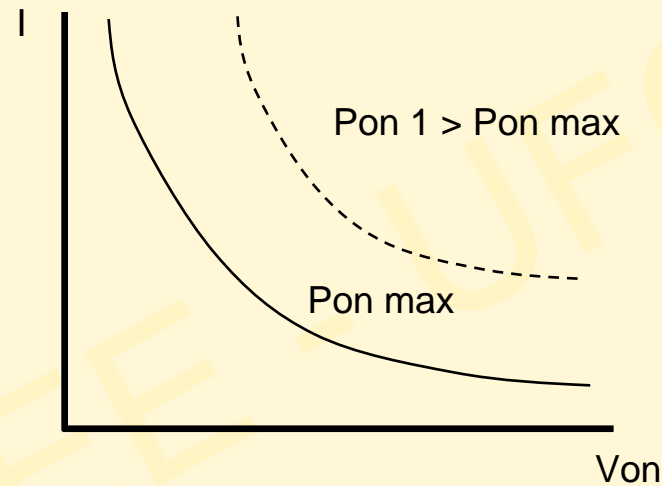
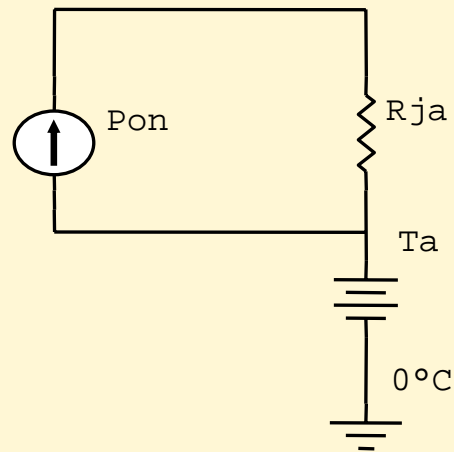
## Perdas nos dispositivos semicondutores

- 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.





## 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.



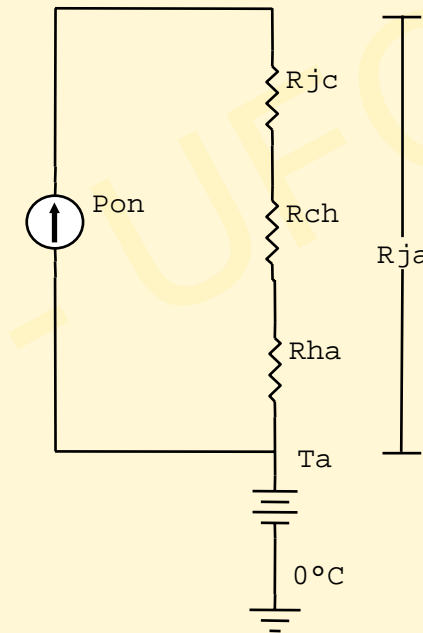
## Dissipação do calor

- 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 elétrico 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



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

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

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