

Aula 5: Transistores de Potência - TBJ

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Conteúdo

Aula	Conteúdo
Aula 1	Conceitos Básicos de Semicondutores
Aula 2	Diodos de potência
Aula 3	Associação de diodos e circuitos RLC chaveados
Aula 4	Retificadores a diodos
Aula 5	Transistores de potência - parte 1
Aula 6	Transistores de potência - parte 2
Aula 7	Conversores c.c./c.c.
Aula 8	Tiristores
Aula 9	Retificadores controlados
Aula 10	Conversores c.c./c.a.
Aula 11	Conversores c.a./c.a.
Aula 12	Conversores ressonantes

Sumário

- ❑ Estrutura e curva I - V;
- ❑ Física de operação do TBJ;
- ❑ Características de comutação;
- ❑ Limitações do dispositivo.



Estrutura Interna



Introdução

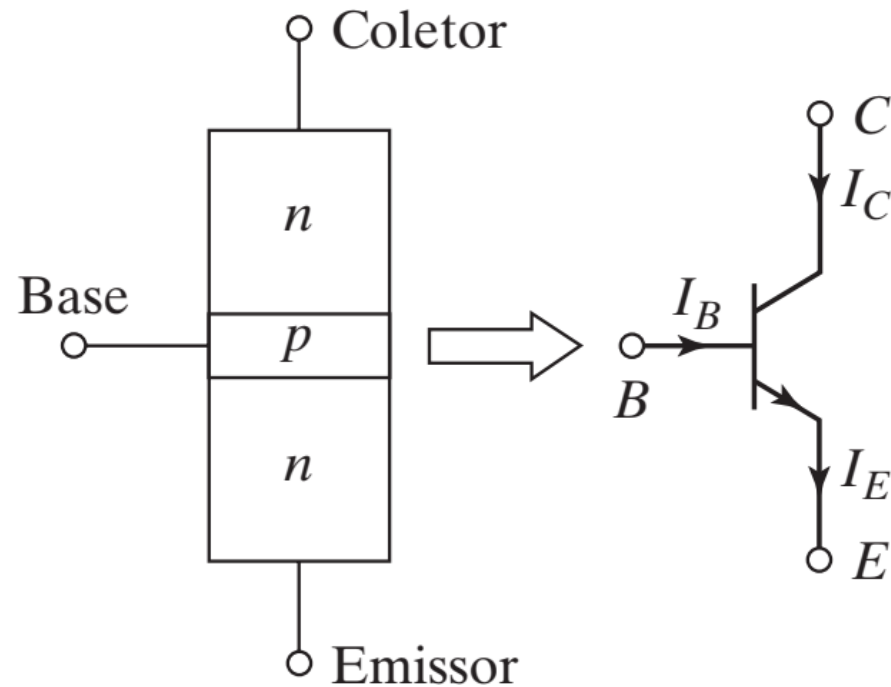
- ❑ Transistor bipolar de junção (Bell Telephone) – 1954;
- ❑ John Bardeen, William Bradford Shockley e Walter Houser Brattain: Nobel em Física de 1956;
- ❑ Inicialmente desenvolvido para lidar com amplificação de sinais e sinais lógicos;
- ❑ Eletrônica de potência: capacidade de bloqueio e alta capacidade de condução de corrente;
- ❑ Transistor de alta potência comercial (Toshiba) – 1975.



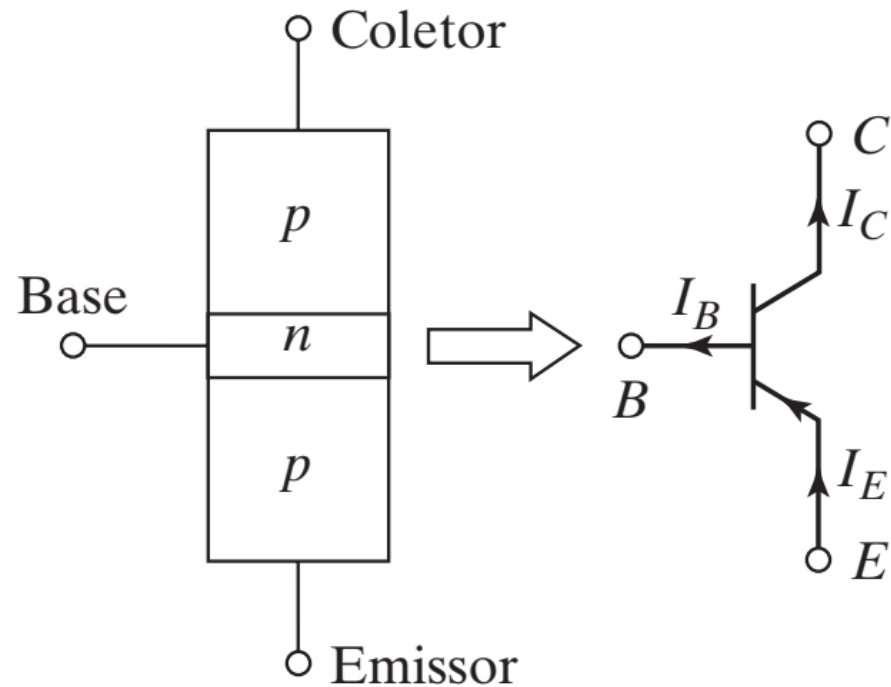
Fonte:
<http://www.beatriceco.com/bti/porticus/bell/images/transistor1.jpg>



Transistor bipolar de junção – Estrutura simplificada



$$I_C = \beta I_B$$

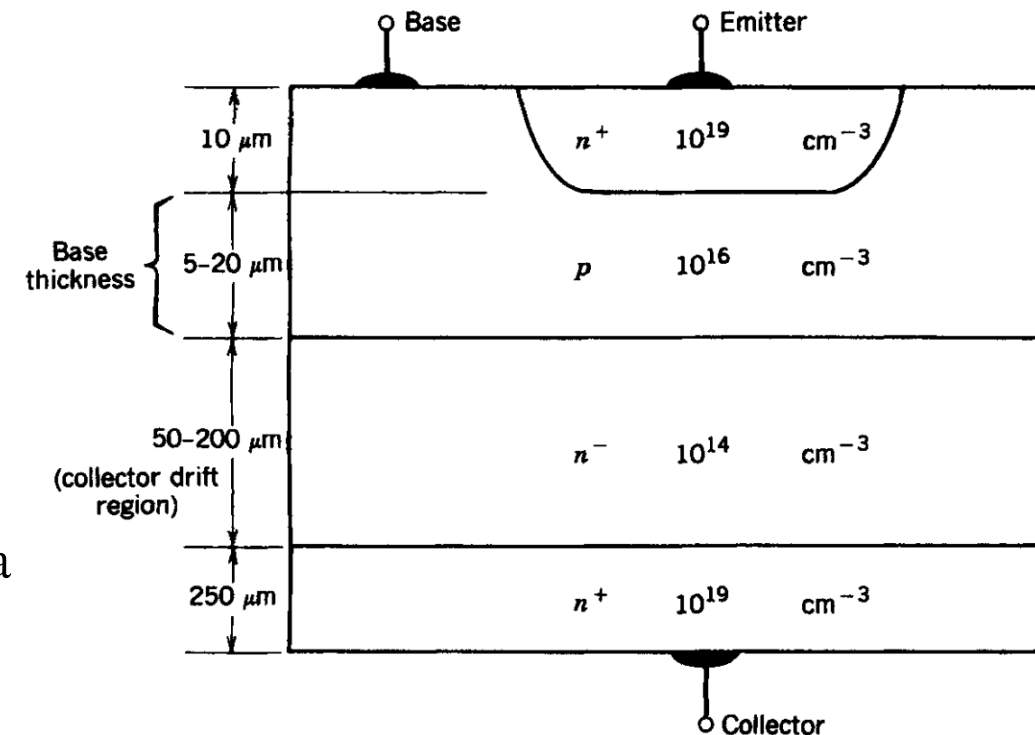
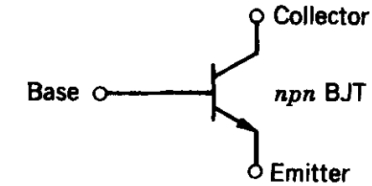


$$I_e = (\beta + 1)I_B$$

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

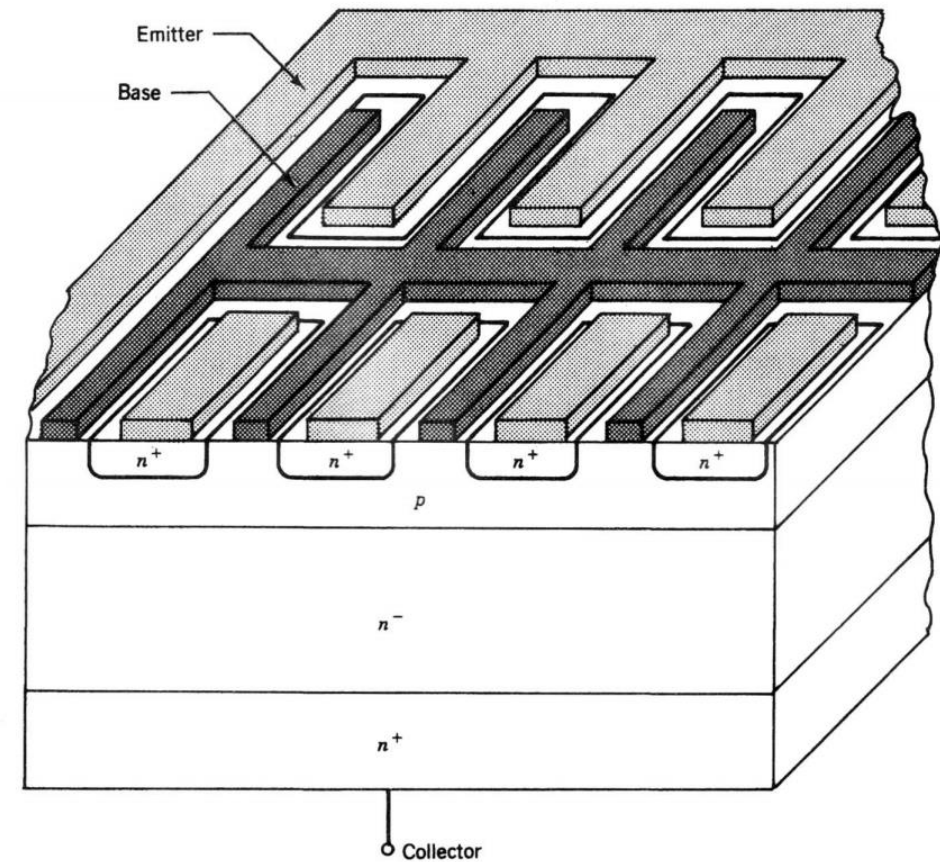
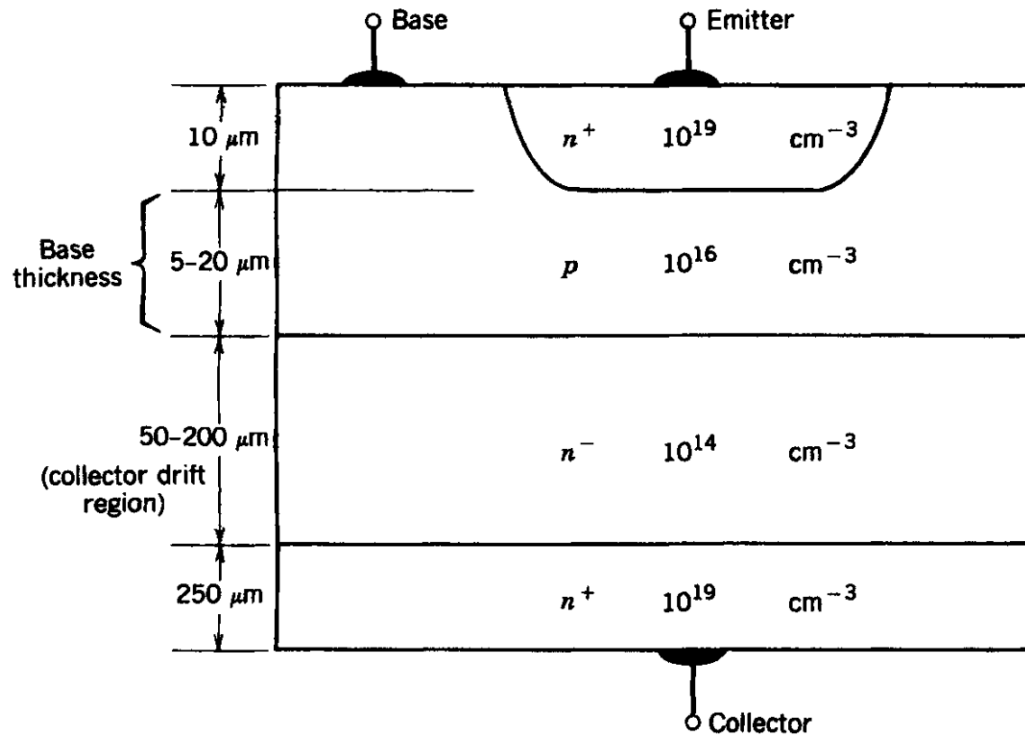
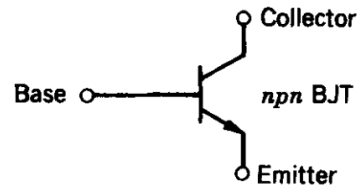
Transistor bipolar de junção de alta potência

- ❑ Estrutura npn é mais popular em EP;
- ❑ Estrutura vertical:
 - Maximiza a área de condução de corrente;
 - Minimiza a resistência elétrica do dispositivo;
 - Reduz a resistência térmica do dispositivo;
- ❑ Comprimento da região de deriva determina a máxima tensão de bloqueio do dispositivo.



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

Transistor bipolar de junção – Geometria



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

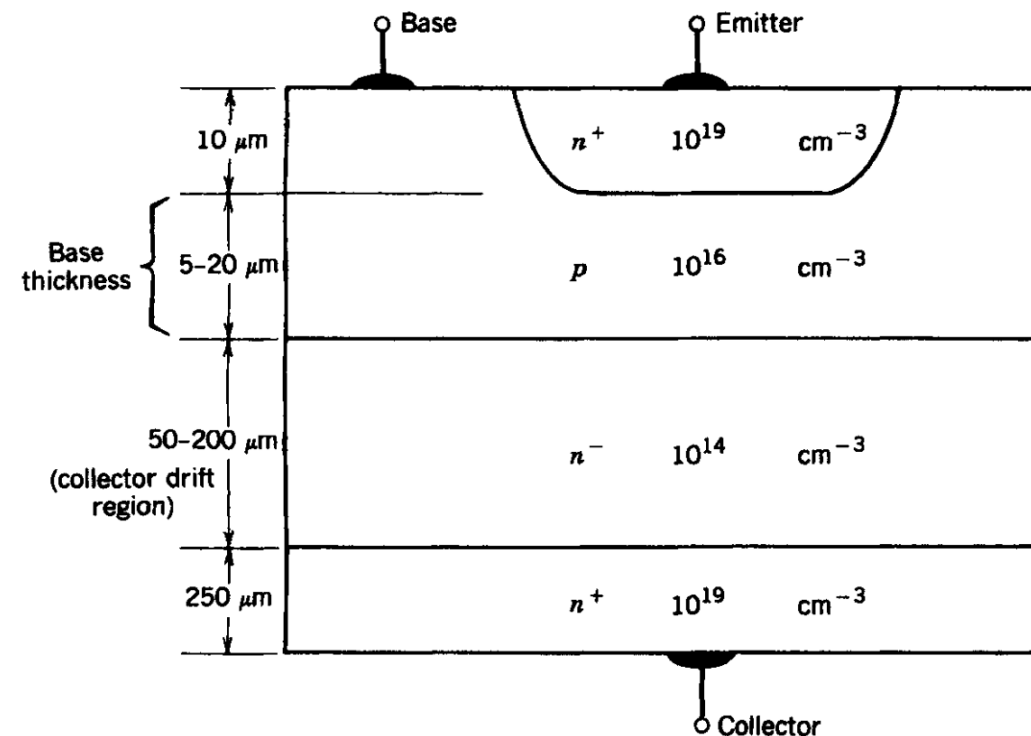
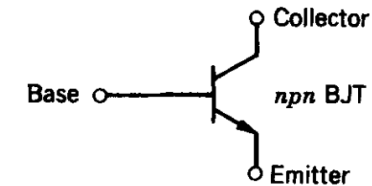
Características – TBJ de potência

- ❑ Comprimento da base
 - Quanto menor, mais amplificação;
 - Se pequena, limita a tensão de bloqueio;

- ❑ Relação de compromisso! 

- ❑ Valores típicos:
 - TBJ convencional: frações de micrômetro;
 - TBJ de potência: Unidades a dezenas de micrometros

- ❑ Consequência: Ganho relativamente baixo (tipicamente β varia de 5 a 20);



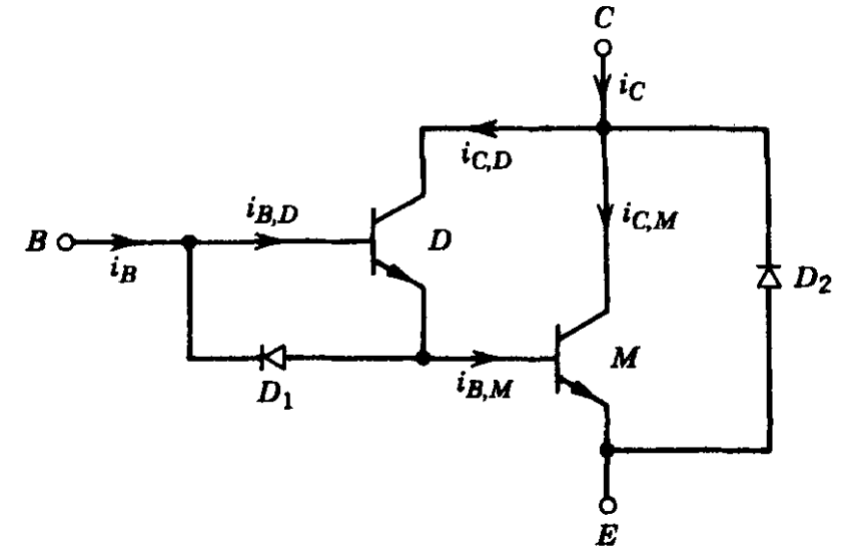
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Características – TBJ de potência

- ❑ Valor de β é muito baixo;
- ❑ Solução: Conexão Darlington;

$$\beta = \beta_1\beta_2 + \beta_1 + \beta_2$$

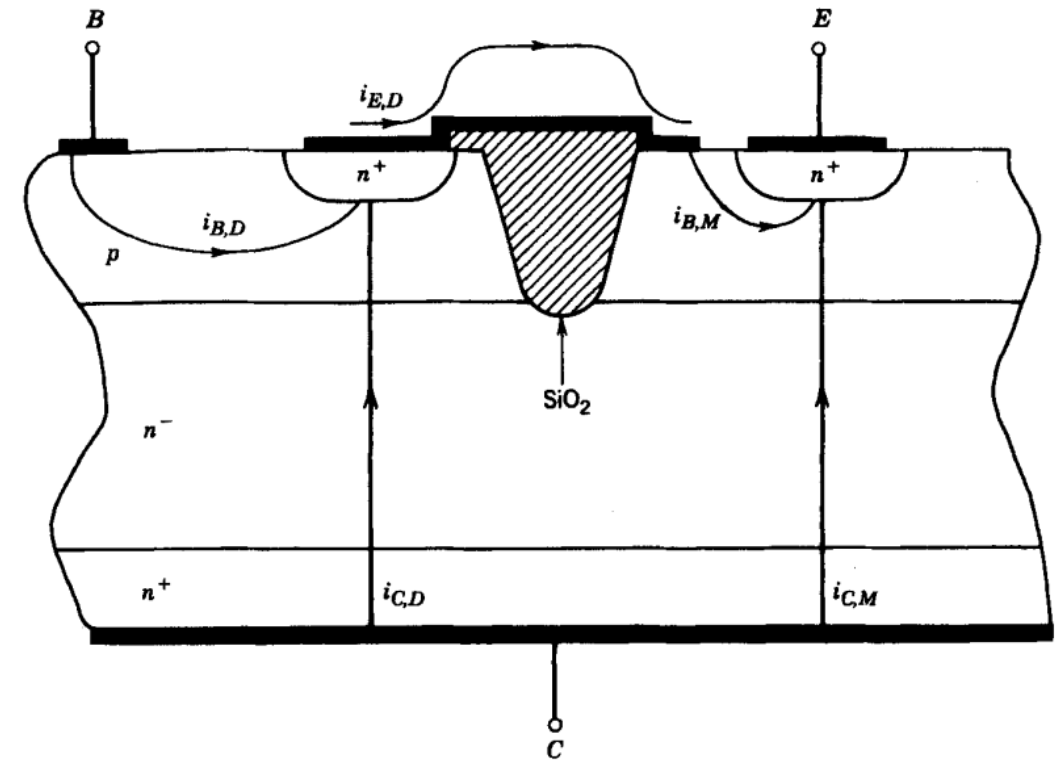
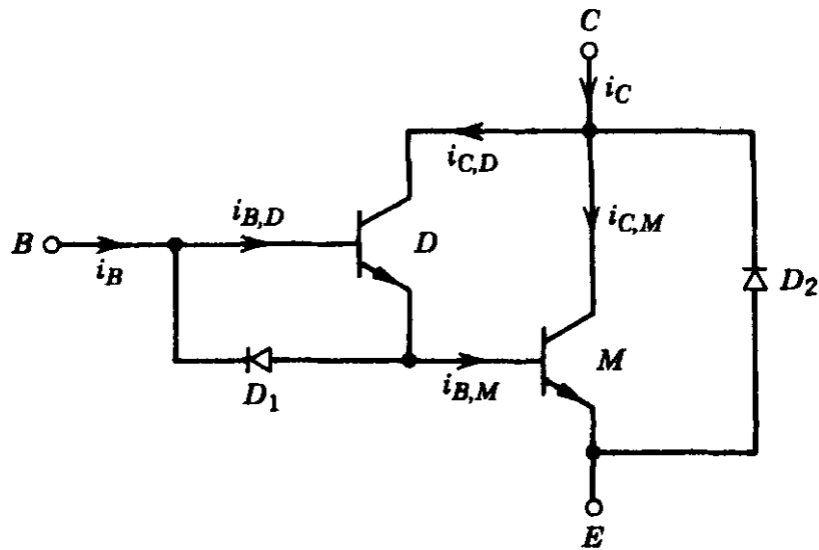
- ❑ Aumento significativo do ganho;
- ❑ Produtos com até 4 transistores foram desenvolvidos.



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

Conexão Darlington – Geometria

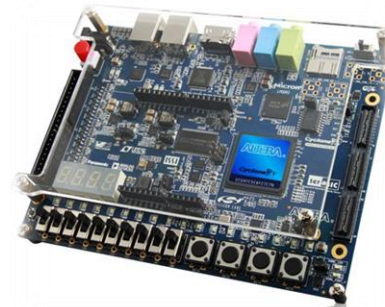
- ❑ Estrutura monolítica!
- ❑ Diodo D_1 : Aumentar a velocidade de desligamento;
- ❑ Diodo D_2 : Operação bidirecional de corrente.



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

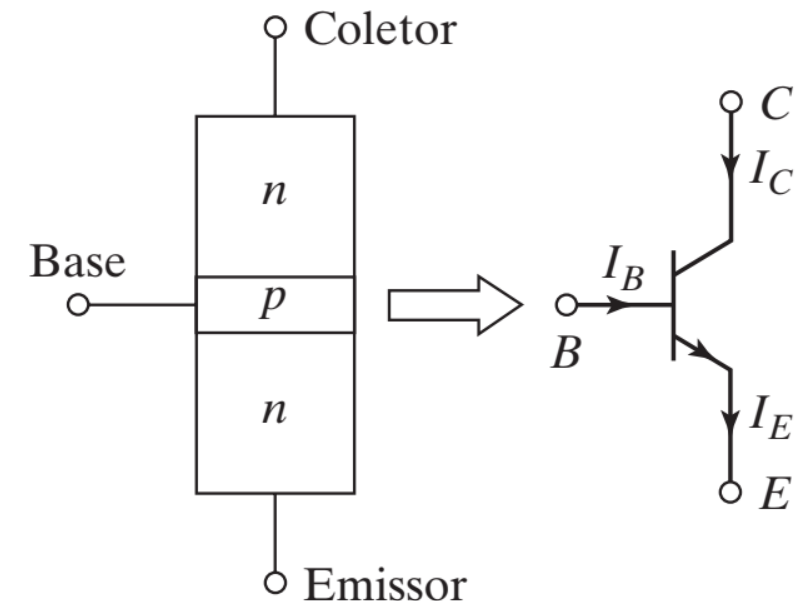


Curva I - V



Característica I – V: TBJ convencional

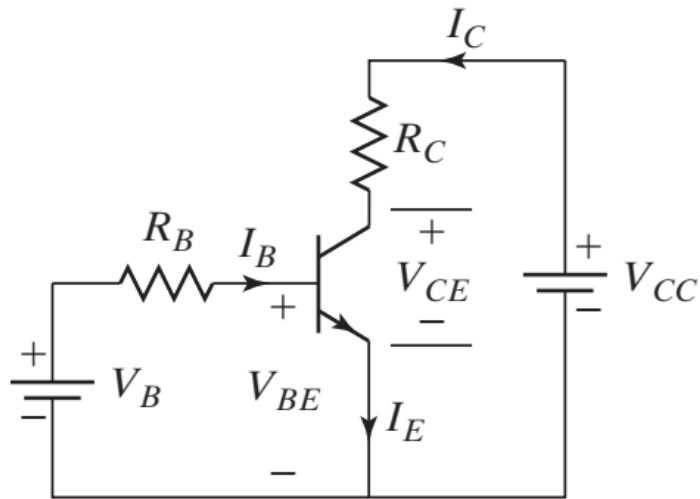
- Modos de operação:
 - Região de corte → corrente de base baixa → Junções CB e BE reversamente polarizadas;
 - Região ativa → corrente de base em uma faixa → Junção BE diretamente polarizada e junção CB reversamente polarizada;
 - Região de saturação → corrente de base elevada → Junções CB e BE diretamente polarizadas.



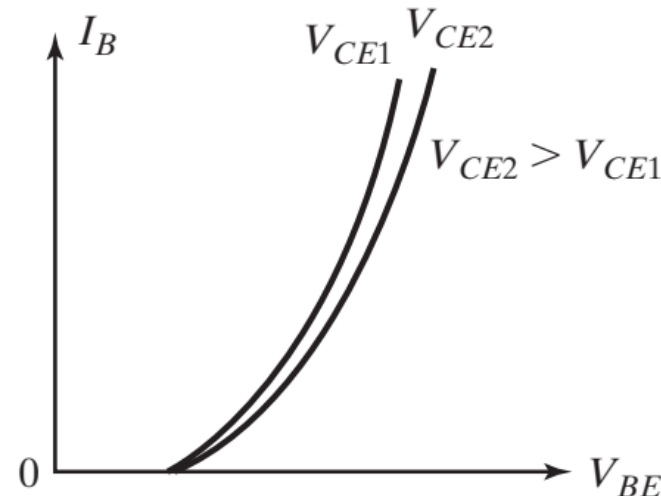
Fonte: M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014 (Livro texto)

Característica I – V: TBJ convencional

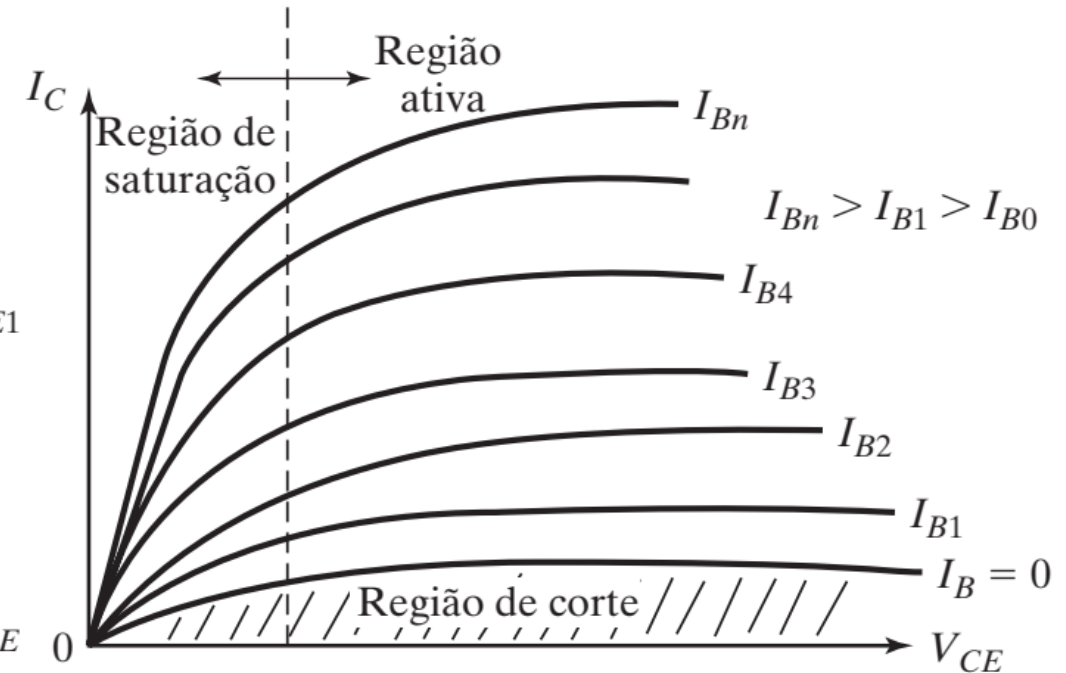
- ❑ Configuração de emissor comum é mais popular em operação de comutação!



(a) Diagrama do circuito



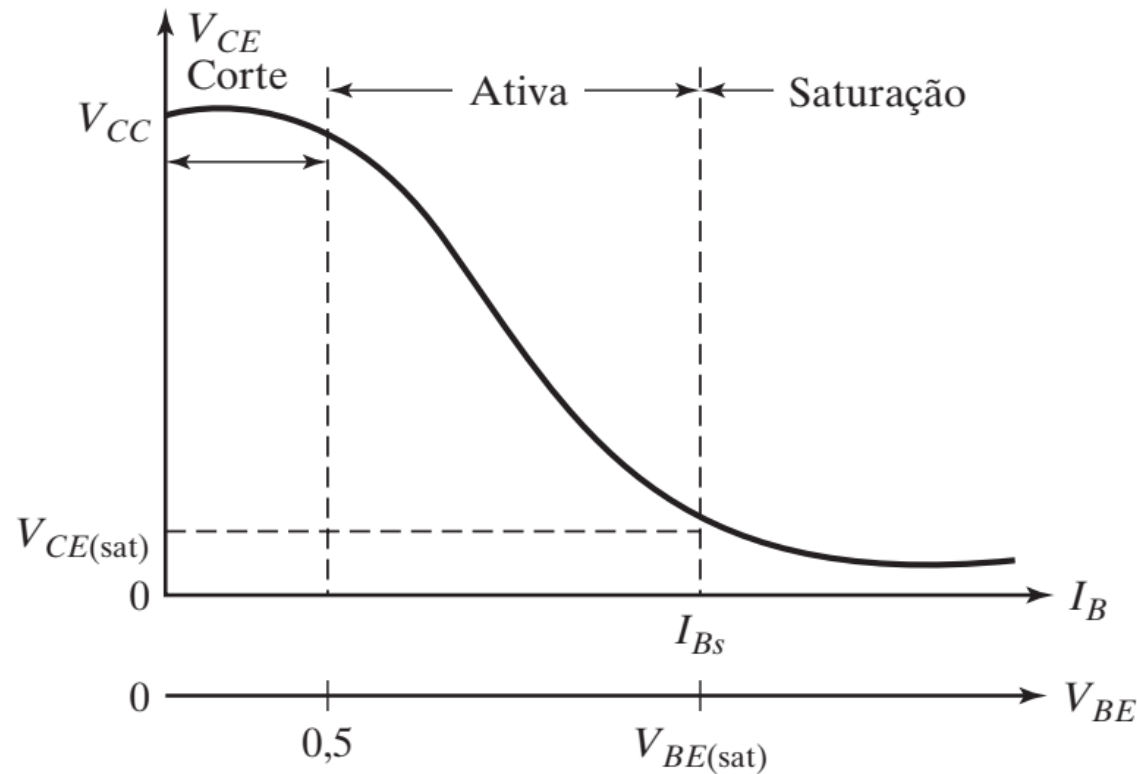
(b) Características de entrada



(c) Características de saída

Característica I – V: TBJ convencional

- ❑ Configuração de emissor comum é mais popular em operação de comutação!



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

Característica I – V: TBJ de potência

❑ Região de quase-saturação!

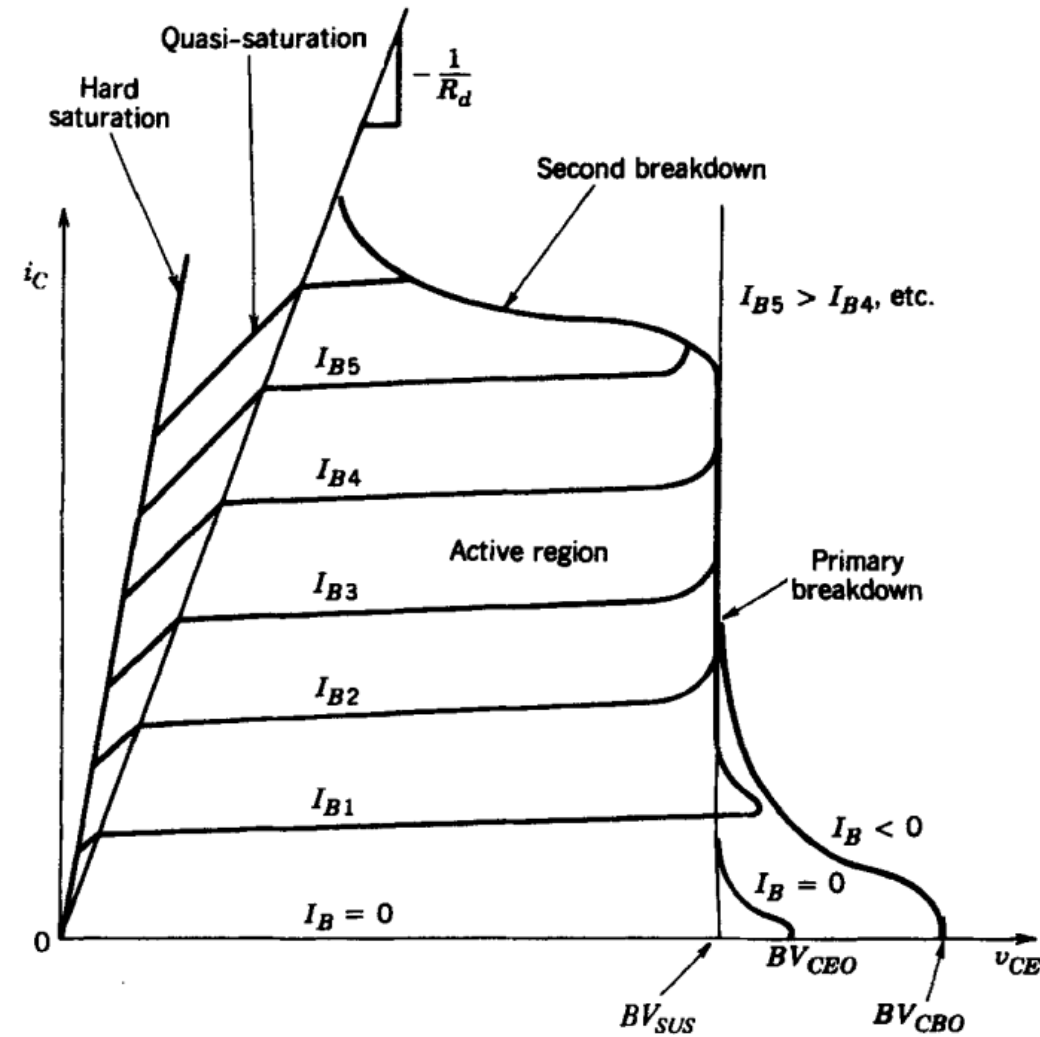


❑ Definição de tensão de bloqueio – mais complexo que no caso do diodo!

❑ Ruptura primária: Associada a junção C-B, similar ao diodo;

❑ Ruptura secundária: mecanismo de falha importante;

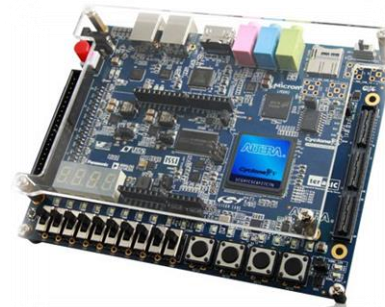
❑ $BV_{CBO} > BV_{CEO}$



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

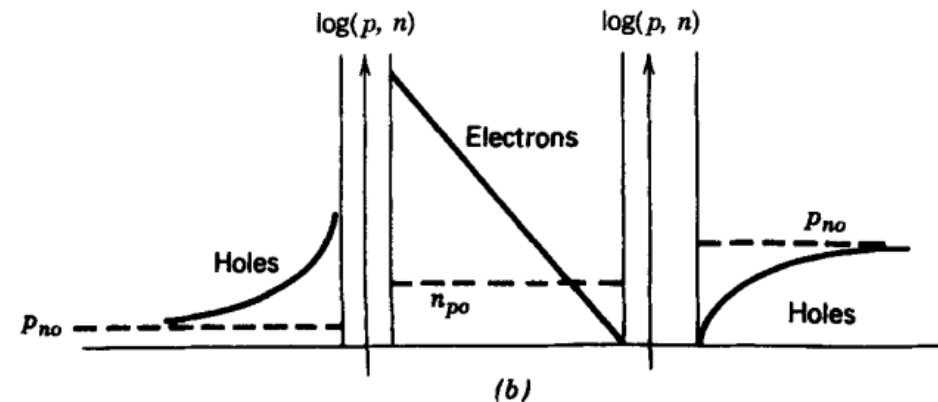
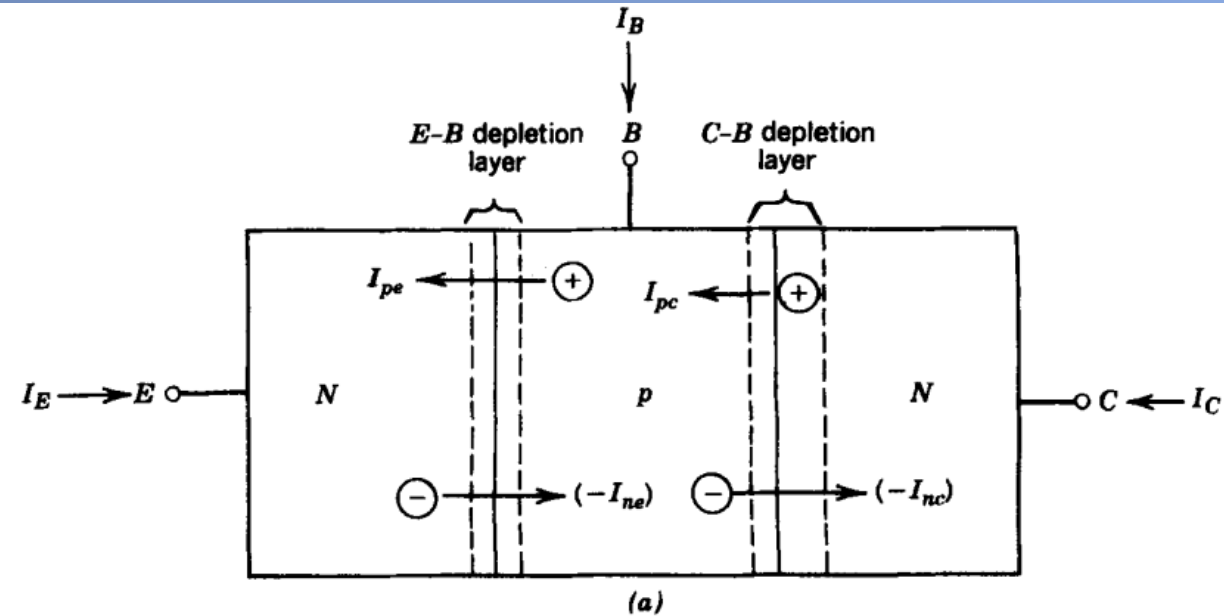


Mecanismo de amplificação e *Trade-off*



Mecanismo básico de amplificação

- ❑ I_{pe} e I_{ne} fluem por difusão (BE diretamente polarizada);
- ❑ I_{pc} e I_{nc} fluem por deriva (BC reversamente polarizada);
- ❑ $I_{ne} \gg I_{pe}$ pois o emissor apresenta maior dopagem;
- ❑ $I_{ne} \approx I_{nc}$ pois:
 - Base muito fina;
 - Área do coletor;
 - Alto gradiente de concentração;
- ❑ $I_{pc} \ll$ que as outras componentes.

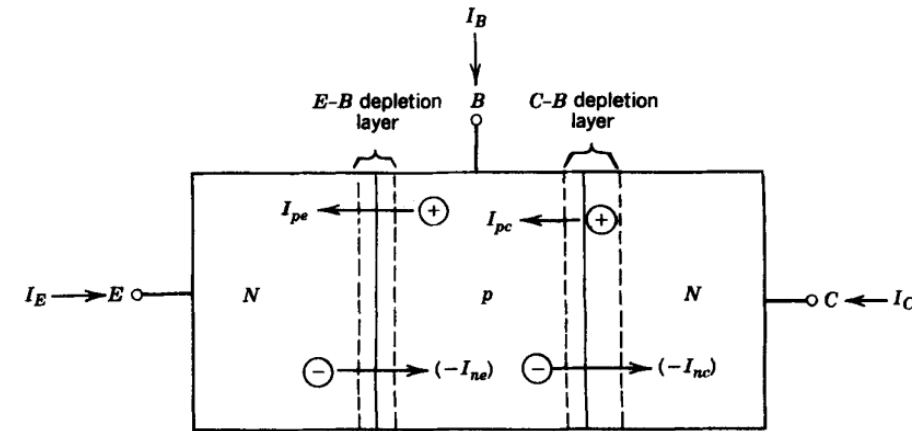


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Ganho β

- A corrente de coletor e emissor são dadas por:

$$I_C = I_{nc} + I_{pc} \approx I_{nc}$$
$$I_E = -I_{pe} - I_{ne}$$



- Assim, a corrente de base será:

$$I_B = -I_E - I_C = I_{pe} + I_{ne} - I_{nc}$$

- Desta forma, pode-se obter que:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{I_B}{I_C} = \frac{I_{ne} - I_{nc}}{I_{ne}} + \frac{I_{pe}}{I_{ne}}$$

Condições para um β elevado

$$\frac{1}{\beta} = \frac{I_B}{I_C} = \frac{I_{ne} - I_{nc}}{I_{ne}} + \frac{I_{pe}}{I_{ne}}$$

- ❑ Reduzir $(I_{ne} - I_{nc})$: Aumentar o tempo de vida dos portadores e diminuir o comprimento da base (menor que o comprimento de difusão $L_n = \sqrt{D_{nb} \tau_{nb}}$).
- ❑ Reduzir $I_{pe} \propto p_0 = \frac{n_i^2}{N_{de}}$: Emissor com dopagem elevada.

Trade-offs

- ❑ A base deve acomodar a região de depleção CB. Portanto, ela não pode ser muito fina em dispositivos que bloqueiam elevada tensão;
- ❑ Um tempo de vida elevado resulta em uma performance ruim durante a comutação;
- ❑ Conclusão → é muito difícil obter um ganho elevado em TBJs de potência;
- ❑ Valores típicos: $5 \leq \beta \leq 20$.

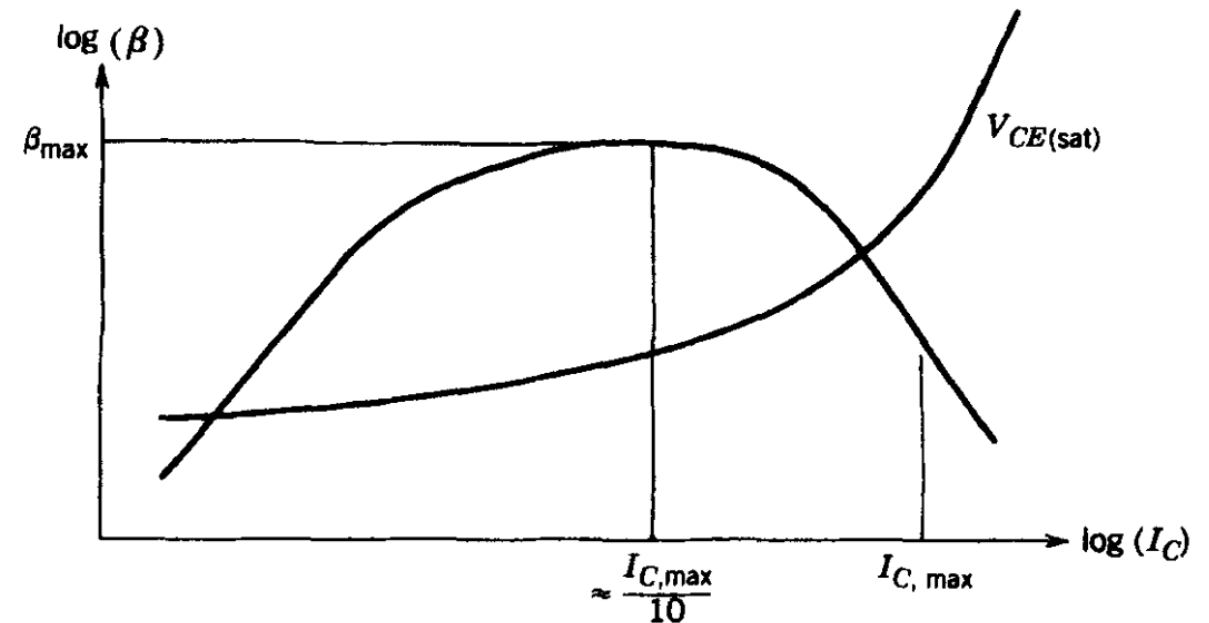
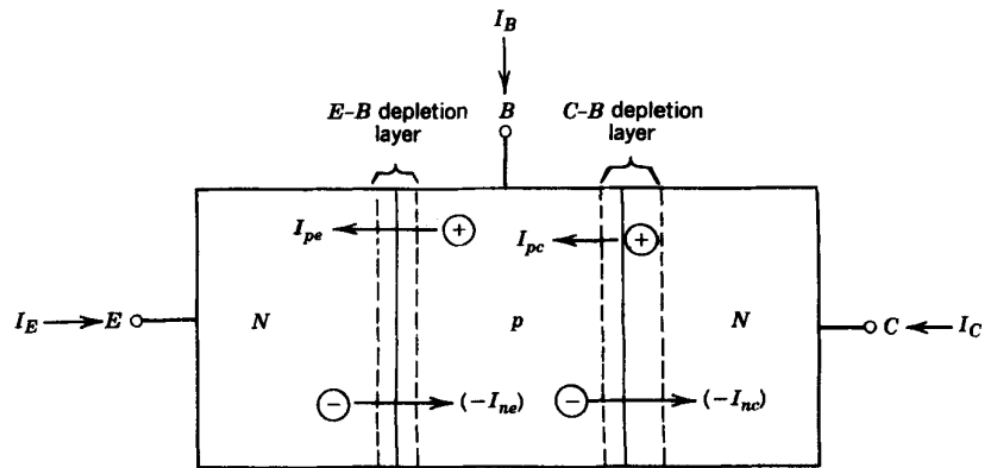
Redução do ganho para altas correntes

□ Mecanismo que não é previsto pela análise anterior e apresenta duas razões:

1) Modulação de condutividade da base

➤ Cenário de alta injeção

➤ Requer maior injeção de lacunas → aumento da corrente de base!

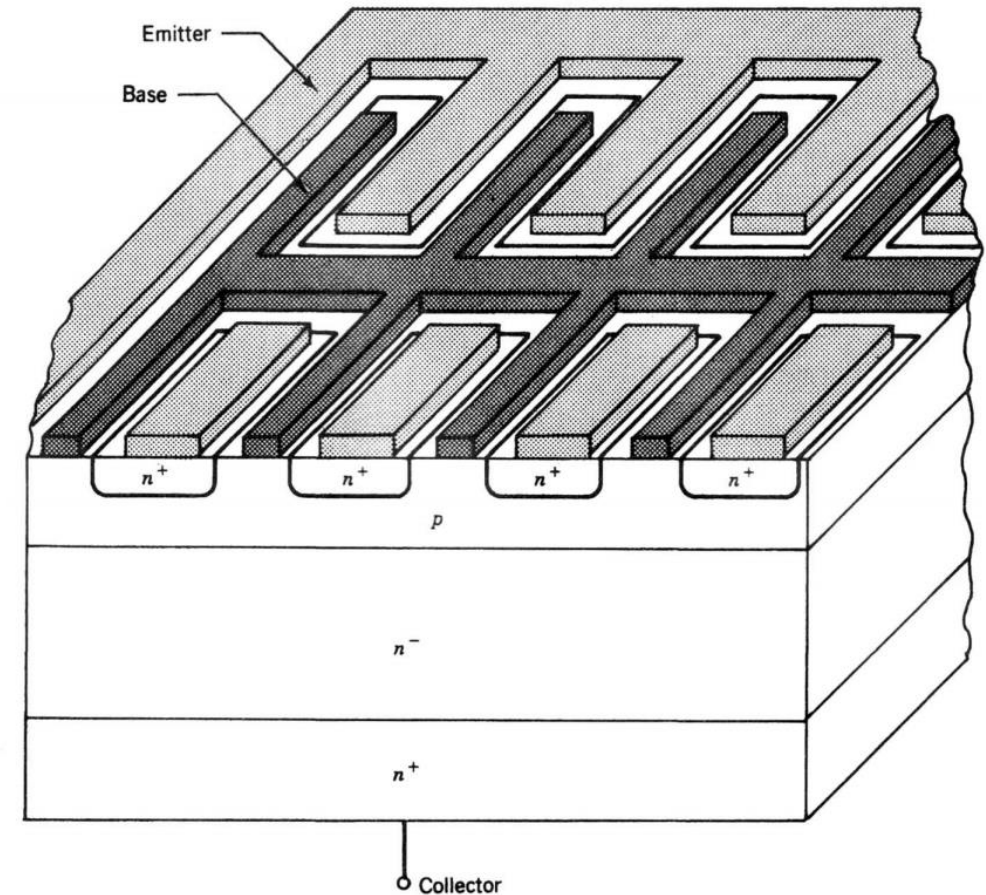
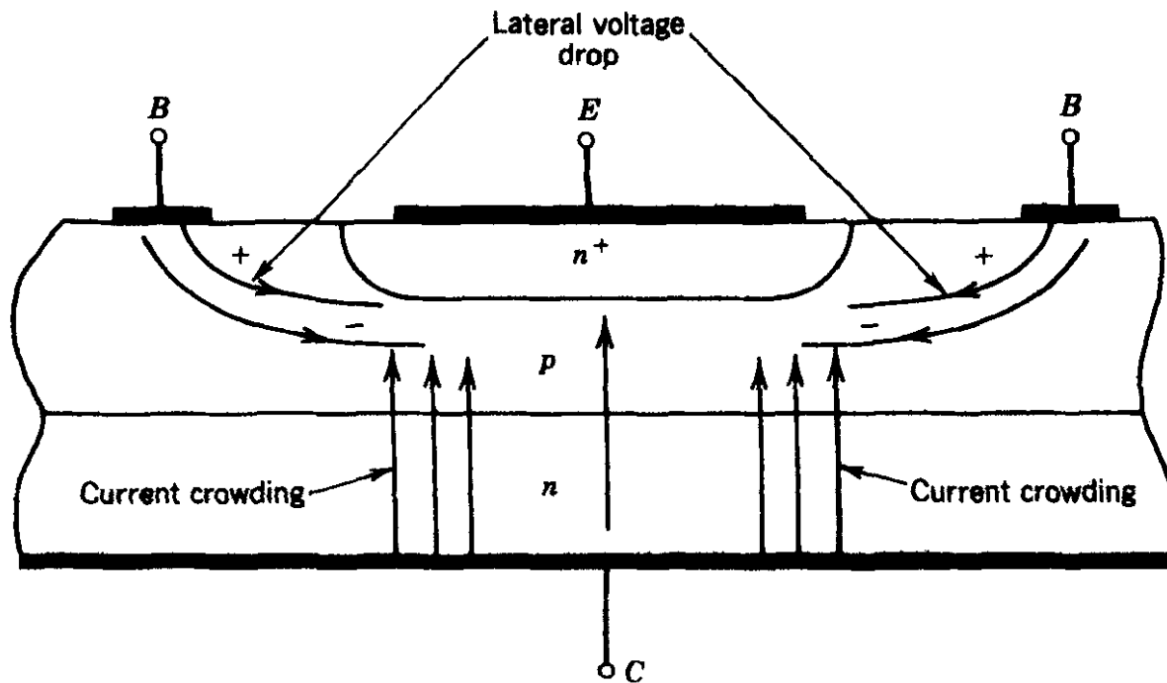


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Redução do ganho para altas correntes

2) Current crowding

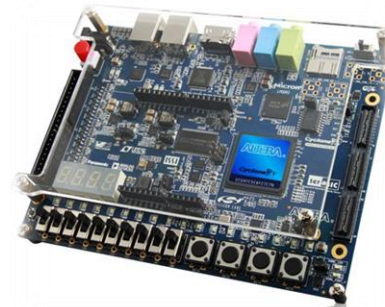
- Distribuição não uniforme de correntes;
- Resulta em alta injeção para correntes modestas;
- Solução: vários terminais de emissor estreitos!



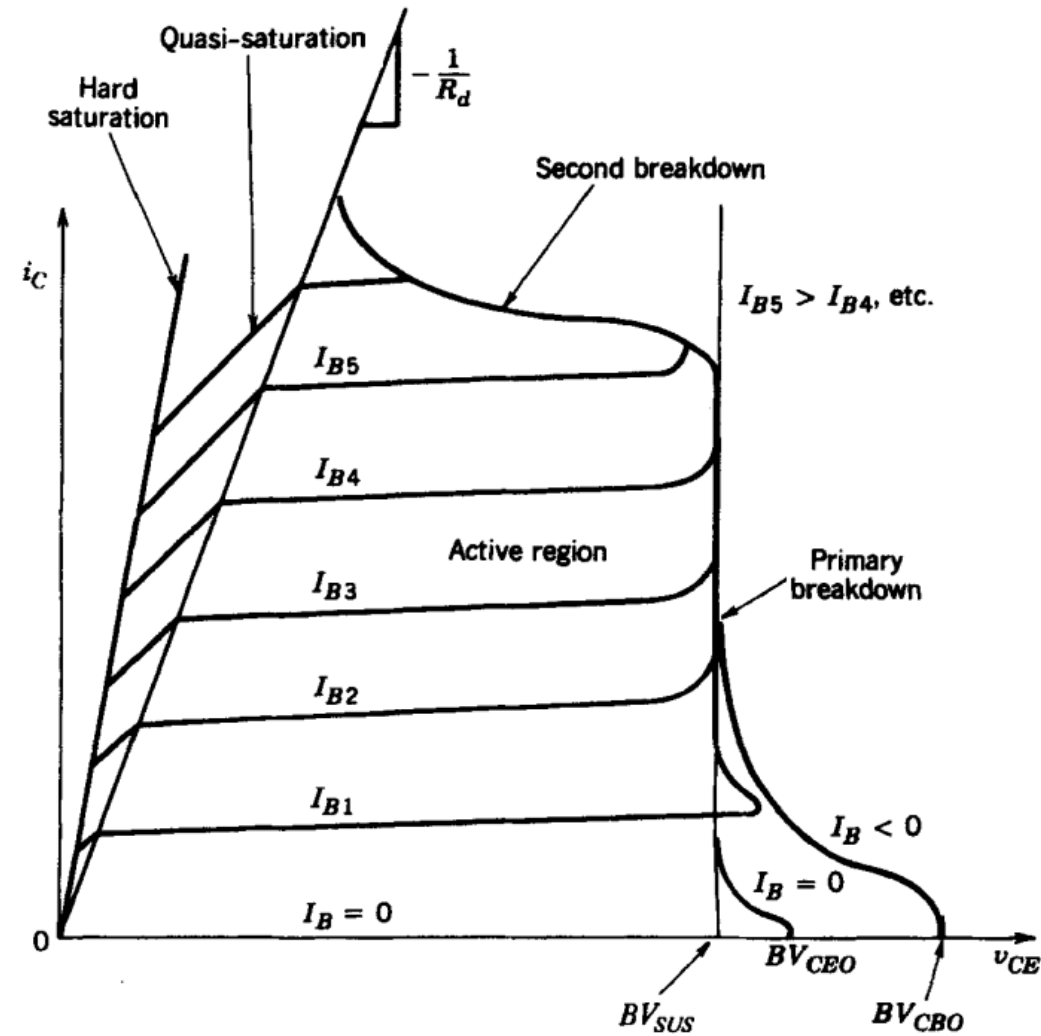
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.



Região de quase-saturação



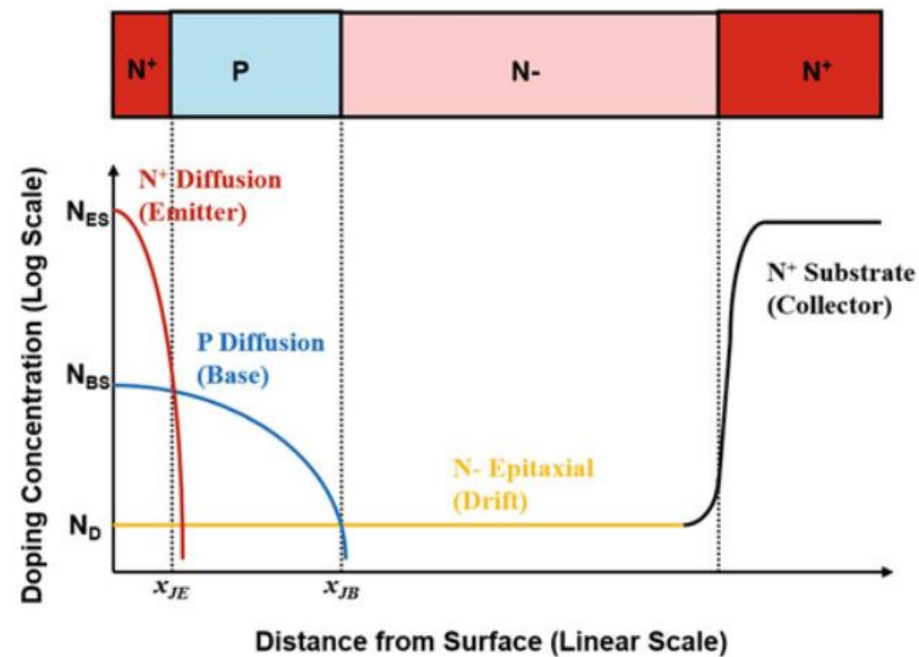
Quase saturação



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

Quase saturação

- ❑ Característica de transistor de potência;
- ❑ Resultado da camada de deriva N^- utilizada para aumentar a capacidade de bloqueio do transistor.



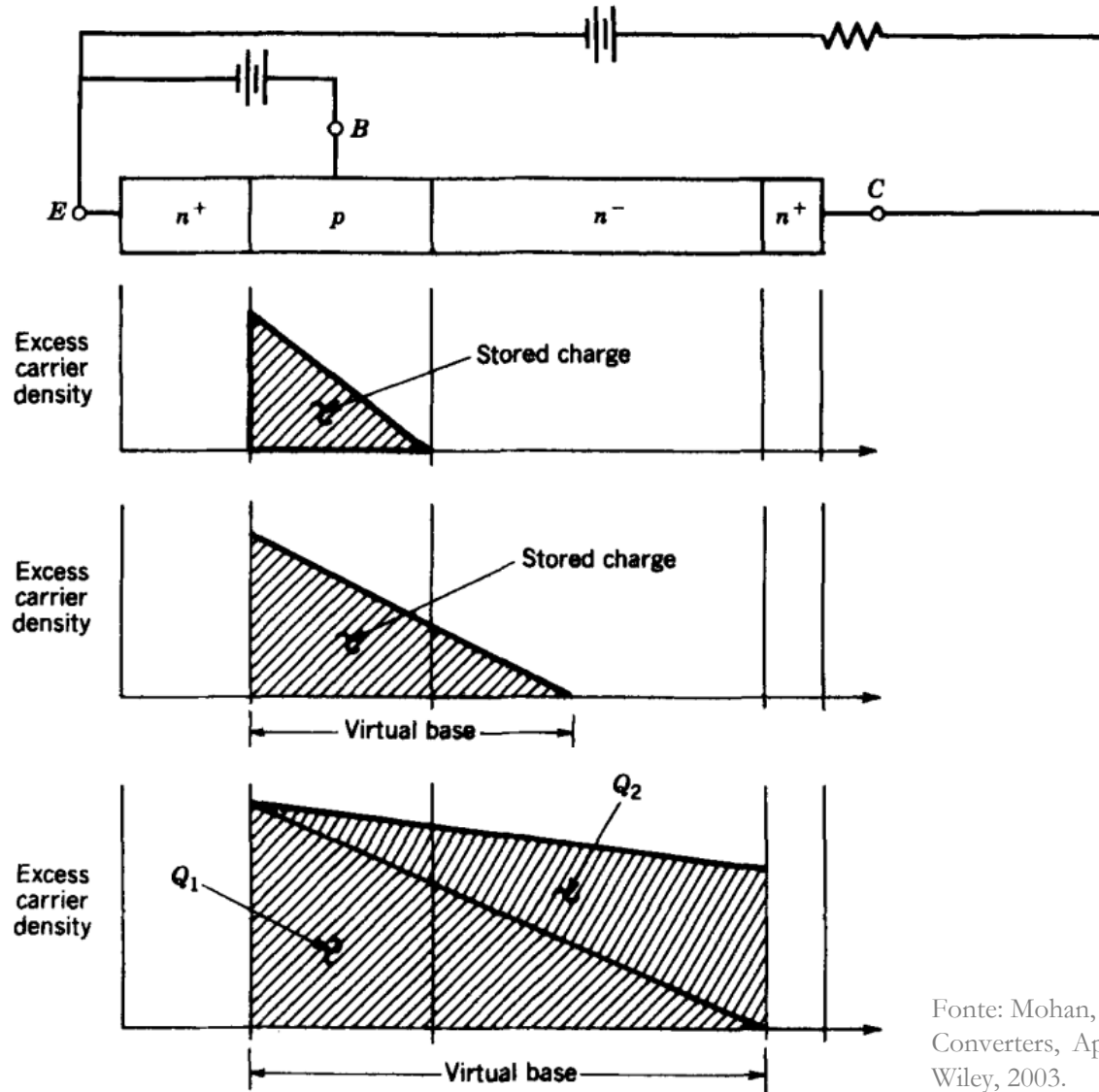
Fonte: Baliga, B. J. "Fundamentals of Semiconductor Devices", Springer.

Quase saturação

Região ativa;

Região de quase saturação;

Região de saturação.



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

Quase saturação

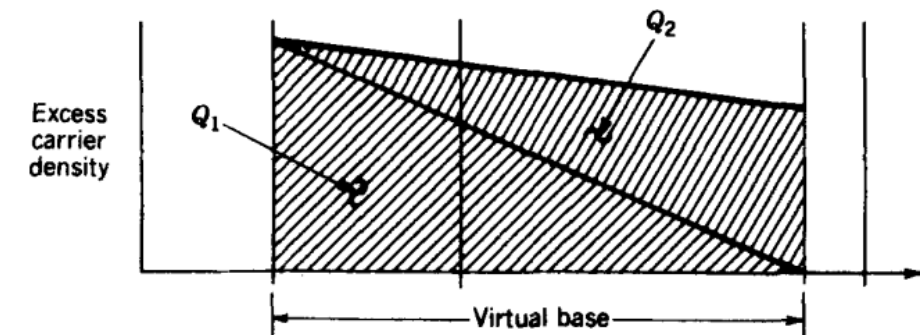
- ❑ Transistor inicialmente na região ativa;
- ❑ Aumenta-se a corrente de base $\rightarrow v_{ce}$ reduz e a queda de tensão na região de deriva aumenta (por quê?);
- ❑ Isto leva a redução da região de depleção CB ao ponto que esta junção entra em condução;
- ❑ Neste caso, acontece dupla injeção na camada N^- ;
- ❑ É importante notar que existe uma maior densidade de portadores do lado da base, visto que uma grande parcela de elétrons é injetada pelo emissor.

Quase saturação e saturação

- ❑ Note um aumento efetivo do comprimento da base, que reduz o valor de β .
- ❑ Além disso, o limite entre a região ativa e a região de quase saturação depende da resistência elétrica da camada de deriva:

$$i_c = \frac{v_{ce}}{R_d}$$

- ❑ Quando a carga atinge a região N^+ temos a região de saturação;
- ❑ Para tal, uma carga mínima armazenada é necessária;
- ❑ Qual a vantagem da região de saturação?



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

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



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



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



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



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



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

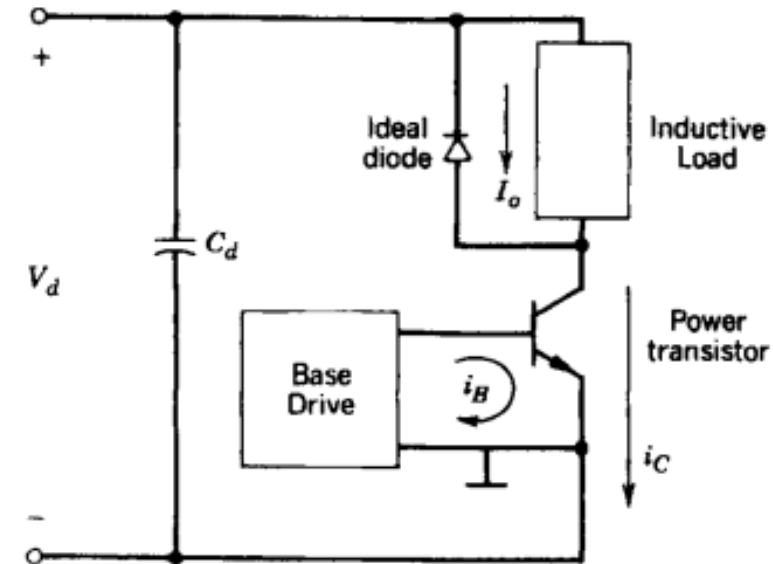


Características de comutação



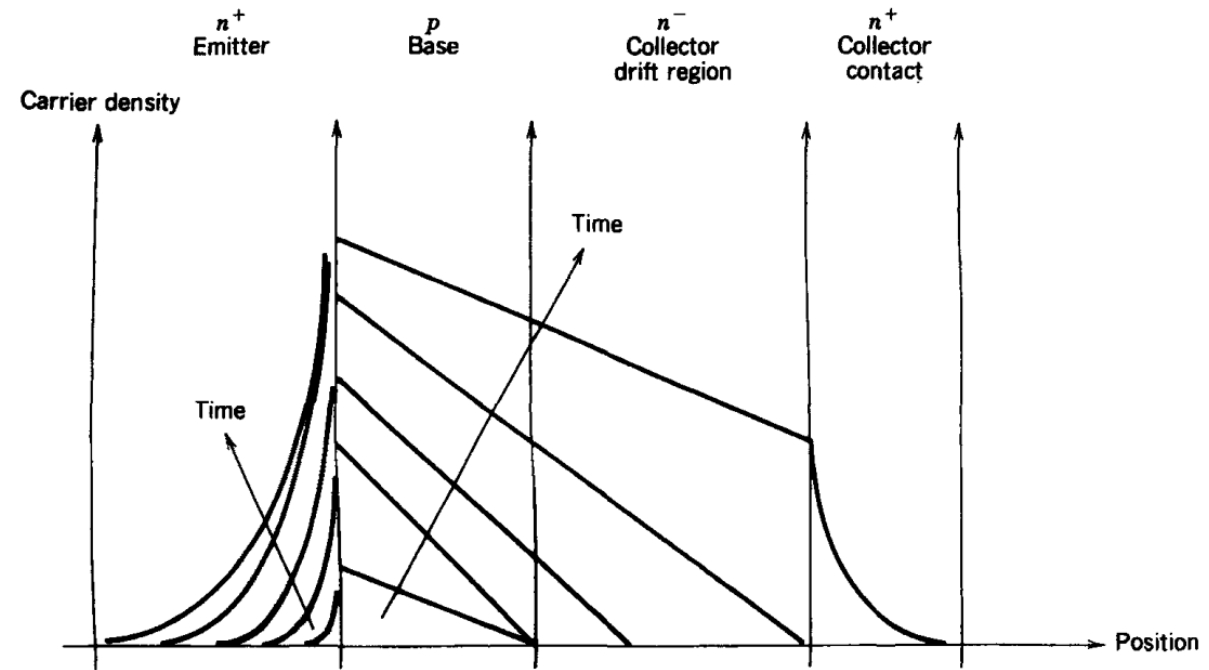
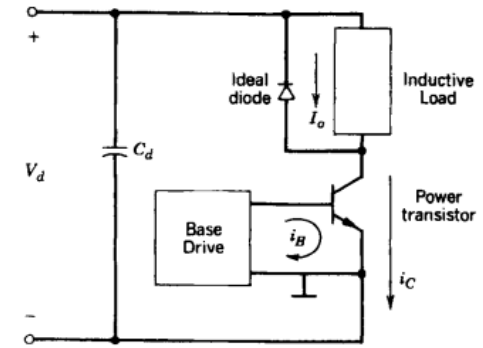
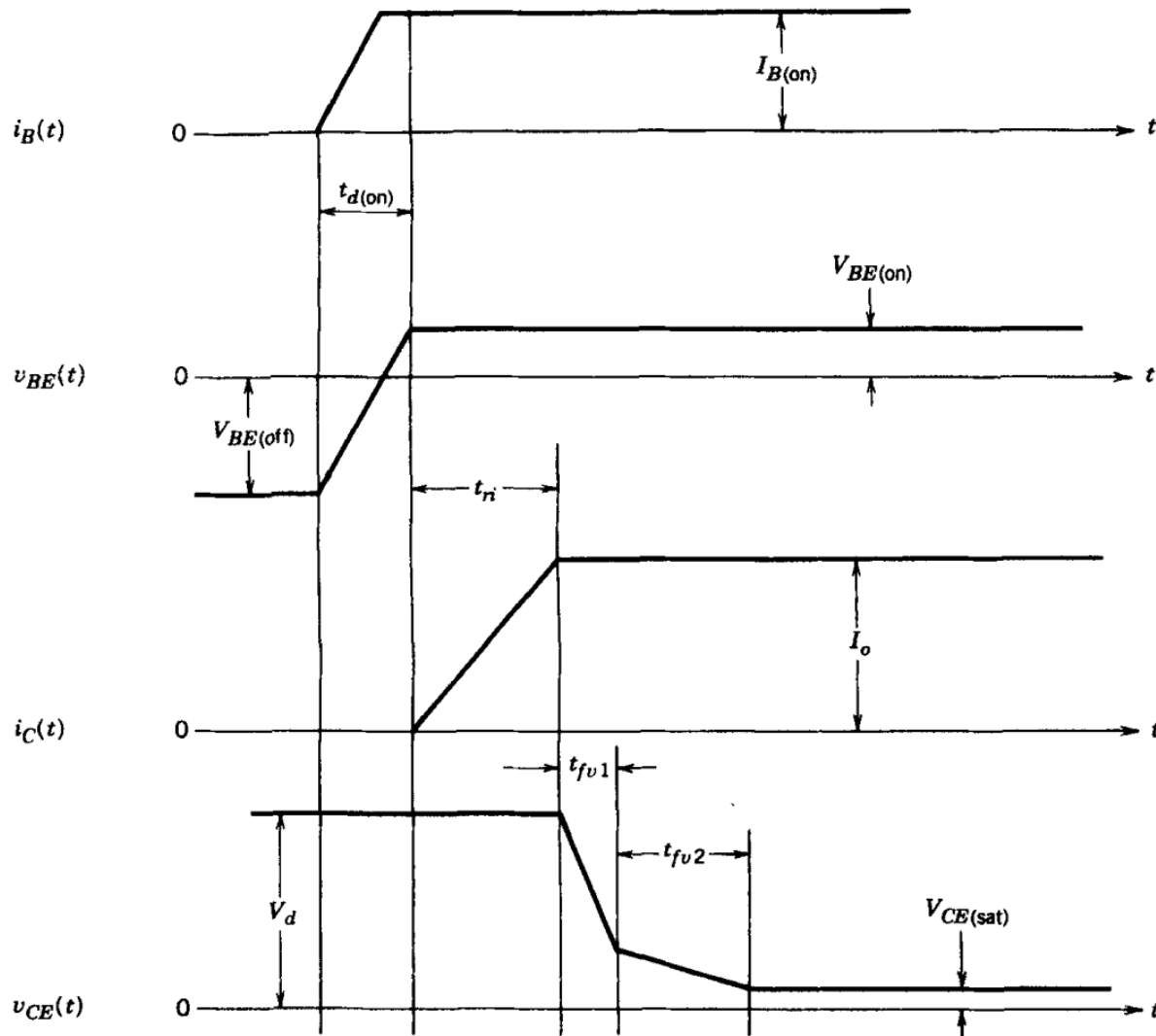
Transitórios de comutação

- ❑ Os transitórios de comutação de transistores serão avaliados a partir de um circuito com carga indutiva e um diodo de roda livre;
- ❑ Este circuito emula o comportamento de diversas topologias de conversores que empregam transistores de potência e são largamente utilizados;
- ❑ Corrente de base positiva → transistor liga → saturação;
- ❑ Corrente de base negativa → transistor desliga → bloqueio.



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

Transitório de *turn-on*

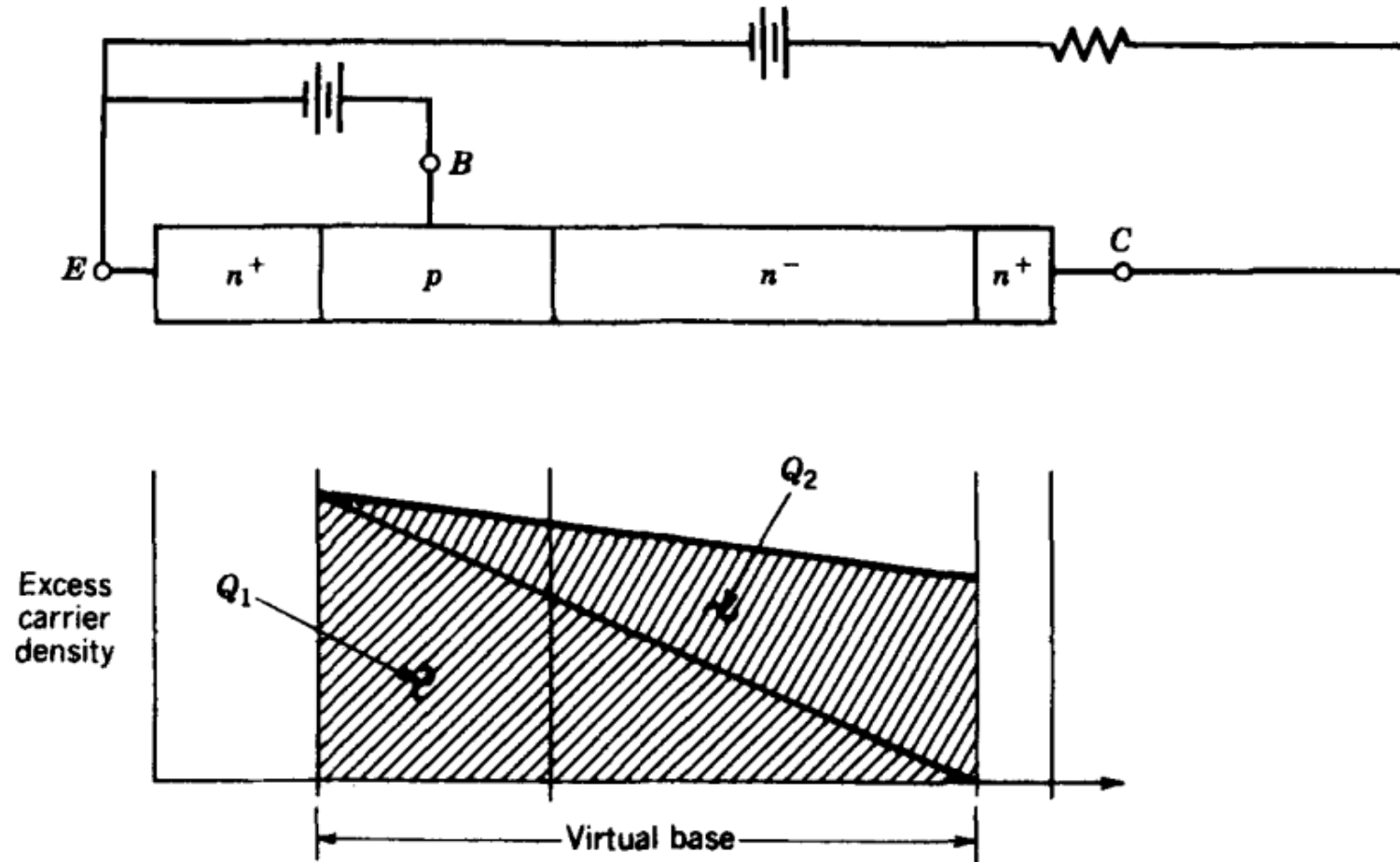


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Transitórios de comutação

- ❑ Tempo $t_{d(on)}$: Descarga da capacitância da junção BE reversamente polarizada;
- ❑ Tempo t_{ri} : tempo de subida da corrente (transistor ainda na região ativa);
- ❑ Tempo t_{fv1} : a tensão v_{ce} cai visto que o diodo de roda livre deixa de conduzir;
- ❑ t_{fv2} : região de quase-saturação → mudança da taxa de variação da tensão por causa da mudança do β ;
- ❑ Depois de t_{fv2} o transistor atinge a saturação;
- ❑ É importante notar que o valor de corrente de base afeta a velocidade de comutação. Desta forma, muitas vezes um fator de saturação forçada ou Overdrive é utilizado.

Overdrive



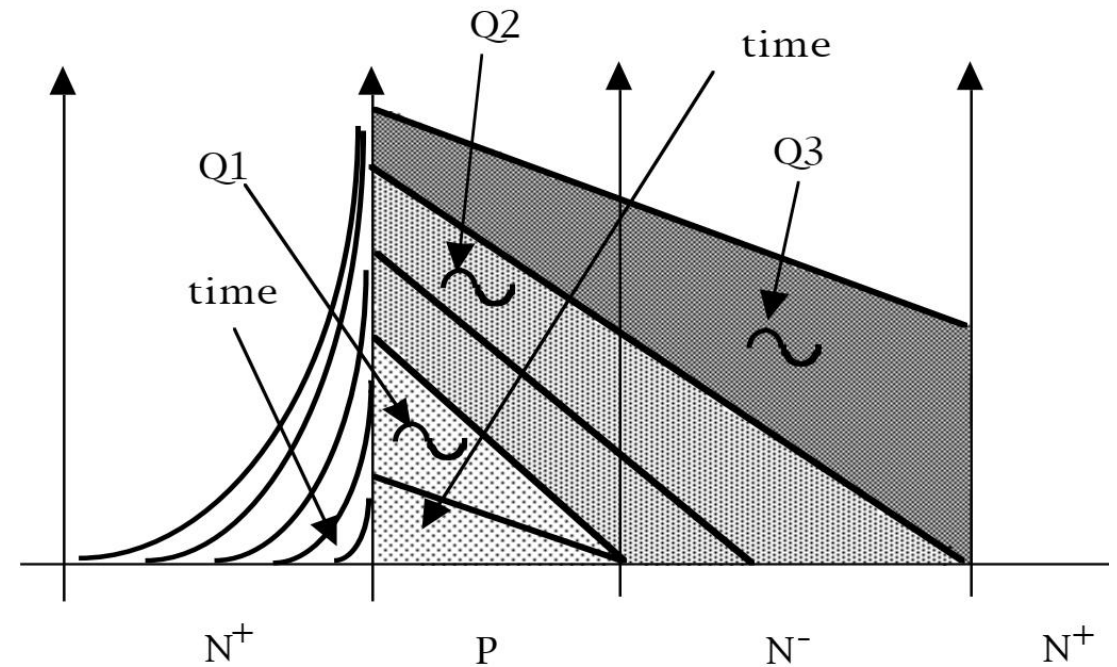
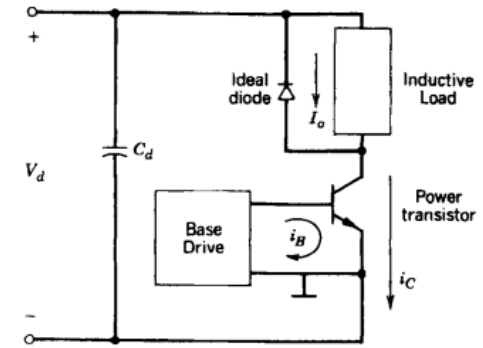
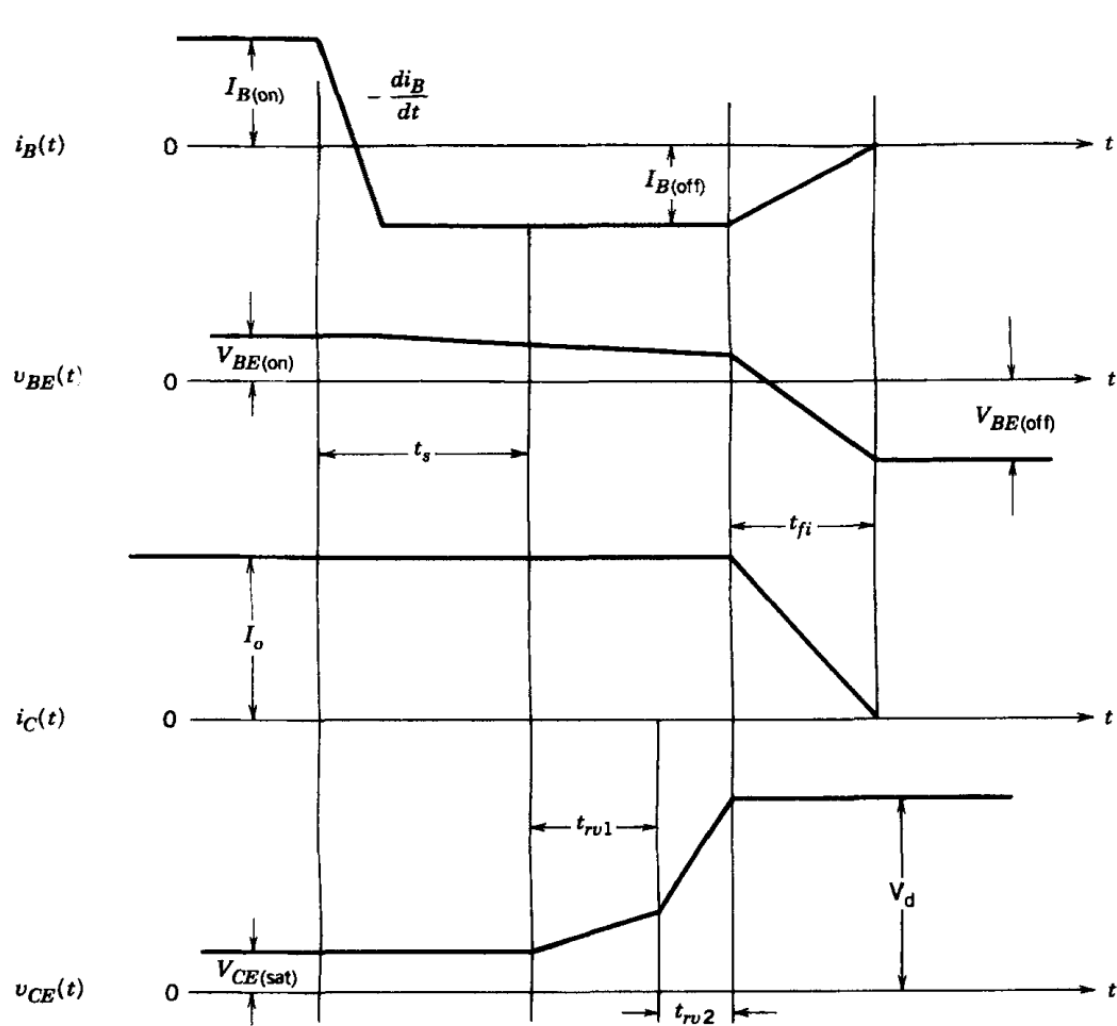
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Transitório de *turn-off*

- ❑ Poderia ser obtido reduzindo a corrente de base para zero;
- ❑ Problema: a carga armazenada no transistor deve ser eliminada;
- ❑ Considerar apenas o mecanismo de recombinação resulta em tempos longos de comutação e elevadas perdas;
- ❑ Portanto, é comum utilizar uma corrente negativa na base de forma a acelerar o processo de eliminação de portadores de carga;
- ❑ Taxa de variação da corrente de base deve ser controlada para minimizar t_{off} .

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

Transitório de *turn-off*



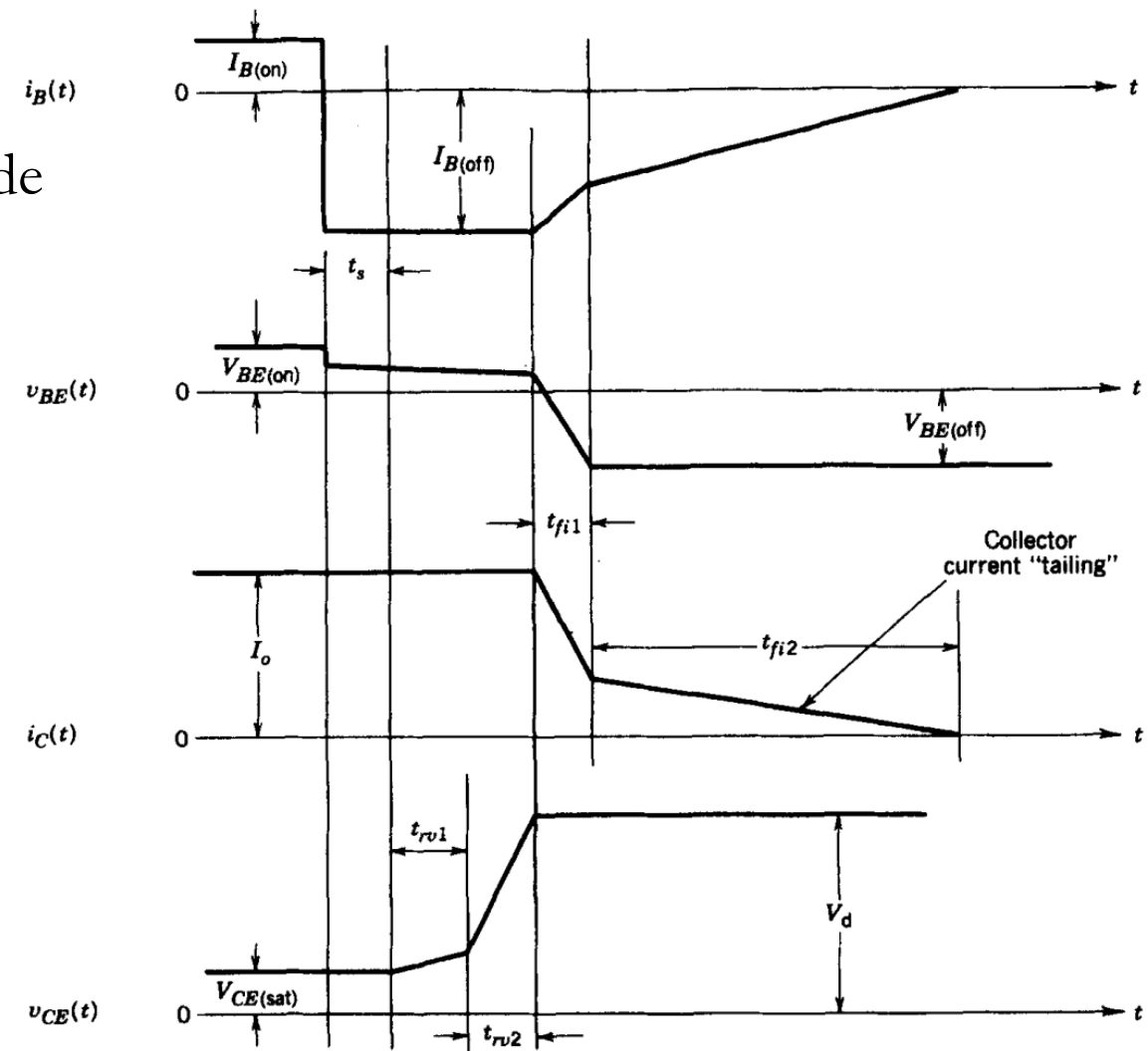
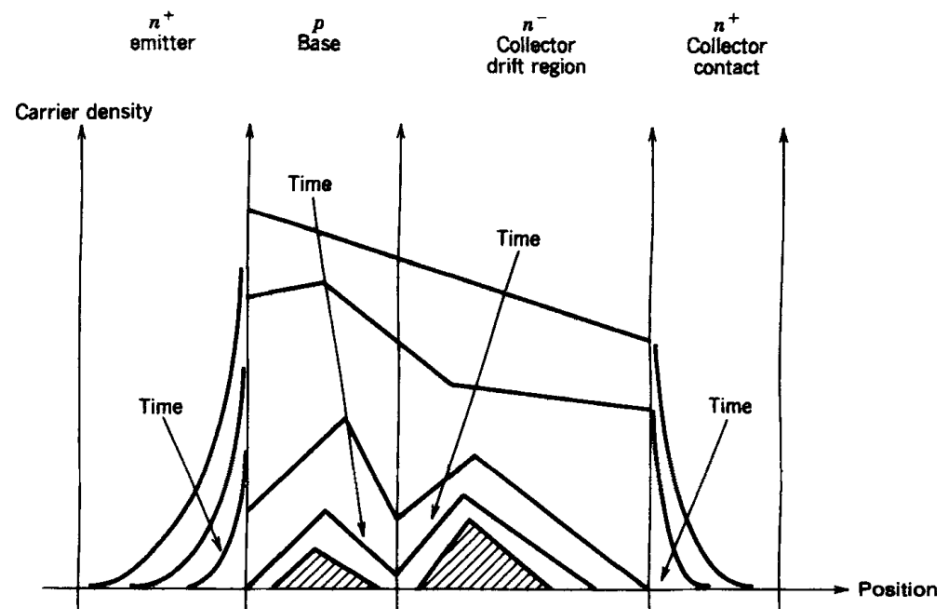
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Transitórios de comutação

- ❑ Tempo t_s : Tempo necessário para remover a carga equivalente ao Overdrive → tempo para remover Q_3 ;
- ❑ Tempo t_{fv1} : região de quase-saturação → derivada baixa (baixo β) → tempo para remover Q_2 ;
- ❑ t_{fv2} : região ativa → alta taxa de variação: Tempo necessário para v_{CE} atingir v_d ;
- ❑ t_{fi} : tempo para remover a carga Q_1 .

Desligamento sem controle de corrente de base

- ❑ Carga remanescente na região de deriva;
- ❑ Eliminada por recombinação e corrente de base negativa;
- ❑ Resulta na calda e elevadas perdas;

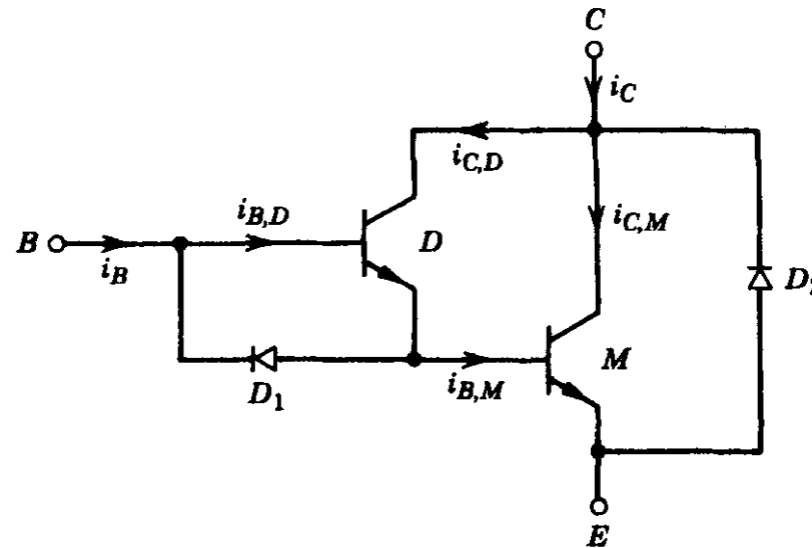


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Transitório de comutação de transistores Darlington

Apresenta duas diferenças durante o turn-on quando comparado a um transistor individual:

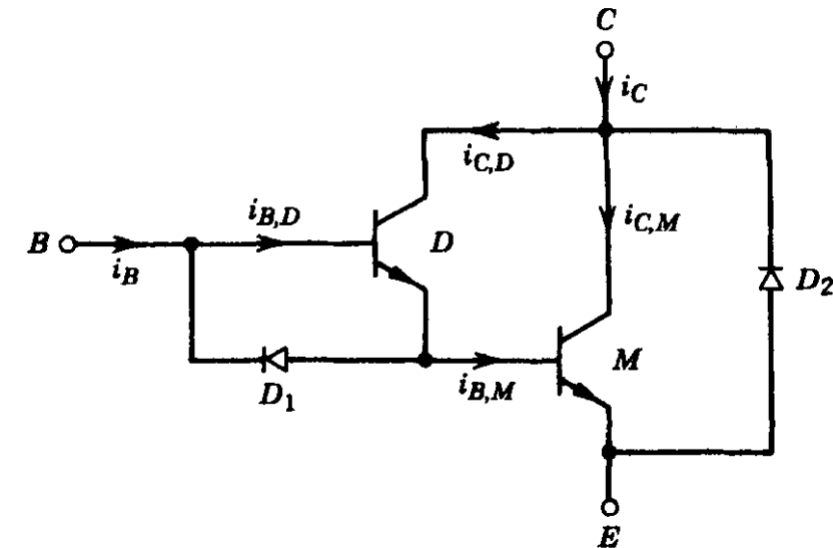
- ❑ O transistor D pode operar na região de quase-saturação visto que sua tensão v_{CE} é a tensão v_{CB} do transistor principal;
- ❑ O tempo é menor, visto que o transistor principal é acionado com uma corrente maior.



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

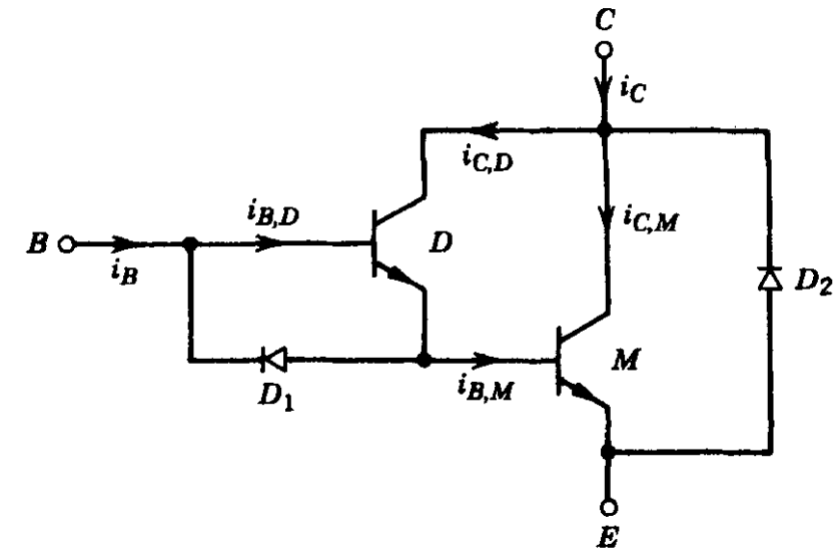
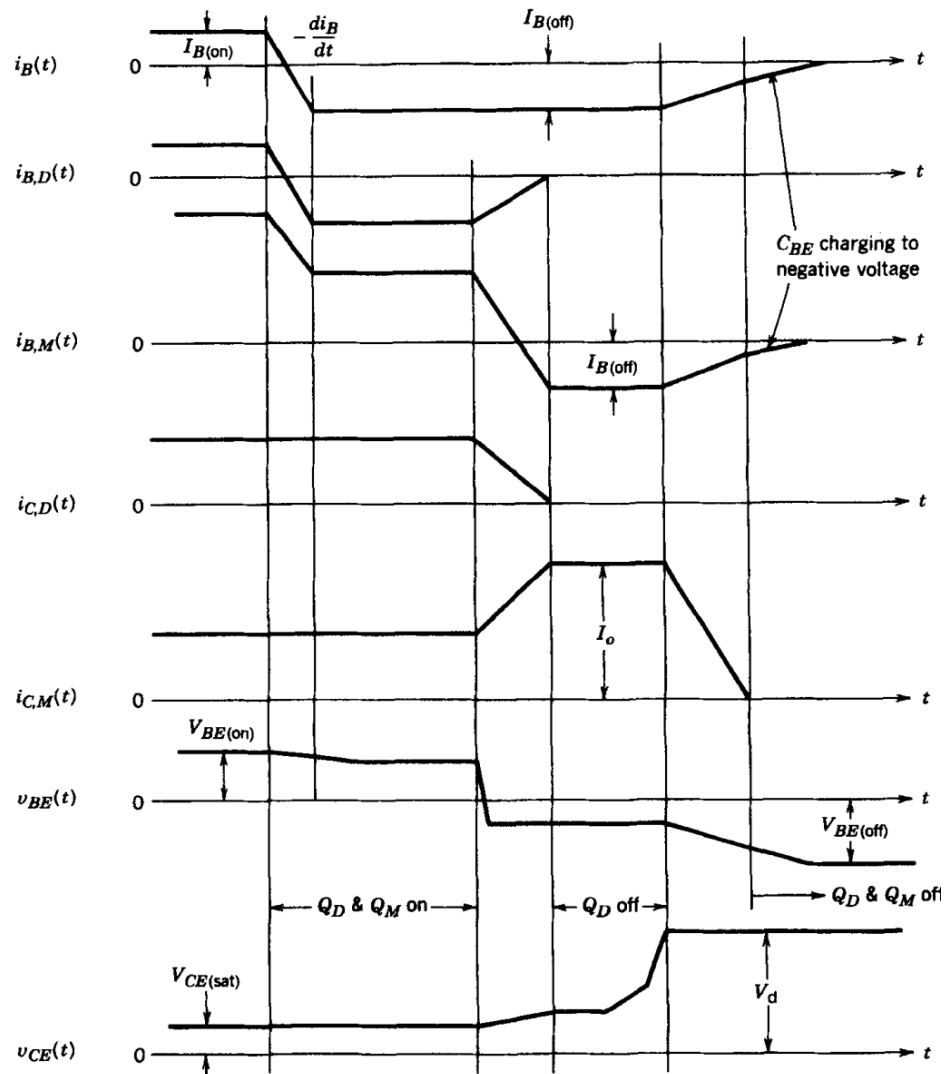
Transitório de comutação de transistores Darlington

- ❑ Durante o desligamento, a situação é diferente;
- ❑ Primeiramente, a corrente de base negativa desliga o transistor D ;
- ❑ Um aumento na corrente de coletor é observado no transistor M ;
- ❑ Em seguida ocorre o desligamento do segundo transistor;
- ❑ Controle de corrente de base é importante;
- ❑ Diodo D_1 : Elemento fundamental!



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

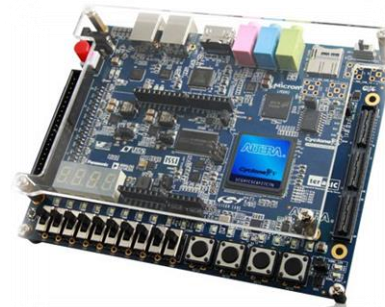
Comportamento da distribuição de carga



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



Limites



Tensão de ruptura

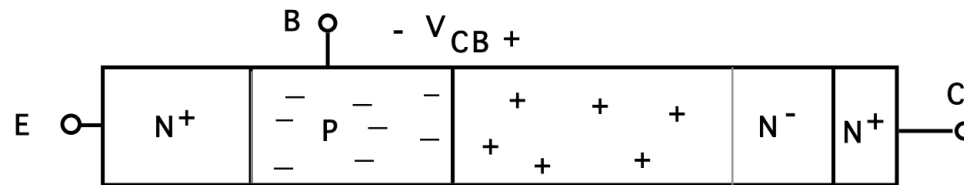
- ❑ Limitada pela junção BC;
- ❑ Isto acontece porque o emissor apresenta uma elevada dopagem ($BV_{BE} \approx 5 - 20 \text{ V}$);
- ❑ Além disso,

$$BV_{CEO} = \frac{BV_{CBO}}{\beta^{\frac{1}{n}}}$$

$n = 4$ para NPN e $n = 6$ para PNP;

Soluções:

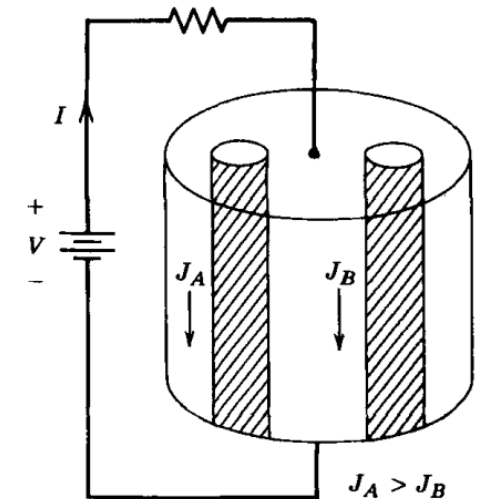
- Aumentar o comprimento da base;
- Região fracamente dopada que garante que a maior parte da região de depleção se encontra no lado do coletor.



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


Ruptura secundária

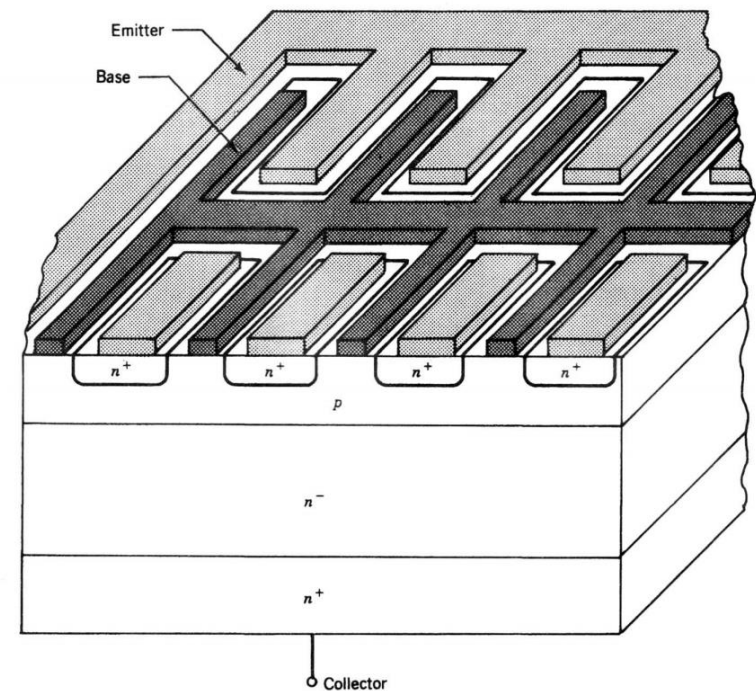
- ❑ Relacionado com a distribuição não uniforme de corrente no interior do dispositivo;
- ❑ Dispositivos baseados em portadores minoritários → susceptíveis;
- ❑ Resistividade diminui com o aumento da temperatura;
- ❑ Pontos quentes tendem a conduzir mais corrente (pode ser instável → avalanche térmica);
- ❑ Deve-se lembrar que durante a comutação o dispositivo está submetido a altos valores de tensão e corrente!



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

Pontos chave para evitar a ruptura secundária

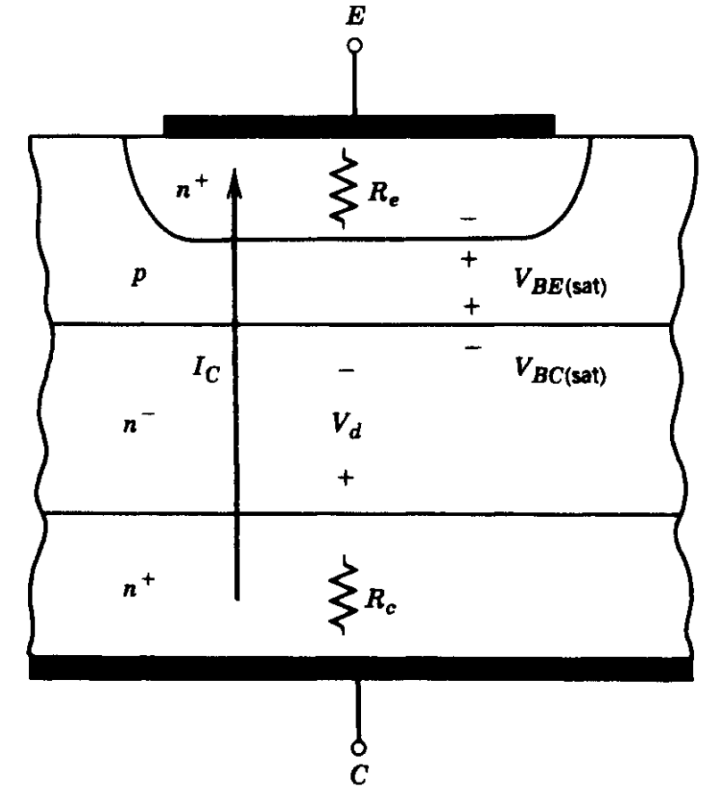
- ❑ Manter as perdas de potência sob controle;
- ❑ Evitar situações que causem distribuição não uniforme de corrente no dispositivo;
- ❑ Utilização de circuitos snubber;
- ❑ Região de operação segura! 



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

Perdas de condução

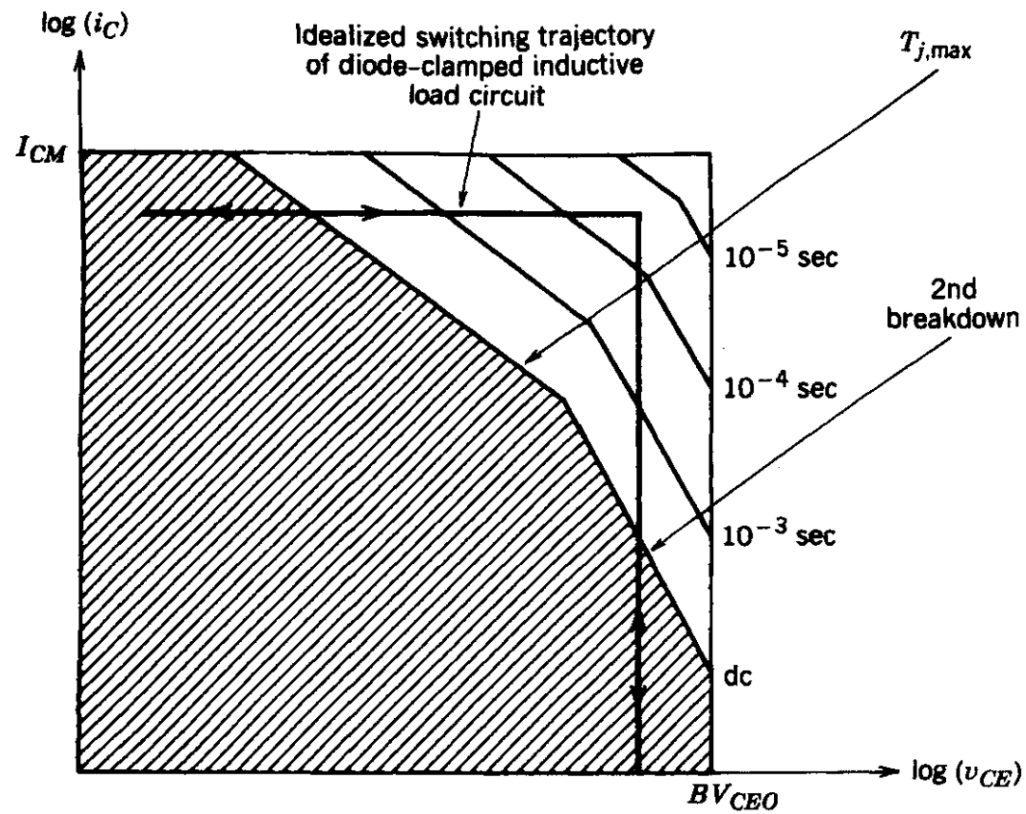
- ❑ Trade-off similar aos diodos PIN, visto que é um dispositivo bipolar;
- ❑ Contudo, menores densidades de corrente para a mesma tensão de bloqueio são empregadas;
- ❑ Isto ocorre devido a redução do β com o aumento de I_C .



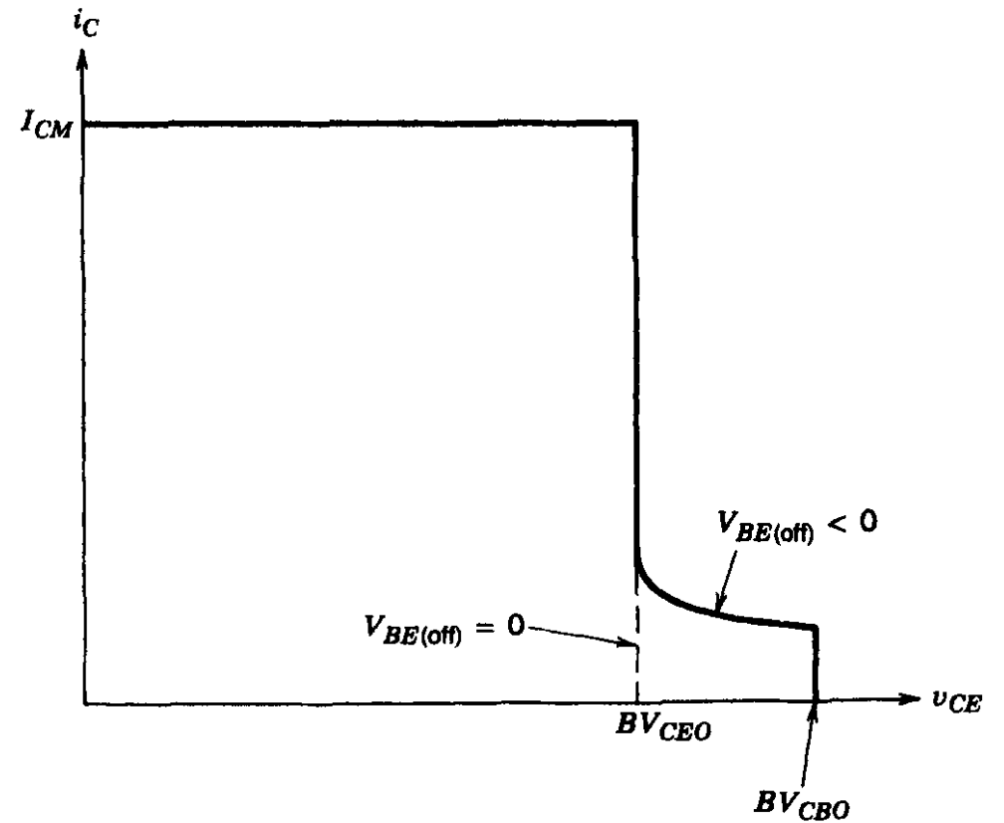
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

Área de operação segura

Forward-bias SOA



Reverse-bias SOA



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

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



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



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



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



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



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