

# Aula 7: Transistores de Potência - IGBT

Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



# Sumário

---

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



# Introdução



# História e curiosidades

- ❑ Anos 60 → retificadores controlados baseados em tiristores tornaram-se populares;
- ❑ Anos 70 → PWM → necessidade de controlar o desligamento;
- ❑ GTO foi desenvolvido (alta capacidade de bloqueio de tensão e corrente).
- ❑ TBJ de potência Conexão Darlington;
- ❑ Evolução da tecnologia de encapsulamento → módulo de potência;
- ❑ TBJ de potência se tornou popular;



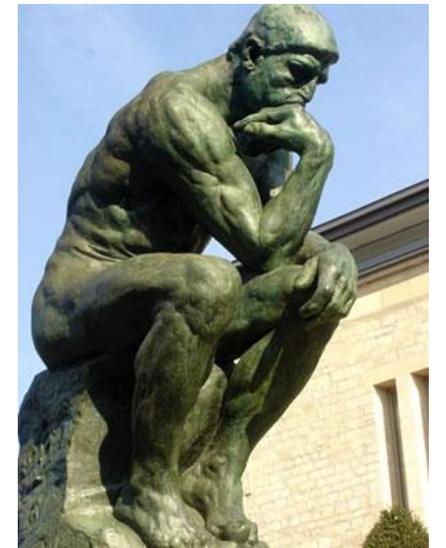
# História e curiosidades

- ❑ MOSFET de potência disponível na década de 70 → fontes chaveadas;
- ❑ Década de 80: GTO e TBJ ainda eram populares;
- ❑ Comutação em alta frequência não era possível em alta potência;
- ❑ MOSFET: Muito atrativo devido a baixa potência do circuito de acionamento;
- ❑ MOSFET: aumento expressivo da resistência com a tensão de bloqueio.

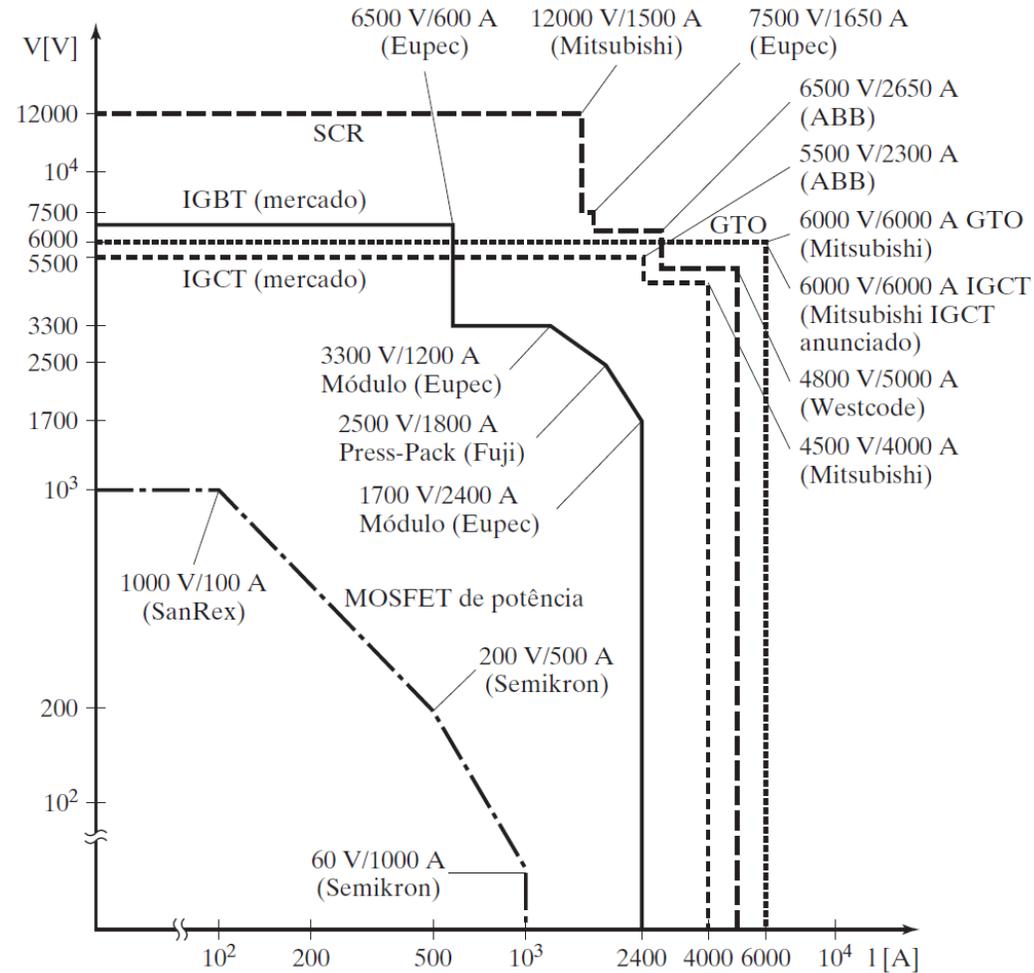


# História e curiosidades

- ❑ Seria possível combinar as melhores características do MOSFET e do TBJ em uma única estrutura?
- ❑ Seria possível conseguir modulação de condutividade em um transistor de efeito de campo?
- ❑ A resposta para estas perguntas culminou no IGBT moderno!



# Comparativo – Tecnologias de dispositivos



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

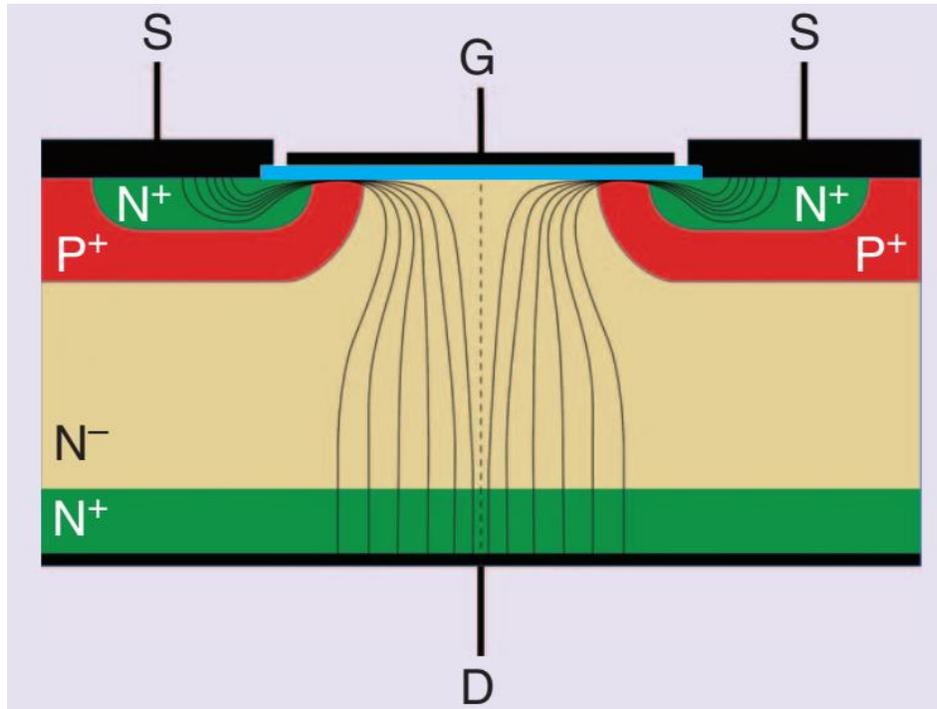


## Estrutura interna

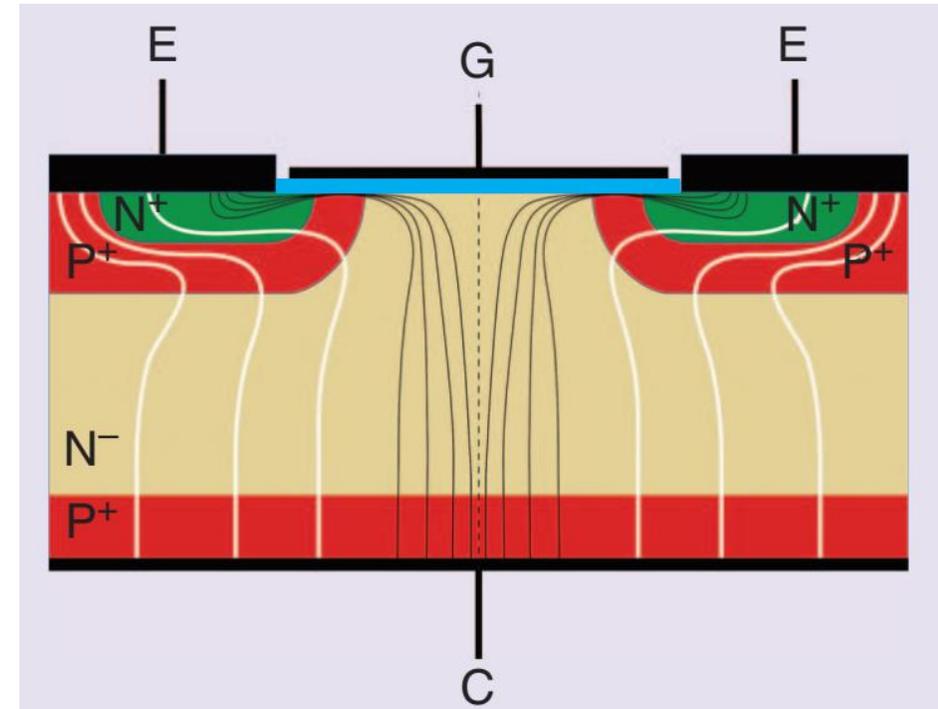


# Estrutura interna

MOSFET



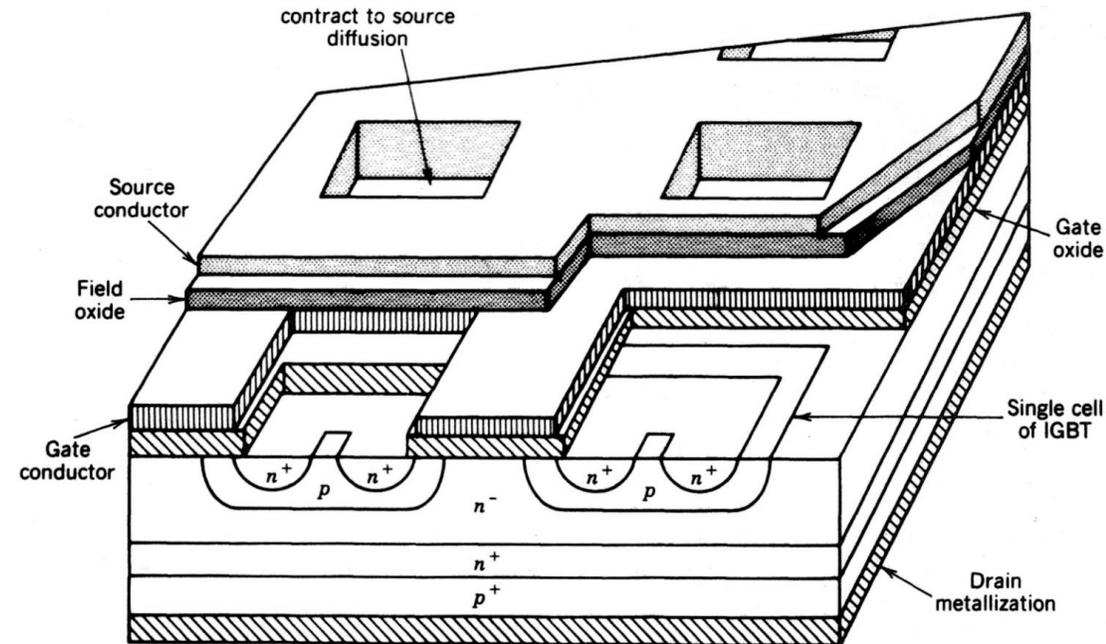
IGBT



Fonte: F. Iannuzzo, C. Abbate and G. Busatto, "Instabilities in Silicon Power Devices: A Review of Failure Mechanisms in Modern Power Devices," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 3, pp. 28-39, Sept. 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2305758.

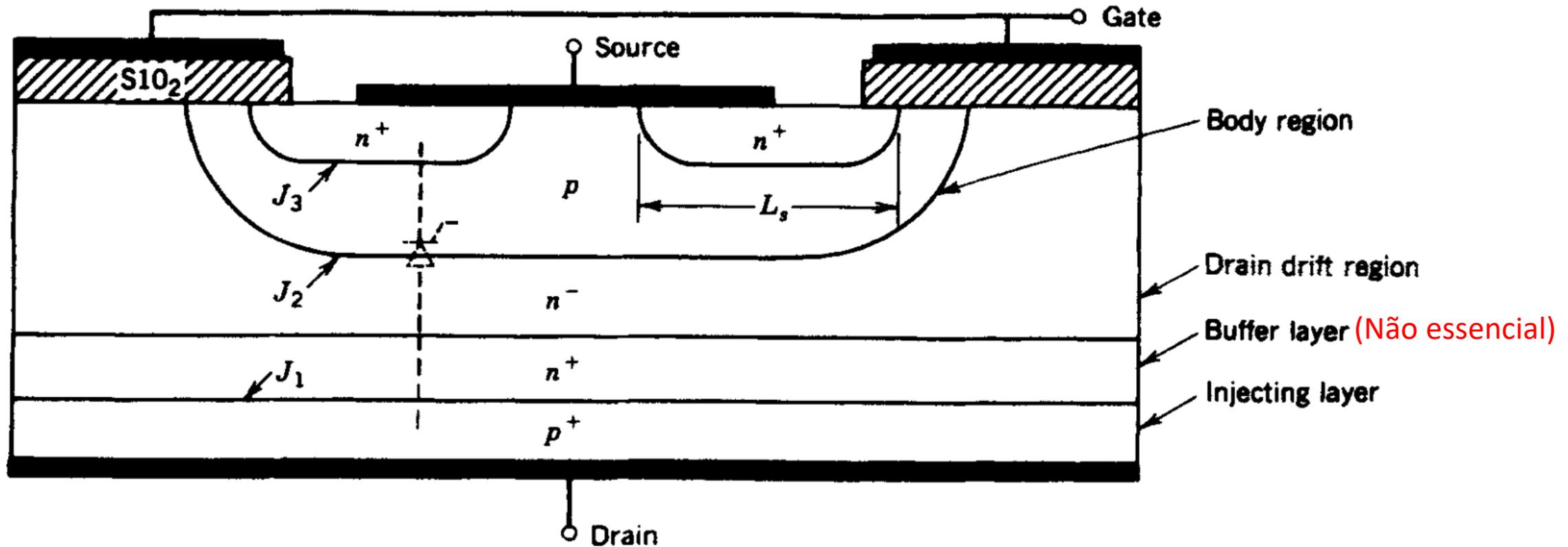
# Estrutura detalhada

- ❑ Similar ao VDMOS;
- ❑ Novidade: Camada  $P^+$ ;
- ❑ Concentrações de dopagem típicas:
  - $n^+$  → aproximadamente  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;
  - $p^+$  → aproximadamente  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ;
  - $n^-$  → entre  $10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ;
  - região  $n^-$  → define a tensão de ruptura;



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

# Estrutura interna – IGBT

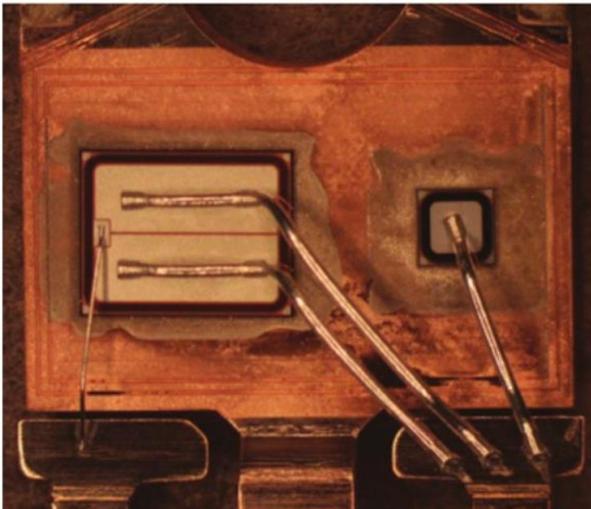
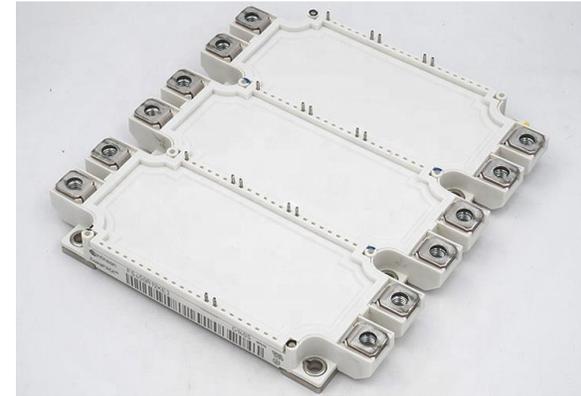
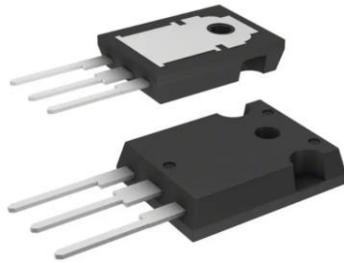


Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

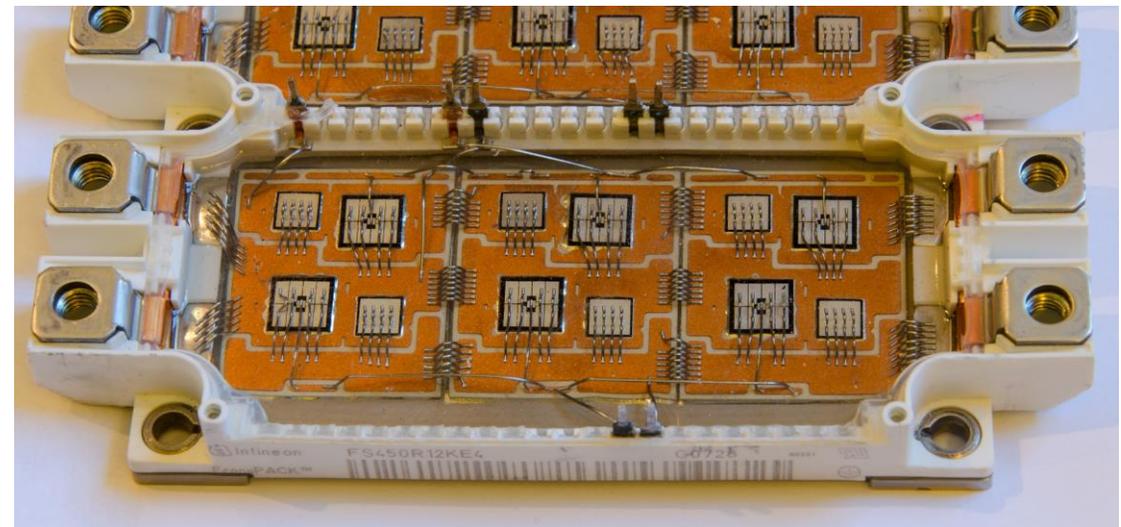
# Estrutura interna

- ❑ Punch-through (PT) IGBT – Camada  $N^+$  está presente – Assimétrico;
- ❑ Non-punch-through (NPT) IGBT – Camada  $N^+$  ausente – Simétrico;
- ❑ Presença de um tiristor parasita; 
- ❑ Latch-up → Limitador de performance dos primeiros dispositivos.

# Aspecto real



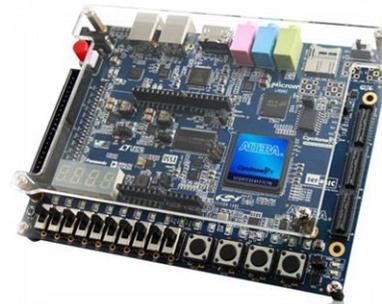
Fonte: ON Semiconductor.



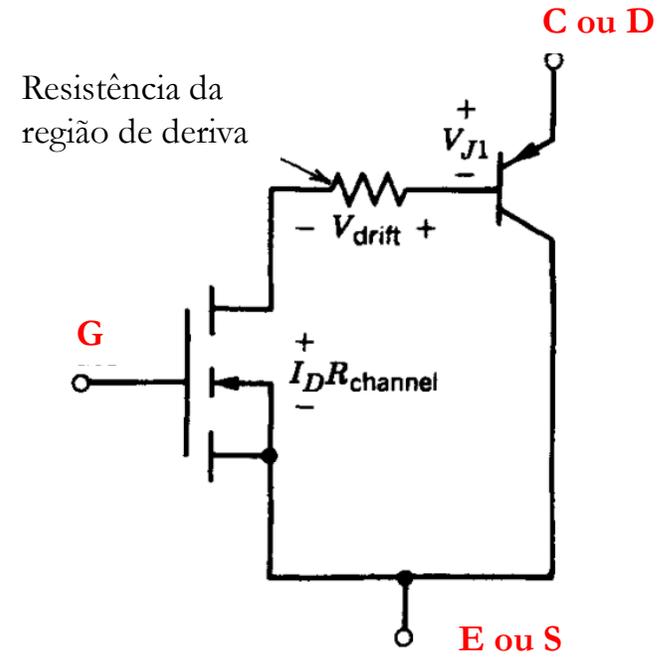
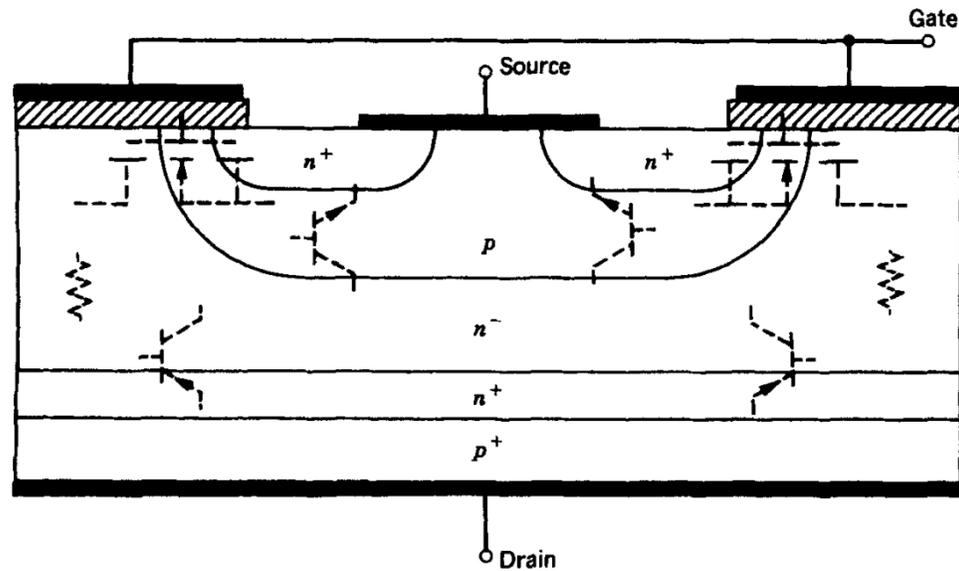
Fonte: Infineon.



## Curva I x V

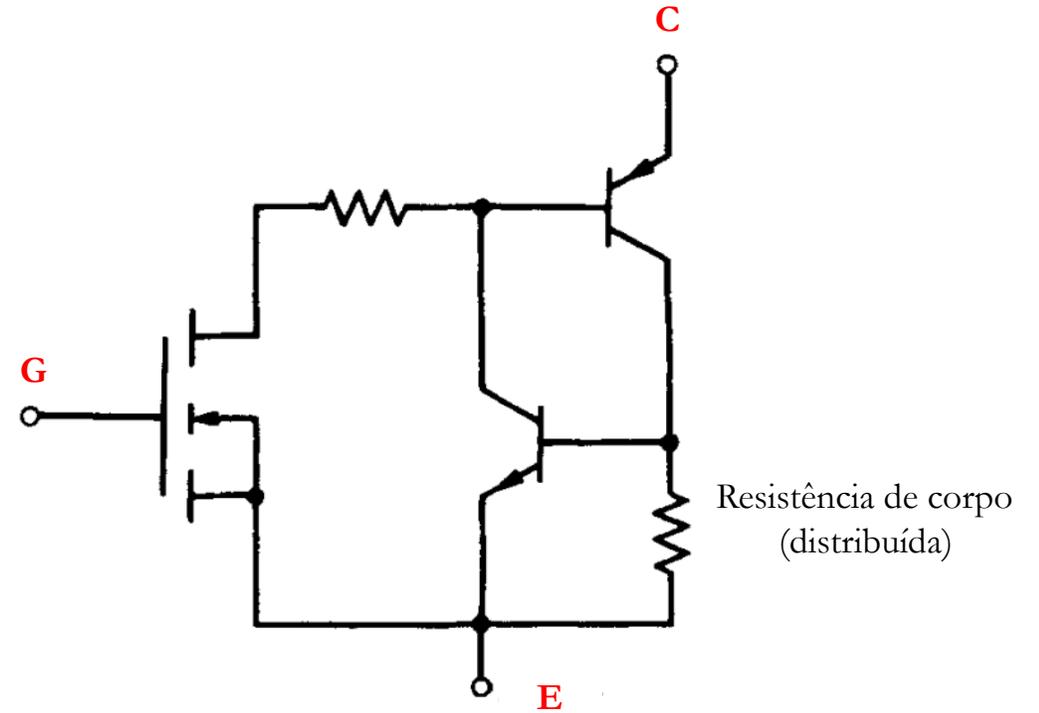
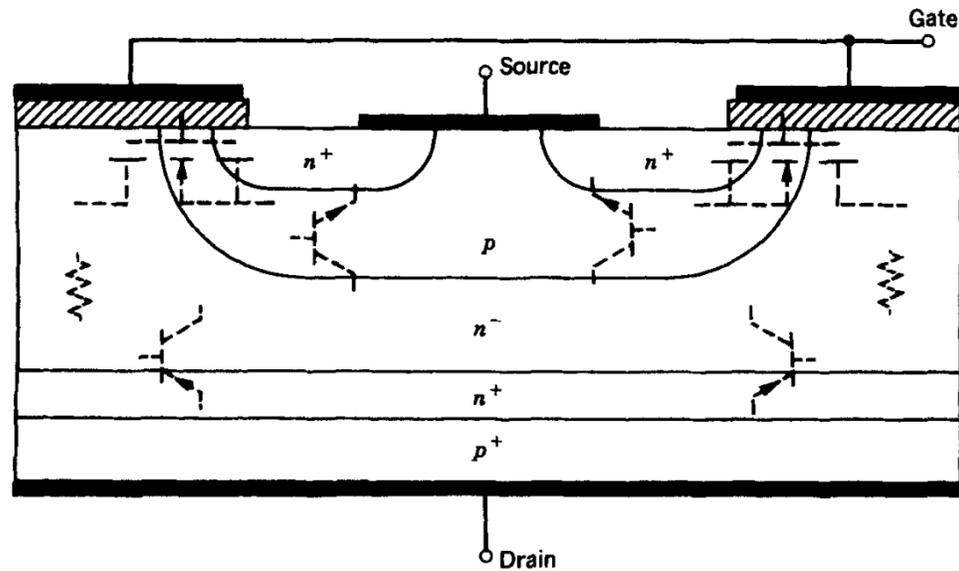


# Estrutura interna



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

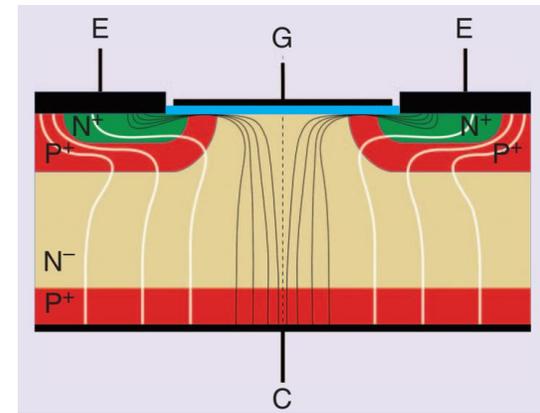
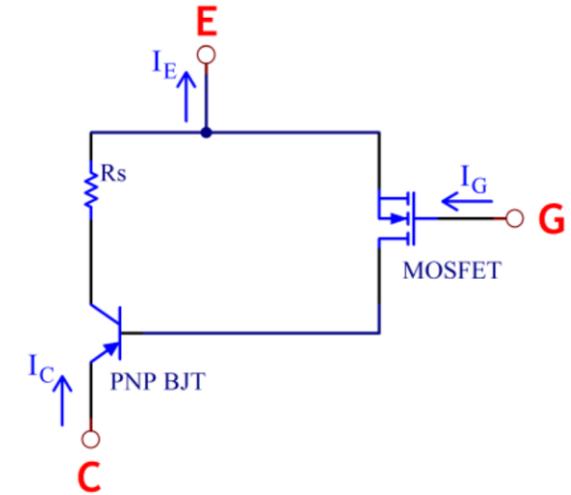
# Estrutura interna



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

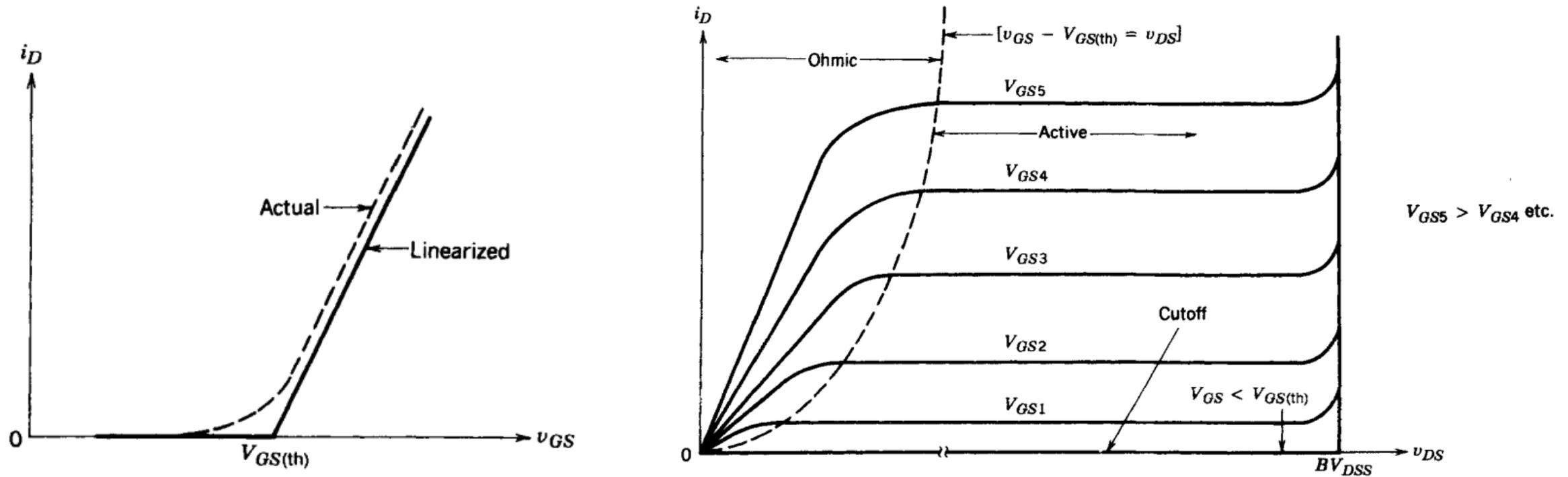
# Estrutura interna

- ❑ BJT → Dois efeitos!
- ❑ Aumento da corrente de coletor por um ganho  $\beta$ ;
- ❑ Queda de tensão na junção emissor base;
- ❑ É importante notar que o ganho não é elevado;
- ❑ Isto acontece porque a base do TBJ é larga.



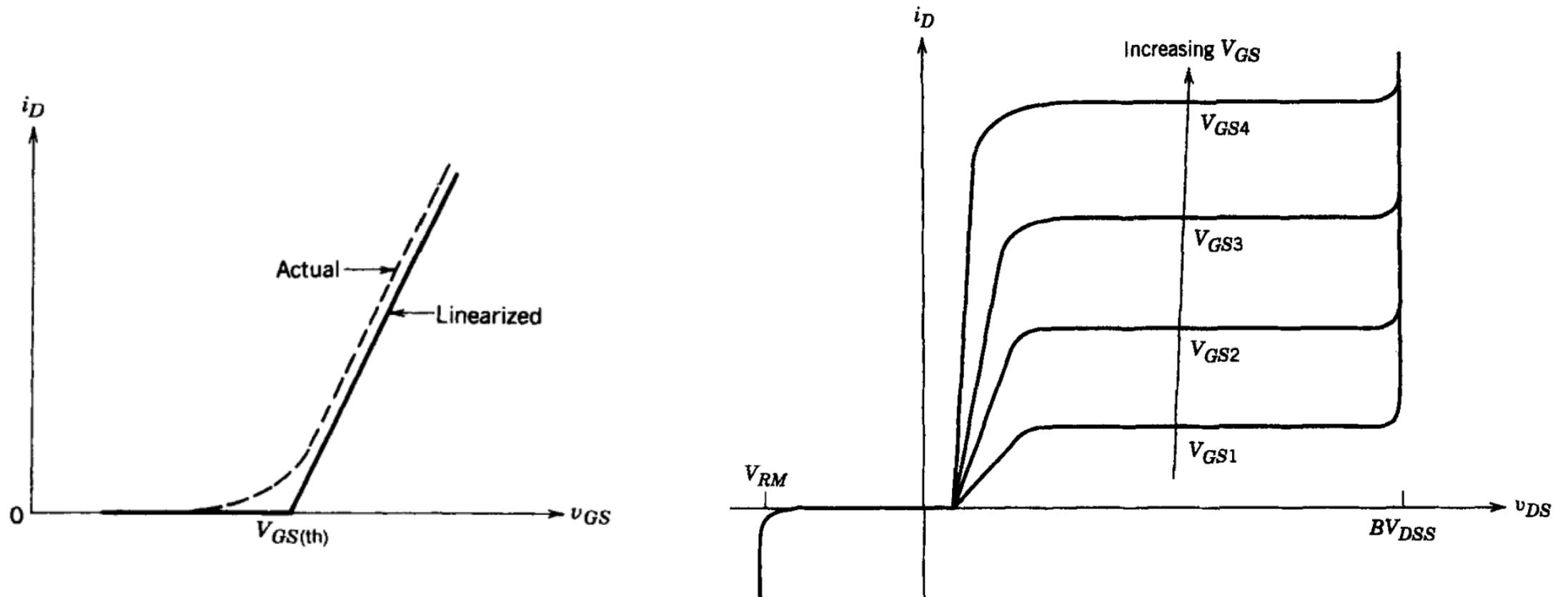
Fonte: F. Ianuzzo. "Modern IGBT gate driving methods for Enhancing reliability of Power Converters".

# Curva I x V de um MOSFET



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

# Curva I x V de um IGBT



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

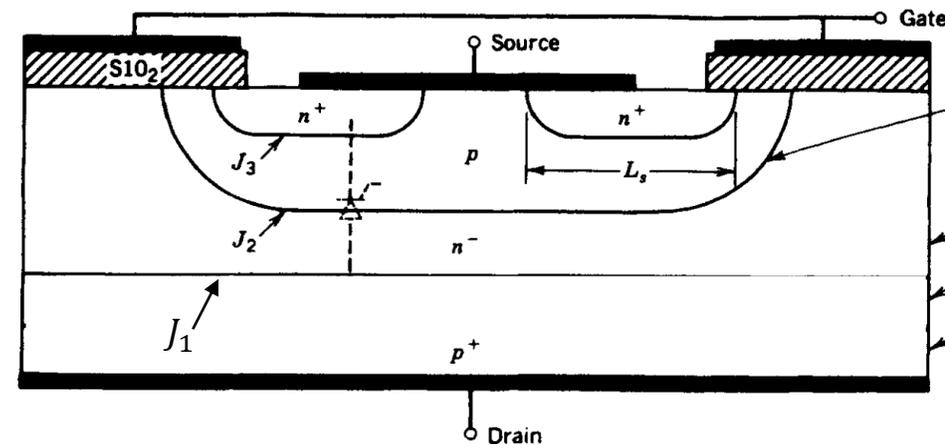


# Física de operação



# IGBT em bloqueio – NPT

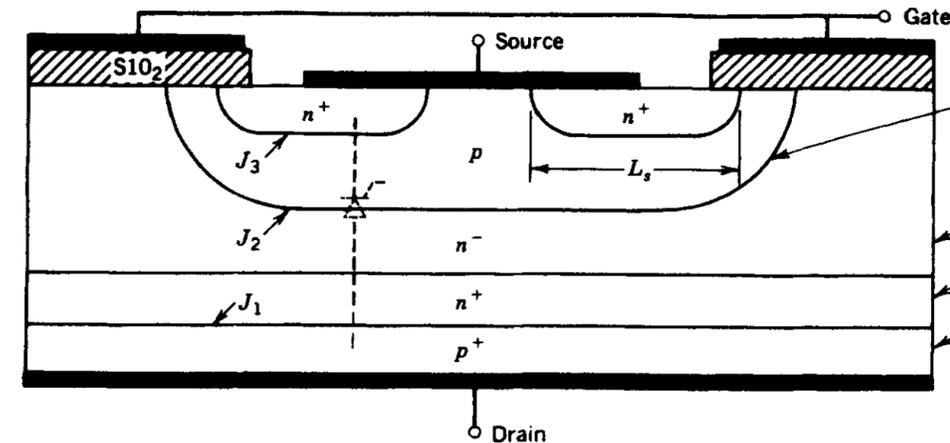
- ❑  $v_{GE(th)}$  menor que tensão limiar  $v_{GE(th)}$  (threshold voltage);
- ❑ Tensão  $v_{CE}$  resulta numa região de depleção na junção  $J_2$ ;
- ❑ Depleção estende-se mais por  $N^-$  (Por quê?);
- ❑  $N^-$  longa o suficiente para que a depleção na atinja  $P^+$ ;
- ❑ Bloqueio de tensão reversa (simétrico).



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

# IGBT em bloqueio – PT

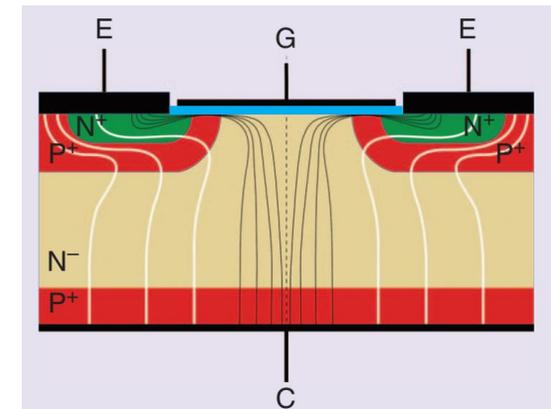
- ❑ Inserção da camada  $N^+$  (buffer ou camada de acoplamento);
- ❑ Redução da espessura do chip para mesma tensão de bloqueio;
- ❑ Junção  $J_2$  responsável por bloqueio de tensão direta;
- ❑ Junção  $J_1$  responsável por bloqueio de tensão direta;
- ❑ Problema: Junção  $J_1$  apresenta baixa tensão de bloqueio;
- ❑ IGBT assimétrico.



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

# Operação diretamente polarizado

- ❑ Quando a tensão  $v_{GE}$  é maior que o limiar, forma-se a camada de inversão ou canal;
- ❑ Princípio de funcionamento muito similar ao verificado no MOSFET de potência;
- ❑ Diferença: Injeção de lacunas da região  $P^+$  na região de deriva;
- ❑ As lacunas se movimentam na camada de deriva por difusão e por deriva;
- ❑ As lacunas atingem a camada  $P^+$  que forma o corpo do MOSFET;
- ❑ A junção  $N^-P^+$  forma o coletor do transistor;

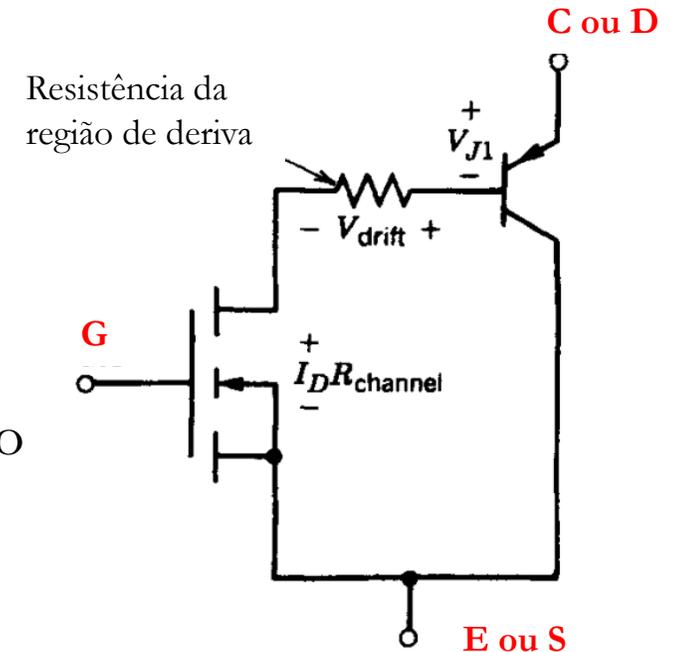


Fonte: F. Iannuzzo, C. Abbate and G. Busatto, "Instabilities in Silicon Power Devices: A Review of Failure Mechanisms in Modern Power Devices," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 3, pp. 28-39, Sept. 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2305758.

# Operação diretamente polarizado

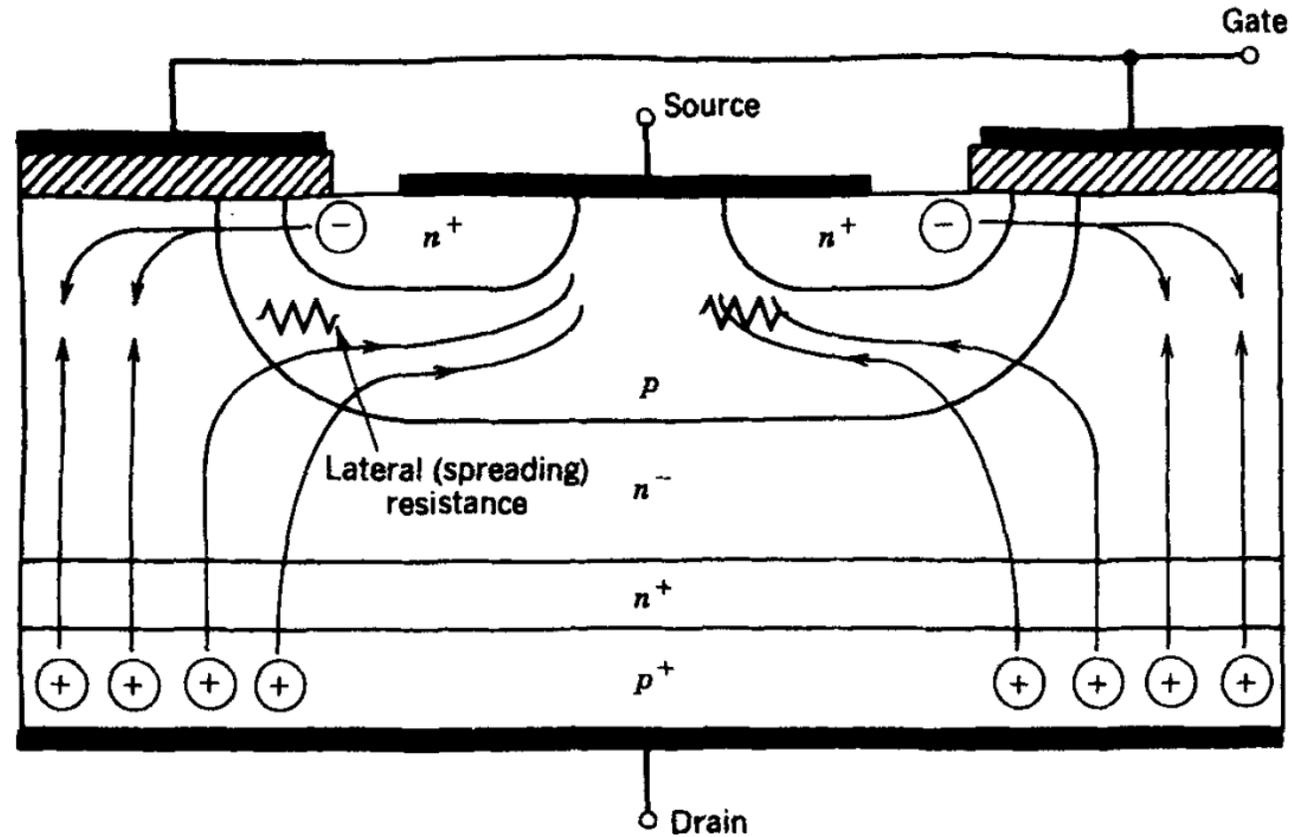
$$V_{DS(on)} = V_{J1} + V_{drift} + I_D R_{channel}$$

- ❑ Queda de tensão  $V_{J1}$  → típico de uma junção PN → 0,7-1 V;
- ❑ A queda de tensão no canal é muito similar ao MOSFET. Isto acontece porque o **MOSFET** carrega grande parte da corrente;
- ❑ Diferente do caso da conexão Darlington de TBJ's;
- ❑ Grande diferença:  $V_{drift}$ ;
- ❑ Isto acontece porque no IGBT acontece a modulação de condutividade (dupla injeção).



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

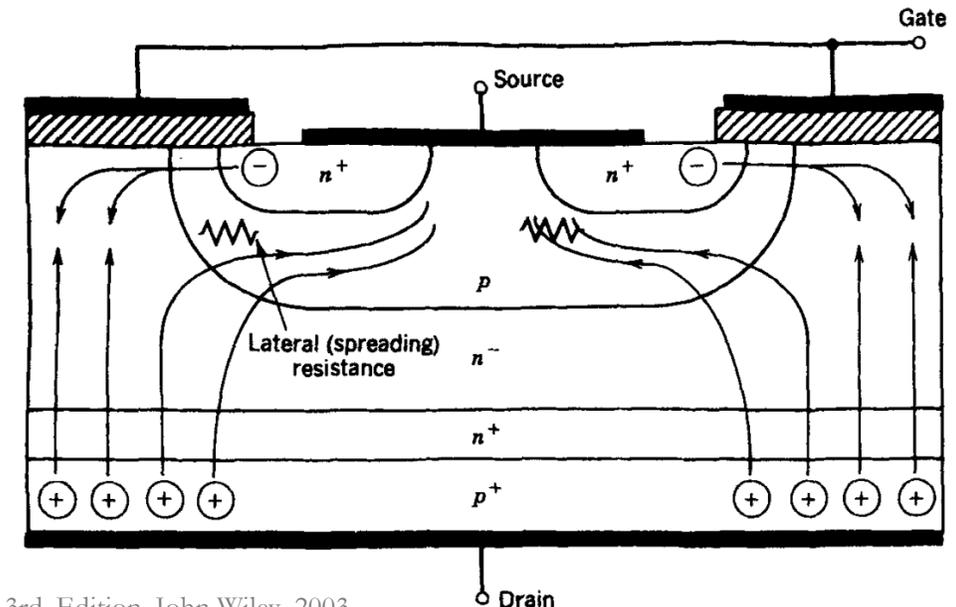
# Modulação de condutividade



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

# Latch-up em IGBTs

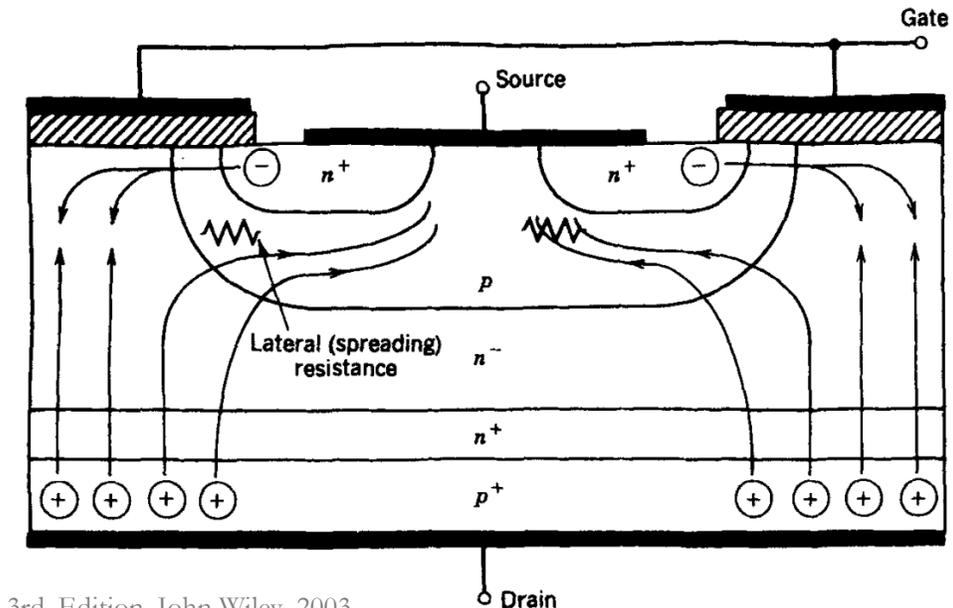
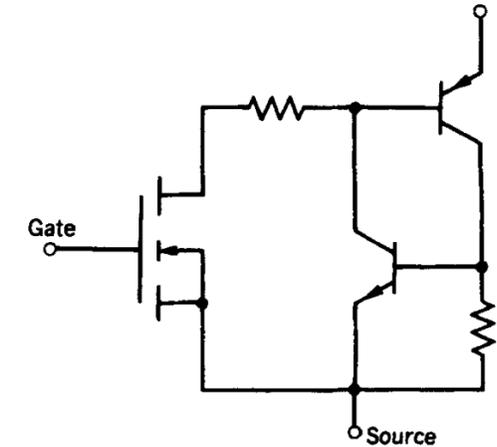
- ❑ Trajetória das lacunas: Fundamental para compreender este fenômeno;
- ❑ Uma parte viaja em linha reta diretamente para a metalização da fonte;
- ❑ Contudo, grande parte apresenta uma curvatura, pois é atraída pela carga negativa na camada de inversão;
- ❑ Fluxo de corrente lateral → queda de tensão lateral;
- ❑ Pode polarizar a junção  $J_3$  (corpo – fonte);
- ❑ Pode ocorrer injeção de elétrons da fonte no corpo;



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

# Latch-up em IGBTs

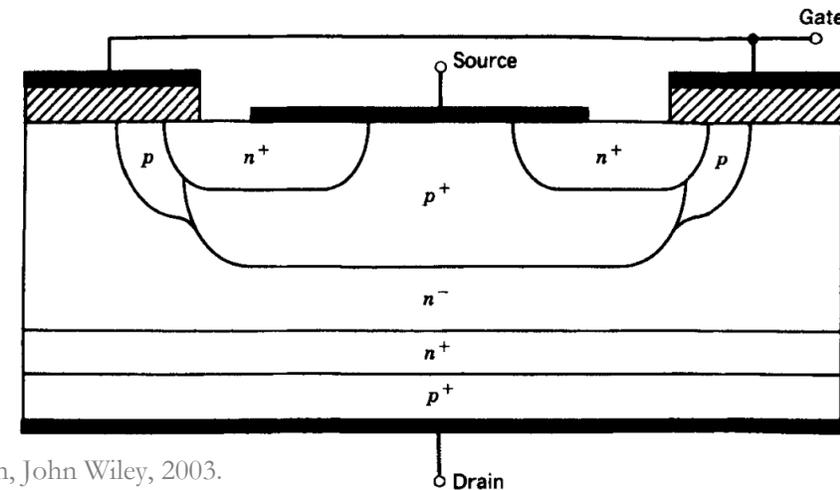
- ❑ Neste caso o transistor parasita NPN entrará em condução;
- ❑ Como ambos os transistores estão ligados, o tiristor parasita liga;
- ❑ Curto circuito entre dreno e fonte;
- ❑ Para um dado IGBT e geometria existe um valor crítico de corrente.



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

# Soluções (1) – Região de corpo

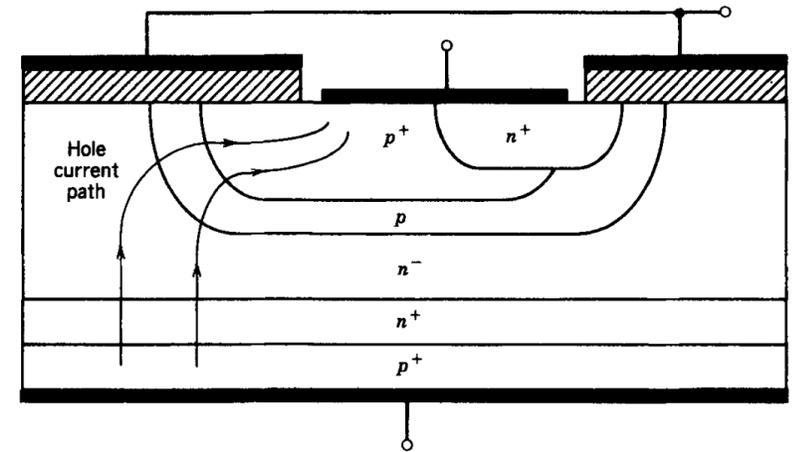
- ❑ Minimizar o comprimento lateral da região de fonte;
- ❑ Região tipo  $P$  do corpo é particionada;
- ❑ Região onde a camada de inversão é formada  $\rightarrow$  dopagem em torno de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  e profundidade similar a região  $N^+$  da fonte;
- ❑ O restante da região de corpo é fortemente dopada (em torno de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) e mais profunda;
- ❑ Isto faz com que a resistência lateral diminua (maior condutividade e maior área lateral).



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

## Soluções (2) – eliminar contatos de emissor (fonte)

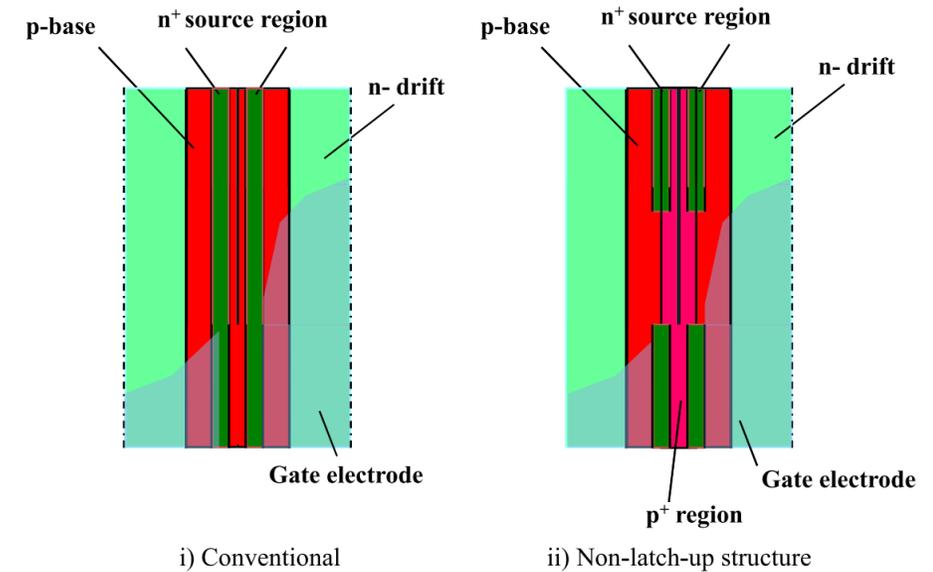
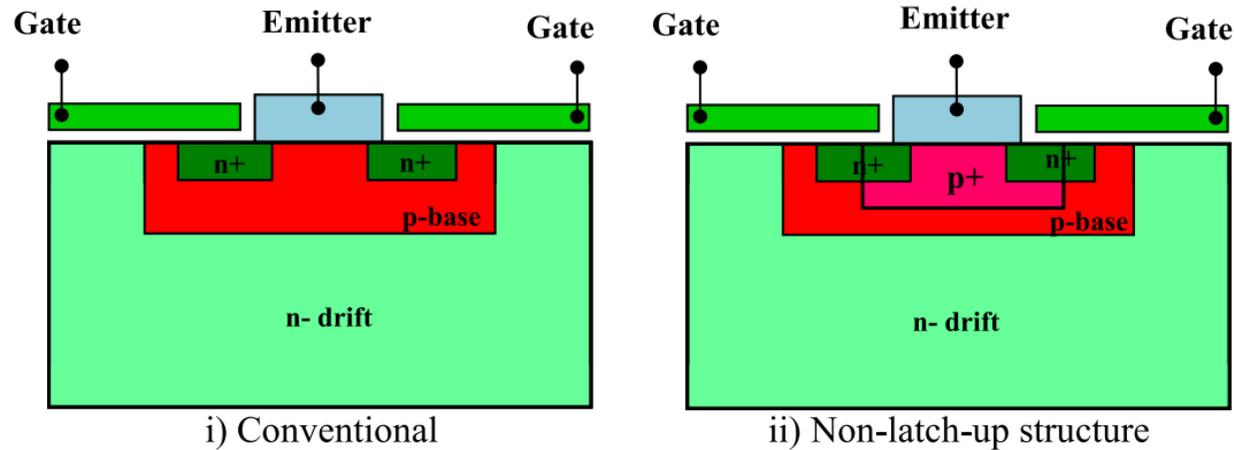
- ❑ Eliminação de um contato de emissor (fonte);
- ❑ Lacunas podem ser coletadas por todo um lado da célula;
- ❑ Caminho adicional de circulação de lacunas (bypass);
- ❑ Redução da transcondutância (redução do comprimento efetivo de gate).



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

# Latch-up em IGBTs

- Primeiras estruturas → 1968, 1970;
- 1984 → non-latch-up IGBT;
- 1985 → primeiro IGBT comercial.



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



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



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



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

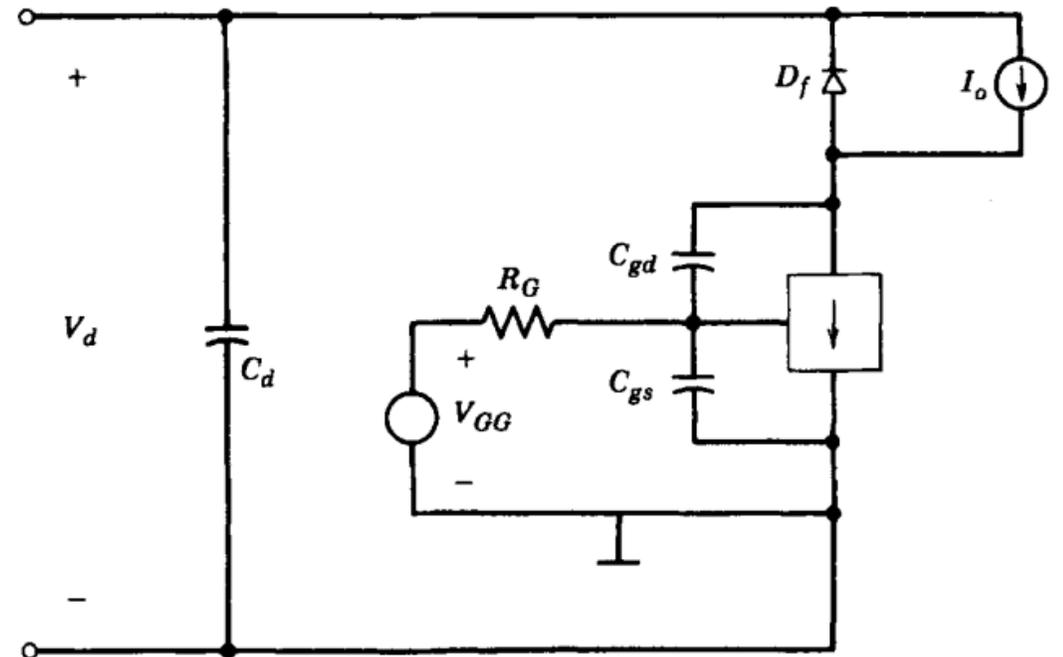


## Características de comutação



# Transitórios de comutação

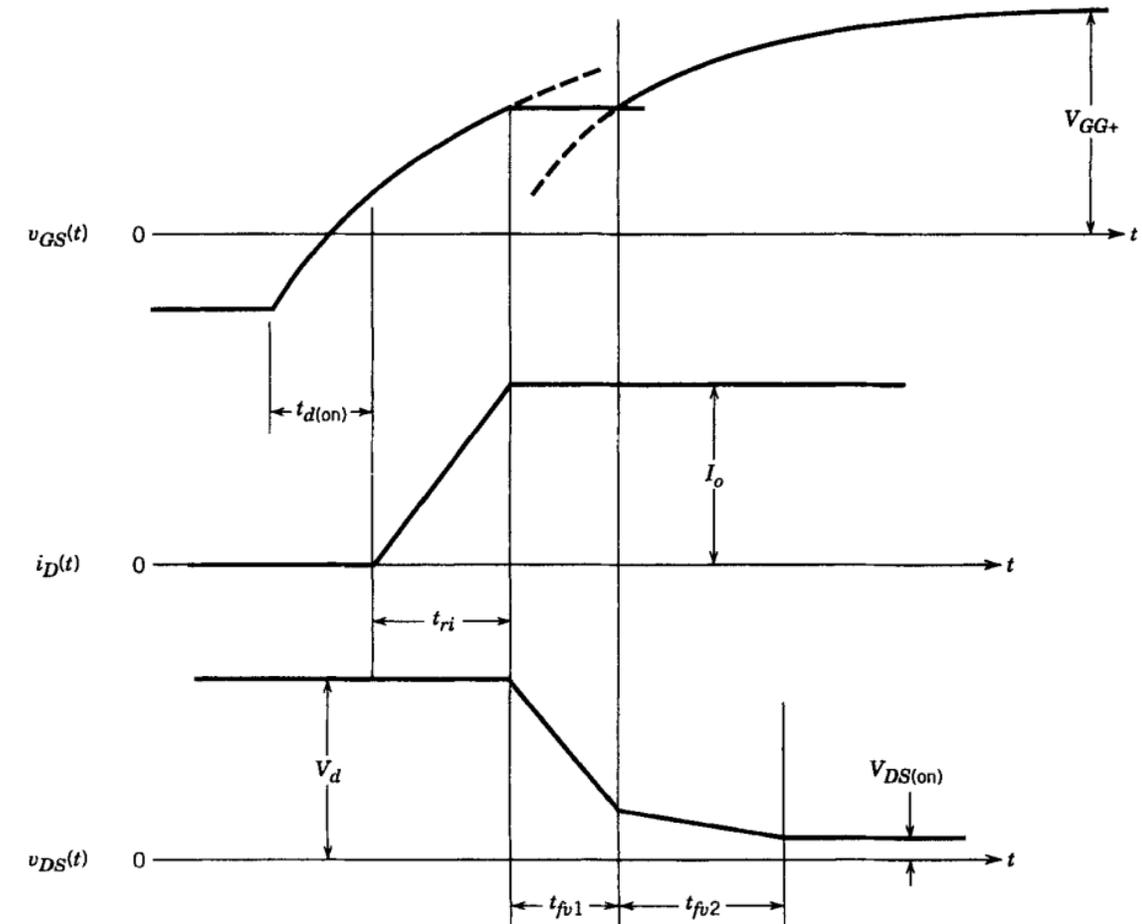
- ❑ Mesmo circuito utilizado para avaliar o TBJ e MOSFET;
- ❑ Note a presença de uma resistência de gate;
- ❑ Afeta diretamente a performance do dispositivo;
- ❑ Diodo  $D_f$  de roda livre para assumir a corrente  $I_o$  durante o turn-off



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

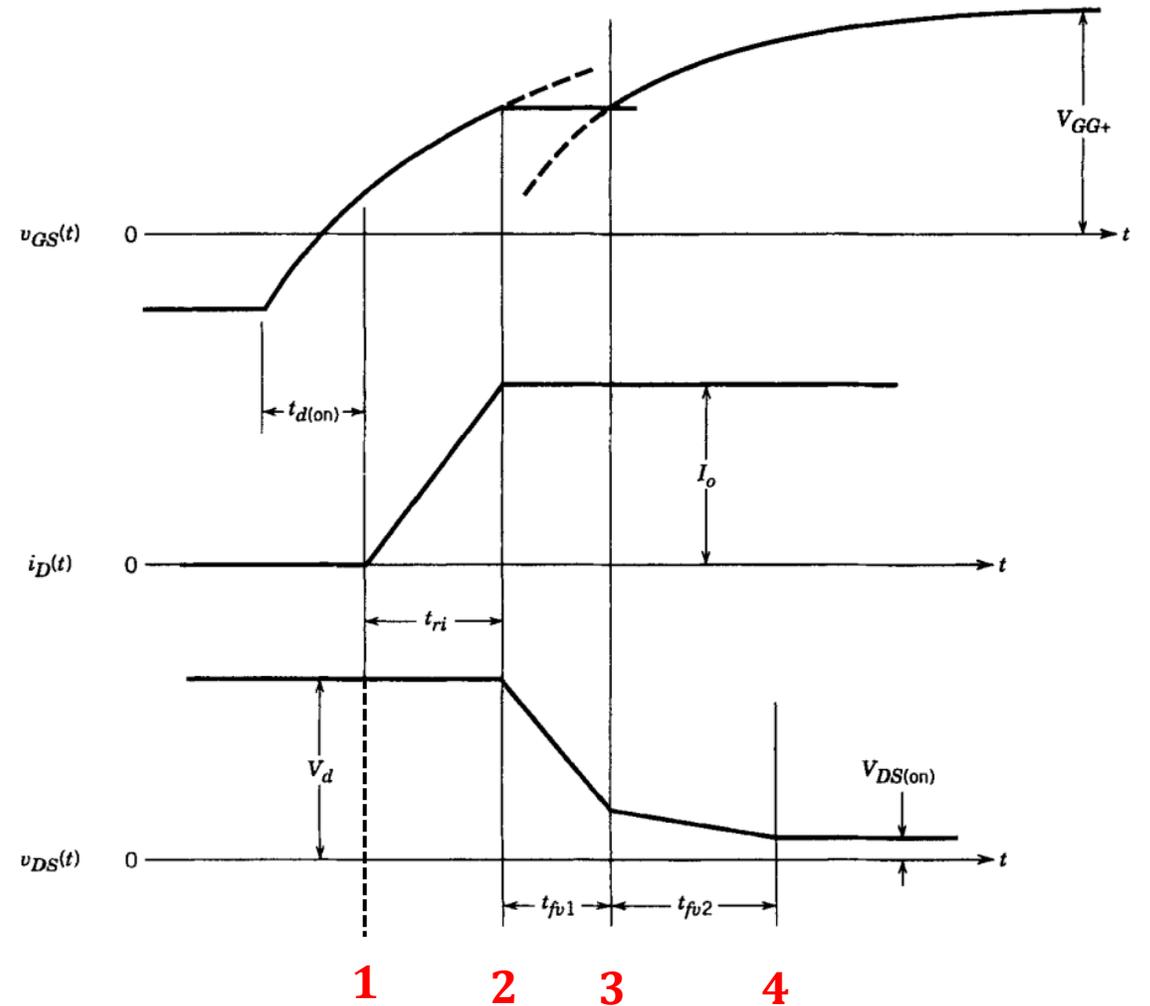
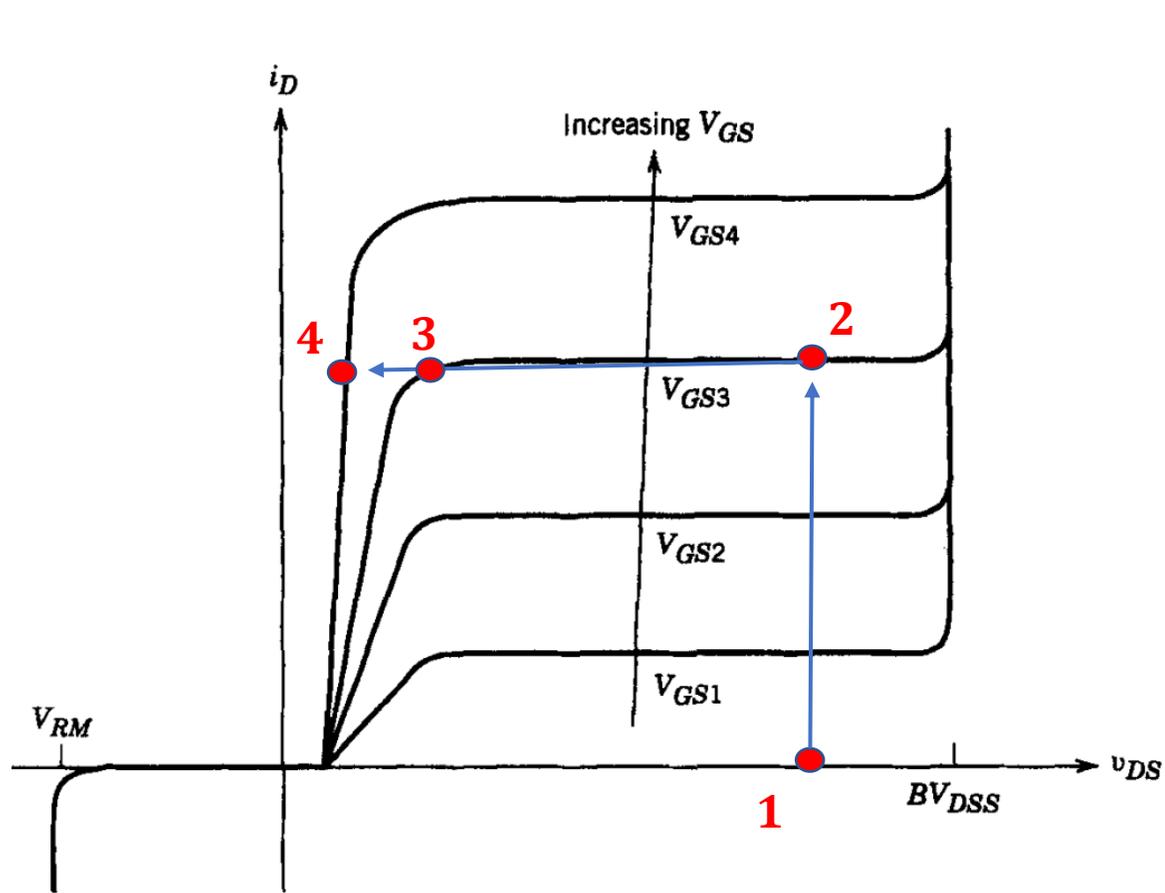
# Transitório de *turn-on*

- ❑ Crescimento da tensão  $v_{GS}$  até a tensão limiar;
- ❑ Aumento linear da corrente na região ativa;
- ❑ Tensão em  $V_d$  pois o diodo ainda conduz;
- ❑ Platô de Miller: Tensão de  $V_{GS} = V_{GS,I_o}$  (região ativa);
- ❑ Tensão  $v_{DS}$  reduz. A mudança de derivada é relacionada a variação de  $C_{gd}$  com a tensão;
- ❑ Além disso, modulação de condutividade leva tempo (Transistor opera na região linear).



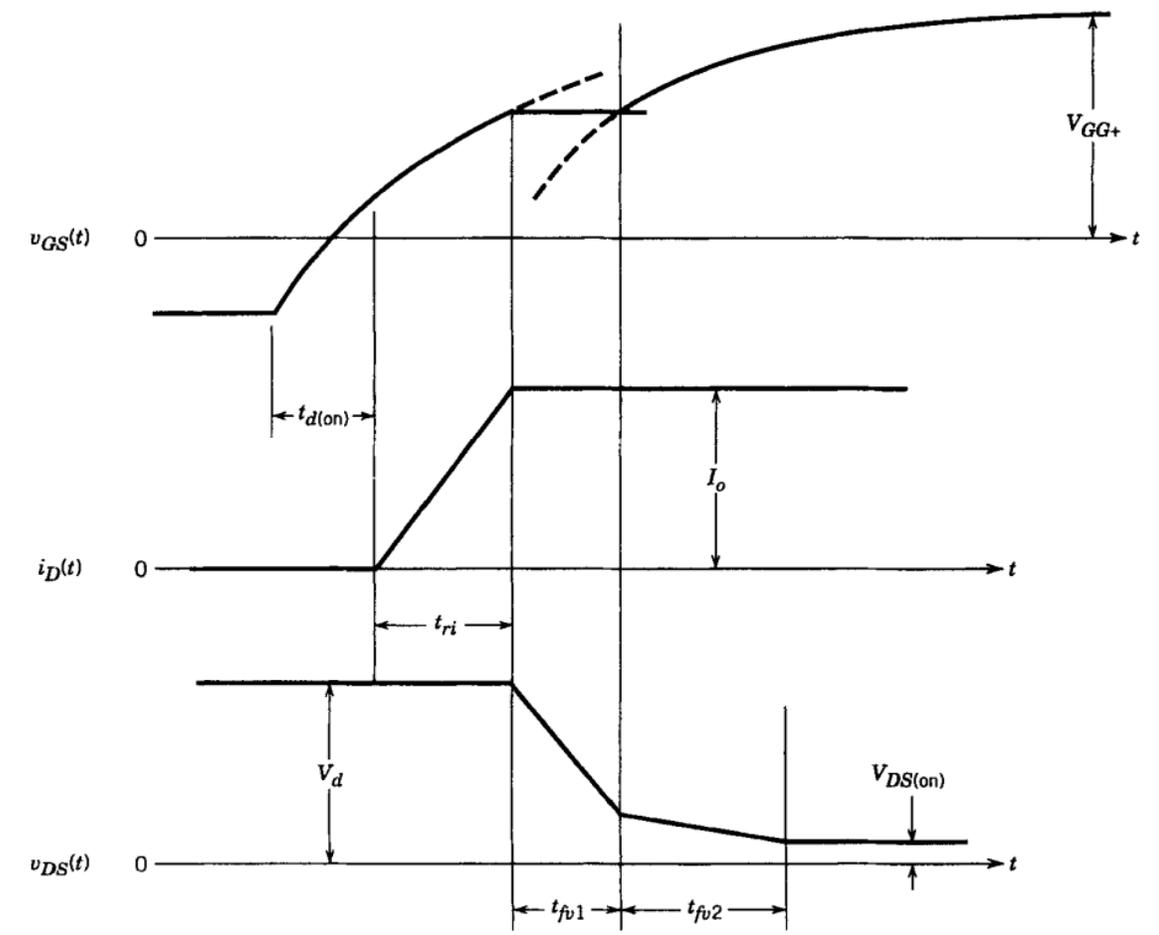
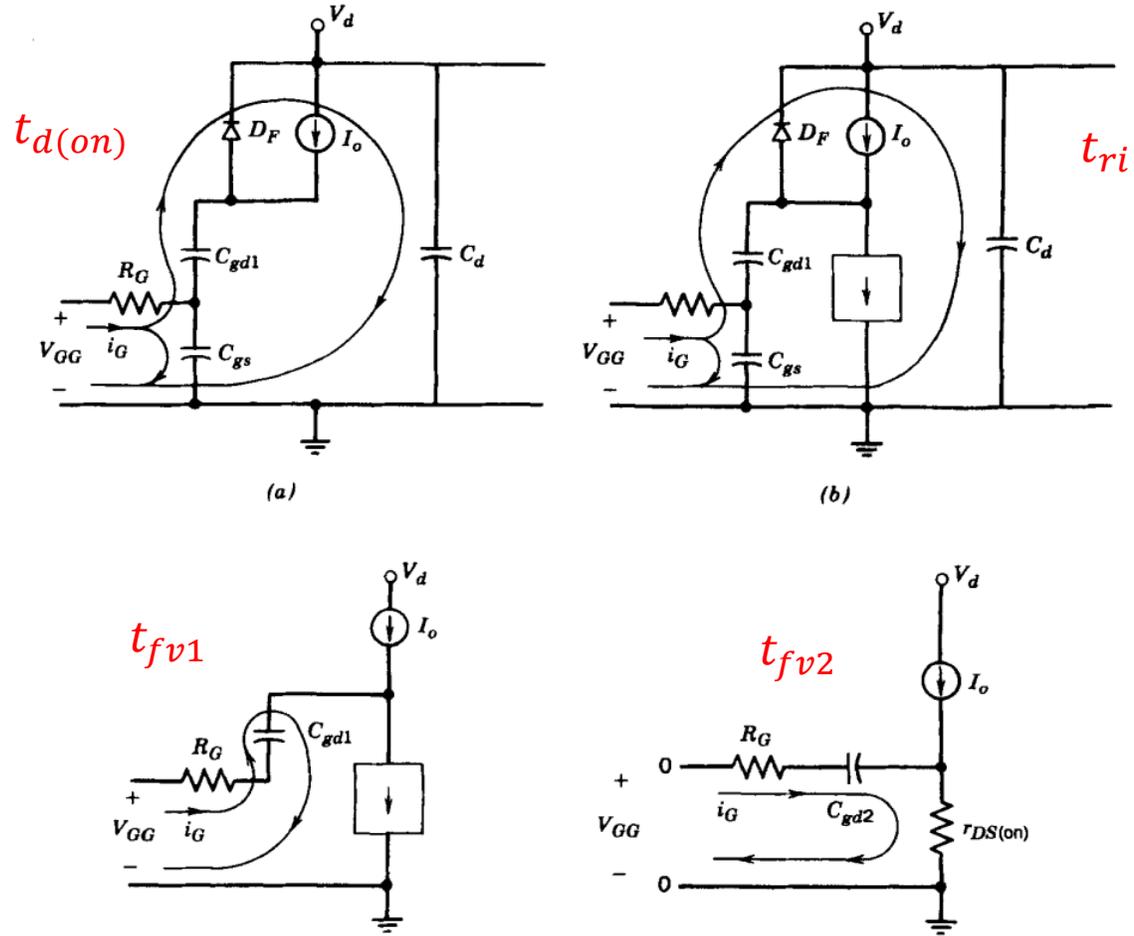
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.

# Transitório de *turn-on*



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

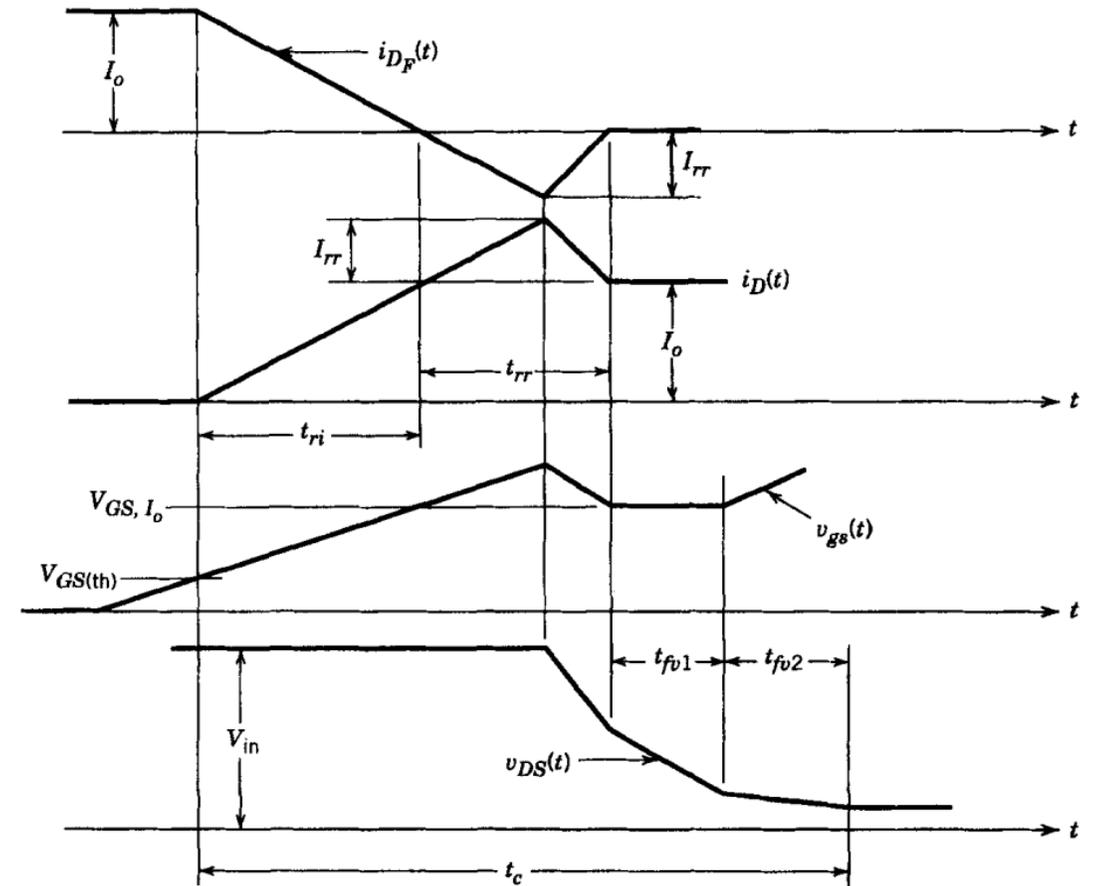
# Transitório de *turn-on*



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

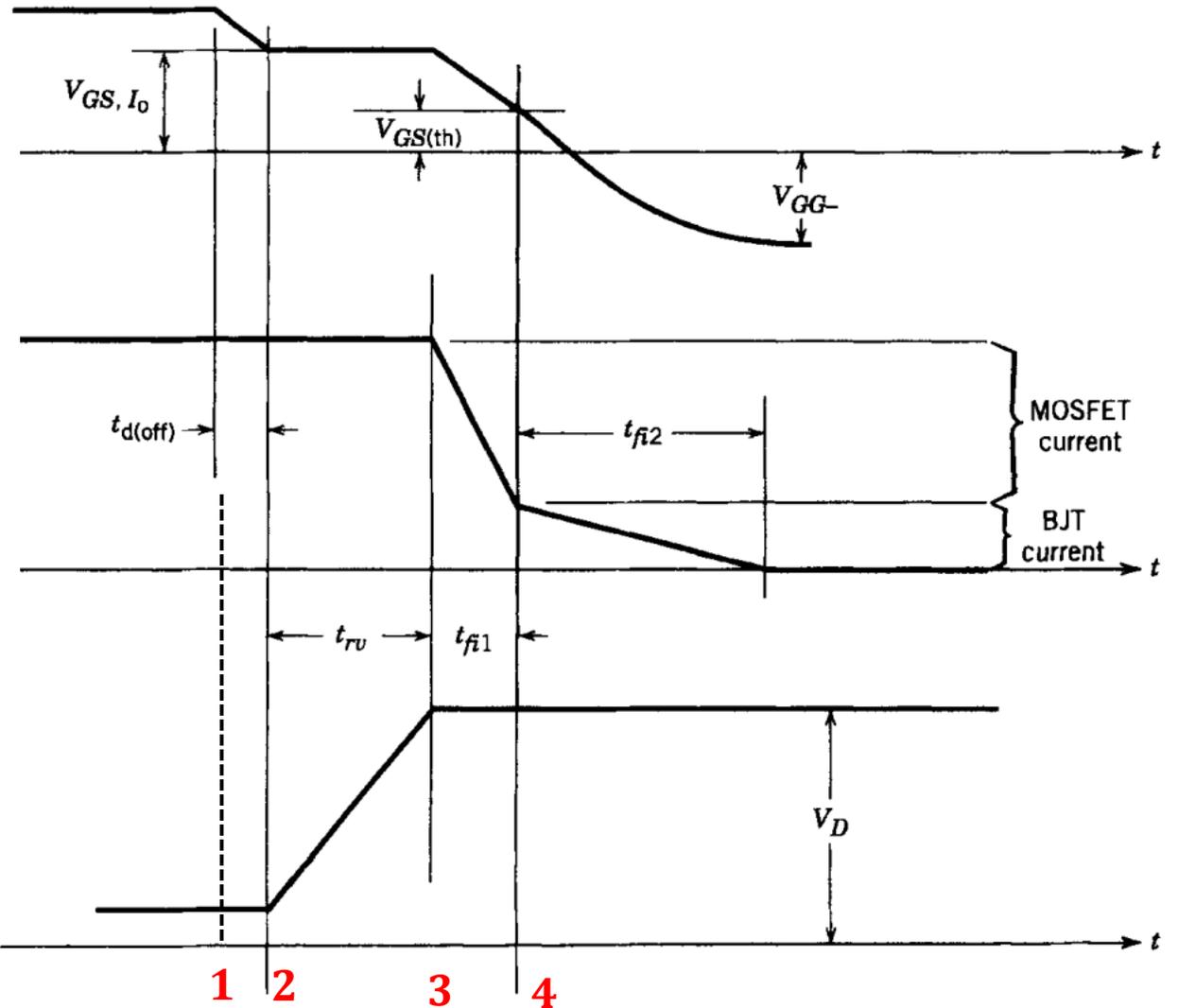
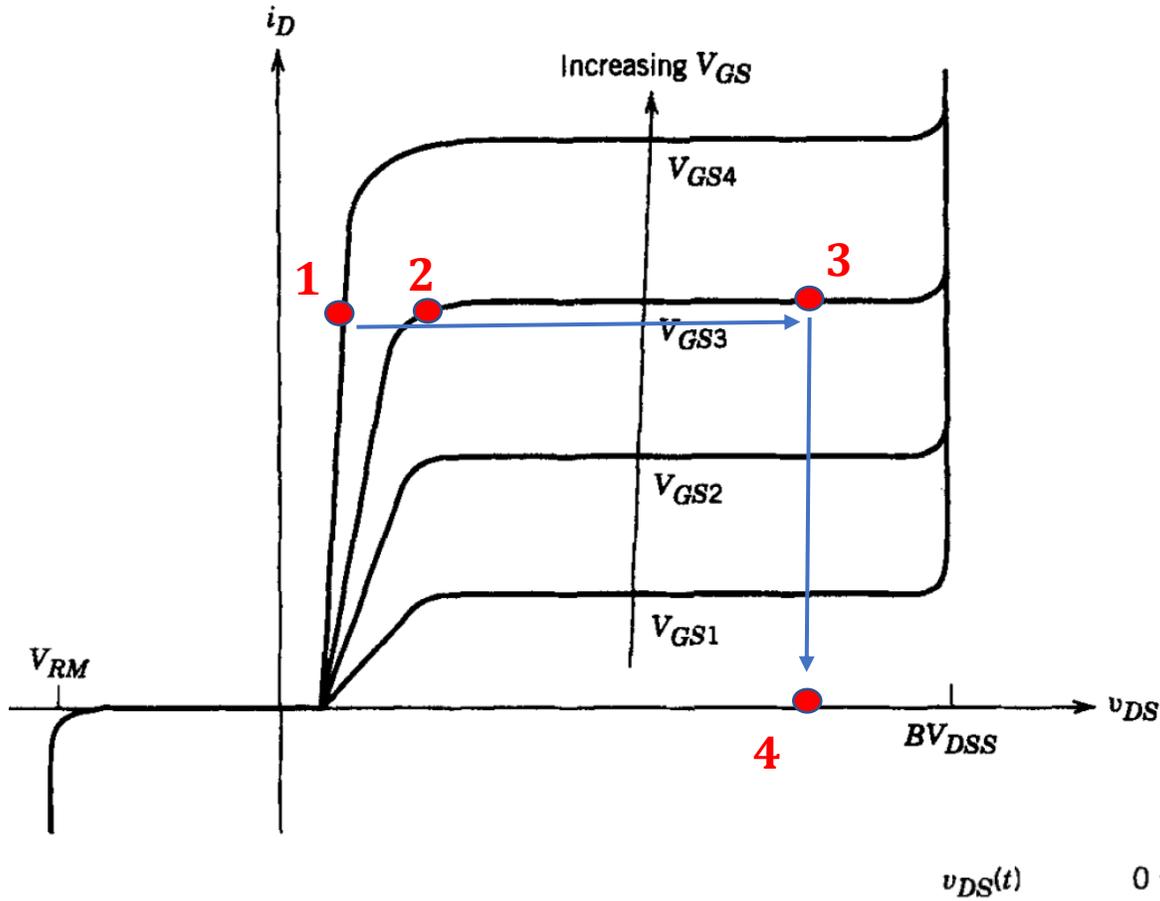
# Efeito do diodo

- ❑ Recuperação reversa:  $V_{GS} > V_{GS,I_o}$ ;
- ❑ Acontece pois a corrente é maior que a corrente da carga;
- ❑ Quando a corrente zera, observa-se uma redução em  $V_{GS}$ ;
- ❑ Isto gera uma corrente adicional em  $C_{GD}$  e uma terceira parte no transitório de descarga.



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

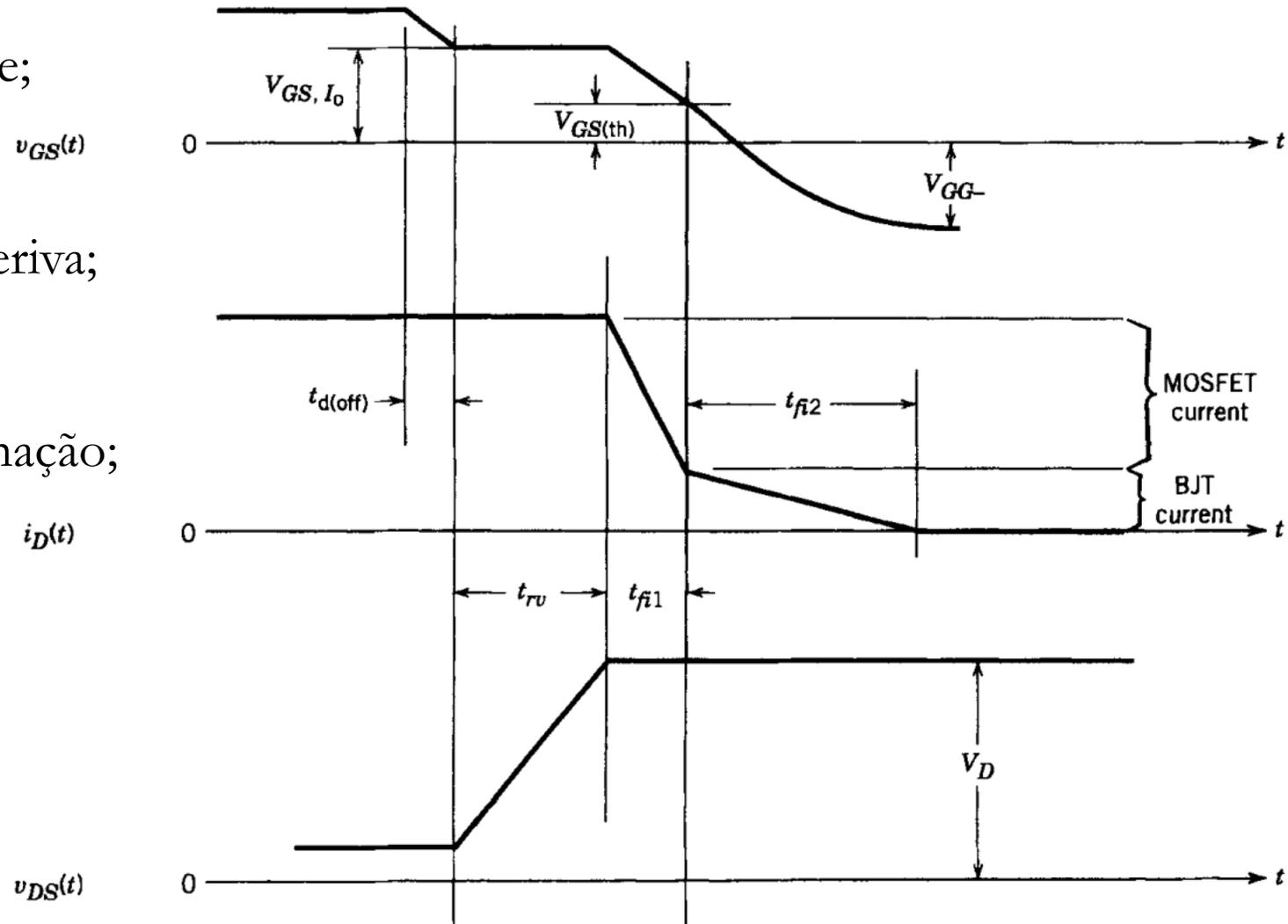
# Transitório de *turn-off*



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

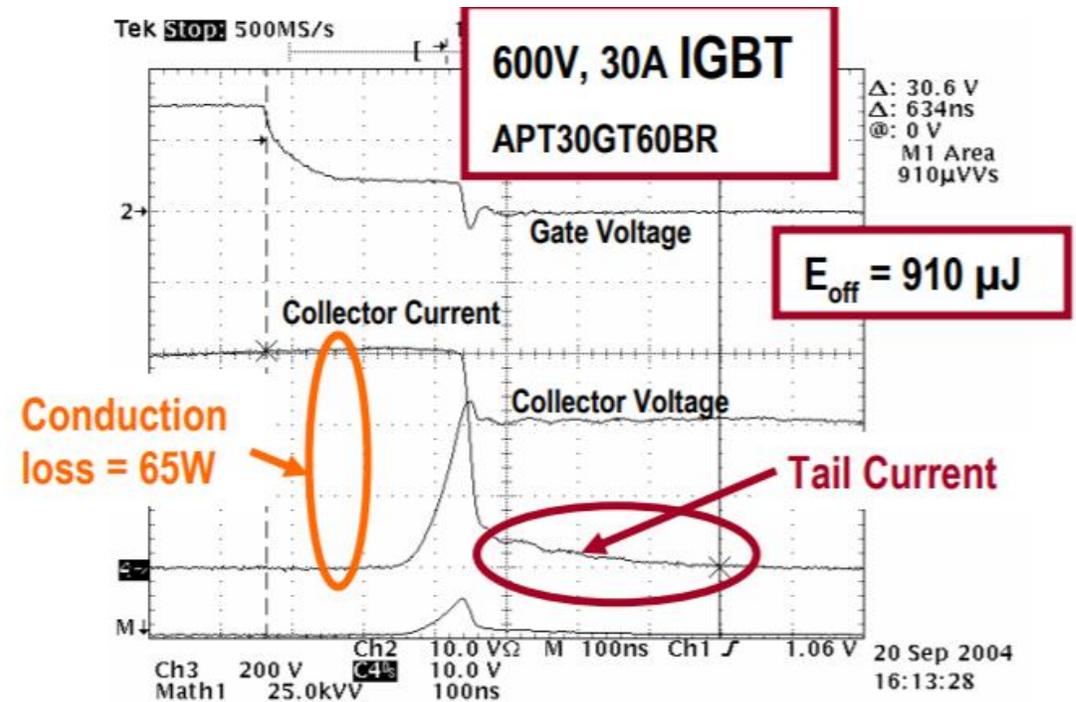
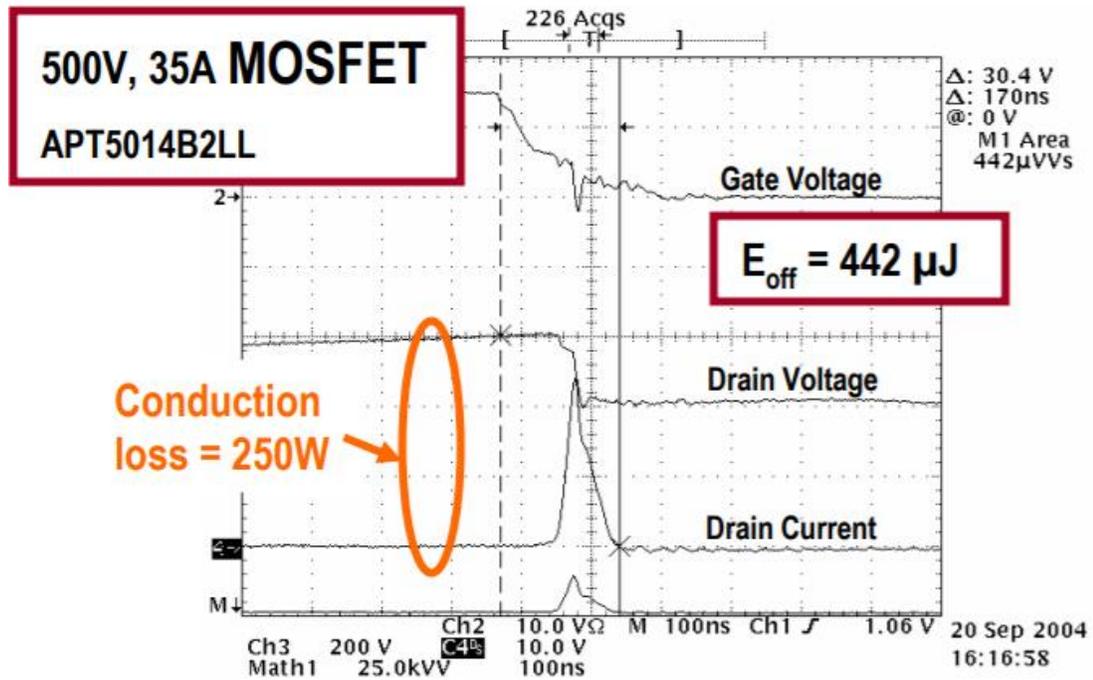
# Transitório de *turn-off*

- ❑ MOSFET irá desligar rapidamente;
- ❑ Carga armazenada na região de deriva;
- ❑ Eliminação por meio de recombinação;
- ❑ Tempo adicional de comutação;
- ❑ “Cauda de corrente”.



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

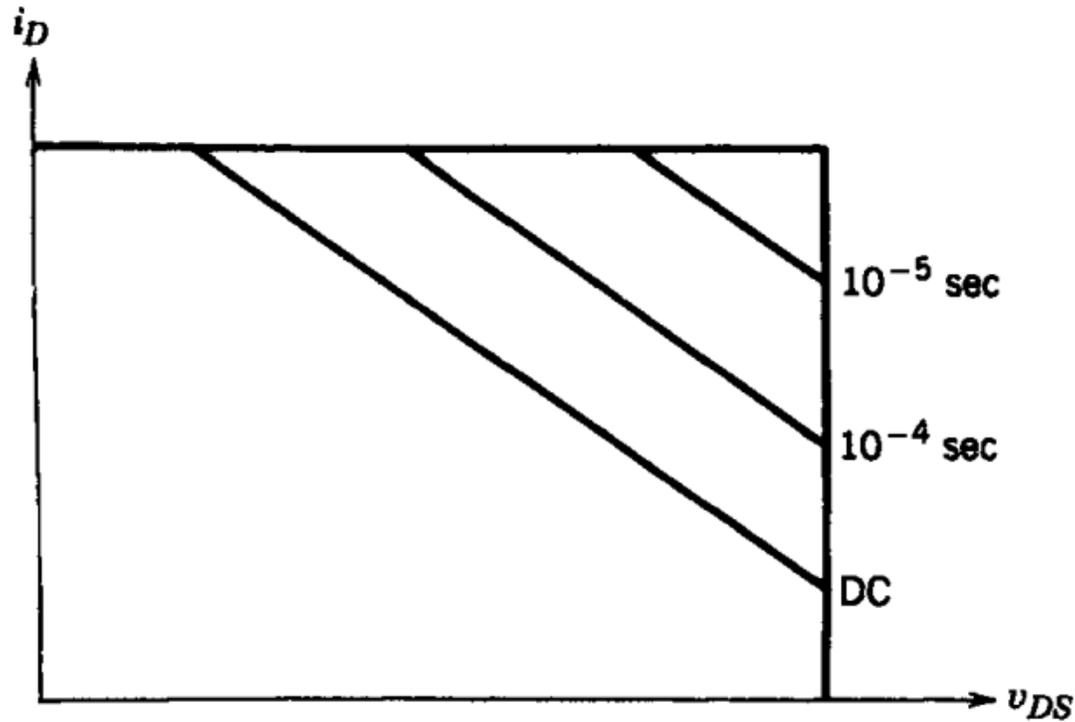
# MOSFET versus IGBT



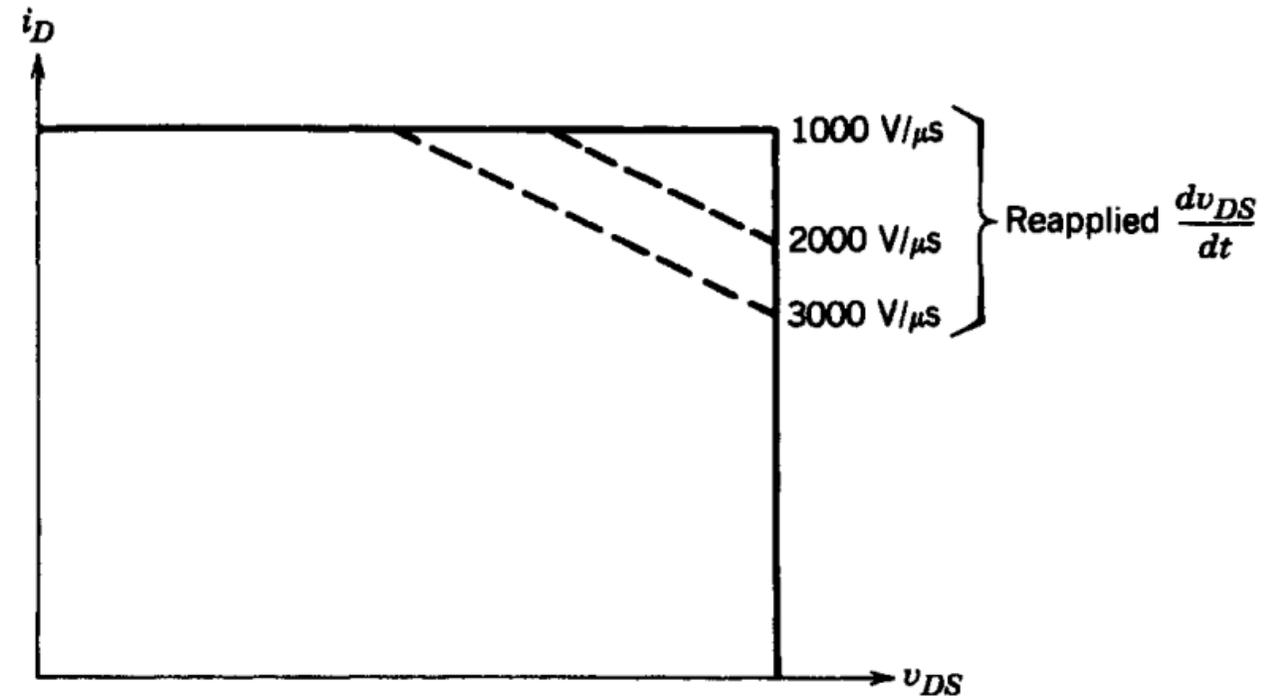
Fonte: Microsemi Device Application Note APT0408 "IGBT Technical Overview".

# Área de operação segura

□ Forward-bias SOA



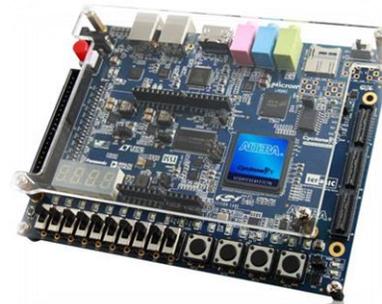
□ Reverse-bias SOA



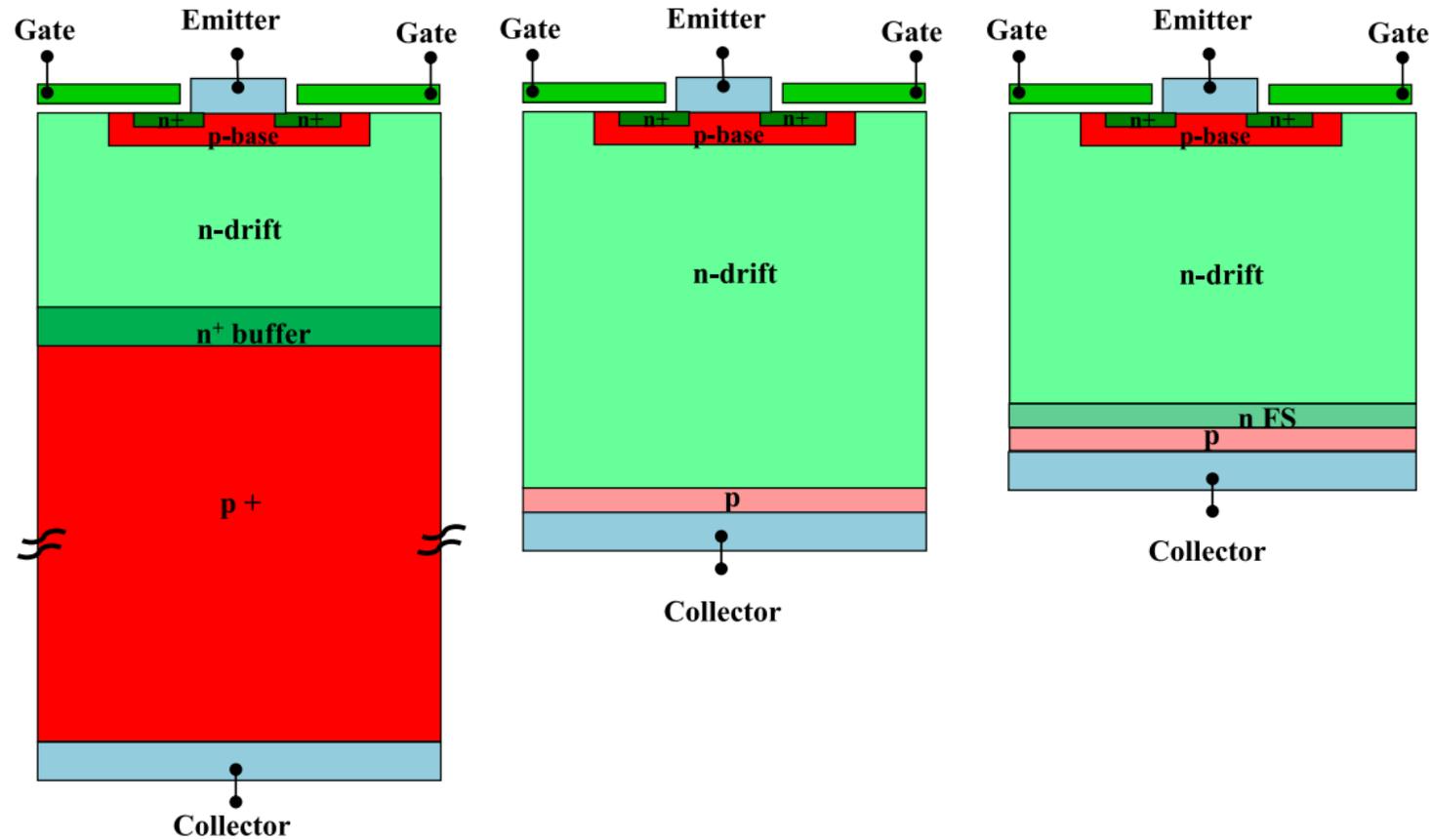
Fonte: Mohan, Undeland and Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design. 3rd. Edition, John Wiley, 2003.



## Avanços e estruturas melhoradas



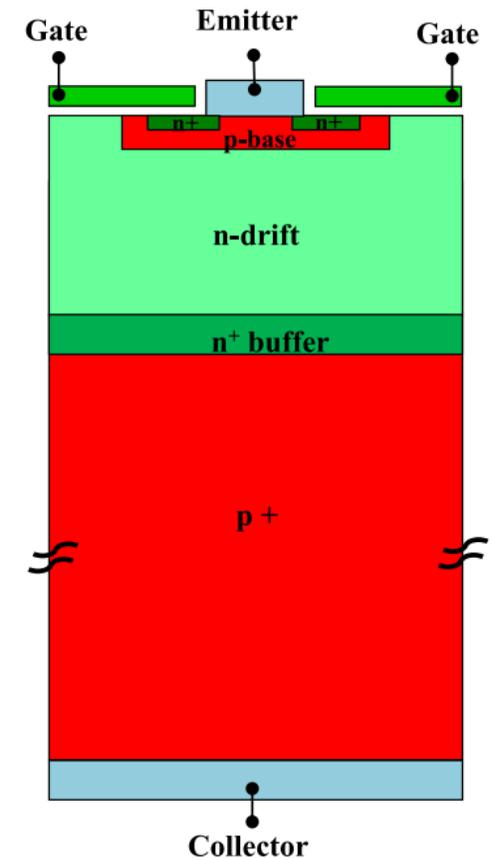
# PT, NPT e FS IGBT



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

# PT IGBT

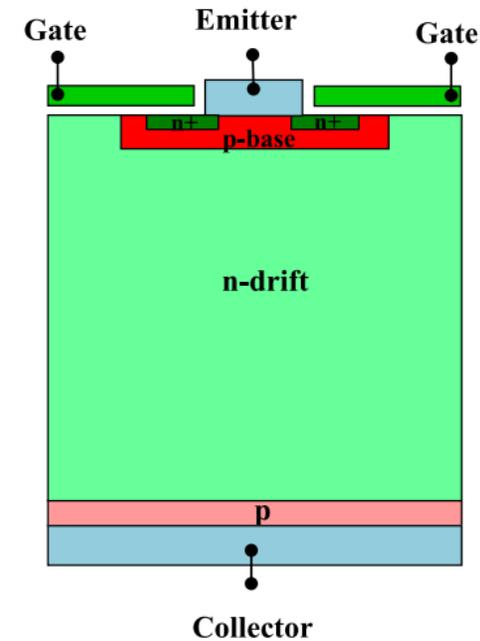
- ❑ Fabricação usa crescimento epitaxial;
- ❑ Base  $N^-$  mais fina  $\rightarrow$  distribuição de campo trapezoidal;
- ❑ Baixa capacidade de bloqueio de tensão reversa;
- ❑ Requer controle de tempo de vida dos portadores para redução do tempo de desligamento;
- ❑ Difícil paralelismo;
- ❑ Perdas ao desligar mais dependentes da temperatura.



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

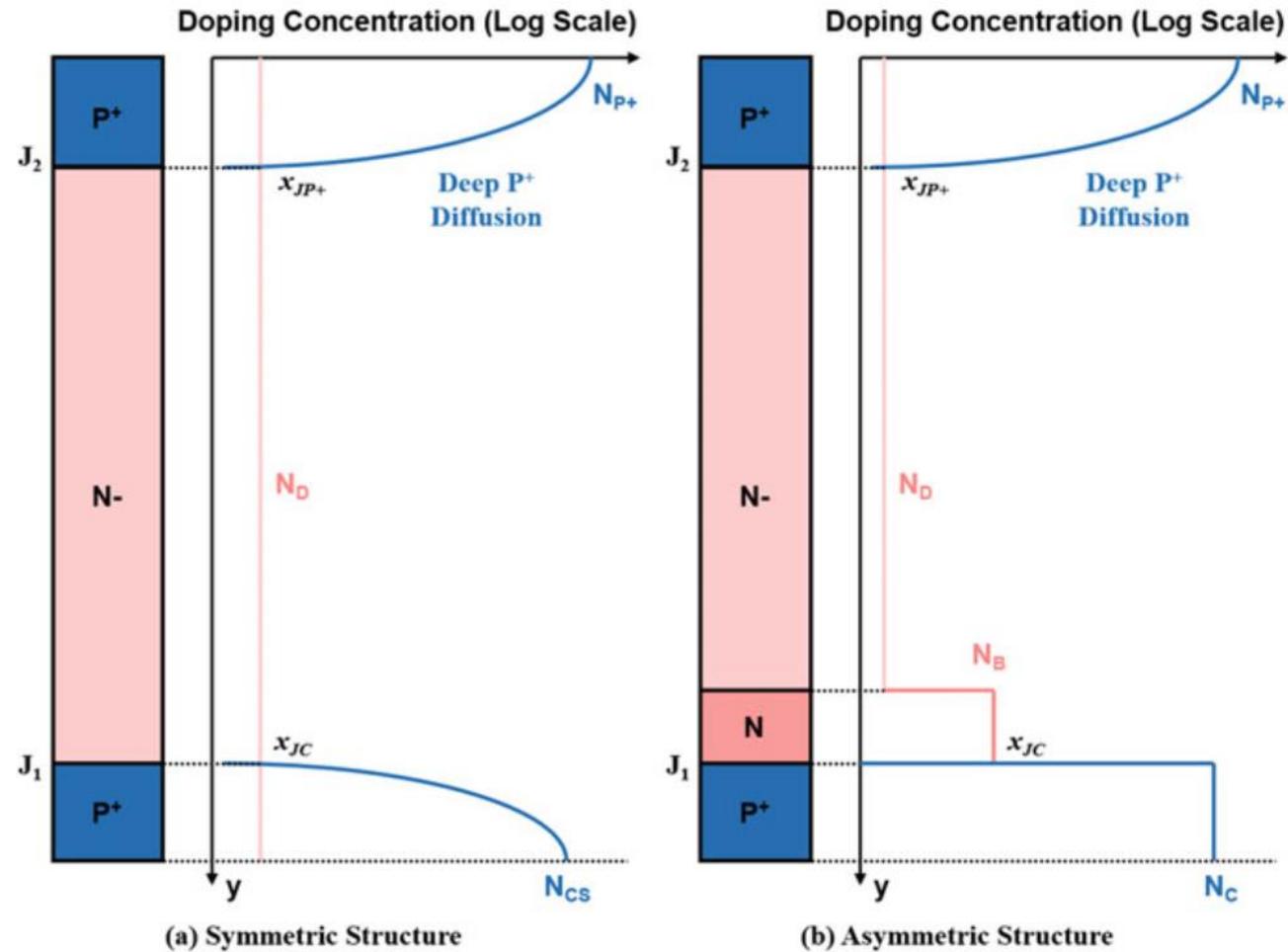
# NPT IGBT

- ❑ Fabricação usando difusão → mais barato;
- ❑ Base  $N^-$  longa → distribuição de campo triangular;
- ❑ Bloqueio bidirecional de tensão;
- ❑ Alto tempo de vida dos portadores;
- ❑ Fácil paralelismo;
- ❑ Mais robusto a curto-circuito.



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

# PT versus NPT IGBT: Perfil de dopagem



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

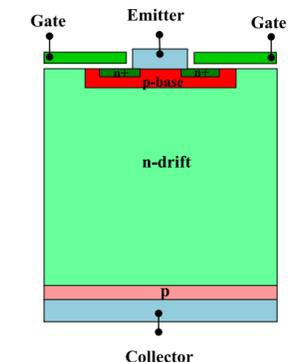
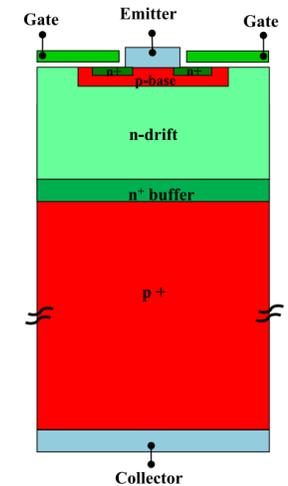
# PT versus NPT IGBT – turn-off

## □ PT

- Camada  $N^+$  é projetada para apresentar baixa carga armazenada;
- Deve ser fina e altamente dopada;
- Difusão de lacunas para o material  $N^-$  durante o desligamento;
- Recombinação nesta camada;

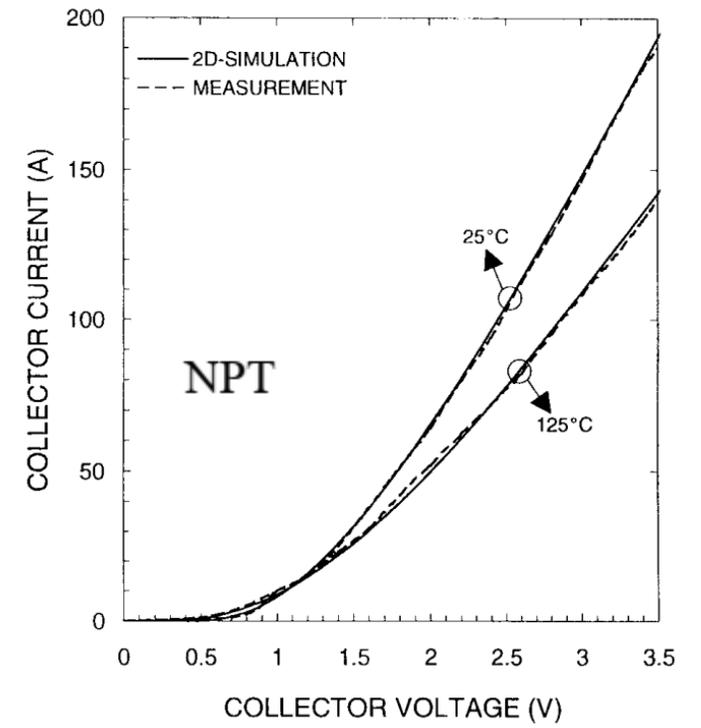
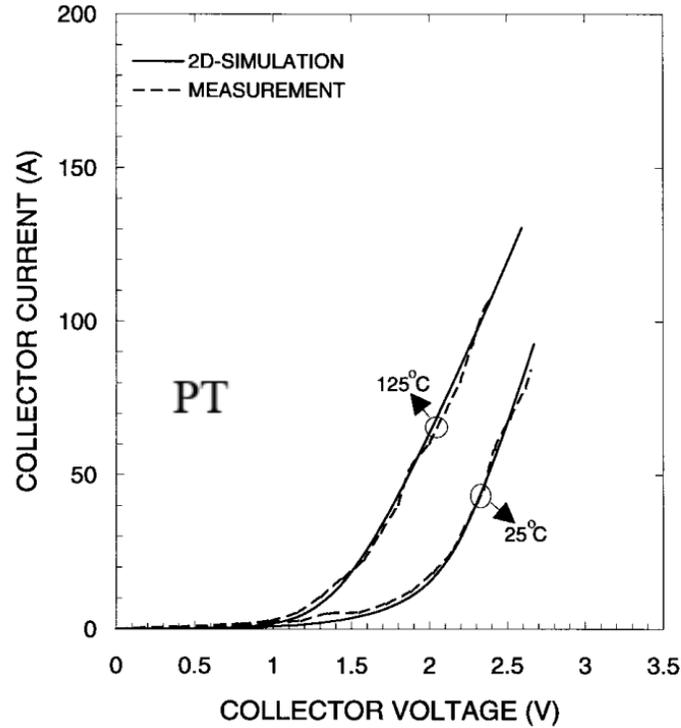
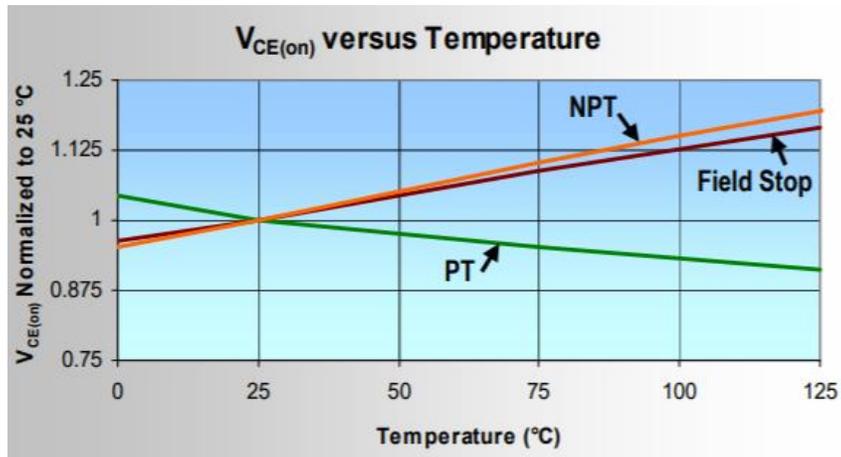
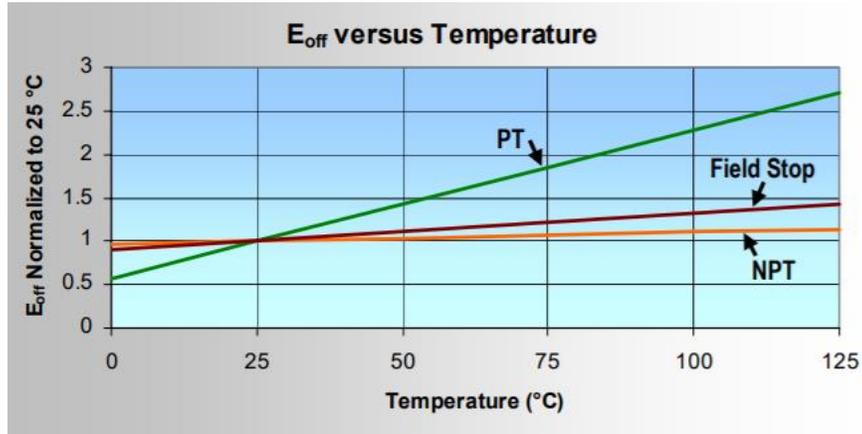
## □ NPT

- Minimização da corrente bipolar ( $\beta$  pequeno);
- MOSFET  $\rightarrow$  90% da corrente;
- Tempo de vida tão grande quanto possível para minimizar perdas de condução.



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

# Comparação

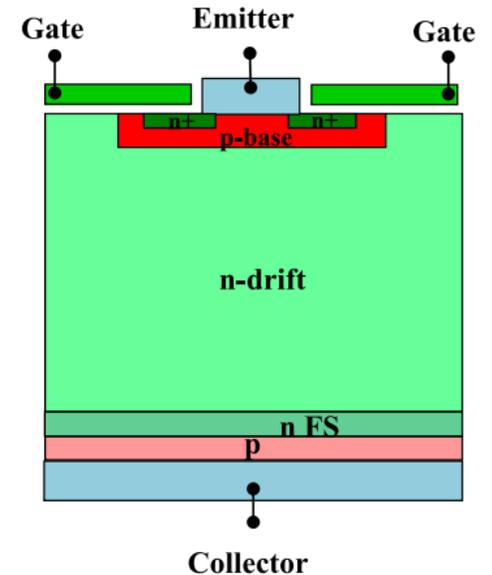


Fonte: S. Pendharkar and K. Shenai, "Zero voltage switching behavior of punchthrough and nonpunchthrough insulated gate bipolar transistors (IGBT's)," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 45, no. 8, pp. 1826-1835, Aug. 1998.

Fonte: Microsemi Device Application Note APT0408 "IGBT Technical Overview".

# FS IGBT

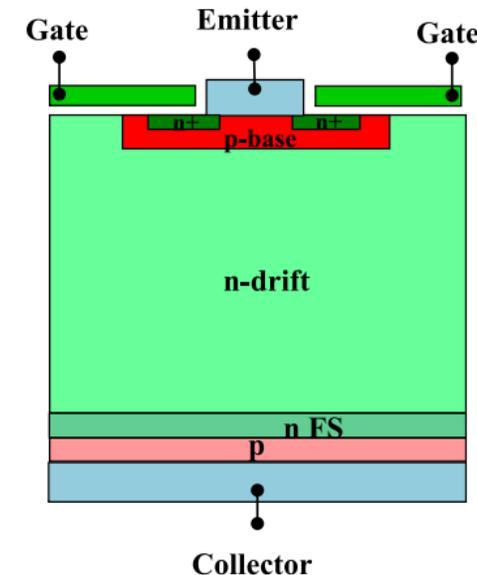
- ❑ Combinação das características positivas do PT e NPT;
- ❑ Redução da cauda de corrente → baixa perda de comutação;
- ❑ Baixa dependência com a temperatura;
- ❑ Camada  $N^+$  → auxiliar na recombinação;
- ❑ Emissor não é eficiente.



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

# Origem do FS IGBT

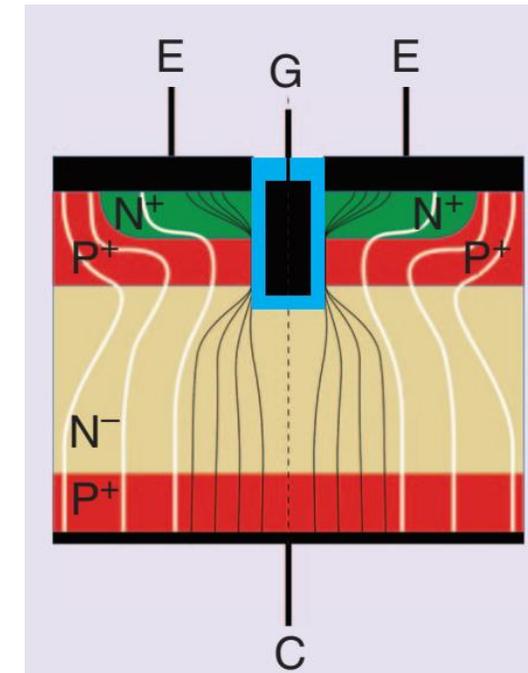
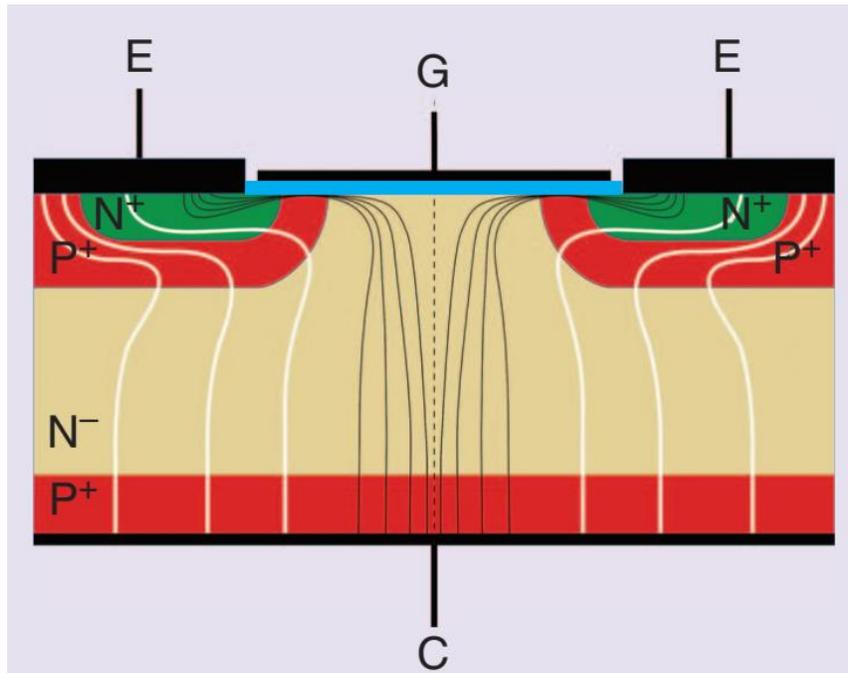
- ❑ Primeiros IGBTs foram fabricados com tecnologia PT;
- ❑ Problemas: Alta injeção de portadores → controle de tempo de vida, problemas de paralelismo;
- ❑ 1989 → NPT IGBT;
- ❑ Sem controle de tempo de vida, menor injeção de lacunas → fácil paralelismo;
- ❑ NPT → rápida substituição dos TBJs;
- ❑ 2000 → Field-Stop → tornar o NPT um dispositivo com campo trapezoidal;
- ❑ Diferença: mais fracamente dopada que a camada de buffer de um IGBT PT.



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

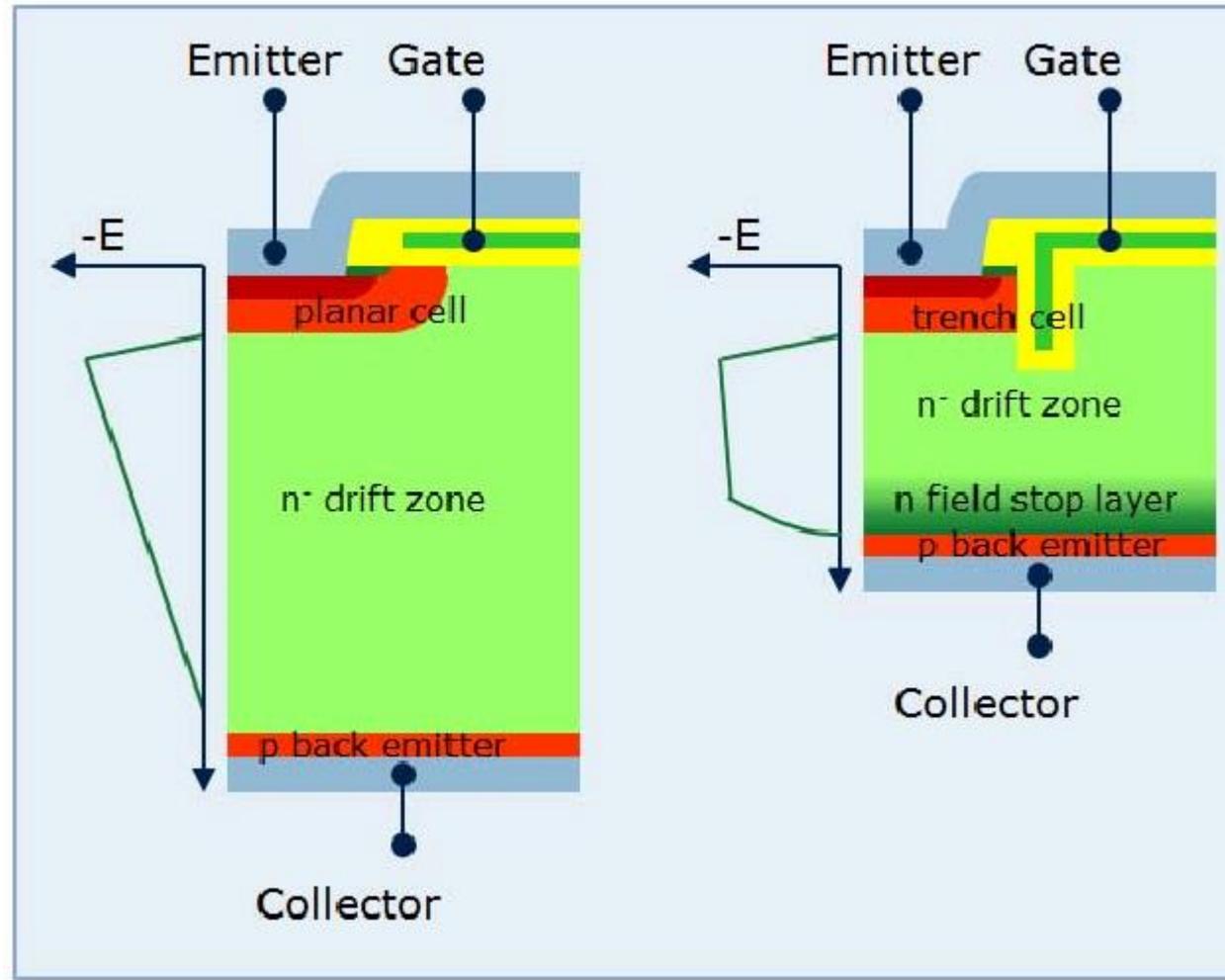
# IGBT Trench

- Aumento da capacidade de condução de corrente!



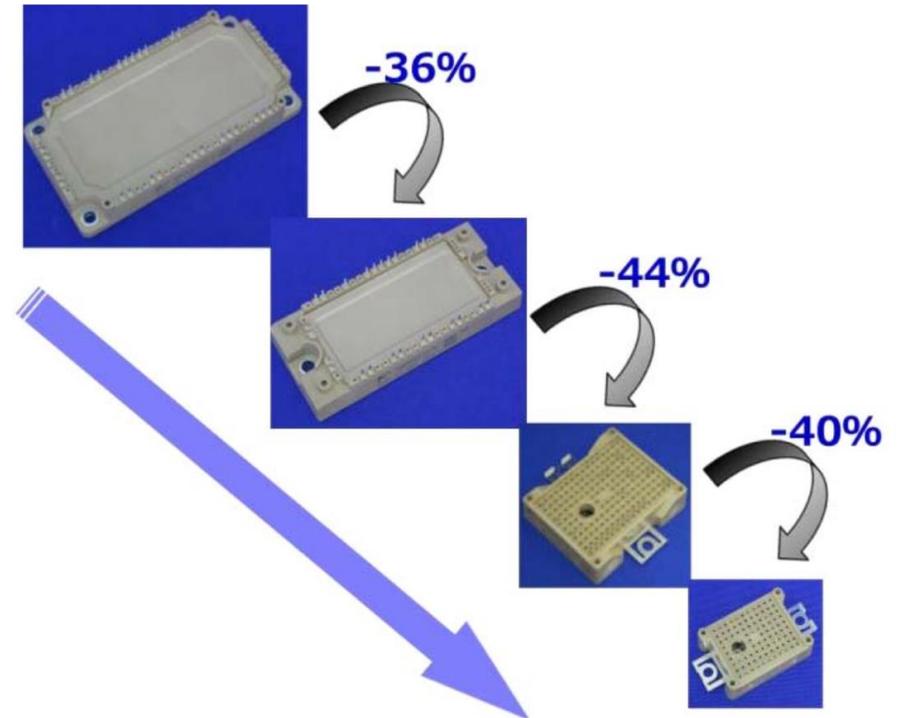
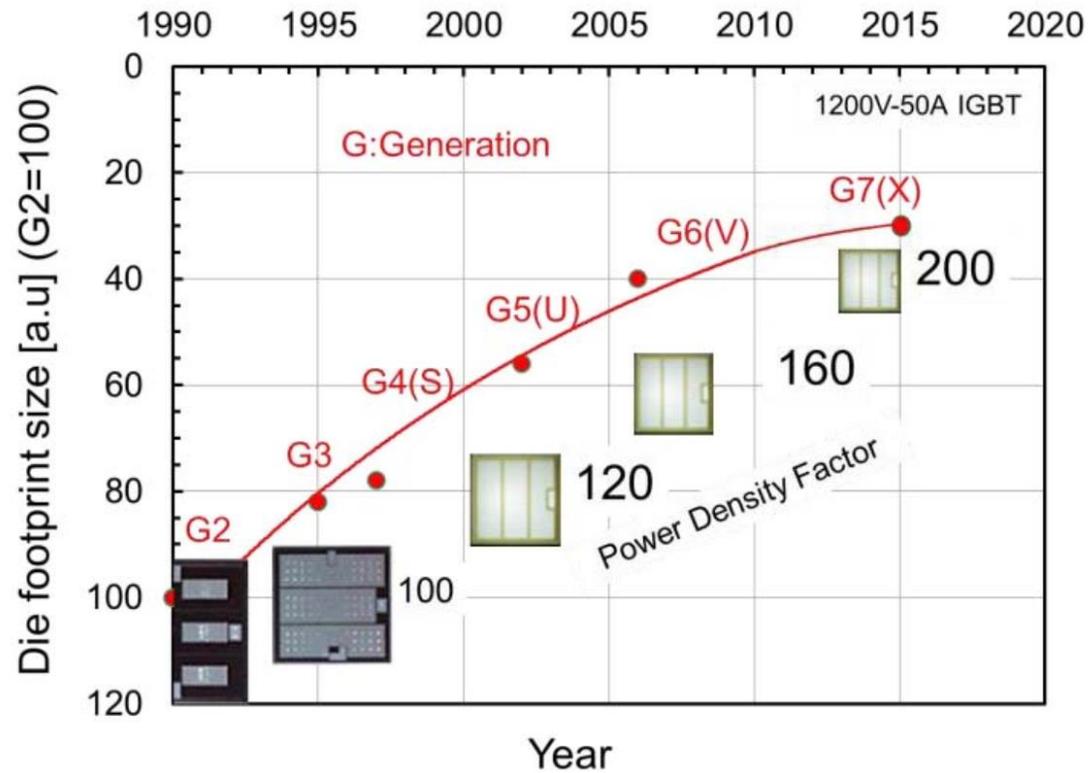
Fonte: F. Iannuzzo, C. Abbate and G. Busatto, "Instabilities in Silicon Power Devices: A Review of Failure Mechanisms in Modern Power Devices," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 3, pp. 28-39, Sept. 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2305758.

# IGBT Trench + Field Stop



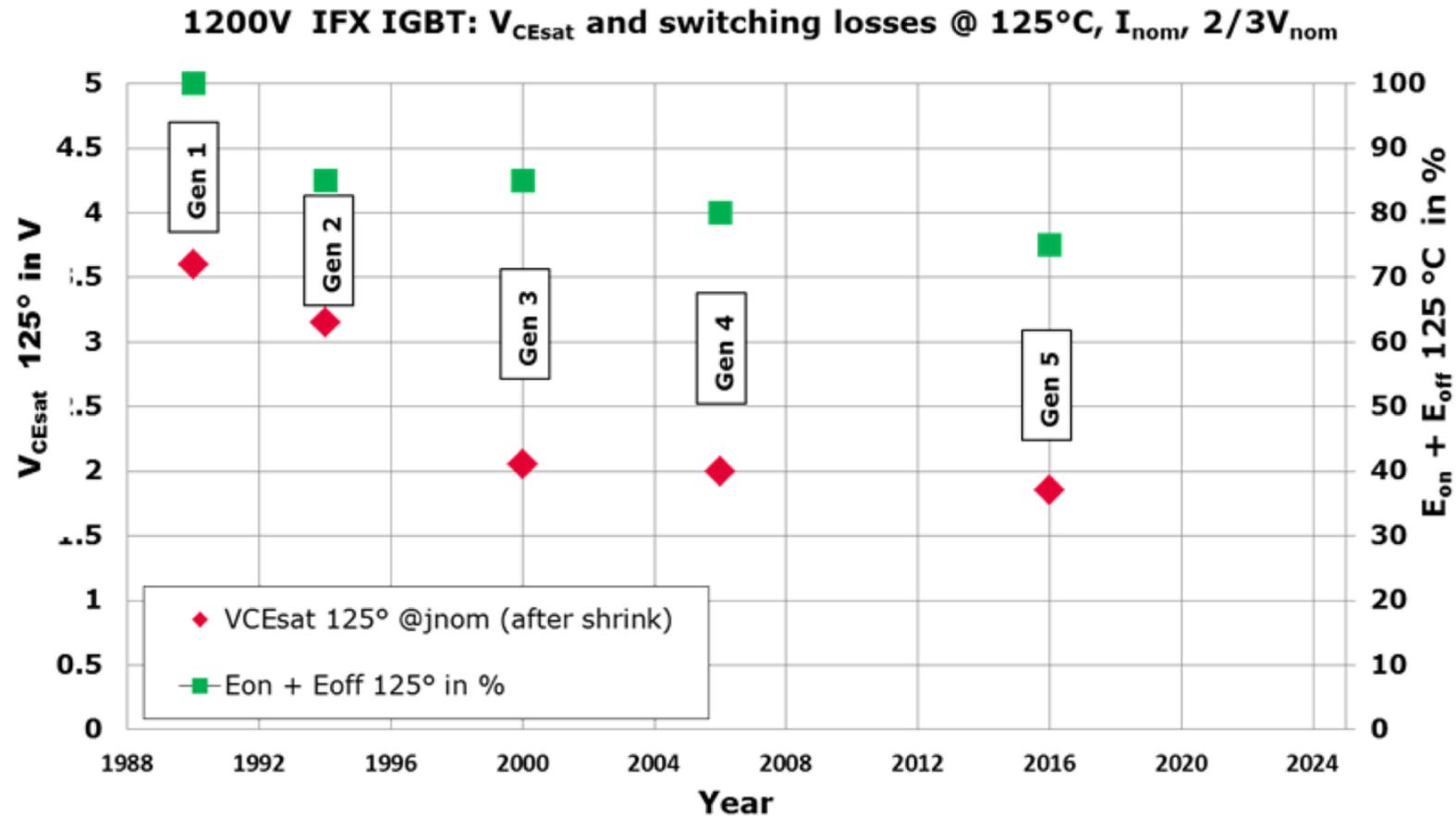
Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

# Evolução da tecnologia



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

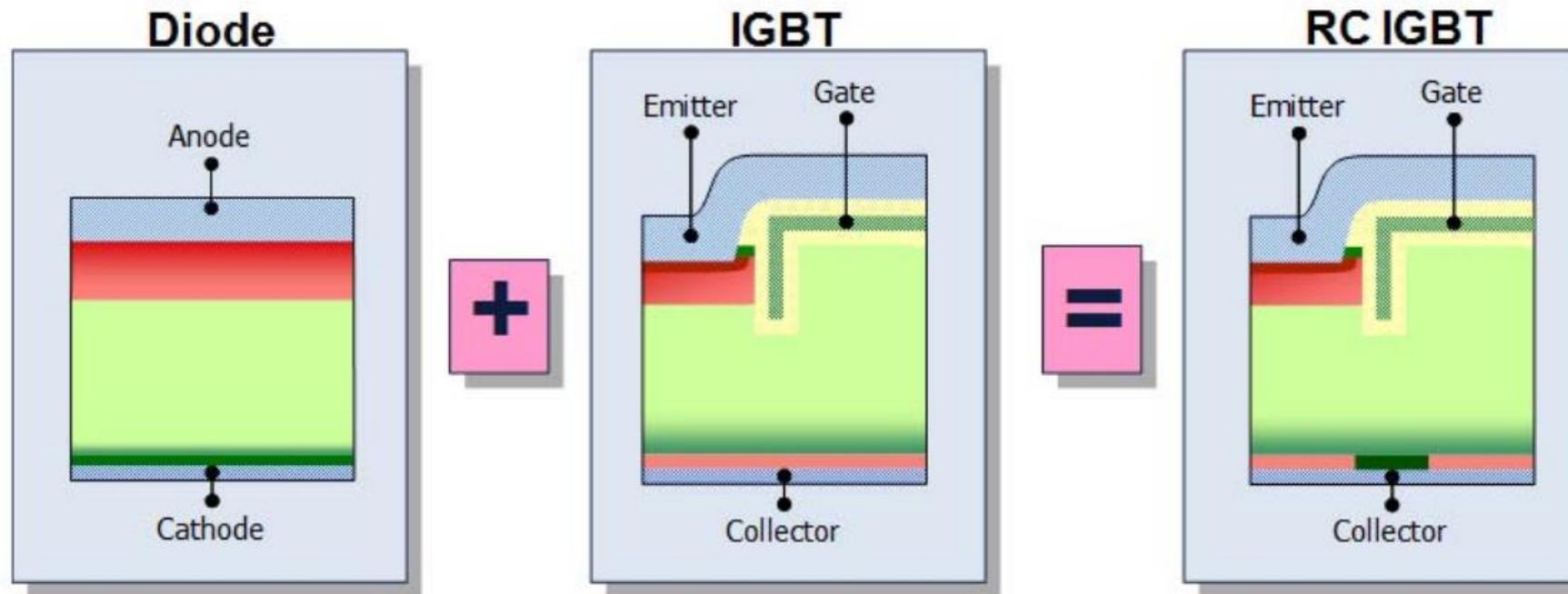
# Evolução da tecnologia



Fonte: Franz-Josef Niedernostheide, Hans-Joachim Schulze, Thomas Laska e Alexander Philippou "Progress in IGBT development". IET Power Electronics 2016.

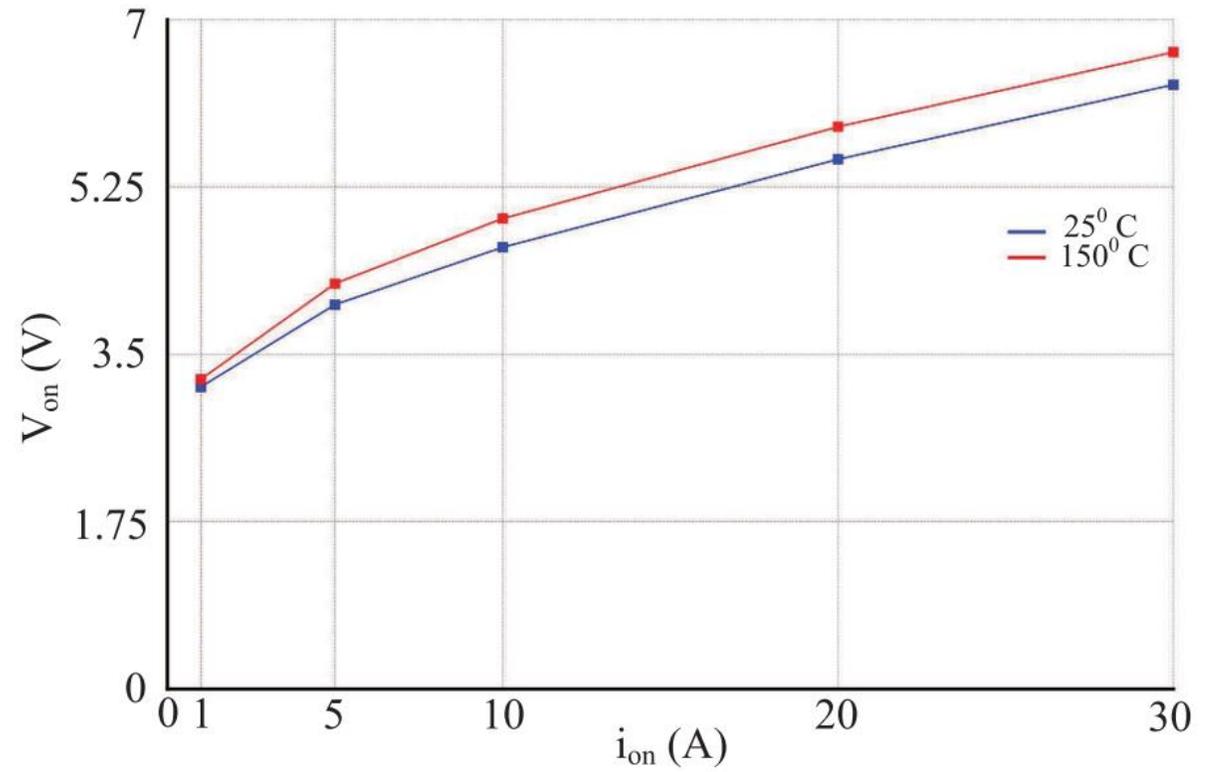
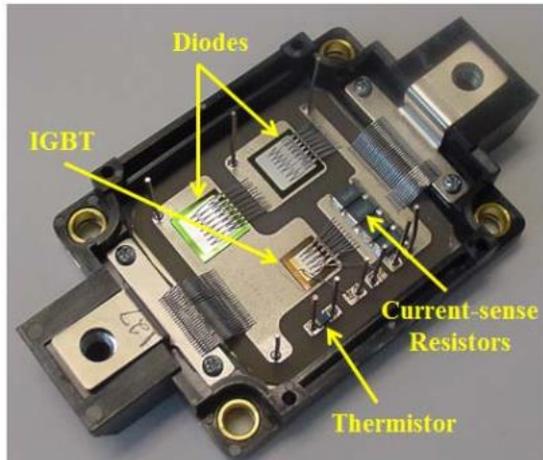
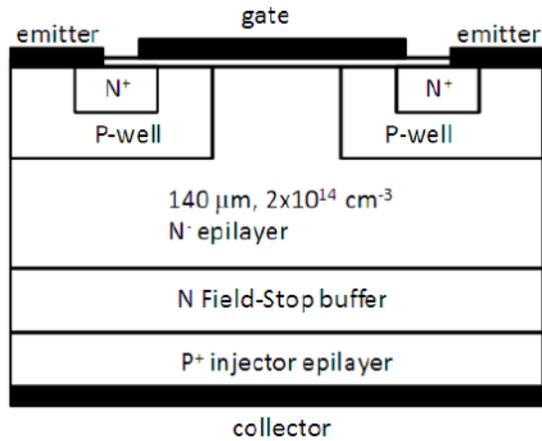
# RC-IGBT

- ❑ Shorted-Anode IGBT;
- ❑ Aplicação em conversores ressonantes.



Fonte: N. Iwamuro and T. Laska, "IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 64, no. 3, pp. 741-752, March 2017.

# IGBT de SiC (15 kV-40A)



A. Kadavelugu et al., "Characterization of 15 kV SiC n-IGBT and its application considerations for high power converters," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 2528-2535.

# Obrigado pela Atenção



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



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



[https://www.instagram.com/gesep\\_vicosa/](https://www.instagram.com/gesep_vicosa/)



[https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh\\_hDBIcxMU2Nw](https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw)



Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



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