

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - UNICAMP

EE 833 - ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

COMPONENTES SEMICONDUCTORES RÁPIDOS DE POTÊNCIA

4.1 Transistor Bipolar de Potência (TBP)

4.1.1 Princípio de funcionamento

A operação normal de um transistor é feita com a junção base-emissor, J1 diretamente polarizada, e com a junção base-coletor J2 reversamente polarizada.

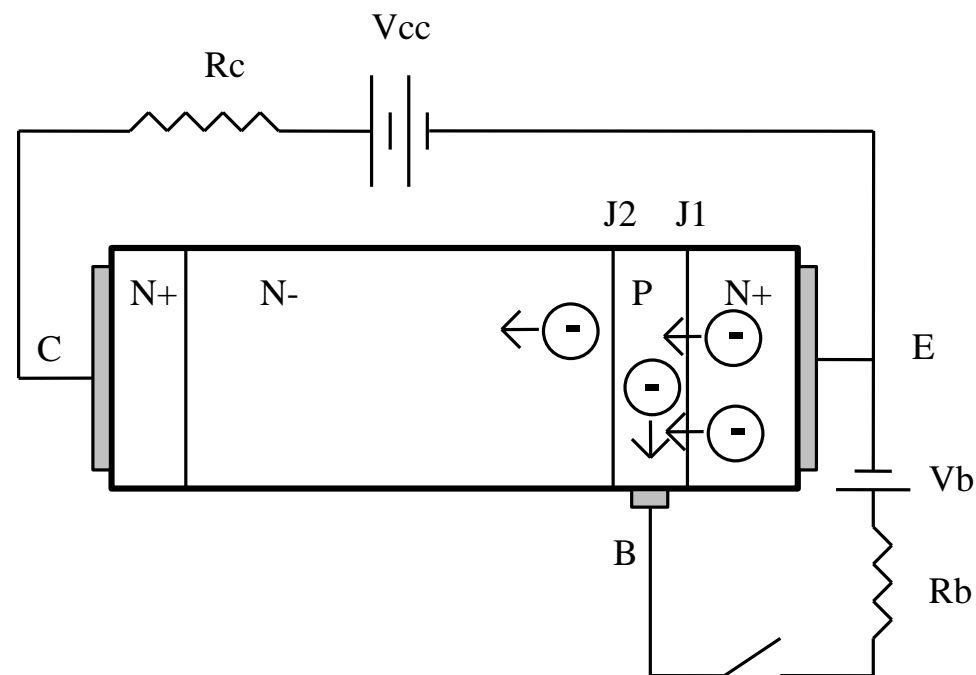


Figura 4.8. Estrutura básica de transistor bipolar.

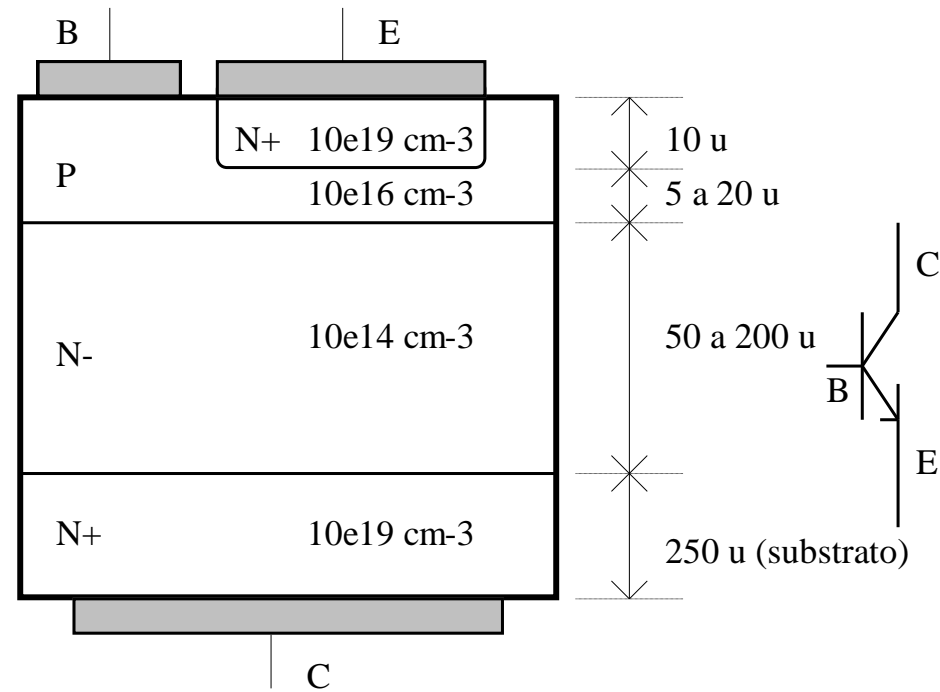


Figura 4.9. Estrutura interna de TBP e seu símbolo.

O uso preferencial de TBP tipo NPN se deve às menores perdas em relação aos PNP, o que ocorre por causa da maior mobilidade dos elétrons em relação às lacunas, reduzindo, principalmente, os tempos de comutação do componente.

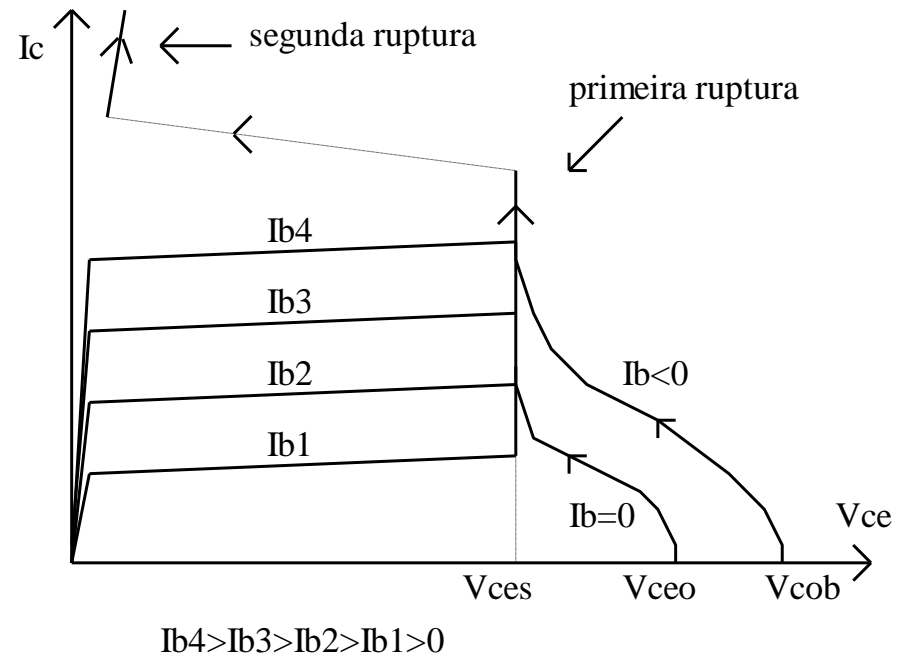


Figura 4.10 Característica estática de transistor bipolar.

4.1.2 Área de Operação Segura (AOS)

À medida que a corrente se apresenta em pulsos (não repetitivos) a área se expande. Para pulsos repetitivos deve-se analisar o comportamento térmico do componente para se saber se é possível utilizá-lo numa dada aplicação, uma vez que a AOS, por ser definida para um único pulso, é uma restrição mais branda. Esta análise térmica é feita com base no ciclo de trabalho (tempo de condução em relação ao período de chaveamento) a que o dispositivo está sujeito, aos valores de tensão e corrente e à impedância térmica do transistor, a qual é fornecida pelo fabricante.

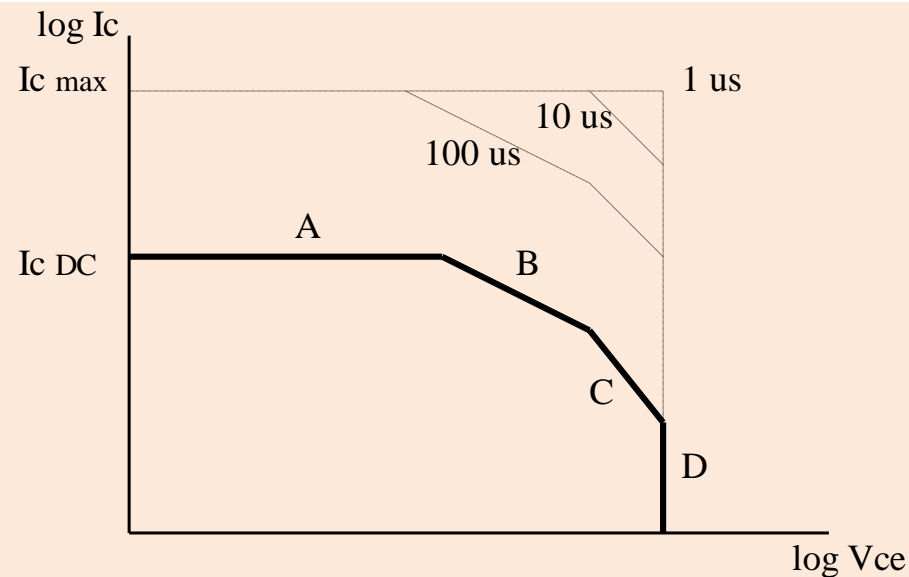


Figura 4.11. Aspecto típico de AOS de TBP

A: Máxima corrente contínua de coletor

B: Máxima potência dissipável

C: Limite de segunda ruptura

D: Máxima tensão Vce

4.1.3 Região de saturação

Na região ativa, J2 está reversamente polarizada e ocorre uma acumulação de elétrons na região da base. Quando se aproxima da saturação, J2 (V_{bc}) fica diretamente polarizada, atraindo lacunas da base para o coletor. Tais lacunas associam-se a elétrons vindos do emissor e que estão migrando pelo componente, criando uma carga espacial que penetra a região N-. Isto representa um "alargamento" da região da base, implicando na redução do ganho do transistor. **Tal situação caracteriza a chamada quase saturação.**

A saturação se caracteriza pelo fato de ambas as junções se tornarem diretamente polarizadas. Com isso a região da base realiza uma injeção de lacunas (portadores minoritários) na região do coletor (N-).

No desligamento toda carga acumulada terá que ser removida antes do bloqueio do TBP, o que sinaliza a importância do circuito de acionamento de base para que o TBP possa minimizar o tempo de desligamento e a dissipação de potência (associada ao valor de V_{ce}). O tempo necessário para a extração dos portadores minoritários é chamado "**tempo de armazenamento**" (*storage time*).

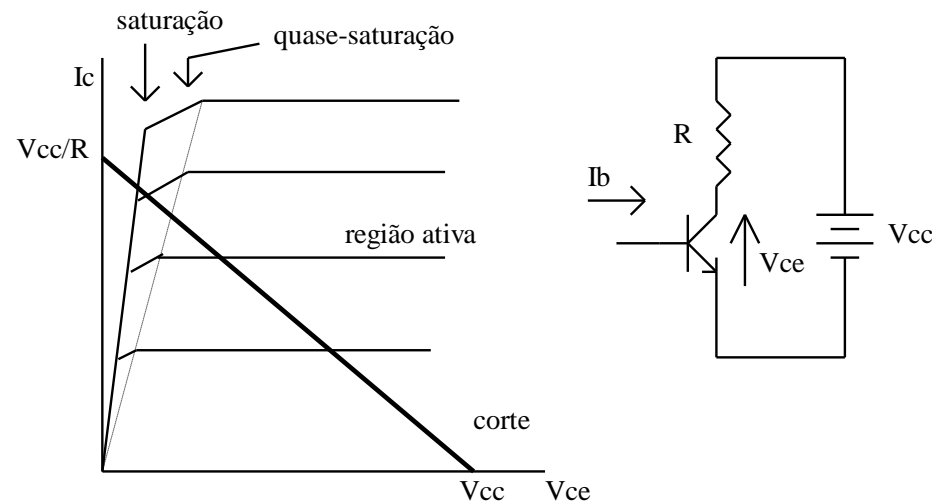


Figura 4.12 Região de quase-saturação do TBP.

4.1.4 Forma da corrente de base

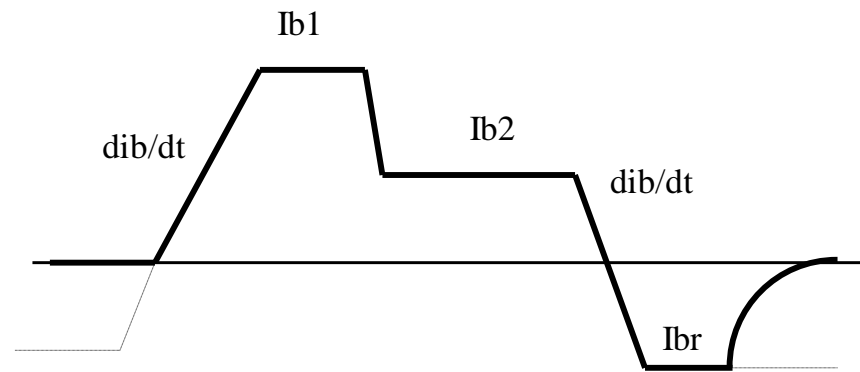


Figura 4.13 Forma de onda de corrente de base recomendada para acionamento de TBP.

4.2 MOSFET

4.2.1 Princípio de funcionamento (canal N)

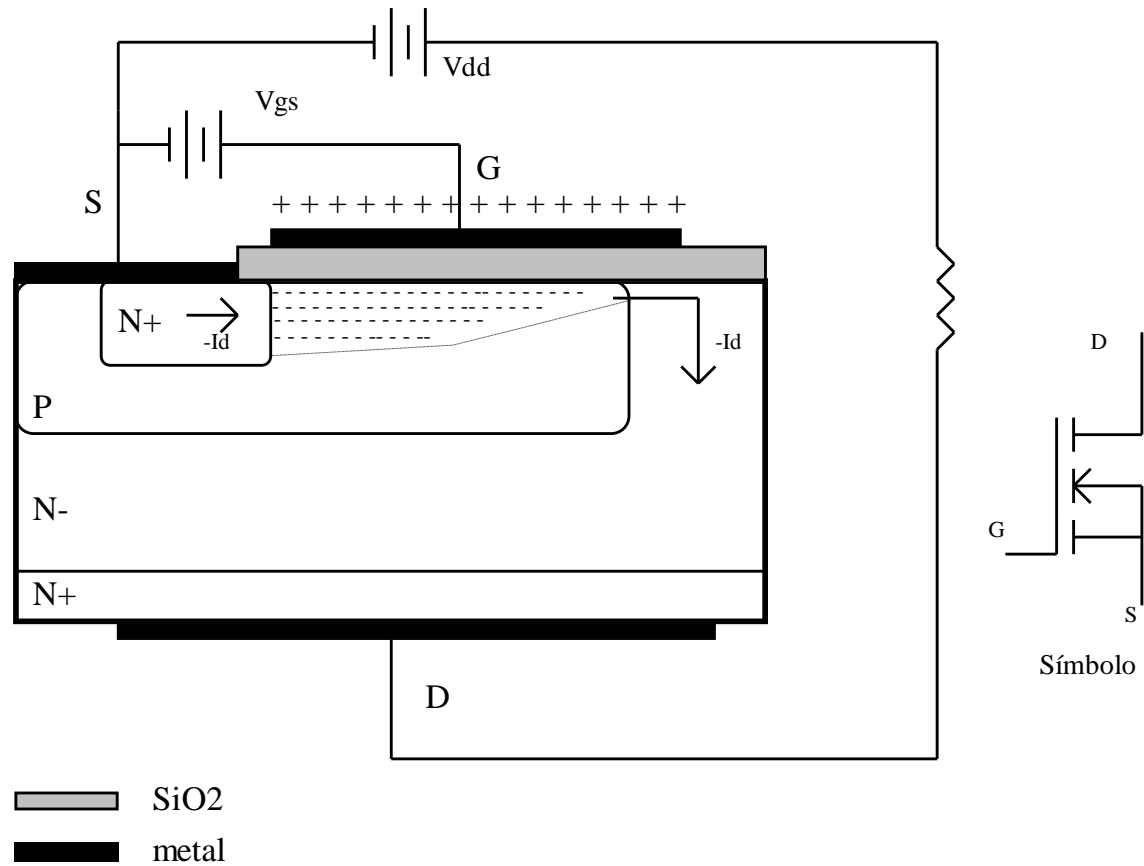


Figura 4.14. Estrutura básica de transistor MOSFET.

4.2.2 Área de Operação Segura

A figura 4.16 mostra a AOS dos MOSFET. Para tensões elevadas ela é mais ampla que para um TBP equivalente, uma vez que não existe o fenômeno de segunda ruptura. Para baixas tensões, entretanto, tem-se a limitação da resistência de condução.

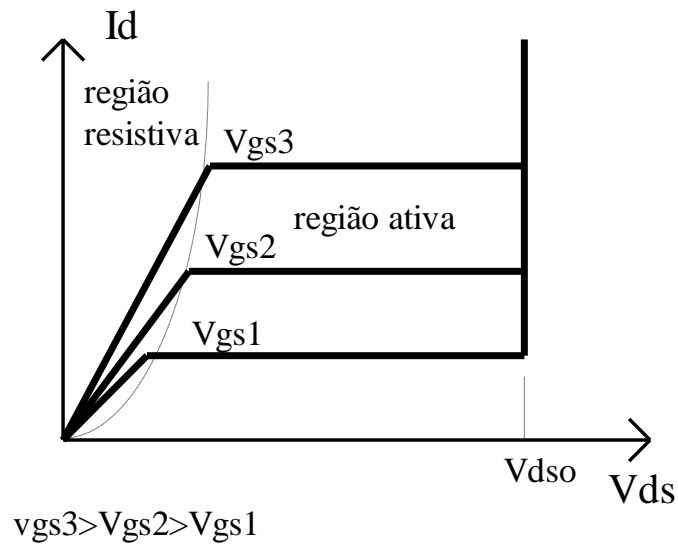


Figura 4.15. Característica estática do MOSFET.

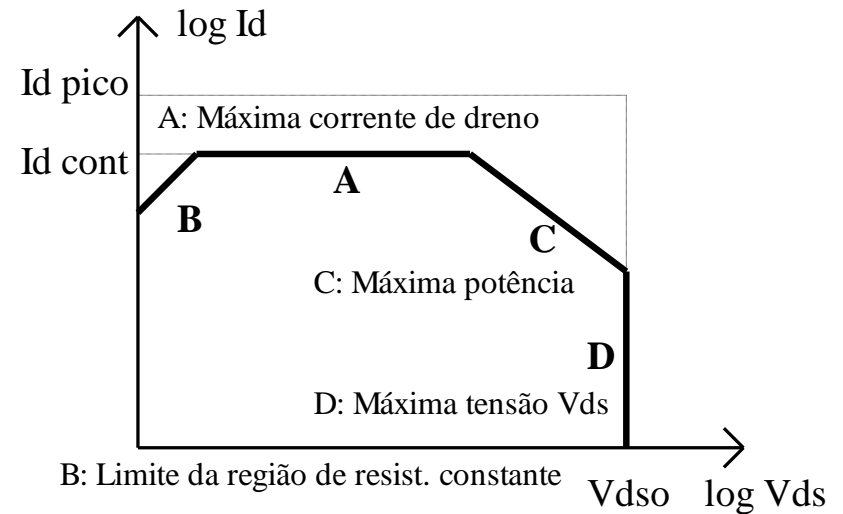


Figura 4.16 AOS para MOSFET.

4.2.3 Característica de chaveamento - carga indutiva

a) Entrada em condução

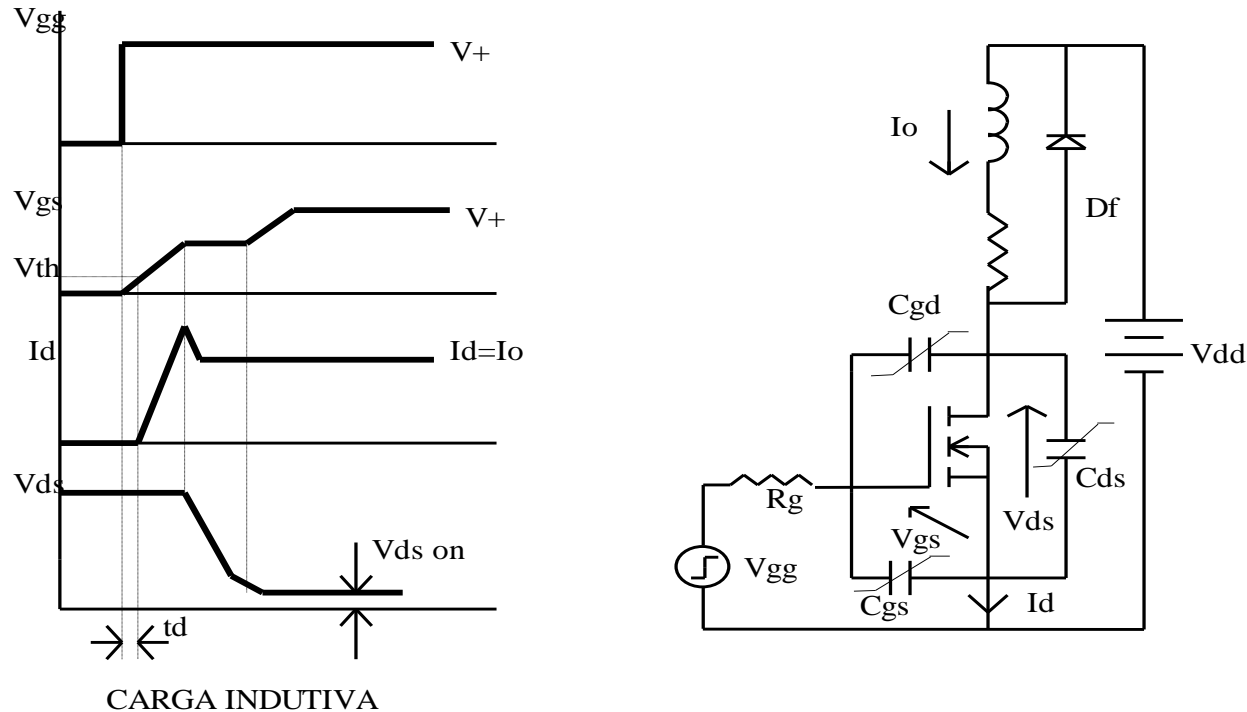


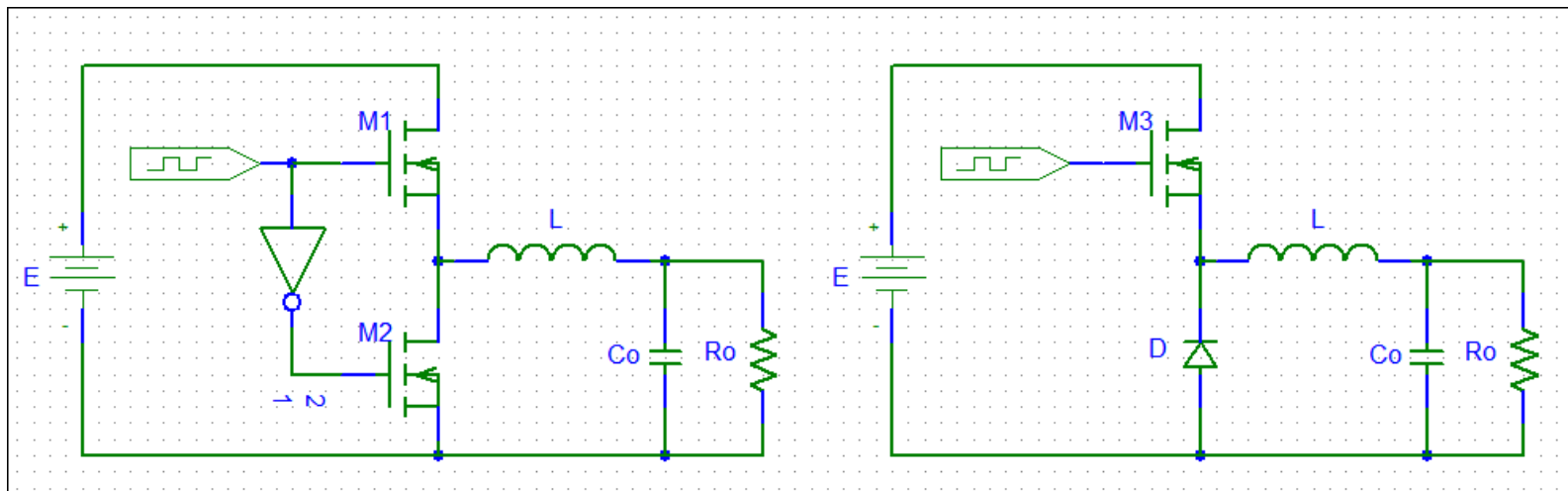
Figura 4.17 Formas de onda na entrada em condução de MOSFET com carga indutiva.

b) Desligamento

O processo de desligamento é semelhante, na ordem inversa. O uso de uma tensão V_{gg} negativa apressa o desligamento, pois acelera a descarga da capacitância de entrada.

Como os MOSFETs não apresentam portadores minoritários estocados, ou seja, num MOSFET canal N todos os portadores em trânsito são elétrons, não existe o tempo de armazenamento, por isso são muito mais rápidos que os TBP.

4.2.4 Retificador síncrono



MOSFET operando como retificador síncrono (esq.) e circuito convencional com diodo (dir.)

Para que se possa usar o MOSFET nessa função a restrição é que V_{sd} seja reduzido, o que se obtém com baixa corrente ou com baixa resistência R_{DSon} . Os dispositivos de baixa tensão (em especial os com capacidade de bloqueio de algumas dezenas de Volts) possuem resistência muito baixa, nos melhores dispositivos abaixo de $1\text{m}\Omega$, com capacidade de condução de centenas de Ampères. Suponha que a corrente reversa seja de 100 A e a resistência de $1\text{m}\Omega$, a queda de tensão será de apenas 100 mV . Nenhum diodo de silício apresenta uma queda de tensão tão reduzida.

Por essa razão MOSFETs operando como retificador síncrono são os dispositivos utilizados nas fontes de ultra-baixa tensão, como nos reguladores utilizados para a alimentação dos *cores* de microprocessadores. Sem eles seria impossível fornecer as dezenas de Watts e dezenas de Ampères exigidos por tais dispositivos.

4.2.5 Circuitos amaciadores (ou de ajuda à comutação) - "snubber"

a) Desligamento - Objetivo: atrasar o crescimento de V_{ds} e desviar I_d (figura 4.18)

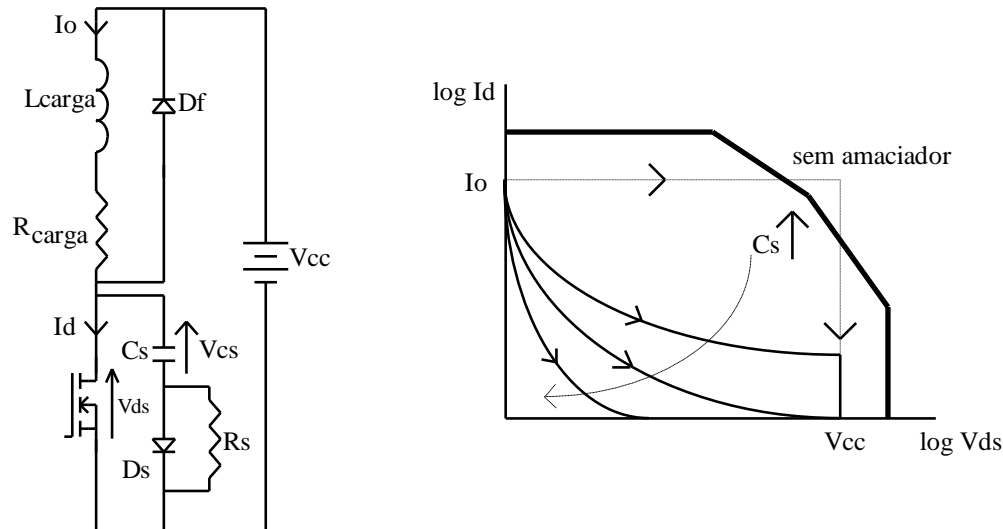


Figura 4.18. Circuito amaciador de desligamento e trajetórias na AOS

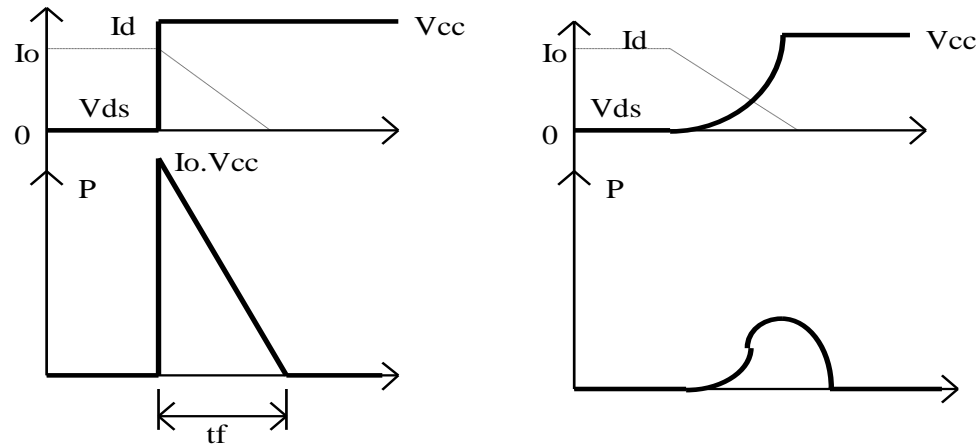


Figura 4.19. Formas de onda no desligamento sem e com o circuito amaciador.

b) Entrada em condução: Objetivo: reduzir V_{ds} e atrasar o aumento de I_d

No circuito sem amaciador, após o disparo do transistor, I_d cresce, mas V_{ds} só se reduz quando D_f deixar de conduzir. A colocação de L_s provoca uma redução de V_{ds} , além de reduzir a taxa de crescimento de I_d . Normalmente não se utiliza este tipo de circuito, considerando que L_s possui baixo valor e pode ser substituído pela própria indutância parasita do circuito.

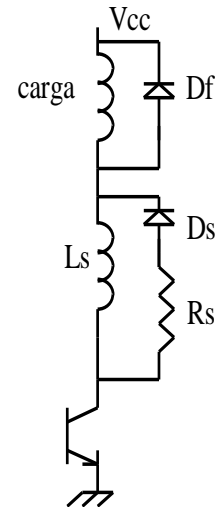


Figura 4.20. Circuito amaciador para entrada em condução.

4.3 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

O IGBT alia a facilidade de acionamento dos MOSFET com as pequenas perdas em condução dos TBP. Sua velocidade de chaveamento é maior do que dos MOSFETs e menor à dos transistores bipolares.

4.3.1 Princípio de funcionamento

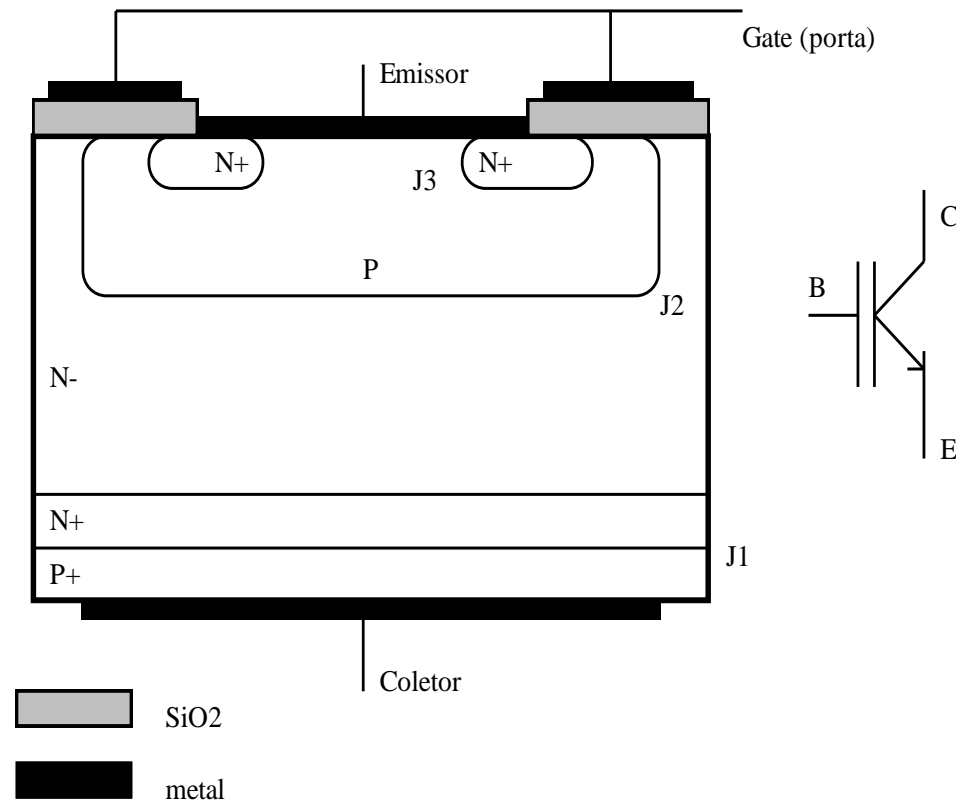


Figura 4.21. Estrutura básica de IGBT.

4.3.2 Características de chaveamento

A entrada em condução é similar ao MOSFET, sendo um pouco mais lenta a queda da tensão V_{ce} , uma vez que isto depende da chegada dos portadores vindos da região P+.

Para o desligamento, no entanto, tais portadores devem ser retirados. Nos TBPs isto se dá pela drenagem dos portadores via base, o que não é possível nos IGBTs, devido ao acionamento isolado. A solução encontrada foi a inclusão de uma camada N+, na qual a taxa de recombinação é bastante mais elevada do que na região N-. Desta forma, as lacunas presentes em N+ recombina-se com muita rapidez, fazendo com que, por difusão, as lacunas existentes na região N- refluem, apressando a extinção da carga acumulada na região N-, possibilitando o restabelecimento da barreira de potencial e o bloqueio do componente.

4.4 Alguns Critérios de Seleção – Componentes de Si

Um primeiro critério é o dos limites de tensão e de corrente. Os MOSFET possuem uma faixa mais reduzida de valores, ficando, tipicamente entre: 100 V/200 A e 1000 V/20 A. Os MOSFET de baixa tensão possuem resistência R_{ds} muito baixa, permitindo quedas de tensão menores do que as dos outros componentes.

Já os TBP e IGBT atingem potências mais elevadas, indo até 1200 V/500 A.

Como o acionamento do IGBT é muito mais fácil do que o do TBP, seu uso tem sido crescente, em detrimento dos TBP.

Outro importante critério para a seleção refere-se às perdas de potência no componente. Assim, em aplicações em alta frequência (acima de 50 kHz) devem ser utilizados MOSFETs. Em frequências mais baixas, qualquer dos três componentes pode responder satisfatoriamente.

As perdas em condução dos TBPs e dos IGBTs são sensivelmente menores que as dos MOSFET de tensão elevada (na faixa de 400 a 1000 V).

Como regra básica no caso de diodos de silício:

- em alta frequência: MOSFET
- em baixa tensão: MOSFET
- custo mínimo: TBP
- nos demais casos: IGBT

4.5 Materiais Emergentes

Uma análise pode ser feita comparando o impacto dos parâmetros mostrados na tabela 4.I sobre algumas características de componentes (hipotéticos) construídos com tais materiais. As tabelas 4.II a 4.IV mostram as variações de alguns parâmetros.

Tabela 4.I Propriedades de materias semicondutores

Propriedade	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	Diamante
Gap de energia a 300K (eV)	1,12	1,43	2,2	2,9	5,5
Condutividade térmica (W/cm.C)	1,5	0,5	5,0	5,0	20
Mobilidade a 300K (cm ² /V.s)	1400	8500	1000	600	2200
Campo elétrico máximo (V/cm)	3.10 ⁵	4.10 ⁵	4.10 ⁶	4.10 ⁶	1.10 ⁷
Temperatura de fusão (°C)	1415	1238	Sublima >> 1800	Sublima >>1800	Muda de fase 2200*

* Diamante → grafite

Nota-se (tabela 4.II) que as resistências da região de deriva são fortemente influenciadas pelos materiais. Estes valores são determinados considerando as grandezas indicadas na tabela 4.I. A resistência de um componente de diamante teria, assim, um valor cerca de 30000 vezes menor do que se tem hoje num componente de Si. O impacto sobre a redução das perdas de condução é óbvio.

Tabela 4.II Resistência ôhmica da região de deriva

Material	Si	GaAs	SiC	Diamante
Resistência relativa	1	6,4.10 ⁻²	9,6.10 ⁻³	3,7.10 ⁻⁵

Na tabela 4.III tem-se, para um dispositivo que deve suportar 1 kV, as necessidades de dopagem e o comprimento da região de deriva. Nota-se também aqui que os novos materiais permitirão uma redução drástica no comprimento dos dispositivos, implicando numa menor quantidade de material, embora isso não necessariamente tenha impacto sobre o custo. Um dispositivo de diamante seria, em princípio, capaz de suportar 1 kV com uma dopagem elevada na região de deriva e num comprimento de apenas 2 μm , ou seja, 50 vezes menos que um componente equivalente de Si.

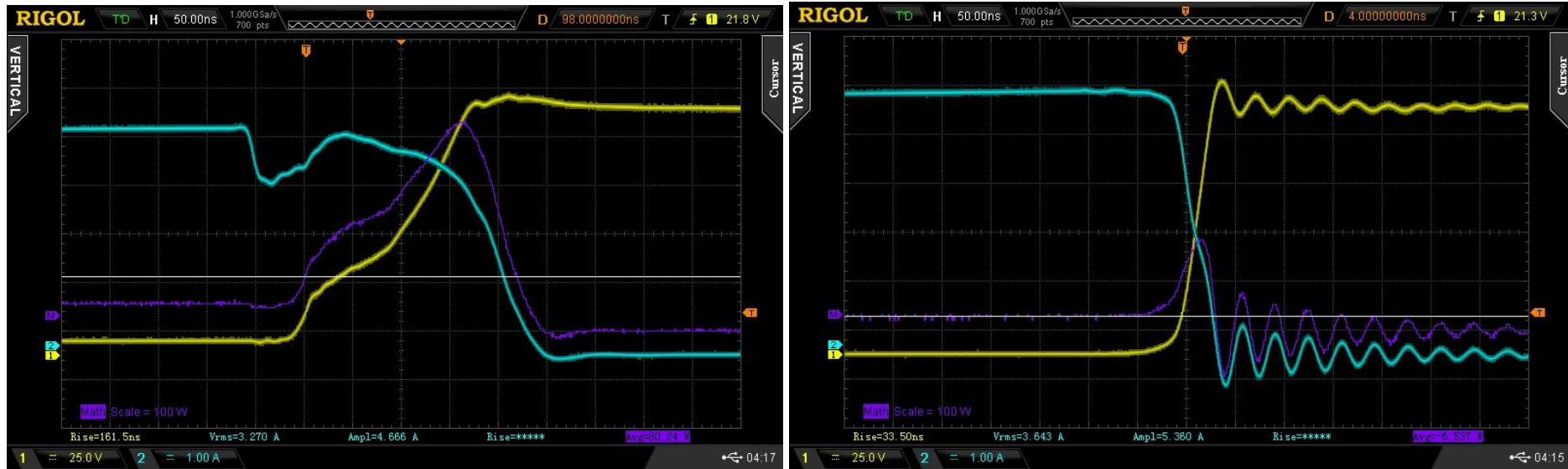
Tabela 4.III Dopagem e comprimento da região de deriva necessário para uma junção abrupta suportar 1 kV

Material	Si	GaAs	SiC	Diamante
Dopagem (cm^{-3})	$1,3 \cdot 10^{14}$	$5,7 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{17}$
Comprimento (μm)	100	50	10	2

Na tabela 4.IV tem-se a redução no tempo de vida dos portadores no interior da região de deriva. Este parâmetro tem implicações sobre a velocidade de comutação dos dispositivos, sendo, assim, esperável que componentes de diamante, sejam algumas ordens de grandeza mais rápidos que os atuais componentes de Si.

Tabela 4.IV Tempo de vida de portador (na região de deriva) para uma junção pn com ruptura de 1000 V

Material	Si	GaAs	SiC	Diamante
Tempo de vida	1,2 μs	0,11 μs	40 ns	7 ns



Comparação de comutação de desligamento de MOSFET de Si (1 kV) e MOSFET SiC (1.2 kV)