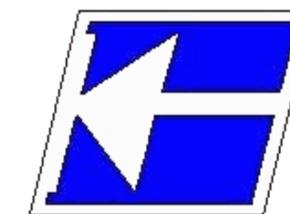




Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Processamento Eletrônico de Energia



Componentes Eletrônicos

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, agosto de 2020.

Curso Básico de Processamento Eletrônico de Energia

O material do curso está disponível em:

1. Moodle para os alunos matriculados na disciplina.
2. Página do professor.
3. Canal no youtube do professor.



<https://moodle.ifsc.edu.br>



www.ProfessorPetry.com.br



<https://www.youtube.com>

Agenda

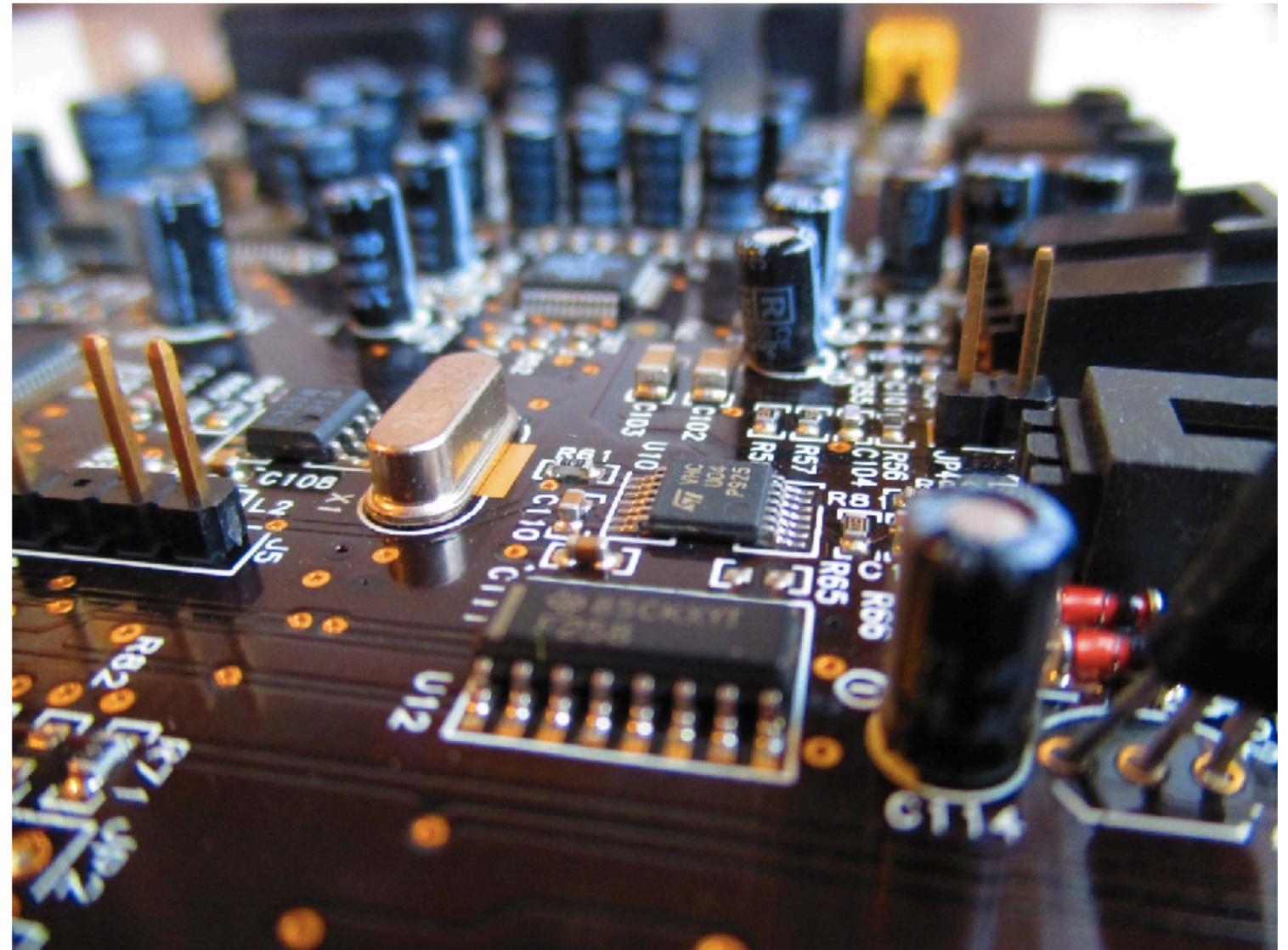
Esta aula está organizada em:

1. Componentes eletrônicos;
 - Resistores, capacitores, indutores e fusistores;
 - Diodos e tiristores;
 - Transistores.
2. Cálculo térmico;
 - Modelo térmico;
 - Exemplos.



Motivação

Os equipamentos eletrônicos são construídos a partir dos componentes passivos e ativos.



Resistores

Definição de resistor:

- Os resistores são componentes que se comportam, em geral, de maneira linear quando submetidos a uma tensão elétrica, que fará circular uma corrente elétrica pelos mesmos. Lembrando que os resistores tem a propriedade de se opor a passagem da corrente elétrica, dissipando energia na forma de calor (efeito Joule).
- Resistores não provocam defasagem entre tensão e corrente, sendo que ambas estão em fase neste componente.



Símbolo

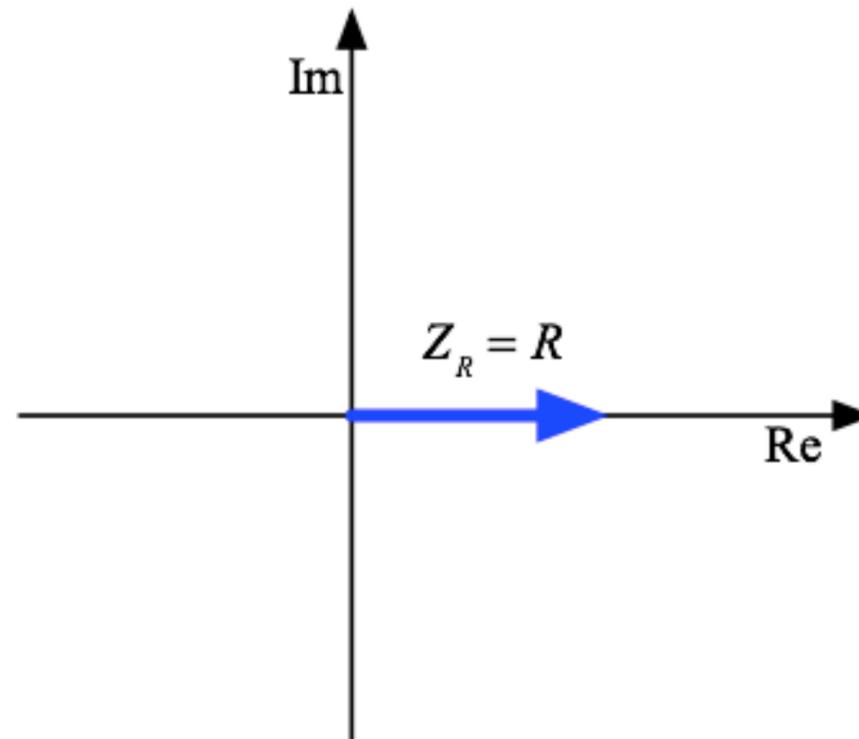


Diagrama fasorial

$$Z_R = R$$
$$i(t) = \frac{v(t)}{R}$$
$$I = \frac{V}{R}$$
$$\vec{I} = \frac{\vec{V}}{R}$$

Equações para o resistor

Indutores

Definição de indutor:

- Os indutores são componentes que se comportam, em geral, de maneira linear quando submetidos a uma tensão elétrica, que fará circular uma corrente elétrica pelos mesmos. No entanto, os indutores se opõem a variação da corrente elétrica, o que implica que os mesmos provocam defasagem da corrente em relação a tensão.
- Indutores provocam uma defasagem de 90° entre a tensão e a corrente, sendo que a corrente está atrasada em relação a tensão.



Símbolo

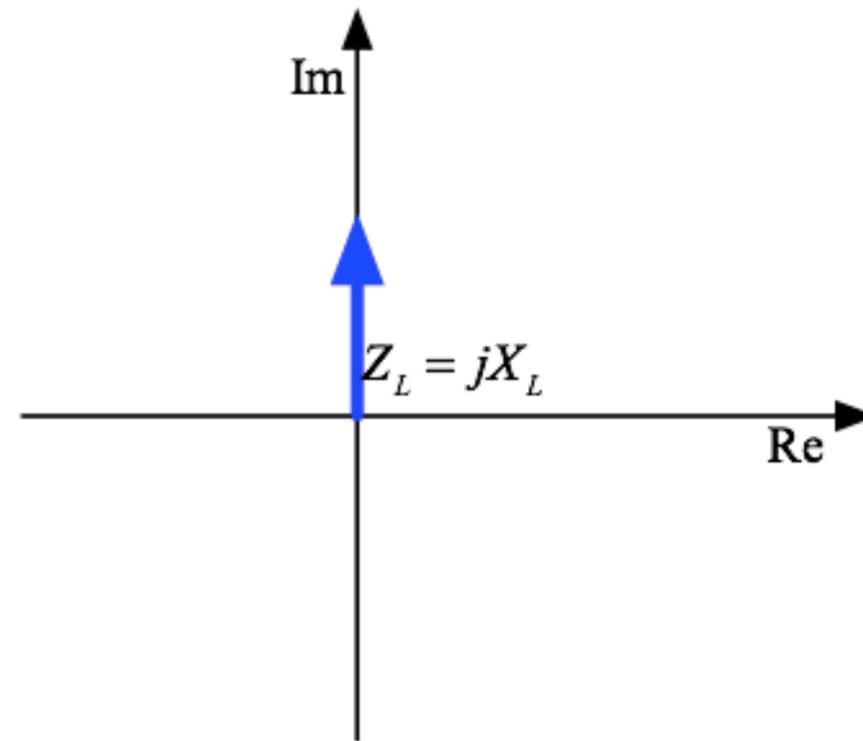


Diagrama fasorial

$$Z_L = j \cdot X_L \rightarrow Z_L = j \cdot \omega \cdot L = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot F \cdot L$$

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$V = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

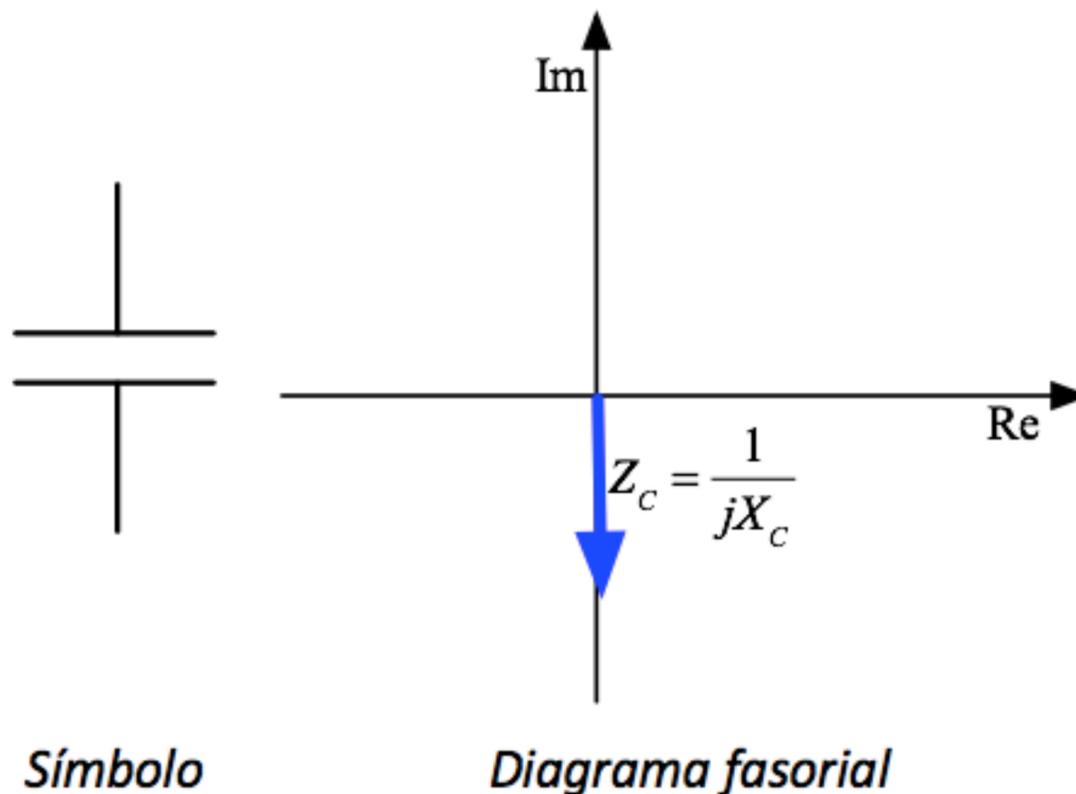
$$\vec{I} = \frac{\vec{V}}{Z_L}$$

Equações para o indutor

Capacitores

Definição de capacitor:

- Os capacitores são componentes que se comportam, em geral, de maneira linear quando submetidos a uma tensão elétrica, que fará circular uma corrente elétrica pelos mesmos. No entanto, os capacitores se opõem a variação da tensão elétrica, o que implica que os mesmos provocam defasagem da tensão em relação a corrente.
- Capacitores provocam uma defasagem de 90° entre a tensão e a corrente, sendo que a corrente está adiantada em relação a tensão.



$$Z_C = \frac{1}{j \cdot X_C} \rightarrow Z_L = \frac{-j}{\omega \cdot C} = \frac{-j}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot C}$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

$$I = C \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\vec{I} = \frac{\vec{V}}{Z_C}$$

Equações para o capacitor

Capacitores

Capacitores:



Modelo equivalente do capacitor

Onde:

- C = Capacitância;
- RSE = Resistência série equivalente;
- LSE = Indutância série equivalente.

$$P = RSE \cdot I_{ef}^2$$

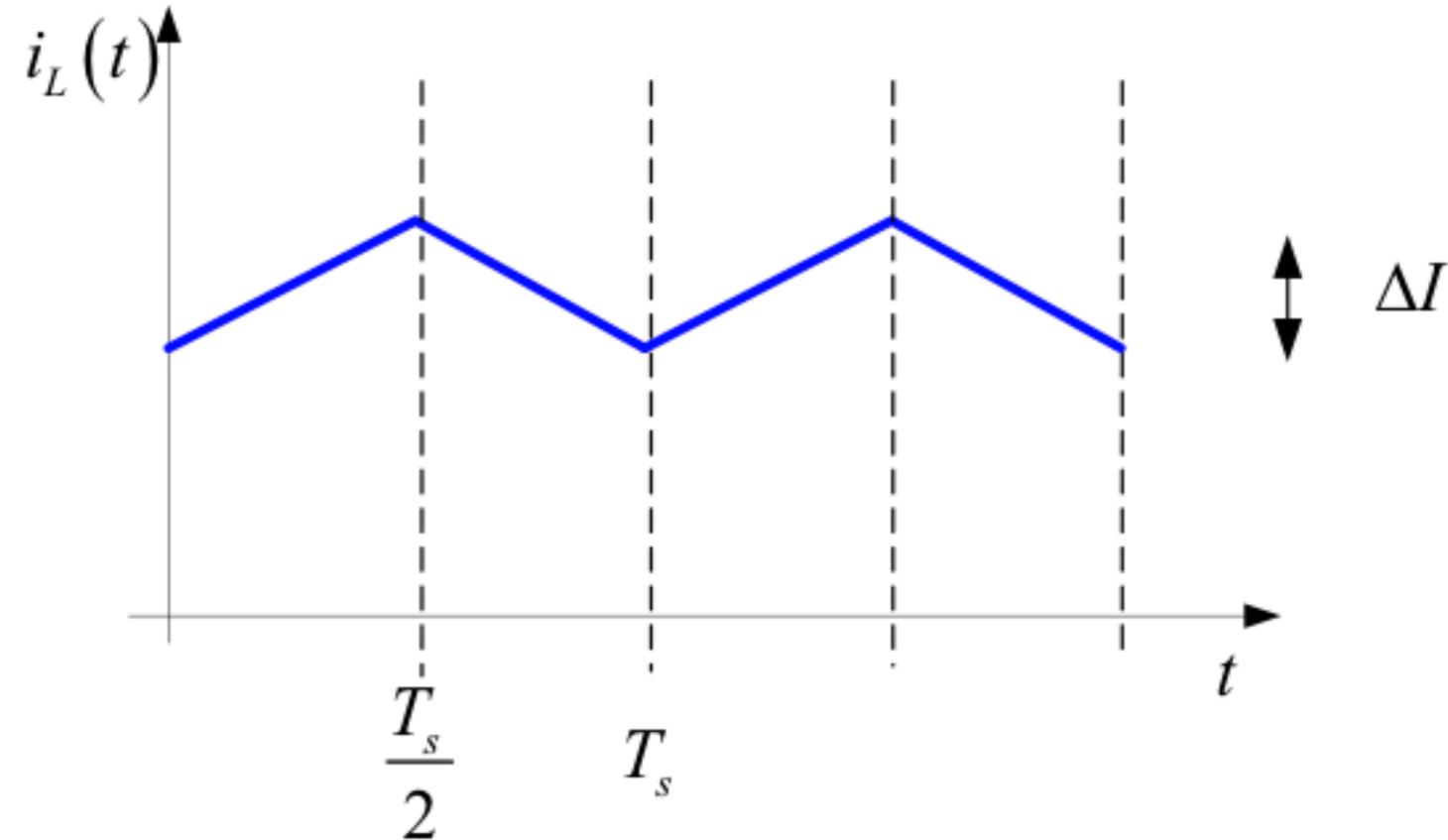
Perdas devido a RSE

Capacitores

Capacitores:

Ondulação de tensão (ripple)

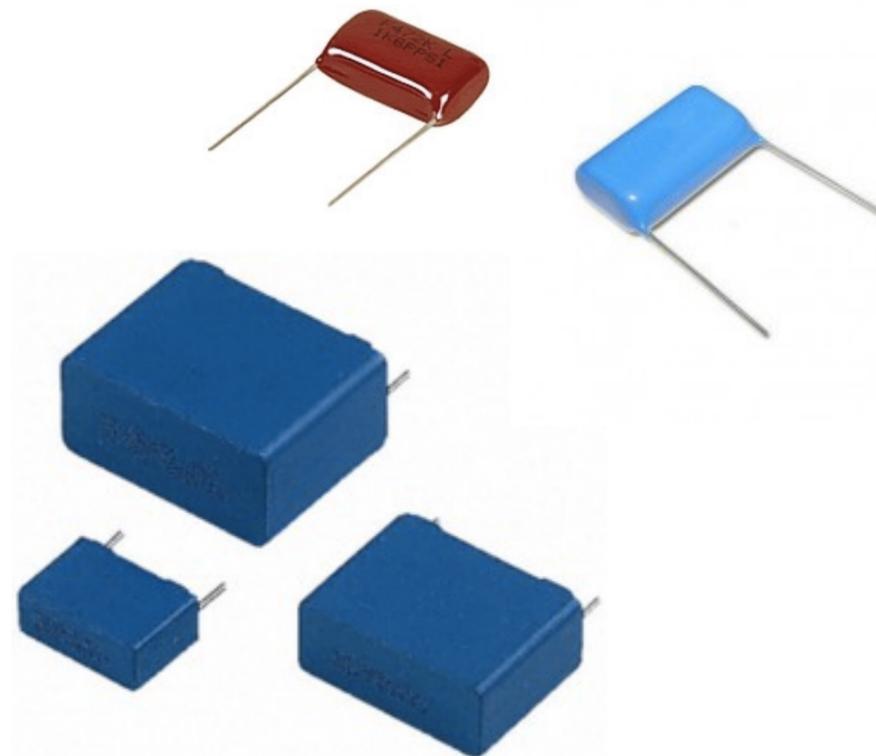
$$\Delta V = RSE \cdot \Delta I$$



Capacitores

Tecnologias de capacitores:

- Filtro do retificador de entrada - São empregados capacitores eletrolíticos de alta tensão e grandes capacitâncias;
- Filtro de saída dos conversores - Empregam-se capacitores eletrolíticos alumínio com baixa RSE;
- Circuitos de grampeamento (snubber) - São utilizados capacitores com dielétricos de polipropileno para regime intermitente de funcionamento.



Fusistores

Fusistores de ação lenta:

- Vidro;
- Areia;
- Cerâmica.

Fusistores de ação rápida:

- Vidro;
- Areia;
- Cerâmica.

Resistores fusíveis (fusistores).



Fusistor



Vidro

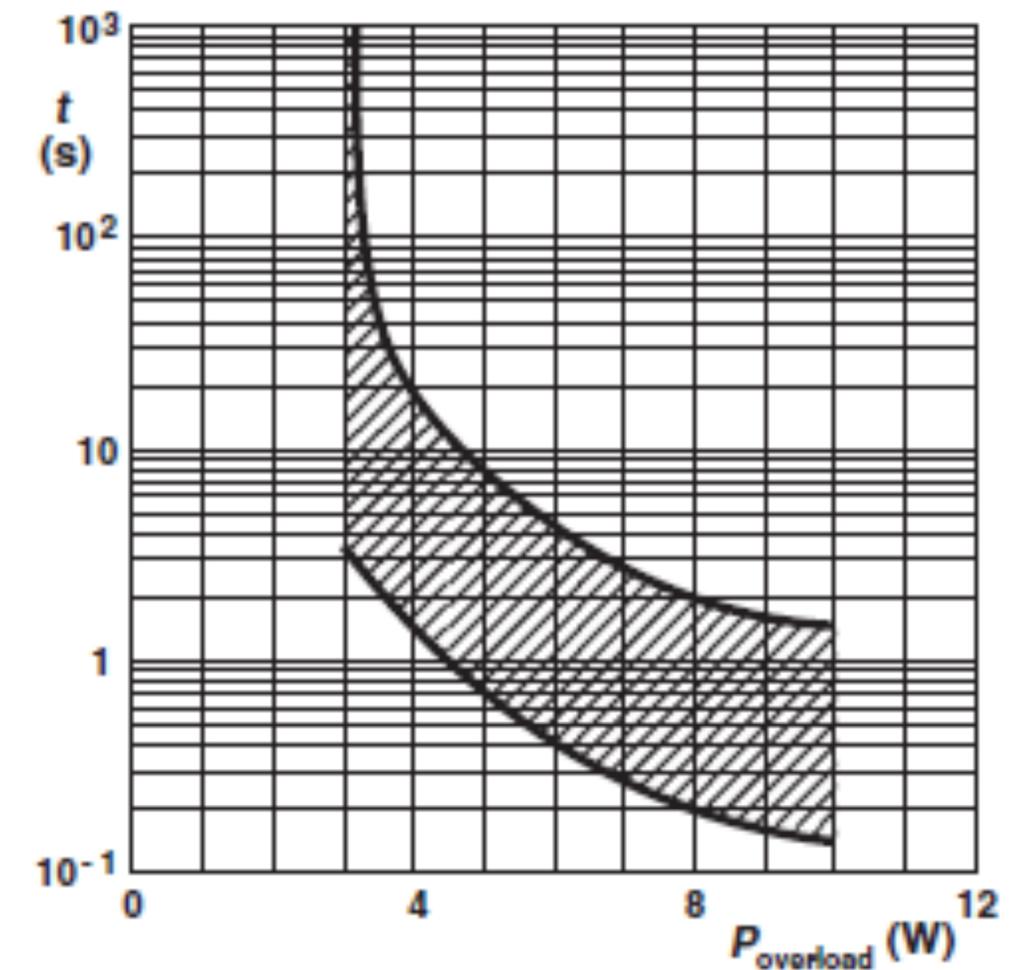


Areia



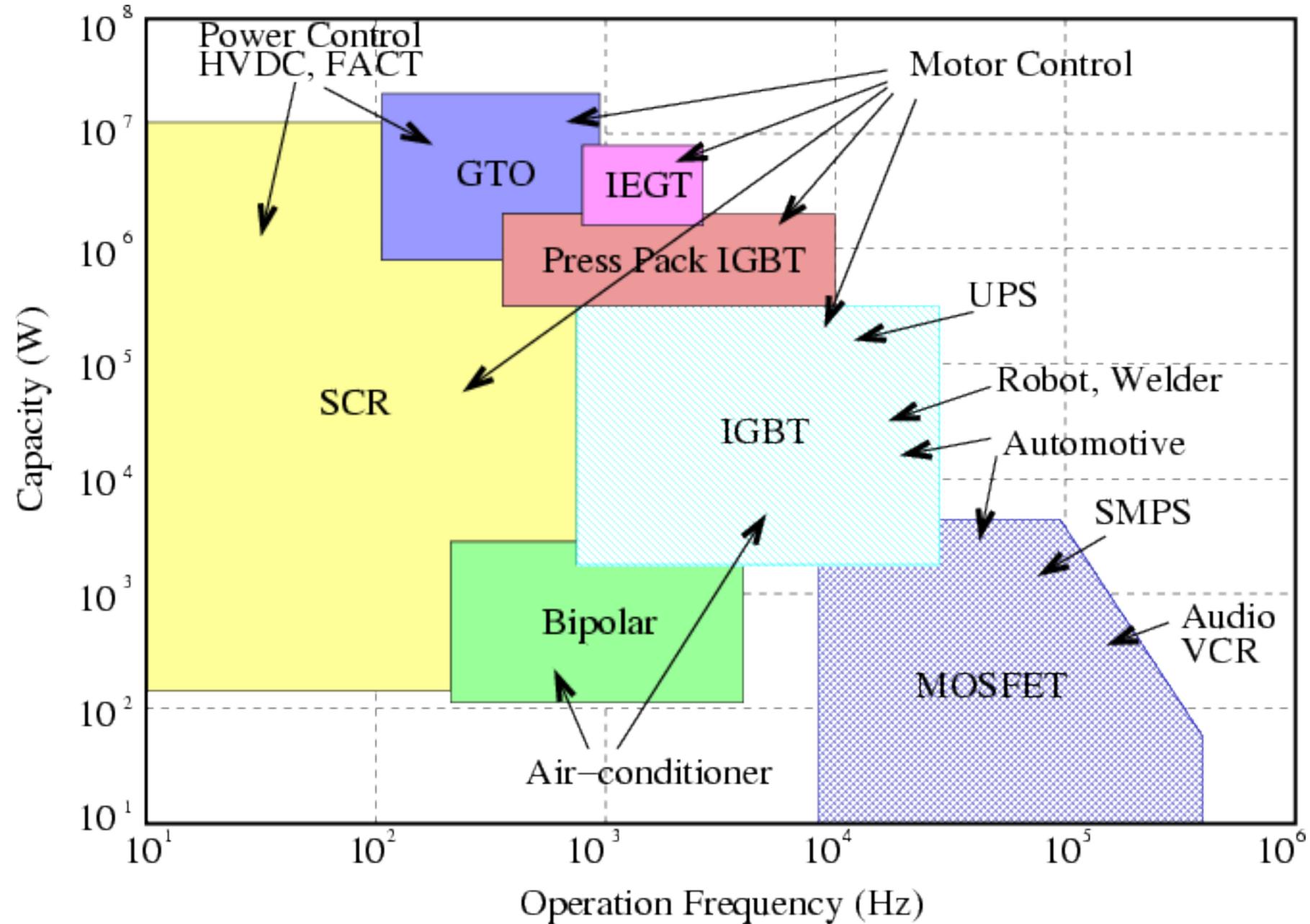
Cerâmica

NR25 - $1 \Omega < R < 15 \Omega$





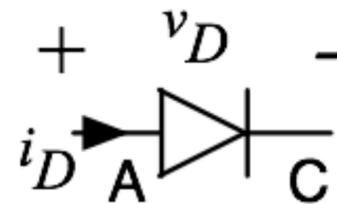
Semicondutores



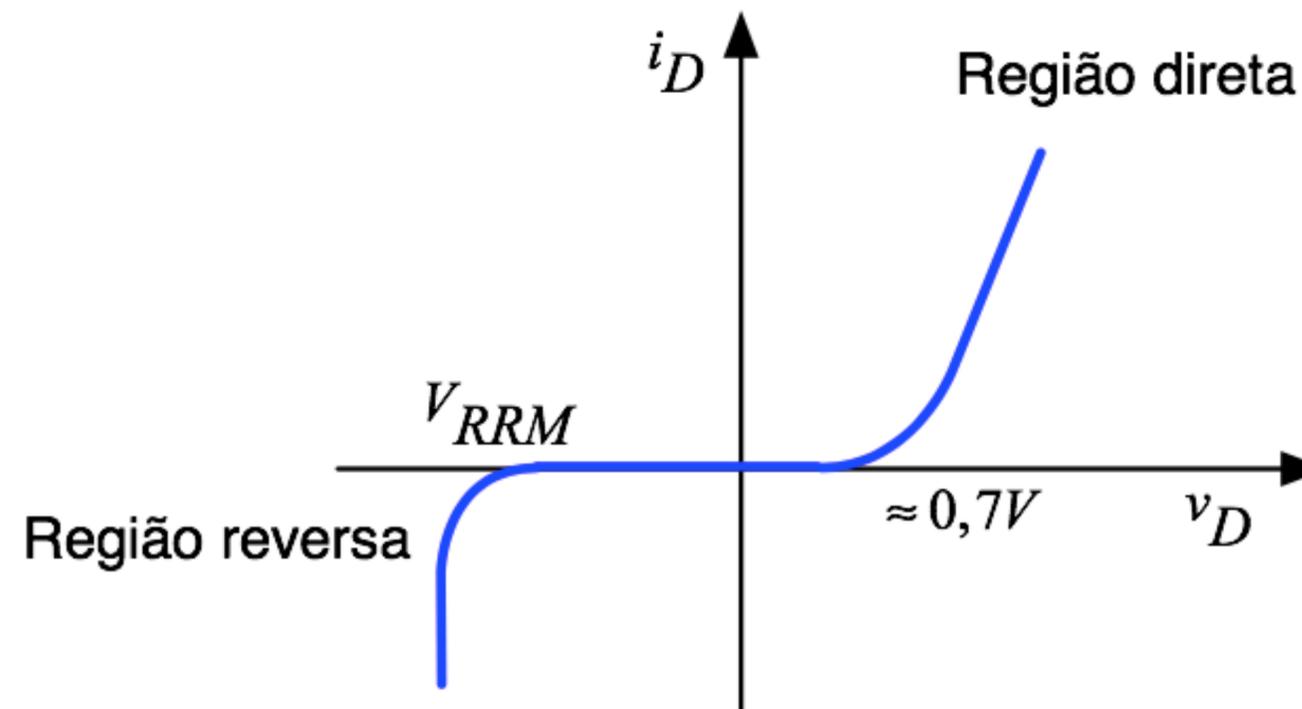
Diodo semicondutor

Definição de diodo:

- Os diodos semicondutores são componentes não-lineares construídos a partir da junção de materiais do tipo p (falta de elétrons) e n (excesso de elétrons).
- Na região direta o diodo entra em condução quando a tensão direta for da ordem de 0,7 V. Já na região reversa o diodo não deve entrar em condução, a não ser que seja atingida a tensão reversa máxima (V_{RRM}). Ao entrar em condução na região reversa, o diodo pode ser danificado por excesso de calor.



Símbolo



Curva I x V

Diodo semicondutor

Principais características dos diodos:

- Corrente direta média - é a corrente que o diodo suporta, em condução contínua (valor médio);
- Corrente direta máxima - é a corrente que o diodo suporta, por exemplo ao se ligar uma fonte, é muito superior à corrente média;
- Tensão direta - é a queda de tensão que o diodo provoca ao estar inserido no circuito e conduzindo;
- Tensão reversa máxima - é a máxima tensão que pode ser aplicada no sentido reverso, a partir da qual o diodo entra em condução também na região reversa.

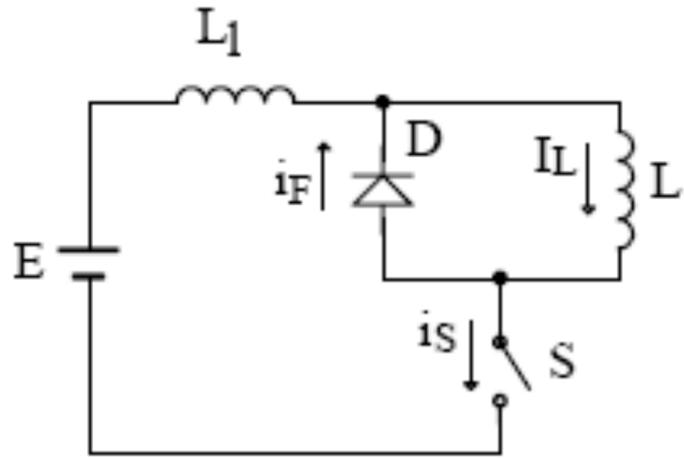


DO-41 (DO-204AL)

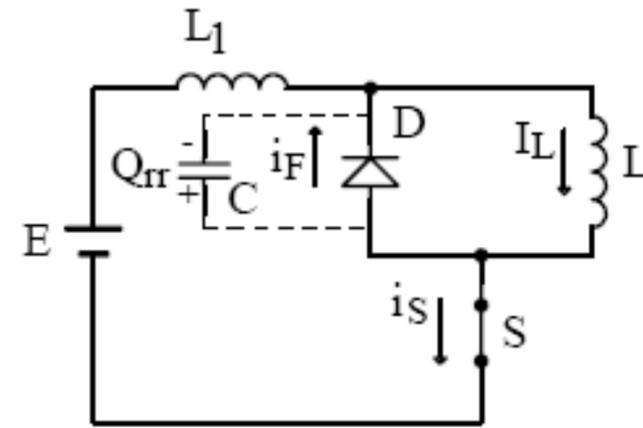
PRIMARY CHARACTERISTICS	
$I_{F(AV)}$	1.0 A
V_{RRM}	50 V, 100 V, 200 V, 400 V, 600 V, 800 V, 1000 V
I_{FSM} (8.3 ms sine-wave)	30 A
I_{FSM} (square wave $t_p = 1$ ms)	45 A
V_F	1.1 V
I_R	5.0 μ A
T_J max.	150 °C
Package	DO-41 (DO-204AL)
Circuit configuration	Single

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25$ °C unless otherwise noted)										
PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT	
Maximum repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum RMS voltage	V_{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V	
Maximum DC blocking voltage	V_{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V	
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at $T_A = 75$ °C	$I_{F(AV)}$	1.0							A	
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	I_{FSM}	30							A	
Non-repetitive peak forward surge current square waveform $T_A = 25$ °C (fig. 3)	I_{FSM}	$t_p = 1$ ms	45							A
		$t_p = 2$ ms	35							
		$t_p = 5$ ms	30							
Maximum full load reverse current, full cycle average 0.375" (9.5 mm) lead length $T_L = 75$ °C	$I_{R(AV)}$	30							μ A	
Rating for fusing ($t < 8.3$ ms)	I^2t (1)	3.7							A ² s	
Operating junction and storage temperature range	T_J, T_{STG}	-50 to +150							°C	

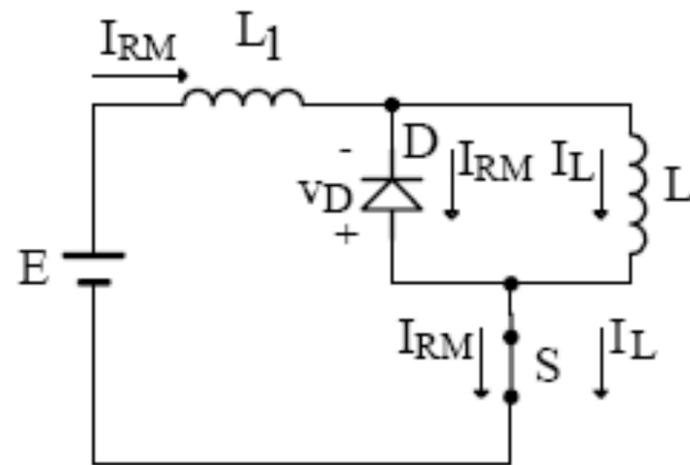
Diode semiconductor



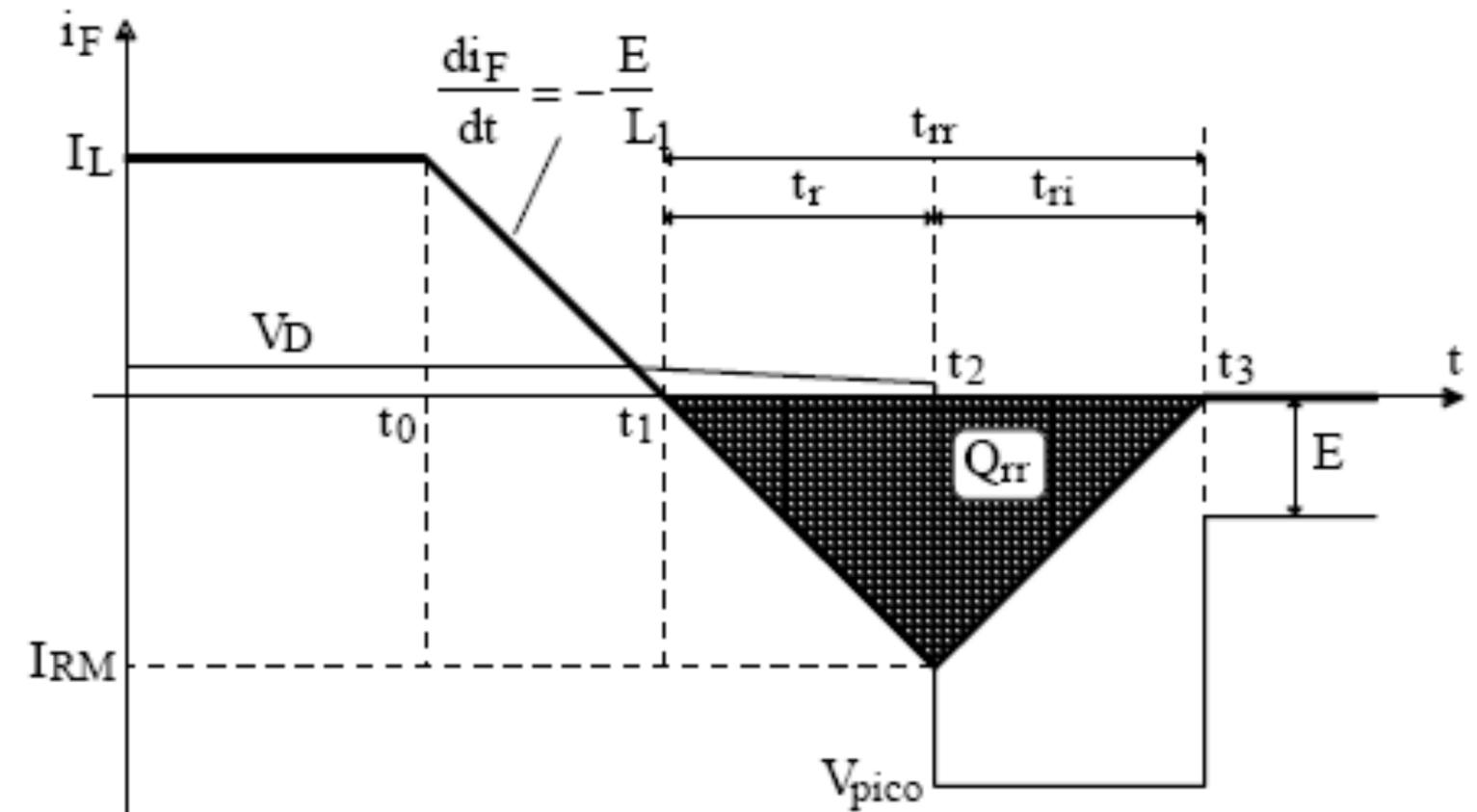
Circuito para estudo da comutação



Primeira etapa da comutação



Segunda etapa da comutação



Recuperação reversa de diodos

Diodo semicondutor

$$\frac{di_F}{dt} = -\frac{E}{L_1}$$

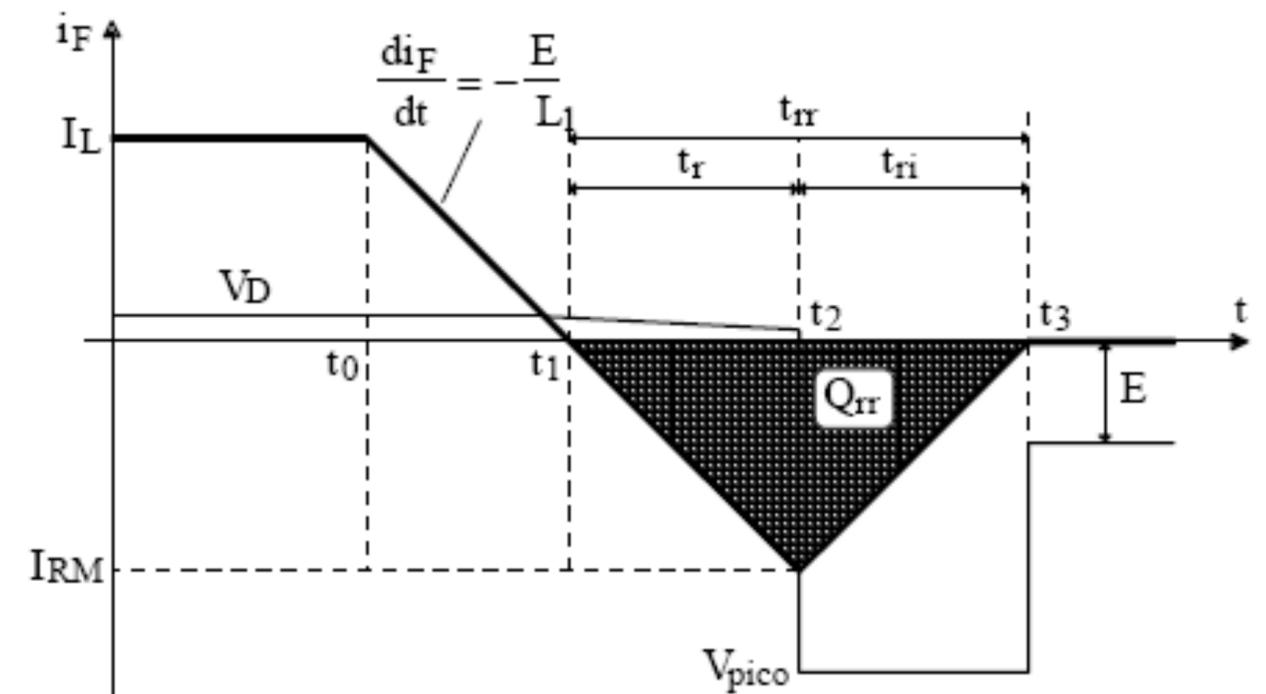
Derivada da corrente depende das indutâncias do circuito

$$t_{rr} \cong \sqrt{\left(\frac{3Q_{rr}}{di_F/dt} \right)}$$

Tempo de recuperação reversa

$$I_{RM} \cong \sqrt{\left(\frac{4}{3} Q_{rr} \frac{di_F}{dt} \right)}$$

Corrente de recuperação reversa máxima



Diode semiconductor

Tipos de diodos considerando a recuperação reversa:

- Recuperação padrão (standard recovery) - são os diodos convencionais, com recuperação reversa típica de diodos de silício;
- Recuperação suave (soft recovery) - são diodos que minimizam o efeito da recuperação reversa, implicando em aumento no tempo de comutação;
- Recuperação rápida (fast recovery) - são diodos com tempo de comutação pequeno, mas alto pico de corrente reversa;
- Sem recuperação reversa - são diodos com carbeto de silício (silicon carbide) que praticamente eliminam a recuperação reversa.

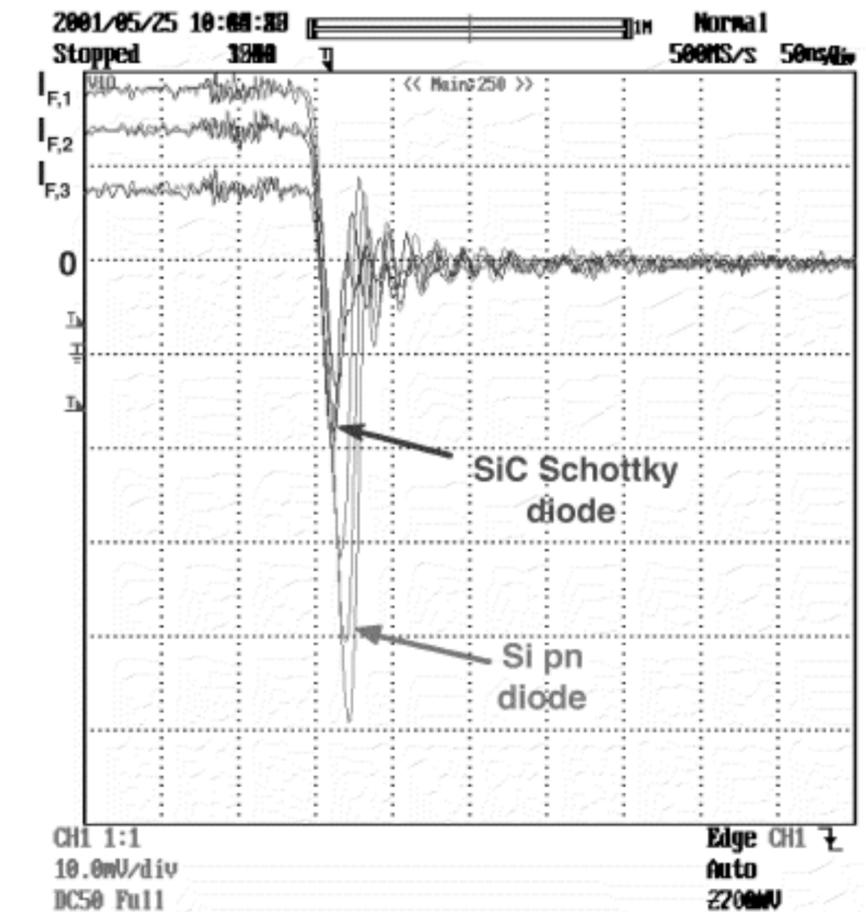
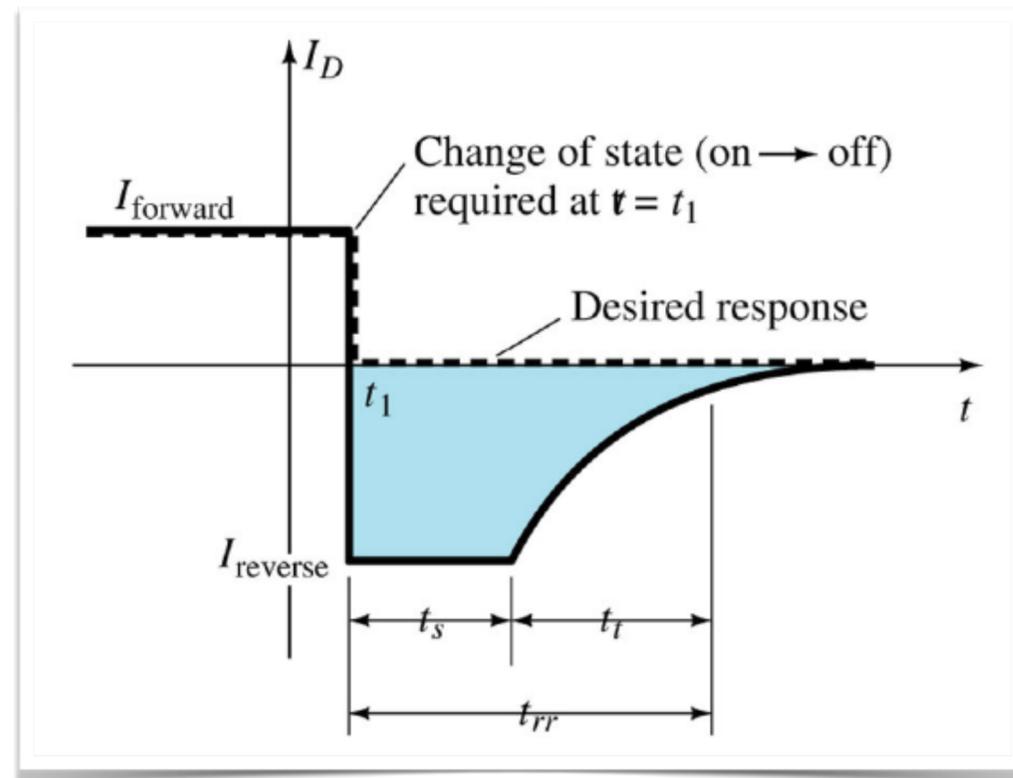


Fig. 5. Typical reverse recovery waveforms of the Si pn and SiC Schottky diode for three different forward currents (2 A/div.).

Diodo semiconductor

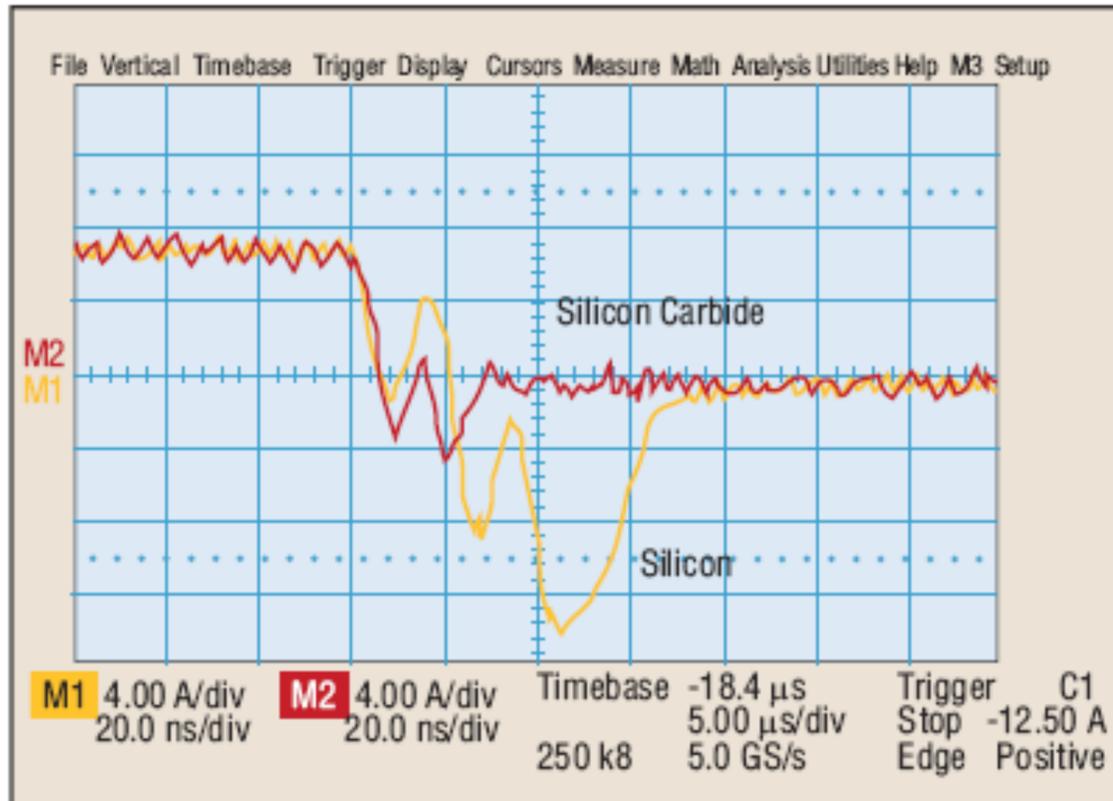


Fig. 4. Low-line diode recovery currents in PFC front-end converter.

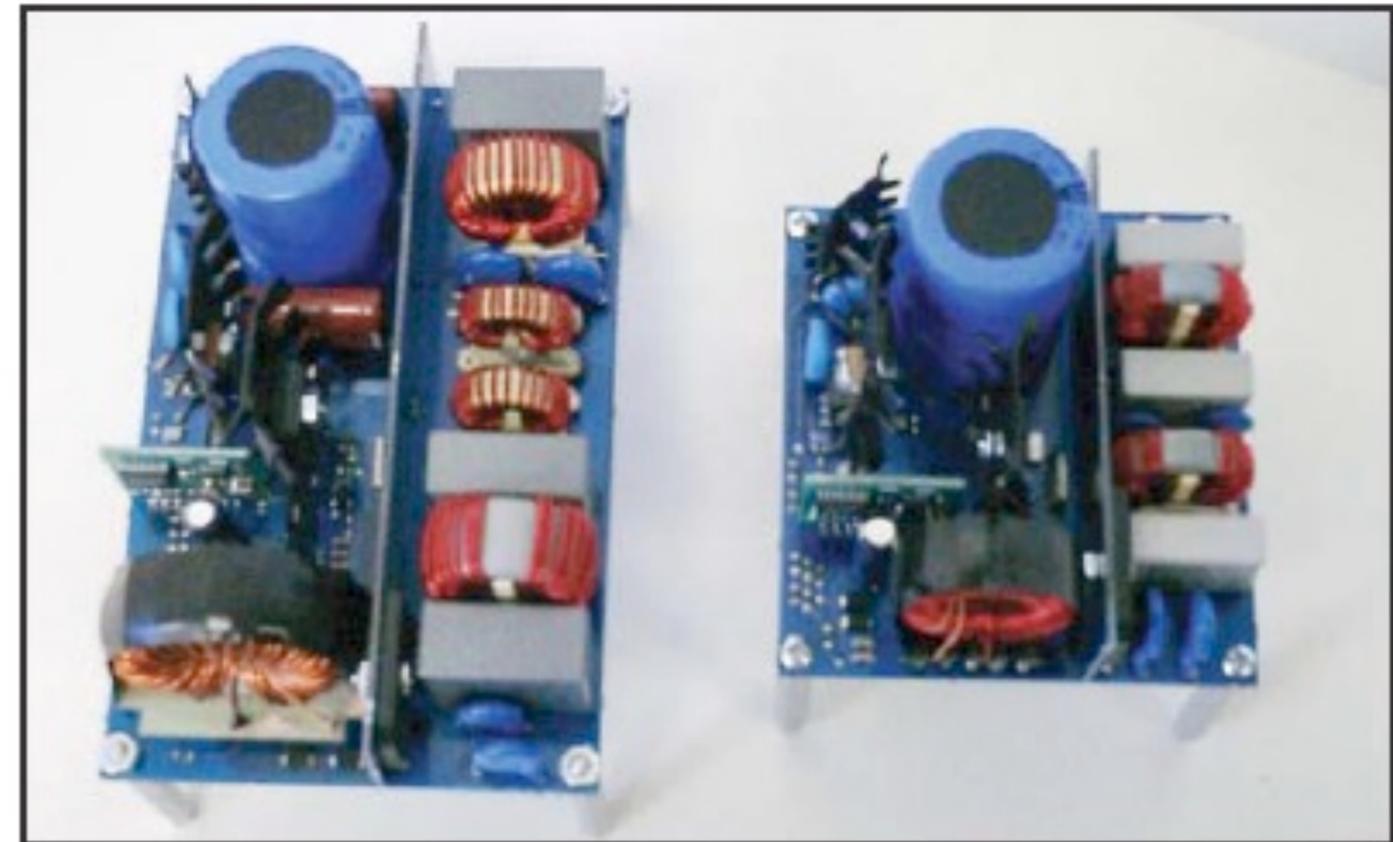


Fig. 8. A size comparison of an 80-kHz PFC front-end built with Si rectifiers (left) and a 200-kHz PFC front-end with SiC rectifiers.

Diodo semiconductor

$$P = V_{(TO)} \cdot I_{Dmed} + r_T \cdot I_{Def}^2$$

Perdas por condução

$$P_1 = 0,5(V_{FP} - V_F)I_o \cdot t_{rf} \cdot f$$

Perdas por comutação
(entrada em condução)

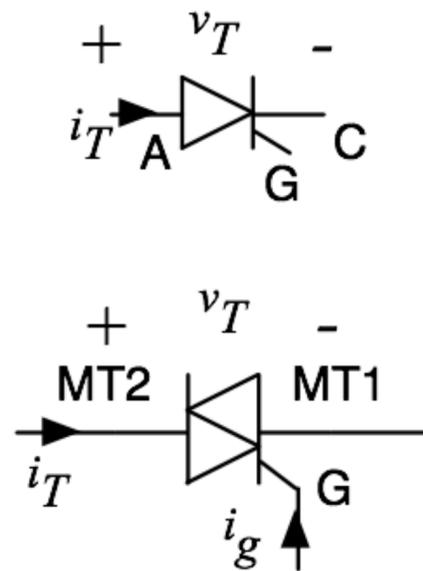
$$P_2 = Q_{rr} \cdot E \cdot f$$

Perdas por comutação
(bloqueio)

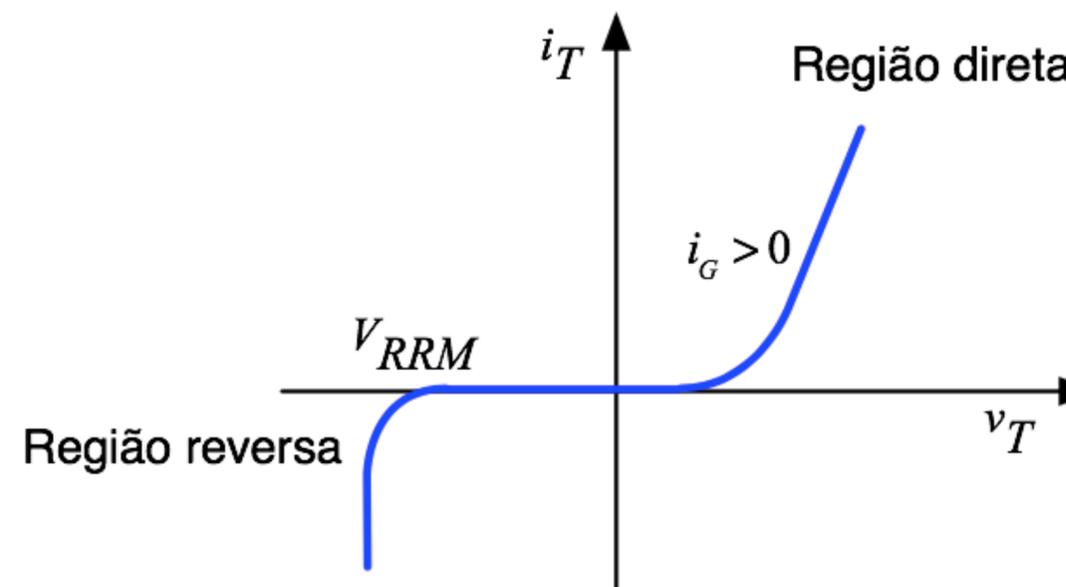
Tiristores

Exemplos de tiristores:

- SCR - diodo retificador de silício; é um diodo unidirecional em corrente com terminal de controle (gatilho);
- TRIAC - é um tiristor bidirecional, mas com apenas um terminal de controle, usado em conversores para corrente alternada, pois pode conduzir no semiciclo positivo e negativo da tensão;
- DIAC ou SIDAC - são diodos para corrente alternada, utilizados nos circuitos de disparo de SCRs ou TRIACs.



Símbolo do SCR e do TRIAC



Curva I x V

Transistores

Regiões de operação dos transistores:

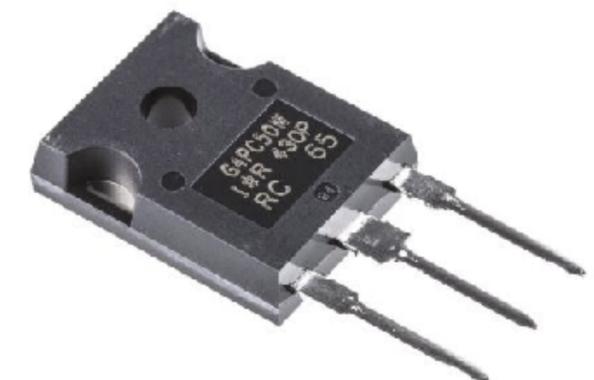
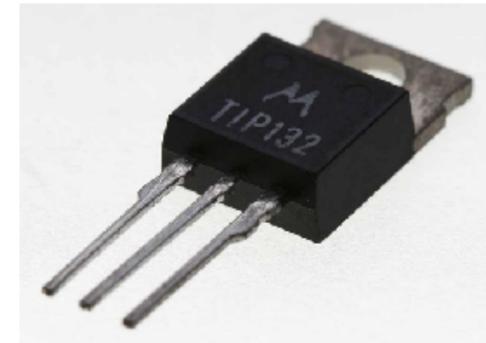
- Corte - é a região em que o transistor não está conduzindo, sua corrente é nula e a tensão sobre o mesmo, em geral, é igual a da fonte de alimentação. Nesta região de operação o transistor não tem perdas, isto é, não processa (dissipa) potência;
- Ativa - é a região de operação em que a corrente de saída varia linearmente com a corrente ou tensão de entrada, por isso é usada para amplificação. Nesta região se tem altas perdas, pois a potência no transistor é o produto da corrente pela queda de tensão no mesmo;
- Saturação - é a região onde o transistor está conduzindo plenamente, com alta corrente. Por outro lado, a queda de tensão é a menor possível, o que implica em perdas menores do que na região ativa.



Transistores

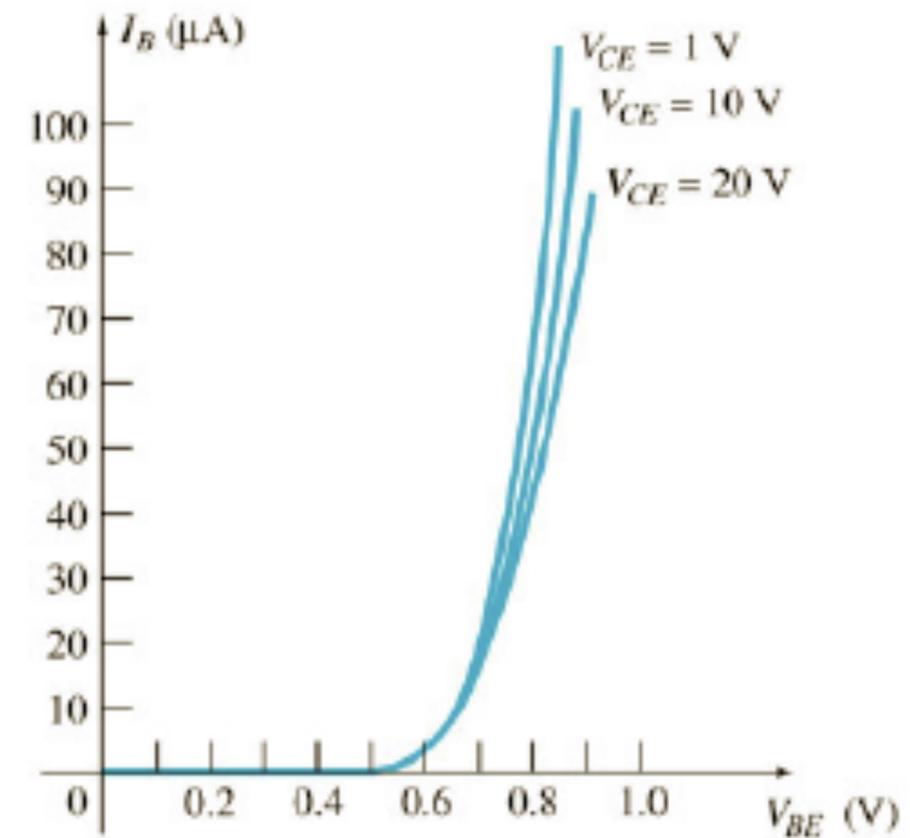
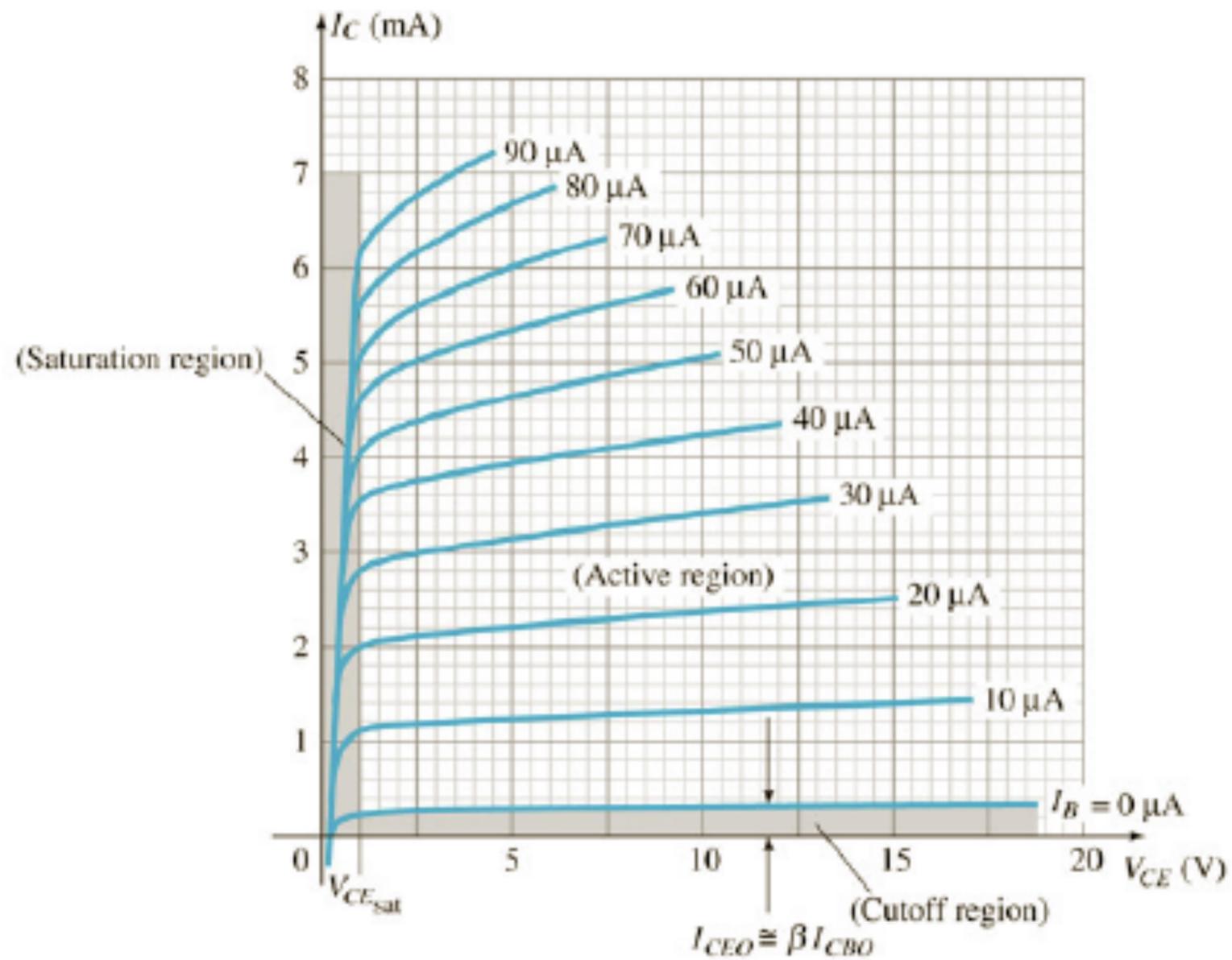
Tecnologias de transistores para eletrônica de potência:

- BJT - transistor bipolar de junção. São os transistores clássicos do tipo NPN ou PNP, acionados pela corrente de base, isto é, a corrente de coletor depende diretamente (ganho) da corrente na base do transistor;
- MOSFET - são transistores mais rápidos, com diferentes tecnologias de fabricação e que conduzem ou não pela aplicação de uma tensão no gatilho (gate), que por intermédio do campo elétrico, proporcionará a abertura ou fechamento do canal e, portanto, a condução ou não do transistor;
- IGBT - são componentes construídos a partir da tecnologia BJT e MOSFET, incorporando características de ambos. São acionados por tensão como os MOSFETs, mas possuem perdas semelhantes ao BJT.
- Silicon Carbide FET - são transistores de efeito de campo, mas que utilizam a tecnologia de carbeto de silício para diminuir os problemas da recuperação reversa, permitindo a operação com frequências mais altas;
- GaN - transistores de nitreto de gálio (gallium nitride) que possuem características melhores que os transistores de silício, operando com frequências mais altas e tendo menores perdas, por possuírem resistência interna menor.



Transistores

Transistor bipolar de junção (BJT):



Transistores

Transistor bipolar de junção (BJT):

The SiC BJT: Most Efficient 1200 V Power Conversion Switch Ever Made

A growing assortment of power switch technologies are on the market and in development today, including several that leverage the features of silicon carbide. Most promising among these choices are SiC bipolar junction transistors (BJTs). They offer very fast switching speed; the industry's lowest conduction losses; easy high temperature operation; very good robustness; and ease of manufacturing. Working in conjunction with a properly designed gate driver, SiC BJTs also offer safe operation with high ruggedness and reliability.

SiC BJT vs Si IGBT

	V	I	V _{CE}	E _{ON}	E _{OFF}
Si IGBT	1200	40	3	2500	1800
SiC BJT	1200	40	1.6	1000	600
Improvement (lowered by)			47%	60%	67%

SiC BJT Features

Lowest Losses on the Market

- Lowest conduction losses ($R_{ON} < 2.2 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ @ RT)
- Very low switching losses
- Lowest total losses; including driver losses
- High gain; SiC BJT DC current gain > 70

Fast Switching

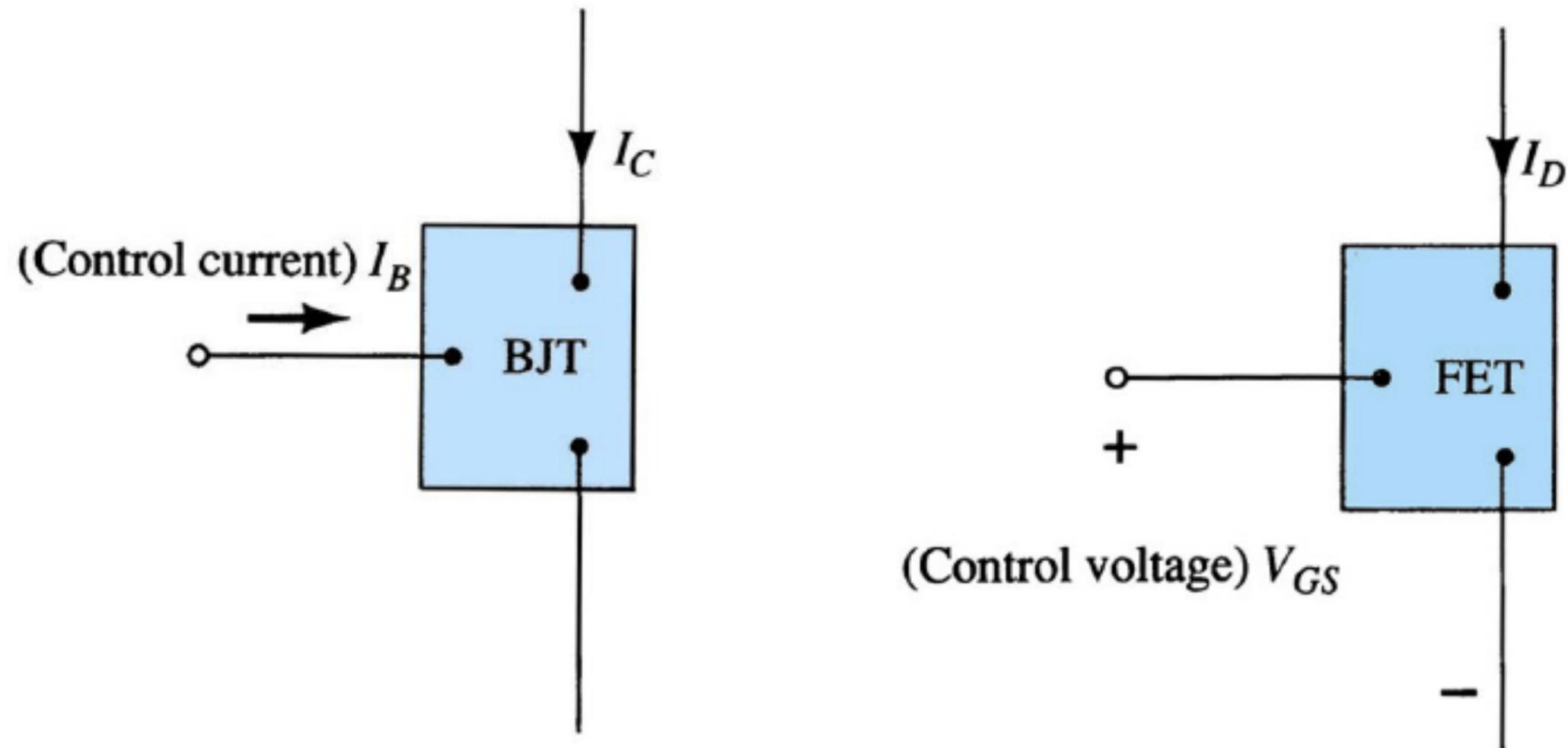
- Approximately 20 ns for turn-on and turn-off
- Switching behavior is not temperature dependent
- No current tailing for SiC BJT

Robust and Reliable

- Normally OFF device
- Highest rated operating temperature; $T_j = 175^\circ\text{C}$
- Positive temperature coefficient (R_{ON}); Easy paralleling
- No secondary breakdown for SiC BJT
- No SiO₂ gate oxide reliability issue
- Short circuit resistant
- Low leakage current

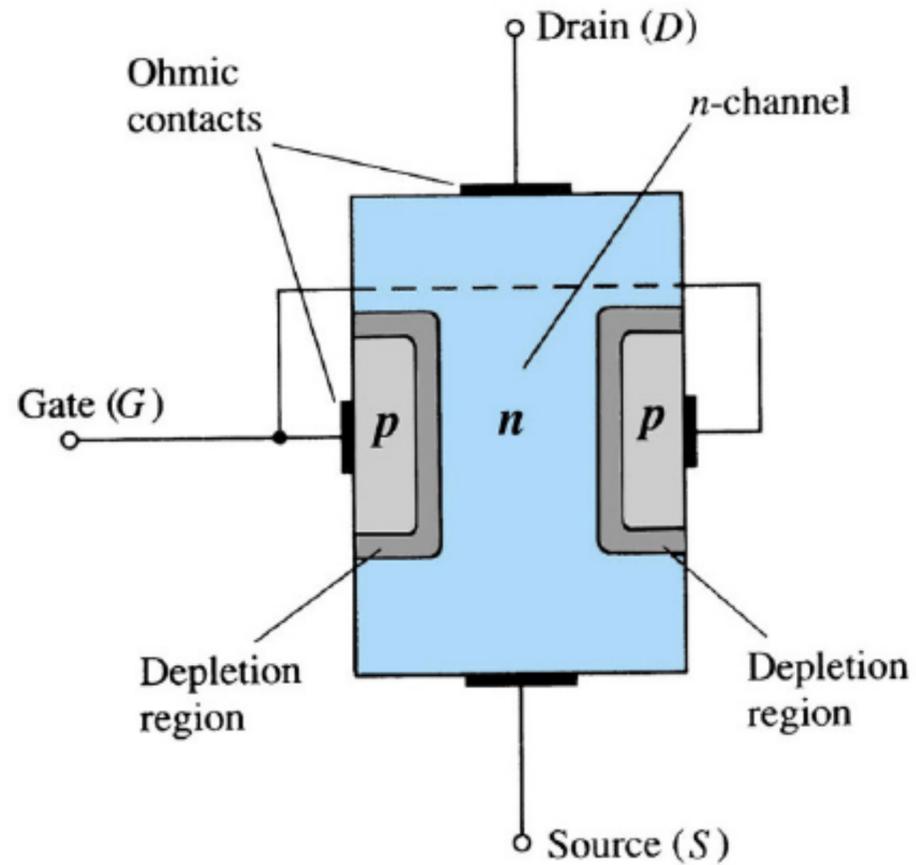
Transistores

Transistor bipolar de junção (BJT) x Transistor de efeito de campo (FET):

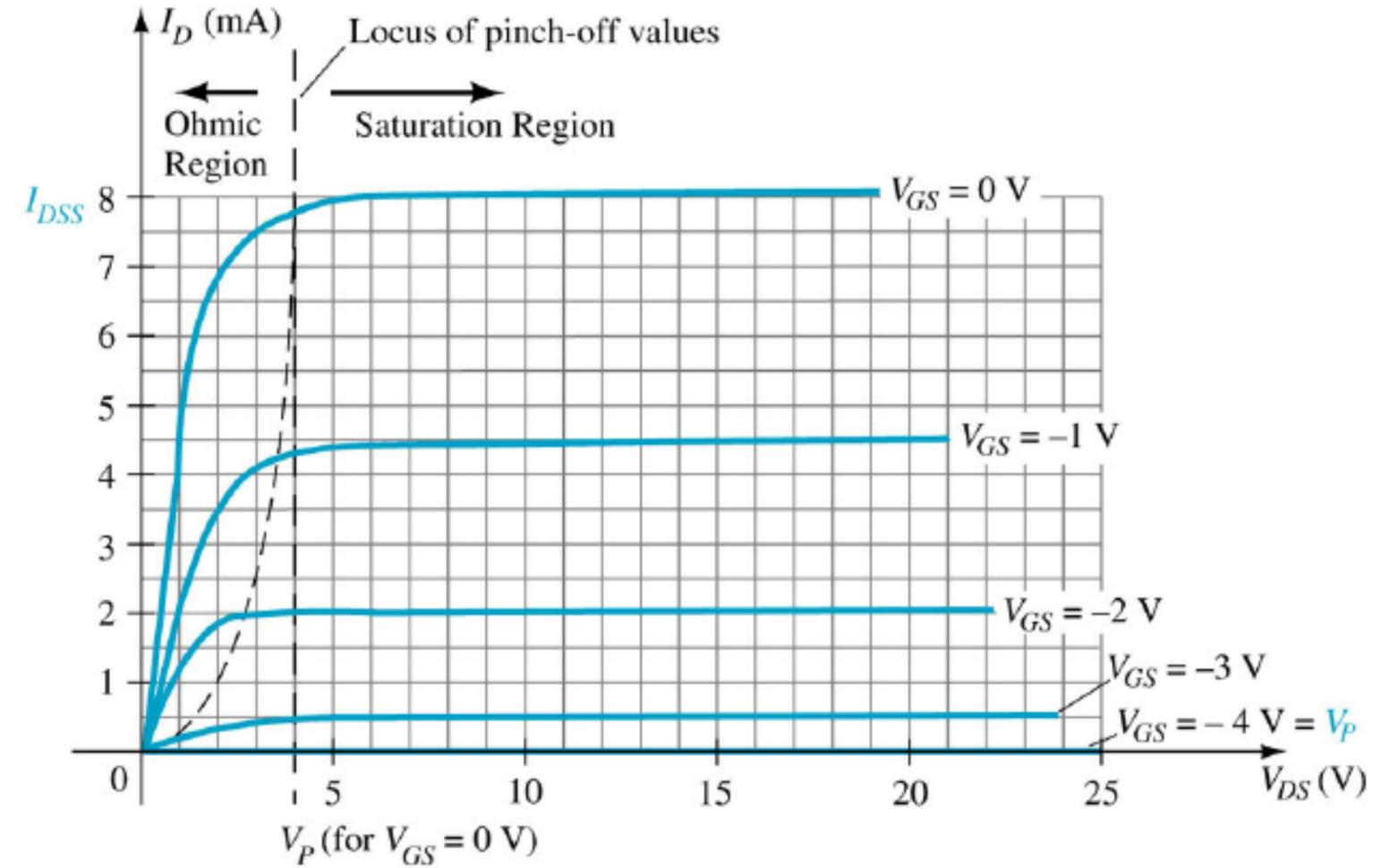
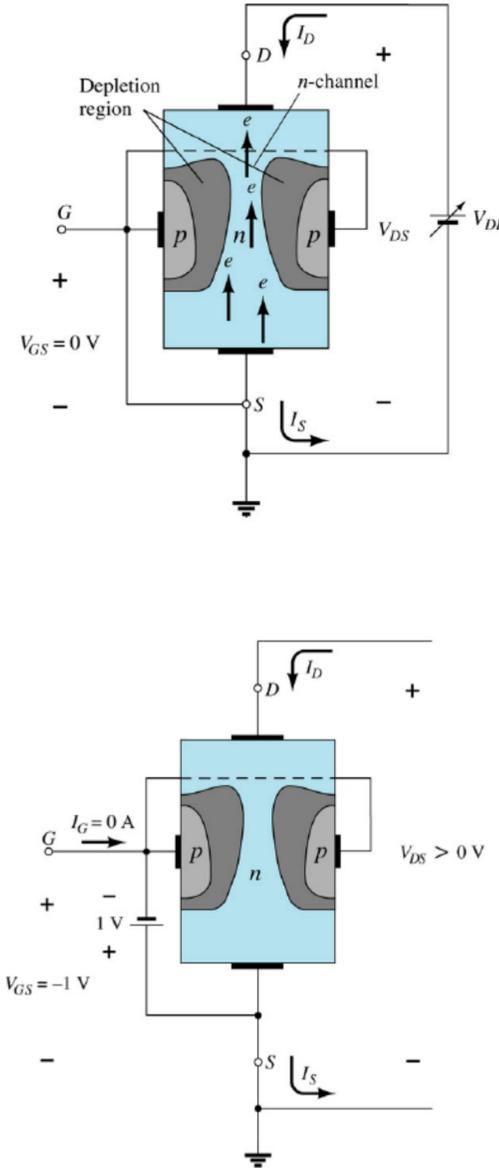


Transistores

Transistor de efeito de campo (FET):



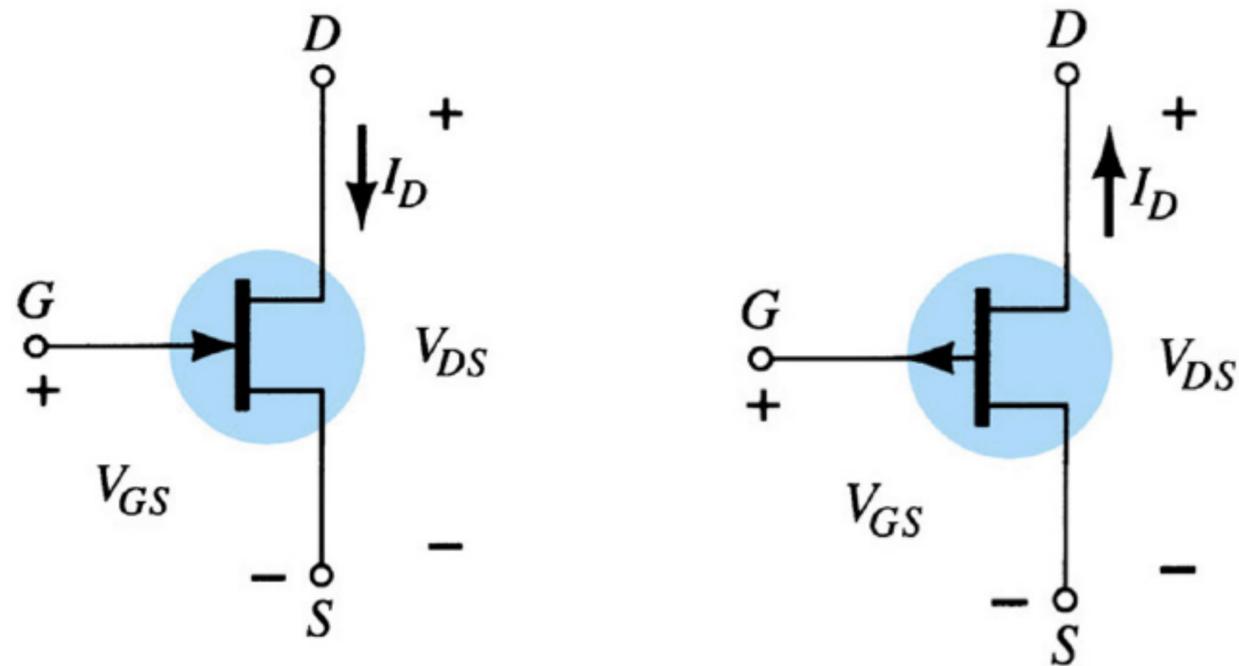
JFET: operação básica



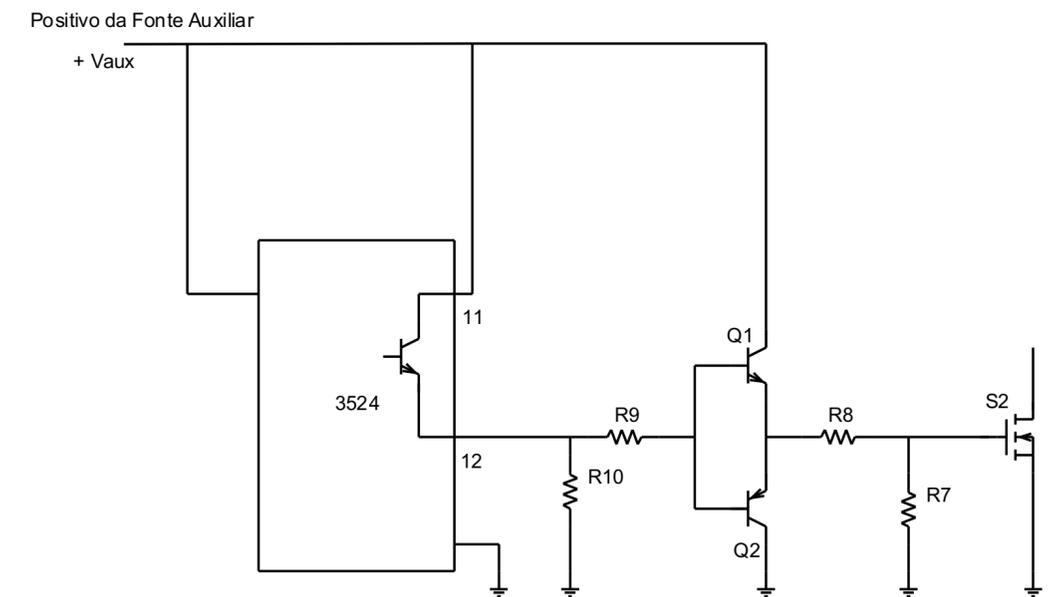
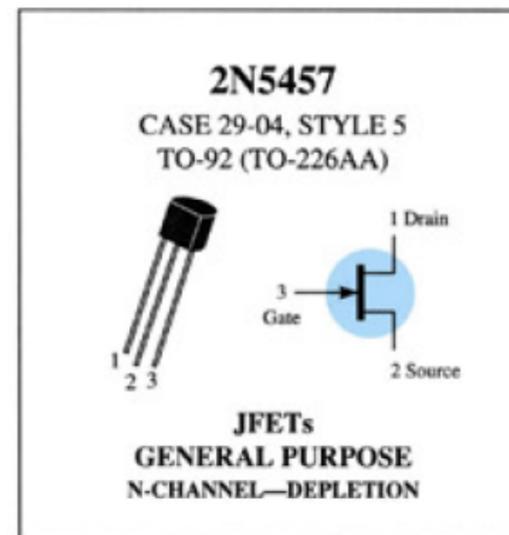
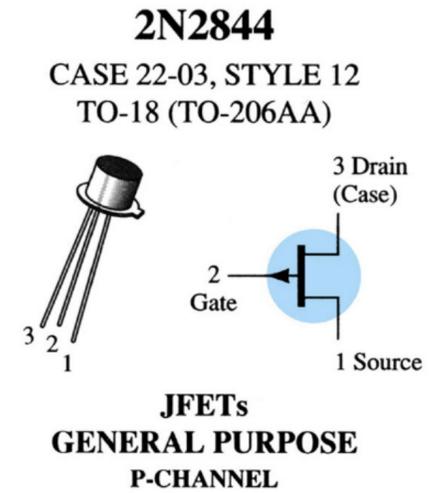
Fonte: Boylestad, Dispositivos Eletrônicos.

Transistores

Transistor de efeito de campo (FET):



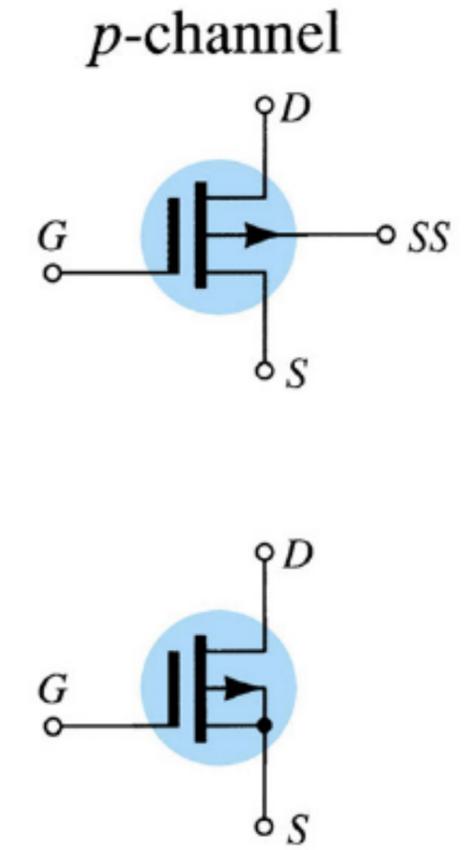
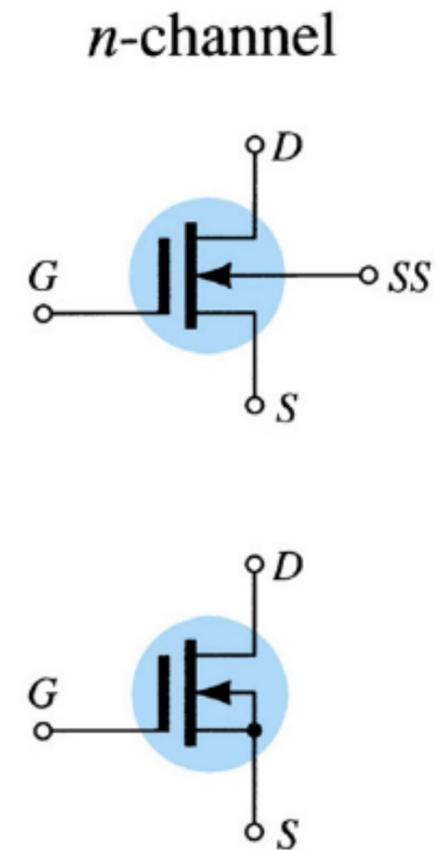
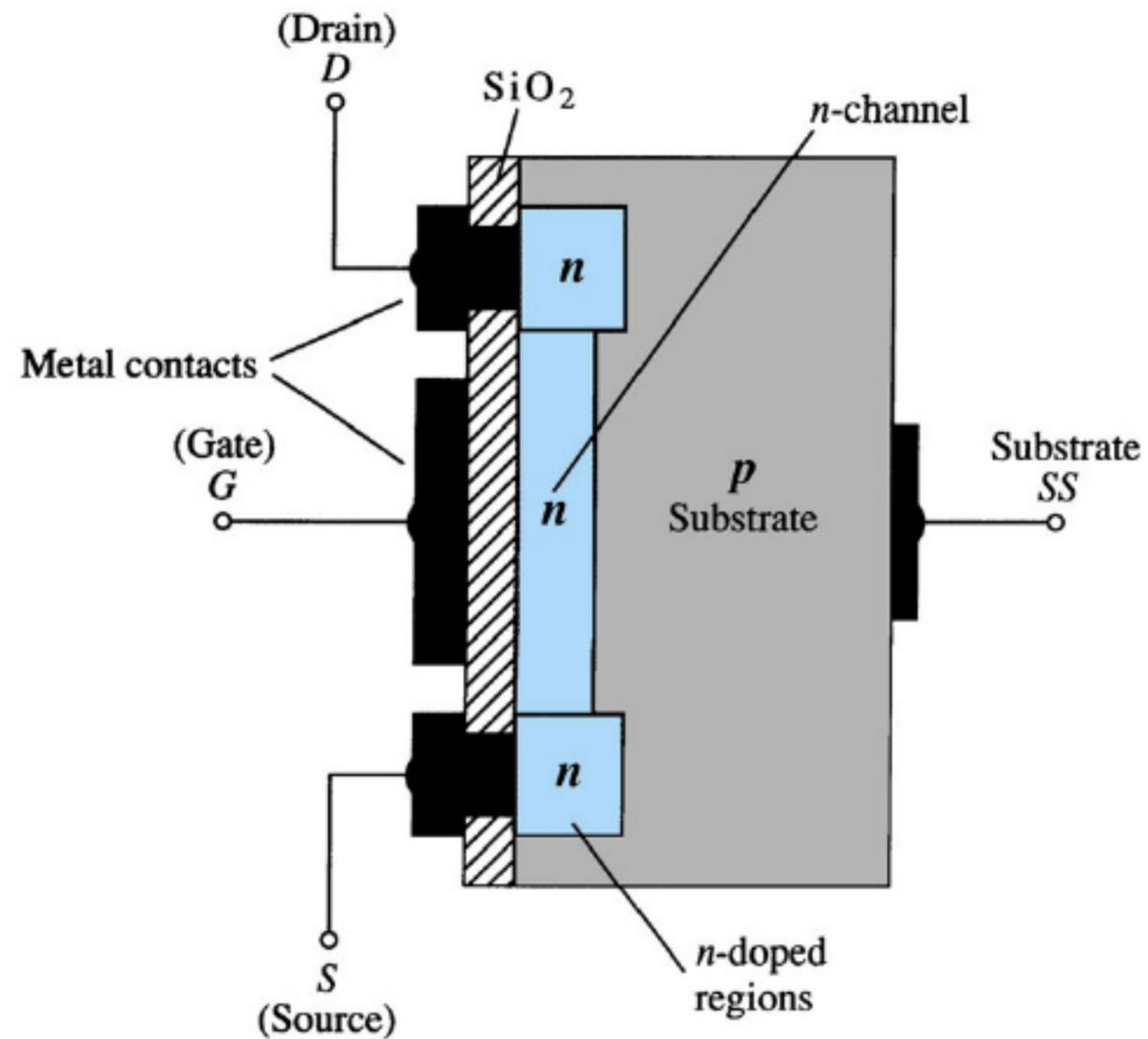
JFET canal n e canal p



Exemplo de aplicação

Transistores

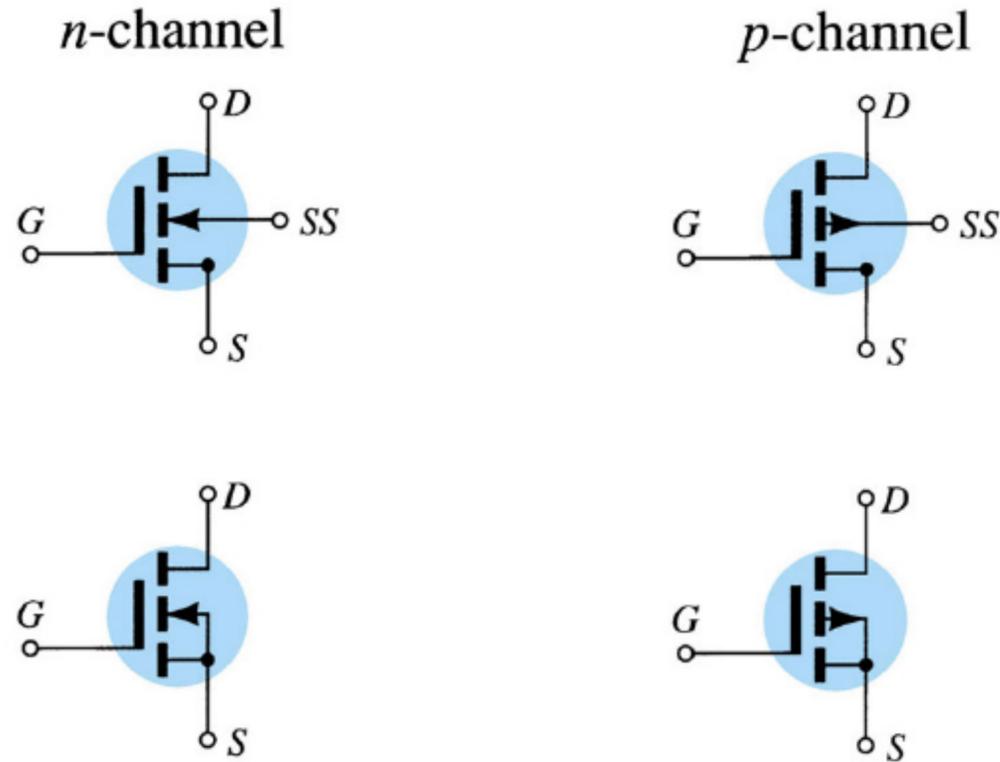
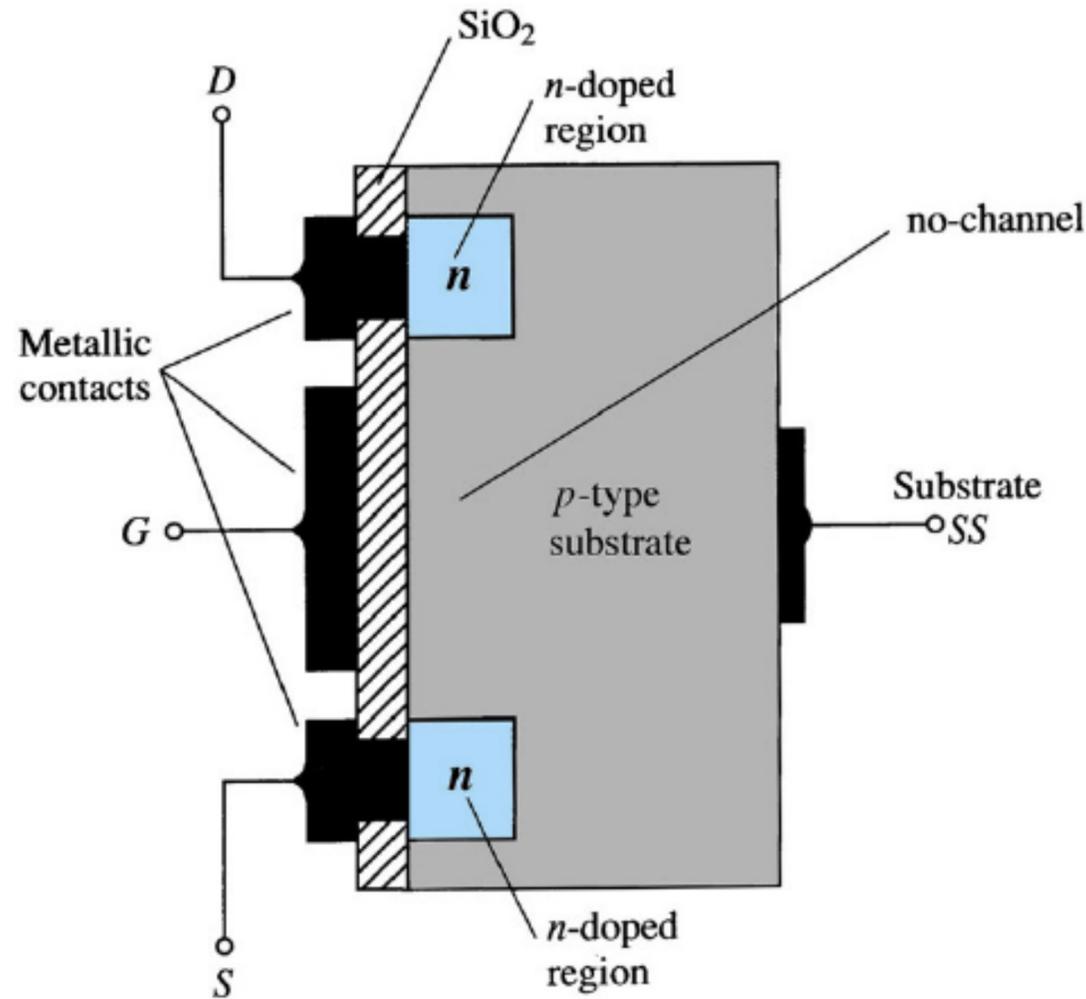
Transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor):



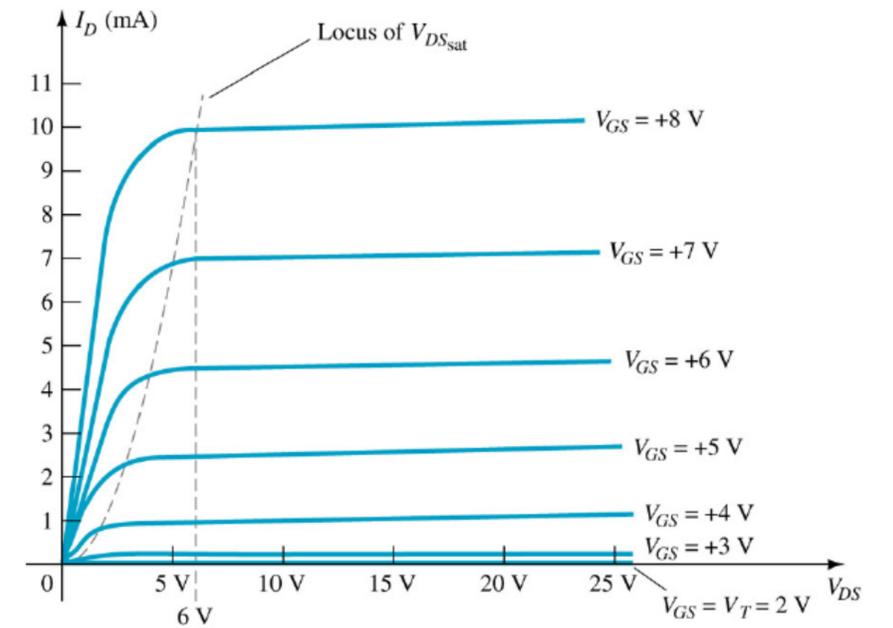
MOSFET tipo depleção

Transistores

Transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor):



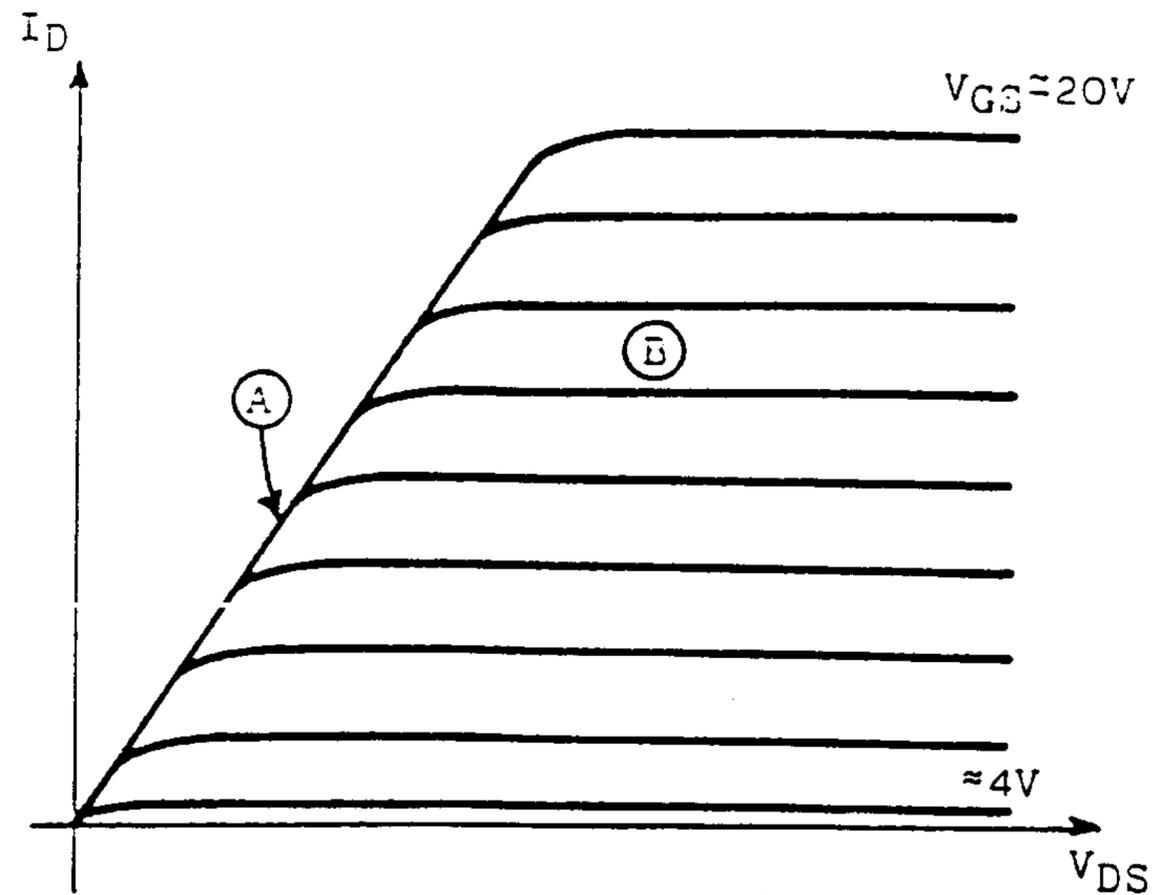
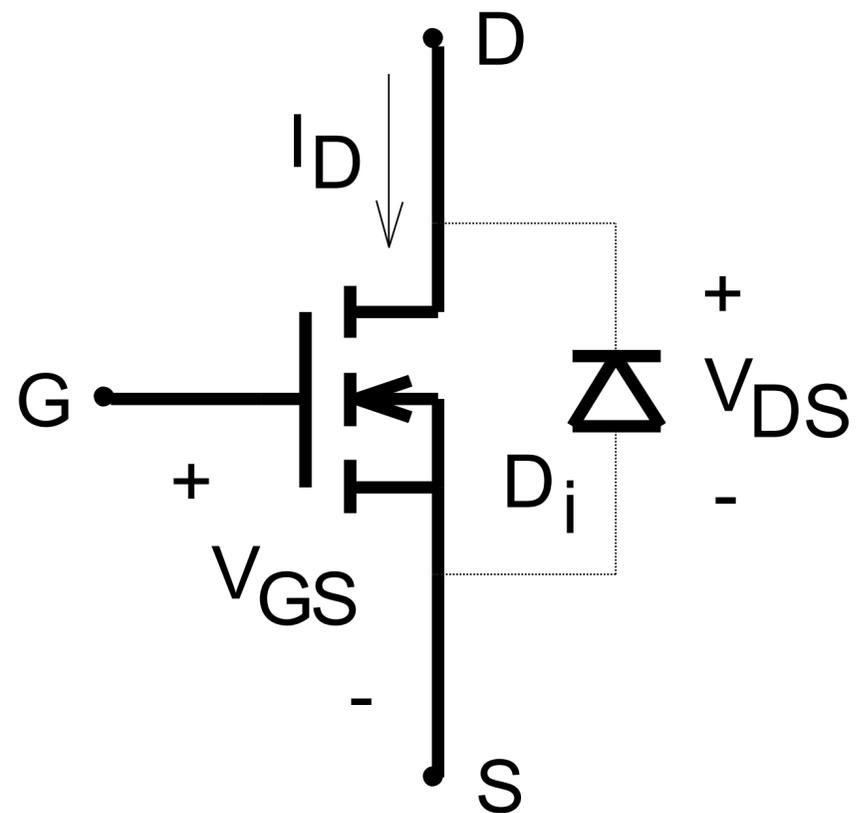
MOSFET tipo intensificação



Canal n

Transistores

Transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor):



MOSFET de potência

Transistores

Transistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor):

$$P_{cond} = \frac{t_{on}}{T} \cdot r_{ds(on)} \cdot i_{d(on)}^2$$

Perdas por condução

$$P_{com} = \frac{f}{2} (t_r + t_f) \cdot i_{d(on)} \cdot v_{ds(off)}$$

Perdas por comutação
(entrada em condução e bloqueio)

$$t_f \cong t_{on}$$

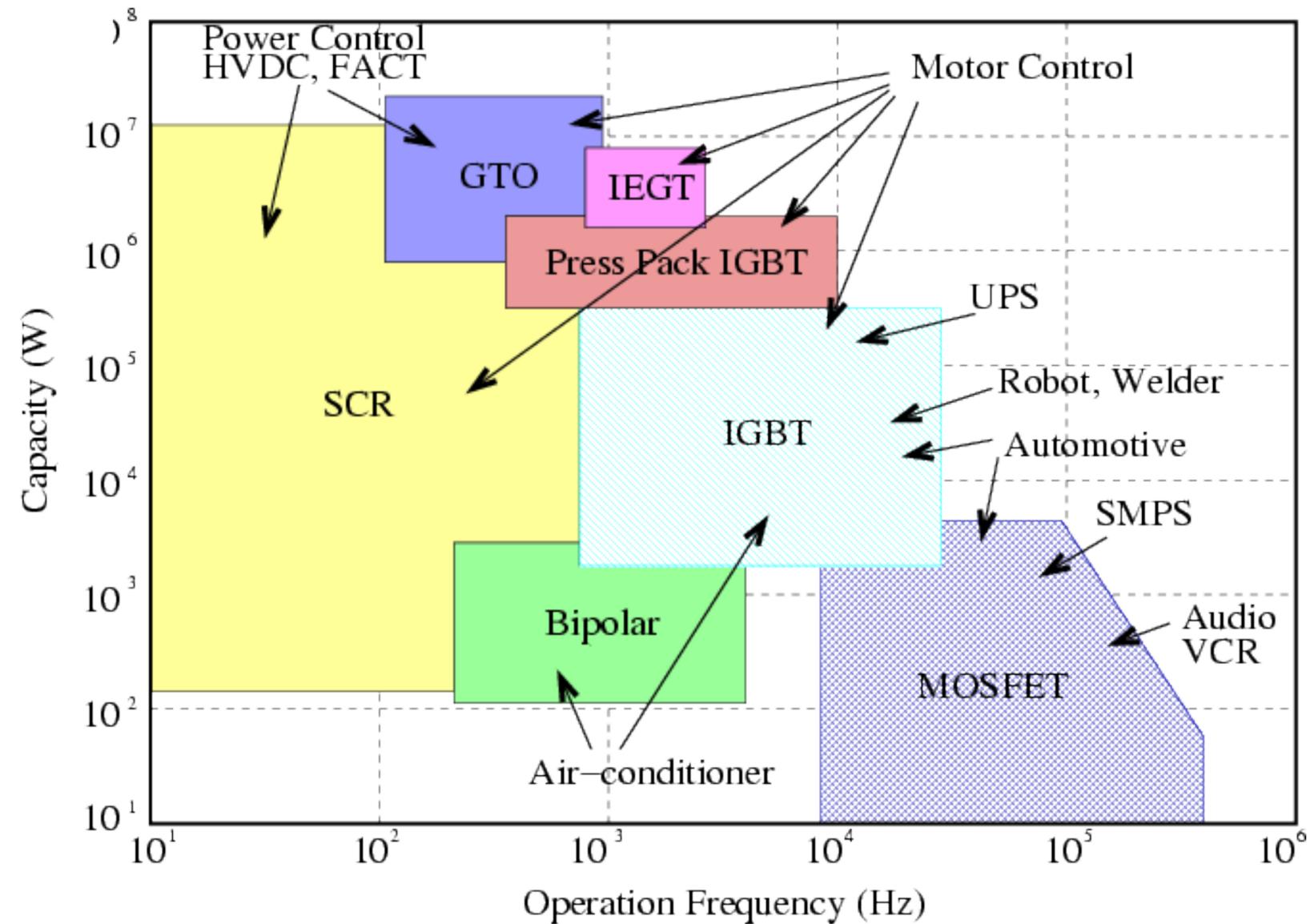
$$t_r \cong t_{off}$$

Tempos de comutação

Transistores

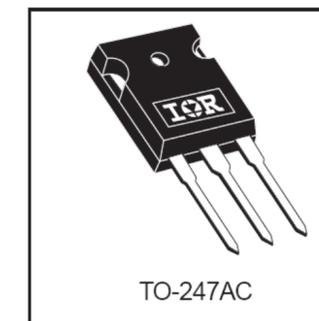
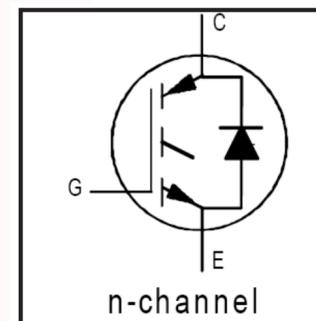
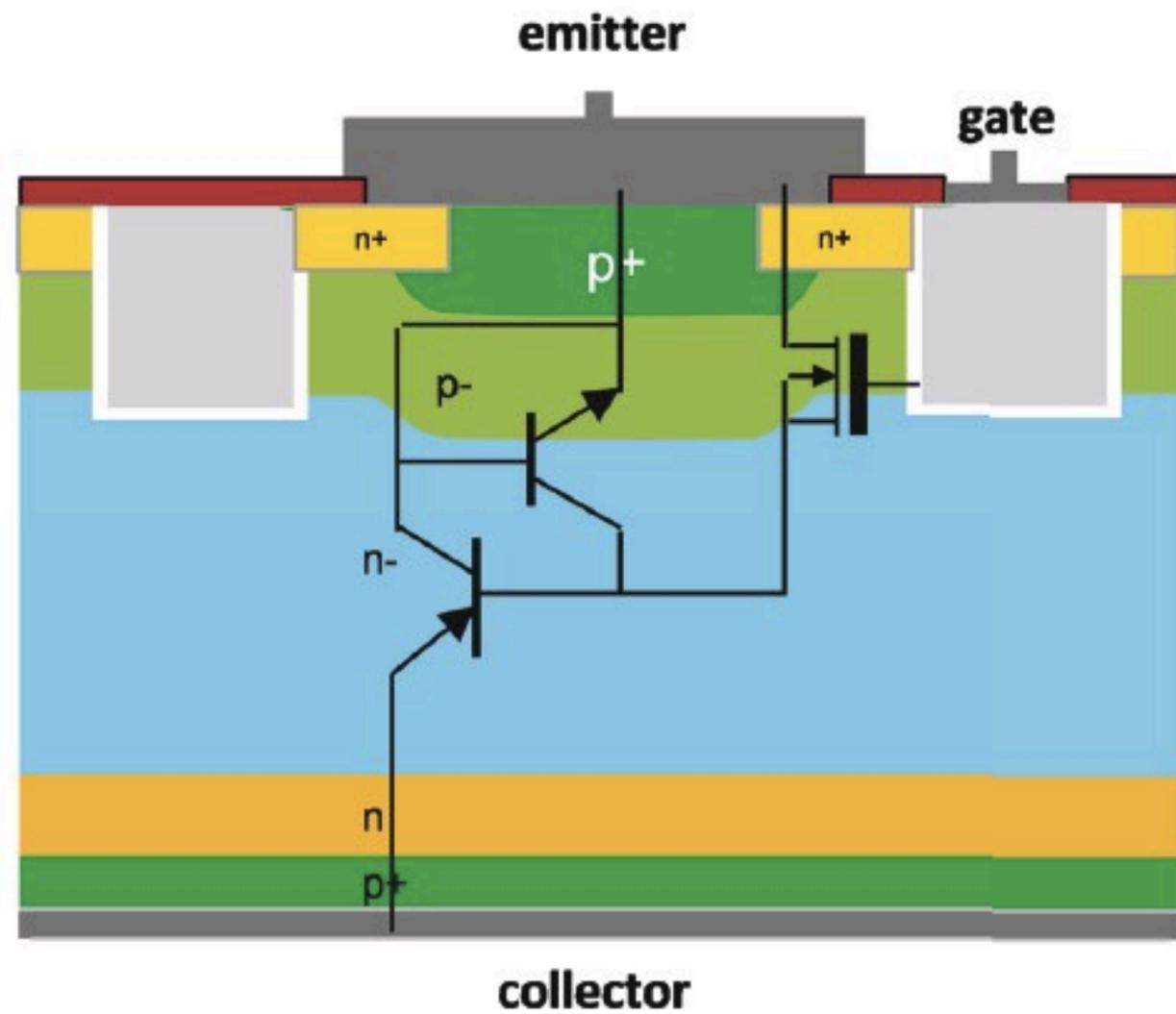
Quando usar MOSFET:

- Frequências altas (acima de 50 kHz);
- Tensões muito baixas (< 500 V);
- Potências baixas (< 1 kW).



Transistores

Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):



Transistores

Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):

$$P_{cond} = (i_C \cdot V_{CEsat} + i_B \cdot V_{BEsat}) \cdot t_{on} \cdot f$$

Perdas por condução

$$P_{com} = \frac{1}{2} (t_r + t_f) \cdot I \cdot E \cdot f$$

Perdas por comutação
(entrada em condução e bloqueio)

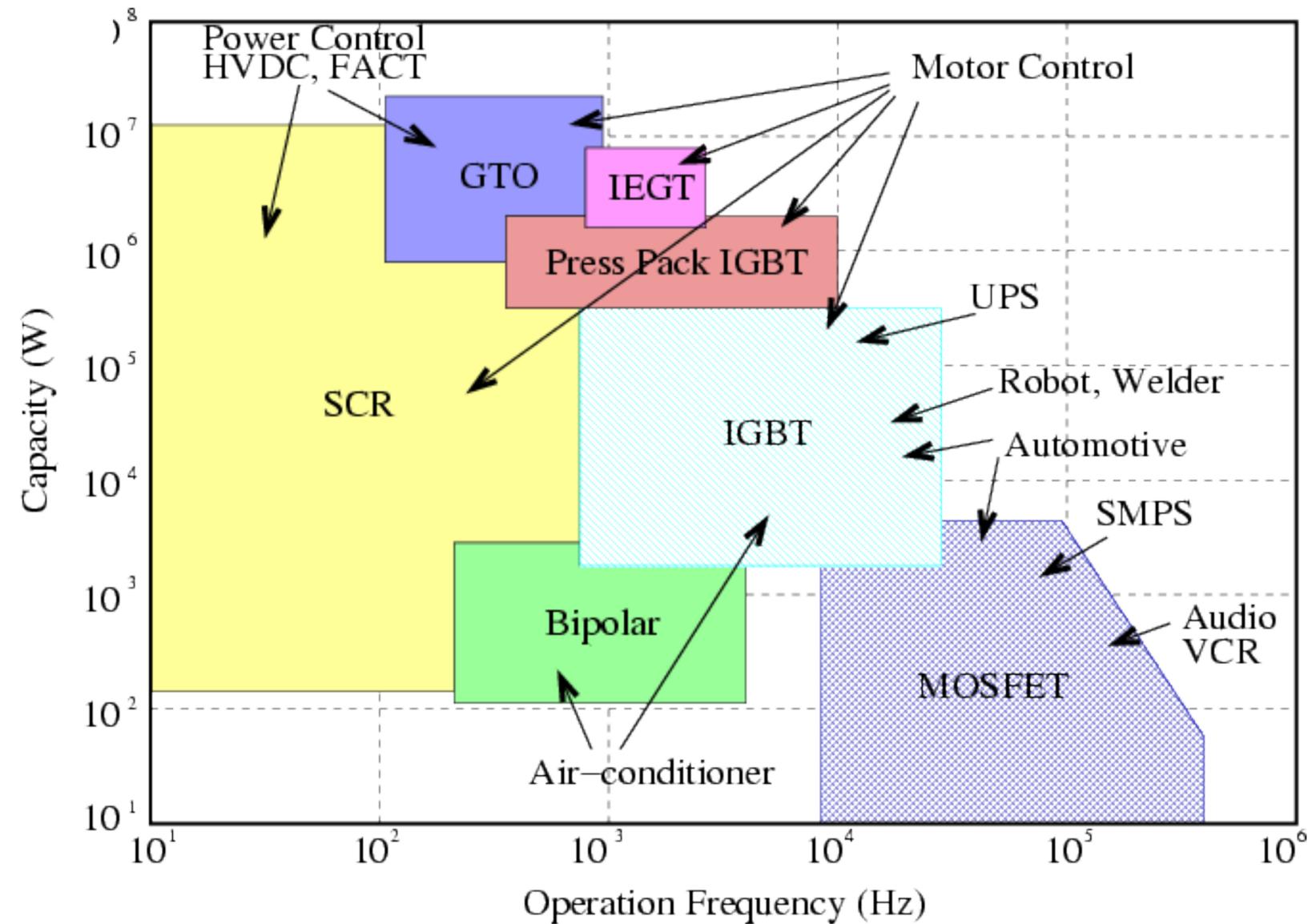


<https://inep.ufsc.br>

Transistores

Quando usar IGBT:

- Frequências baixas (menor que 50 kHz);
- Tensões altas (> 500 V);
- Potências altas (> 1 kW).



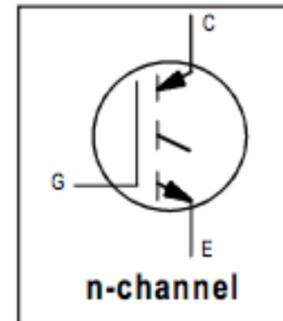
Transistores

Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):

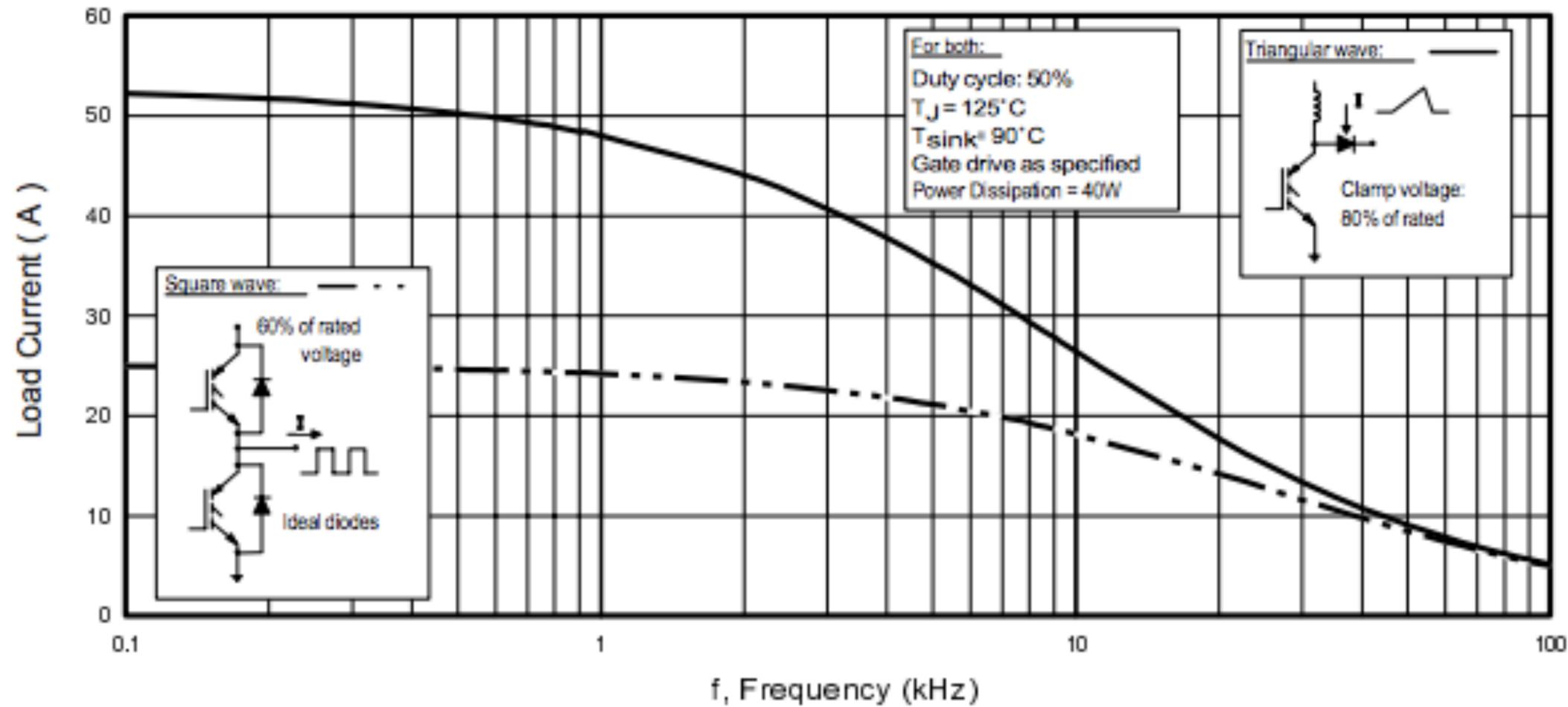
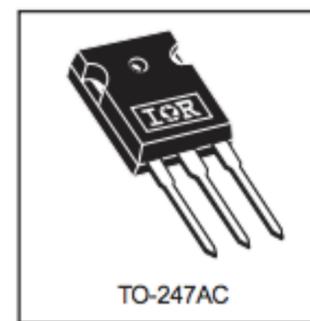
Package/Switching	Frequency	Voltage
<u>IGBT SINGLE / Soft</u>	<u>Ultrafast <30kHz</u>	<u>300V</u>
		<u>600V</u>
		<u>1200V</u>
<u>IGBT SINGLE / Hard</u>	<u>Standard <1kHz</u>	<u>600V</u>
		<u>1200V</u>
	<u>Ultra Fast 8-30kHz</u>	<u>600V</u>
		<u>300V</u>
		<u>600V</u>
		<u>1200V</u>
<u>Warp 30-150kHz</u>	<u>600V</u>	
	<u>900V</u>	
<u>IGBT Co-Pack / Soft</u>	<u>Ultrafast <30kHz</u>	<u>1200V</u>
<u>IGBT Co-Pack / Hard</u>	<u>Standard <1kHz</u>	<u>600V</u>
		<u>600V</u>
	<u>Ultra Fast 8-30kHz</u>	<u>300V</u>
		<u>600V</u>
		<u>1200V</u>
		<u>600V</u>
<u>Warp 30-150kHz</u>	<u>600V</u>	
	<u>900V</u>	

Transistores

Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):

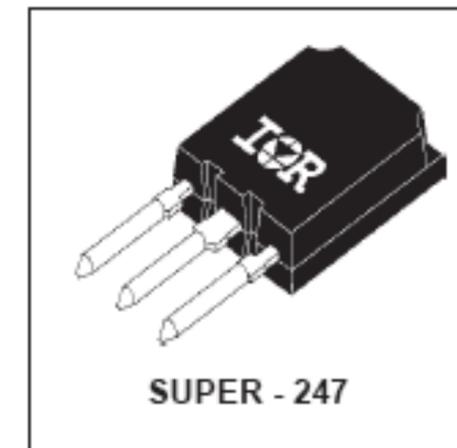
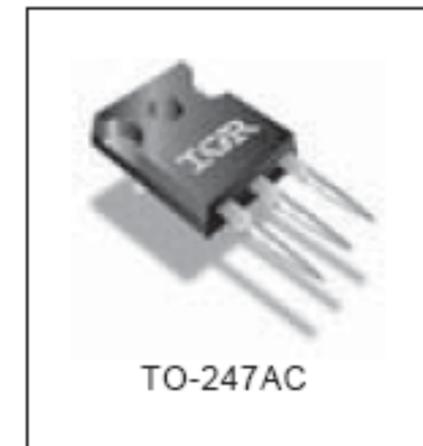
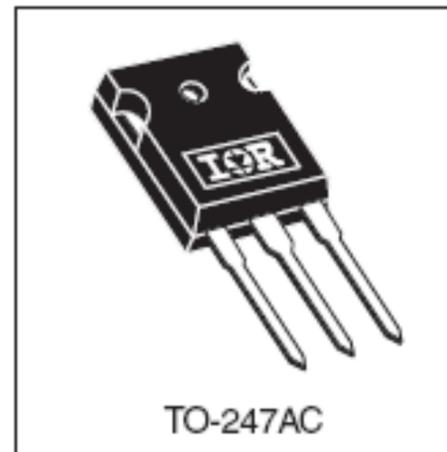
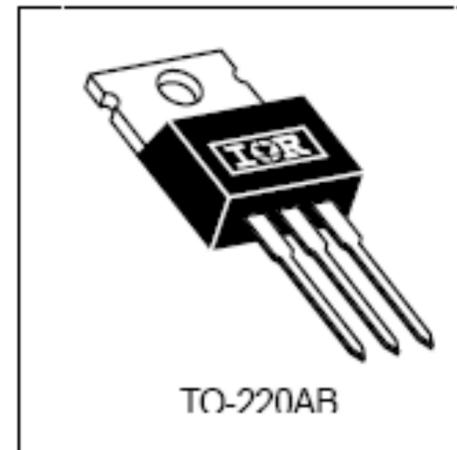
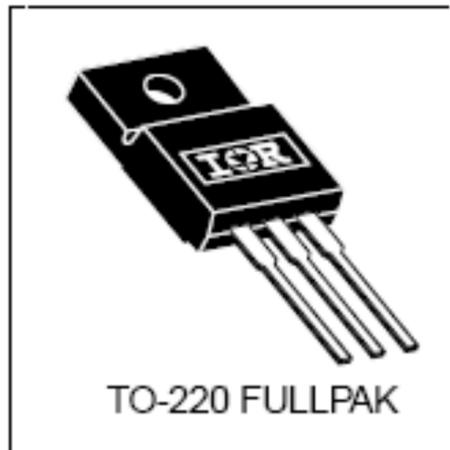
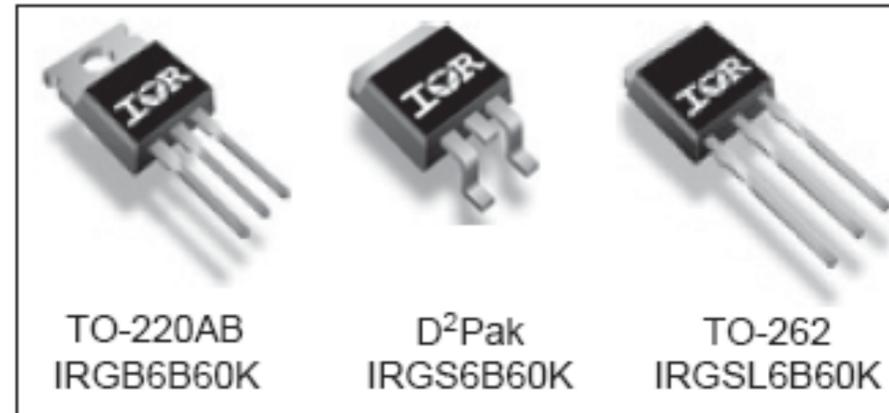
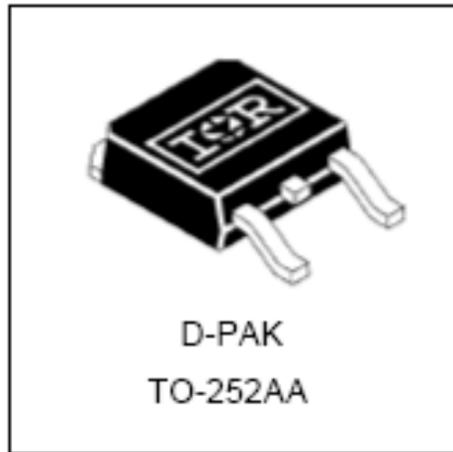


$V_{CES} = 900V$
 $V_{CE(on) typ.} = 2.25V$
 @ $V_{GE} = 15V, I_c = 28A$



Transistores

Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):

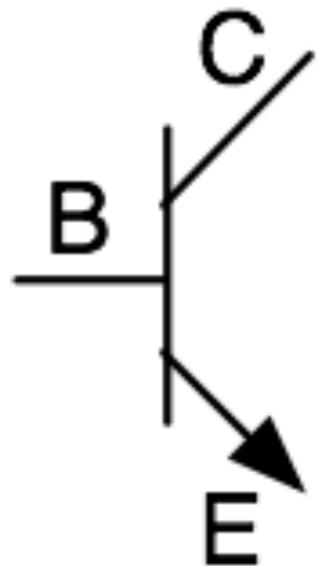


Transistores

Acionamento e perdas dos transistores:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

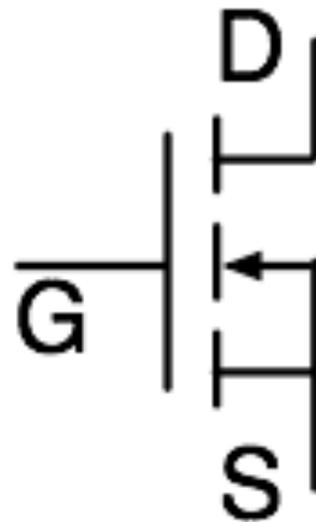
$$P_{BJT} = V_{CE(sat)} \cdot I_C$$



BJT

$$I_D = K \cdot V_G$$

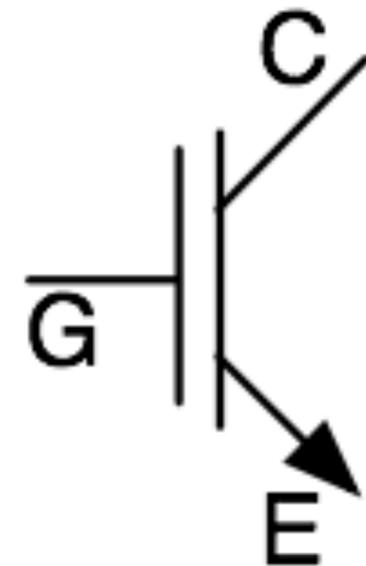
$$P_{MOSFET} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2$$



MOSFET

$$I_C = K \cdot V_G$$

$$P_{IGBT} = V_{CE(sat)} \cdot I_C$$

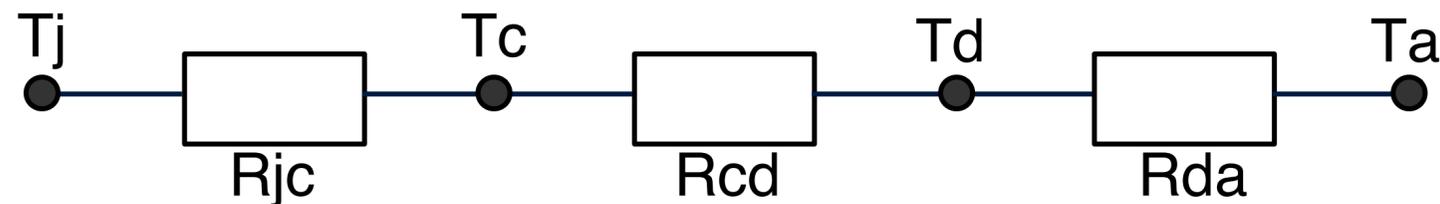


IGBT

Cálculo térmico

Elementos do modelo térmico:

- T_j - temperatura na junção em graus Celsius;
- T_c - temperatura na capsula em graus Celsius;
- T_d - temperatura no dissipador em graus Celsius;
- T_a - temperatura ambiente em graus Celsius;
- R_{jc} - resistência térmica entre junção e cápsula, em $^{\circ}\text{C}/\text{W}$;
- R_{cd} - resistência térmica entre cápsula e dissipador, em $^{\circ}\text{C}/\text{W}$;
- R_{da} - resistência térmica entre dissipador e ambiente, em $^{\circ}\text{C}/\text{W}$.



modelo térmico

$$T_j - T_a = R_{ja} \cdot P$$

Exemplo:

- Diodo 1N4007, queda de tensão de 1,1 V, corrente de 0,9 A, temperatura de 30 graus Celsius, resistência térmica entre junção e ambiente de 50 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Sabendo que a temperatura máxima é de 175 $^{\circ}\text{C}$. Será preciso usar dissipador?

$$P_D = V_D \cdot I_D = 1,1 \cdot 0,9 = 0,99 \text{ W}$$

$$T_j = T_a + R_{ja} \cdot P = 30 + 50 \cdot 0,99 = 79,5^{\circ}\text{C}$$

Como 79,5 $^{\circ}\text{C}$ é menor do que 175 $^{\circ}\text{C}$, não precisa dissipador.

Cálculo térmico

Exemplo:

- MOSFET IRF540 conduzindo 20 A, temperatura ambiente com 40 °C, resistência térmica entre junção e ambiente de 62 °C/W e resistência de 44 mΩ e temperatura máxima na junção de 175 °C. Verificar se precisa dissipador.

$$P_{MOSFET} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2 = 44m \cdot 20^2 = 17,6W$$

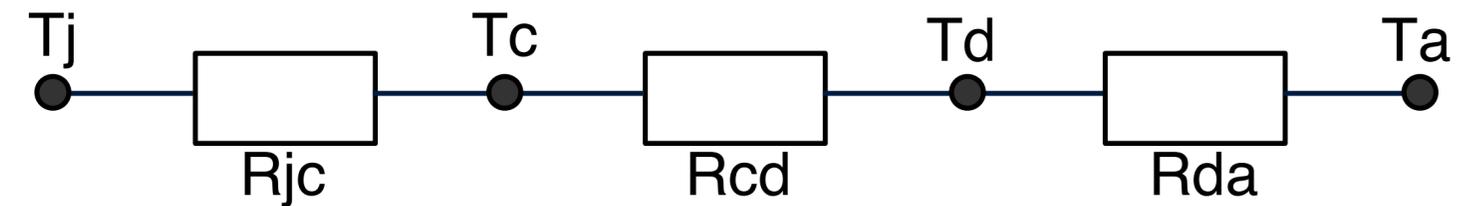
$$T_j = T_a + R_{ja} \cdot P = 40 + 62 \cdot 17,6 = 1131,2^\circ C$$

Como 1131,2 °C é maior do que 175 °C, então precisa dissipador.

$$R_{ja(max)} = \frac{T_j - T_a}{P_{MOSFET}} = \frac{175 - 40}{17,6} = 7,67^\circ C / W$$

$$R_{ja(max)} = R_{jc} + R_{cd} + R_{da} \rightarrow R_{jc} + R_{cd} = 1^\circ C / W$$

$$R_{da} = R_{ja(max)} - (R_{jc} + R_{cd}) = 7,67 - 1 = 6,67^\circ C / W$$



modelo térmico

$$T_j - T_a = R_{ja} \cdot P$$

Próxima Aula

Conversores ca-cc

