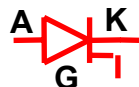
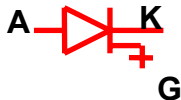
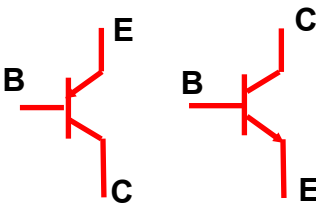


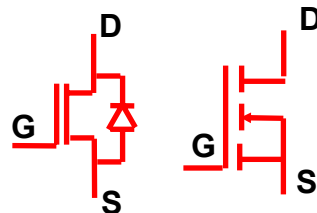
DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA:

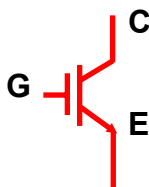
1. **diodo** 

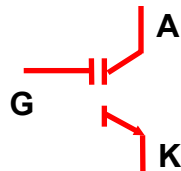
2. **tiristor** - (SCR) “silicon controlled rectifier”. 

3. tiristor de corte comandado (GTO) - “gate turn off thyristor”. 

4. transistor bipolar - (TJB). 

5. **transistor de efeito de campo de potência** (MOSFET). 

6. IGBT - “**insulated gate bipolar transistor**”. 

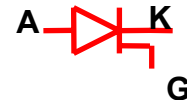
7. MCT - “MOS controlled thyristor”. 

DIODO



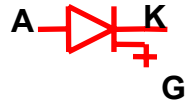
5000 V, 10000A

TIRISTOR



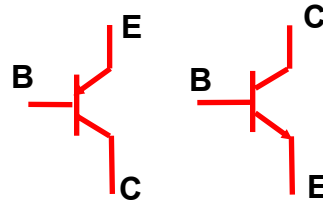
lentos: 5000V, 5000A, $t_q=100\mu s$
rápidos: 2000V, 200A, $t_q=20\mu s$

GTO



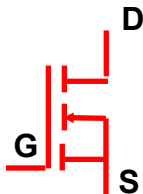
4500V, 1000A
9000V, 9000A (módulos)

TRANSISTOR
BIPOLAR

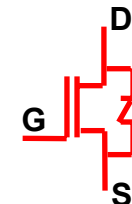


2000V, 2 a 10A
1000V, 100A

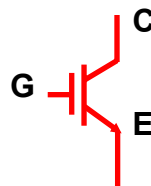
MOSFET



100V, 30A
1000V, 6A

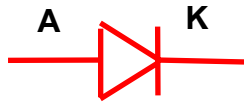


IGBT



3500V, 300A

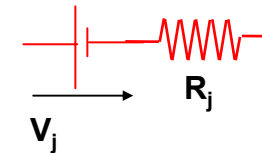
Diodo



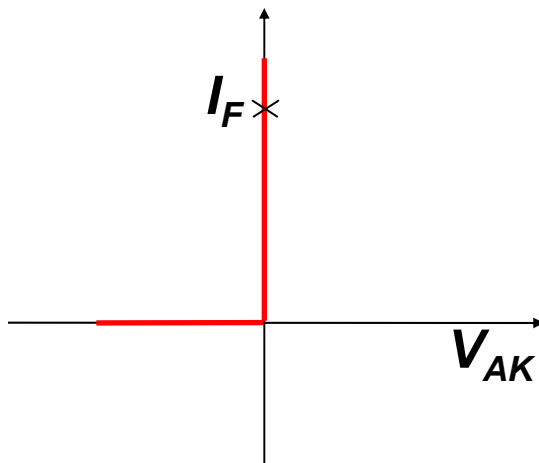
Conduz se a tensão v_{AK} se tornar positiva.

Bloqueia se a corrente I_F se tornar negativa

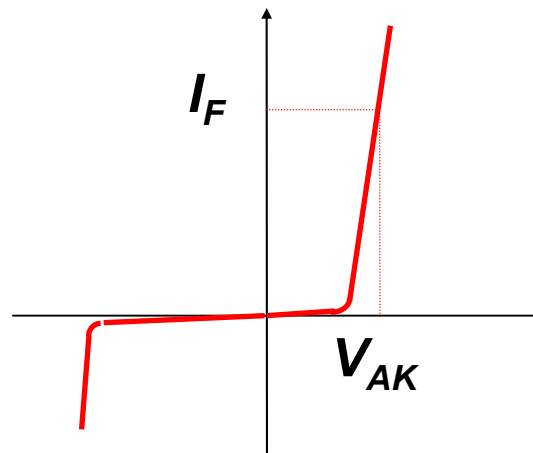
Esquema equivalente
do diodo em condução



Característica
ideal



Característica
real



Potência dissipada:

$$P_F = V_F I_F = V_j I_{Fav} + R_j I_{Fef}^2$$

Resistência térmica do
dissipador:

$$T_{jmax} - T_a = R_{th\ j-a} P_F$$

Limites de operação:

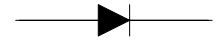
- V_{RRM} - tensão inversa máxima de pico repetitivo
- I_{FRMS} - máximo valor eficaz da corrente directa
- I_{FAV} - máximo valor médio da corrente directa
- I_{FRM} - máximo valor de pico rep. da corrente directa
- I_{FSM} - máximo valor de pico não rep. da corrente directa
- I^2t - característica de choque térmico $I^2t = \int_0^t i_D^2 dt$

valor médio da corrente directa

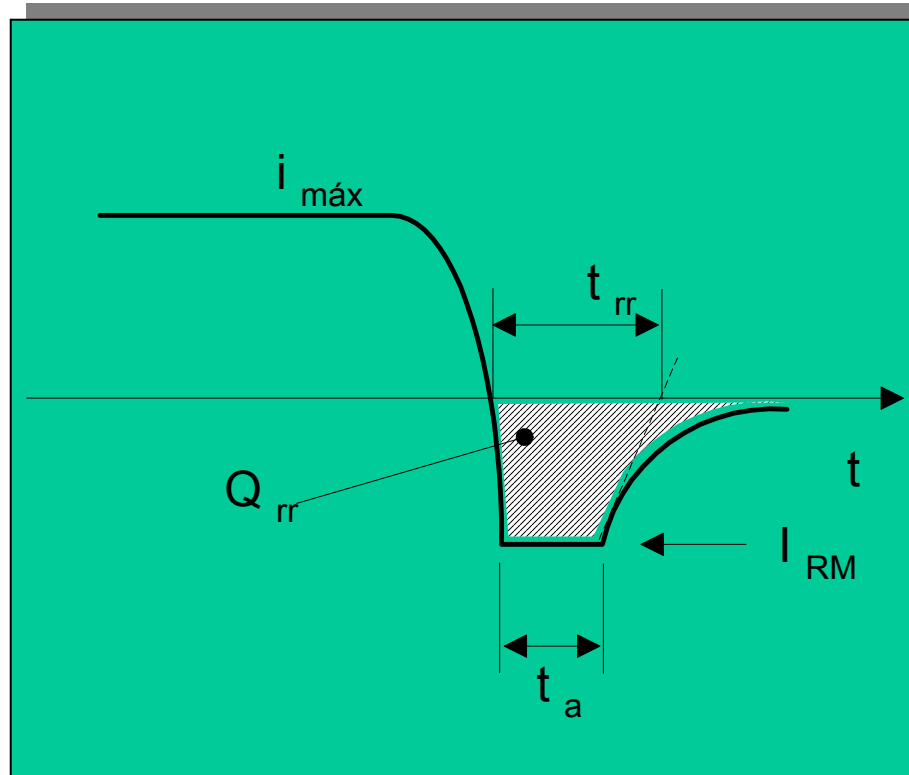
$$I_{F(av)} = \frac{1}{T} \int_0^t i_D dt$$

valor eficaz da corrente directa

$$I_{F(RMS)} = \frac{1}{T} \int_0^t i_D^2 dt$$



Característica dinâmica

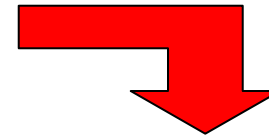
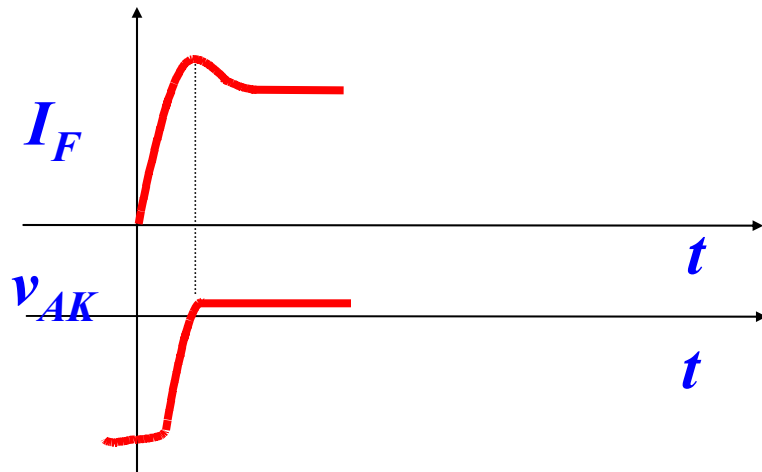


t_{rr} – tempo de recuperação inversa;
intervalo de tempo entre a inversão da corrente e a intersecção da tangente no início da subida com o eixo t

Q_{rr} – carga de recuperação inversa (C);
Carga eléctrica removida da junção durante a transição ON-OFF

t_a – tempo de armazenamento;
Intervalo desde que se inverte até começar a subir exponencialmente

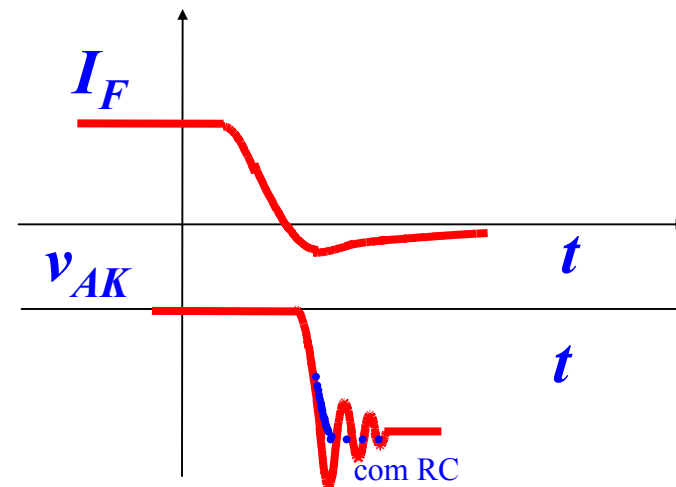
Passagem à condução



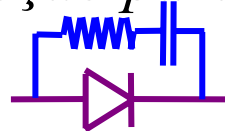
Carga de capacidade

Potência dissipada

Passagem ao corte



Circuito de protecção para evitar oscilações:

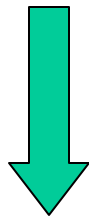


Problemas quando a frequência aumenta



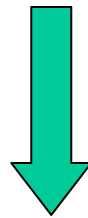
Classificação de díodos

Schottky



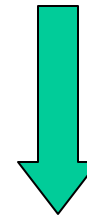
- $V_{on} = 0.3$
- $V_{m\acute{a}x} < 150V$

Recuperação rápida
(fast recovery)



- t_{rr} baixo ($< \mu s$)
- $V_{m\acute{a}x} < kV$
- $I_{m\acute{a}x} < kA$

Rectificadores



- t_{rr} elevado
- $V_{m\acute{a}x} > kV$
- $I_{m\acute{a}x} > kA$

Schottky

International
IR Rectifier

89CNQ...A Series

SCHOTTKY RECTIFIER
New GenIII D-61 Package

80 Amp

Major Ratings and Characteristics

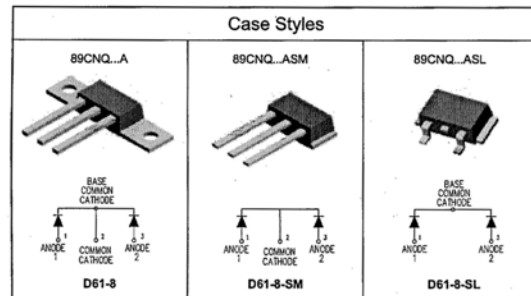
Characteristics	89CNQ...A	Units
$I_{F(AV)}$ Rectangular waveform	80	A
V_{RRM}	135 to 150	V
I_{FSM} @ $t_p = 5 \mu s$ sine	4300	A
V_F @ $40 A, T_J = 125^\circ C$ (per leg)	0.69	V
T_J range	-55 to 175	$^\circ C$

Description/Features

The 89CNQ...A center tap Schottky rectifier module has been optimized for very low forward voltage drop, with moderate leakage. The proprietary barrier technology allows for reliable operation up to $175^\circ C$ junction temperature. Typical applications are in switching power supplies, converters, free wheeling diodes, and reverse battery protection.

- $175^\circ C$ T_J operation
- Center tap module
- High purity, high temperature epoxy encapsulation for enhanced mechanical strength and moisture resistance
- Low forward voltage drop
- High frequency operation
- Guard ring for enhanced ruggedness and long term reliability
- New fully transfer-mold low profile, small footprint, high current package

Case Styles



www.irf.com

89CNQ...A Series

Bulletin PD-20046 rev. B 01/02

International
IR Rectifier

Voltage Ratings

Part number	89CNQ135A	89CNQ150A
V_R Max. DC Reverse Voltage (V)	135	150
V_{RWM} Max. Working Peak Reverse Voltage (V)		

→ Máx. tensão de bloqueio

Absolute Maximum Ratings

Parameters	89CNQ	Units	Conditions
$I_{F(AV)}$ Max. Av. Forward Current (Per Leg) See Fig. 5	40 80	A	50% duty cycle @ $T_J = 130^\circ C$, rectangular waveform (Rated V_R)
I_{FSM} Max. Peak One Cycle Non-Repetitive Surge Current (Per Leg) See Fig. 7	4300 500	A	5 μs Sine or 3 μs Rect. pulse 10 ms Sine or 6 ms Rect. pulse Following any rated load condition and with rated V_R applied
E_{AS} Non-Repetitive Avalanche Energy (Per Leg)	290	mJ	$T_J = 25^\circ C$, $I_{AS} = 1$ Amps, $L = 18$ mH
I_{AR} Repetitive Avalanche Current (Per Leg)	1.0	A	Current decaying linearly to zero in 1 μs Frequency limited by T_J max. $V_A = 1.5 \times V_R$ typical

→ Máx. Corrente directa
valor médio

Electrical Specifications

Parameters	89CNQ	Units	Conditions
V_{FM} Max. Forward Voltage Drop (Per Leg) See Fig. 1 (1)	0.99 1.14 0.69 0.78	V V V V	@ 40A @ 80A $T_J = 25^\circ C$ $T_J = 125^\circ C$
I_{RM} Typical Reverse Leakage Current (Per Leg) See Fig. 2 (1)	1.5 21	mA mA	$T_J = 25^\circ C$ $T_J = 125^\circ C$ $V_R = \text{rated } V_R$
C_T Max. Junction Capacitance (Per Leg)	980	pF	$V_R = 5V_{DC}$, (test signal range 100Khz to 1Mhz) $25^\circ C$
L_S Typical Series Inductance (Per Leg)	5.5	nH	Measured lead to lead 5mm from package body
dV/dt Max. Voltage Rate of Change (Rated V_R)	10000	V/ μs	

→ Tensão de condução

→ Corrente de fuga
no corte

(1) Pulse Width < 300 μs , Duty Cycle < 2%

Thermal-Mechanical Specifications

Parameters	89CNQ	Units	Conditions
T_J Max. Junction Temperature Range	-55 to 175	$^\circ C$	
T_{stg} Max. Storage Temperature Range	-55 to 175	$^\circ C$	
R_{thJC} Max. Thermal Resistance Junction to Case (Per Leg)	0.85	$^\circ C/W$	DC operation
R_{thJC} Max. Thermal Resistance Junction to Case (Per Package)	0.42	$^\circ C/W$	DC operation
R_{thCS} Typical Thermal Resistance, Case to Heatsink (D61-8 Only)	0.30	$^\circ C/W$	Mounting surface, smooth and greased Device flatness < 5 mils
wt Approximate Weight	7.8 (0.28)	g (oz.)	
T Mounting Torque (D61-8 Only)	Min. 40 (35) Max. 58 (50)	Kg-cm (lb-in)	

Recuperação rápida

Preliminary Data Sheet PD-20619 rev. A 04/01

International
IR Rectifier

70CRU02

Ultrafast Soft Recovery Dual Diode

Features

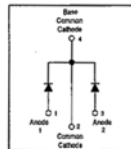
- Ultrafast Recovery
- 175°C Operating Junction Temperature

Benefits

- Reduced RFI and EMI
- Higher Frequency Operation
- Reduced Snubbing
- Reduced Parts Count

Description/ Applications

These diodes are optimized to reduce losses and EMI/RFI in high frequency power conditioning systems. The softness of the recovery eliminates the need for a snubber in most applications. These devices are ideally suited for HFP welding, power converters and other applications where switching losses are not significant portion of the total losses.



$t_{rr} = 21\text{ns}$
 $I_F(AV) = 35\text{Amp}$
 $V_R = 200\text{V}$
Per Leg

Absolute Maximum Ratings

Parameters (*)	Max	Units
V_R Cathode to Anode Voltage	200	V
$I_F(AV)$ Continuous Forward Current, $T_C = 145^\circ\text{C}$ Per Leg	35	A
I_{FSM} Single Pulse Forward Current, $T_C = 25^\circ\text{C}$ Per Leg	300	A
I_{FRM} Single Repetitive Forward Current Per Leg	100	A
P_{DSS} Maximum Power Dissipation, $T_C = 145^\circ\text{C}$ Per Module	67	W
T_J, T_{STG} Operating Junction and Storage Temperatures	-55 to 175	$^\circ\text{C}$

(*) Per Leg unless otherwise specified

Case Styles

70CRU02



TO-218

www.irf.com

70CRU02

Preliminary Data Sheet PD-20619 rev. A 04/01

International
IR Rectifier

Electrical Characteristics per Diode @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Parameters	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
V_{BR}, V_r Breakdown Voltage, Blocking Voltage	200	-	-	V	$I_R = 60\mu\text{A}$
V_F Forward Voltage	-	0.95	1.09	V	$I_F = 35\text{A}$
	-	0.9	1.0	V	$I_F = 35\text{A}, T_J = 125^\circ\text{C}$
	-	0.85	0.9	V	$I_F = 35\text{A}, T_J = 175^\circ\text{C}$
I_R Reverse Leakage Current	-	-	60	μA	$V_R = V_R \text{ Rated}$
	-	-	2	mA	$T_J = 150^\circ\text{C}, V_R = V_R \text{ Rated}$
C_T Junction Capacitance	-	50	-	pF	$V_R = 200\text{V}$
L_S Series Inductance	-	3.5	-	nH	Measured lead to lead 5mm from package body

→ Máx. tensão de bloqueio no corte

→ Corrente fuga no corte

Dynamic Recovery Characteristics per Diode @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Parameters	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
t_{rr} Reverse Recovery Time	-	-	28	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$
	-	34	-		$T_J = 125^\circ\text{C}$
	-	26	-		$T_J = 25^\circ\text{C}$
	-	49	-		$T_J = 125^\circ\text{C}$
Q_{rr} Reverse Recovery Charge	-	48.7	-	nC	$T_J = 25^\circ\text{C}$
	-	202	-		$T_J = 125^\circ\text{C}$

Tempo de recuperação

Thermal - Mechanical Characteristics

Parameters	Min	Typ	Max	Units
$R_{\theta JC}$ Thermal Resistance, Junction to Case Per Diode	-	0.8	0.9	K/W
$R_{\theta JC}$ Thermal Resistance, Junction to Case Both Leg	-	-	0.45	
$R_{\theta CS}^{(1)}$ Thermal Resistance, Case to Heatsink	-	0.2	-	
Wt Weight	-	5.5	-	g
	-	0.2	-	(oz)
T Mounting Torque	1.2	-	2.4	$\text{N} \cdot \text{m}$
	10	-	20	$\text{lbf} \cdot \text{in}$

(1) Mounting Surface, Flat, Smooth and Greased

Rectificadores



V_{RRM}	= 5000 V	Rectifier Diode 5SDD 20F5000
I_{FAVM}	= 1850 A	
I_{FRMS}	= 2900 A	
I_{FSM}	= 23500 A	
V_{F0}	= 0.99 V	
r_F	= 0.282 mΩ	

Doc. No. 5SYA1162-01 Jan. 01

- Very low on-state losses
- Optimum power handling capability

Blocking

Part Number	5SDD 20F5000	5SDD 20F4800	5SDD 20F4400	Conditions
V_{RRM}	5000 V	4800 V	4400 V	$f = 50 \text{ Hz}$, $t_p = 10 \text{ ms}$
V_{RSM}	5200 V	5000 V	4600 V	$f = 5 \text{ Hz}$, $t_p = 10 \text{ ms}$
I_{RRM}	$\leq 75 \text{ mA}$			V_{RRM} , $T_J = 160^\circ\text{C}$

Mechanical data

F_M	Mounting force	nom.	22 kN
		min.	20 kN
		max.	24 kN
a	Acceleration		
	Device unclamped		50 m/s ²
	Device clamped		100 m/s ²
m	Weight		0.5 kg
D_8	Surface creepage distance		30 mm
D_8	Air strike distance		20 mm

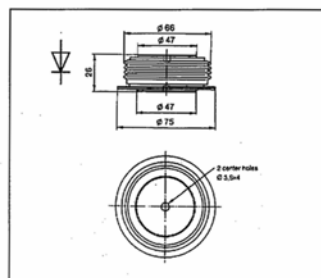


ABB Semiconductors AG reserves the right to change specifications without notice.

ABB

On-state

I_{FAVM}	Max. average on-state current	1850 A	Half sine wave, $T_c = 90^\circ\text{C}$	
I_{FRMS}	Max. RMS on-state current	2900 A		
I_{FSM}	Max. peak non-repetitive surge current	23500 A	$t_p =$	10 ms
		24300 A	$t_p =$	8.3 ms
i^2t	Limiting load integral	2760 kA ² s	$t_p =$	10 ms
		2460 kA ² s	$t_p =$	8.3 ms
V_F	On-state voltage	2.13 V	$I_F =$	4000 A
V_{F0}	Threshold voltage	0.99 V	$I_F =$	2500 - 7500 A
r_F	Slope resistance	0.282 mΩ	$T_J =$	160°C

Switching

Q_{rr}	Recovery charge	min	3800 μAs	$di_F/dt = -30 \text{ A}/\mu\text{s}$	$V_R = 200 \text{ V}$
		max	5200 μAs	$I_{FRM} = 1000 \text{ A}$	$T_J = 160^\circ\text{C}$

Thermal

T_{Jmax}	Max. junction temperature	160°C	
T_{Jstg}	Storage temperature range	-40...175°C	
R_{thJC}	Thermal resistance junction to case	30 K/kW	Anode side cooled
		30 K/kW	Cathode side cooled
		15 K/kW	Double side cooled
R_{thCH}	Thermal resistance case to heat sink	8 K/kW	Single side cooled
		4 K/kW	Double side cooled

Analytical function for transient thermal impedance:

$$Z_{thJC}(t) = \sum_{i=1}^n R_i(1 - e^{-t/\tau_i})$$

i	1	2	3	4
$R_i(\text{K/kW})$	8.96	4.66	1.02	0.34
$\tau_i(\text{s})$	0.4078	0.0643	0.0051	0.0012

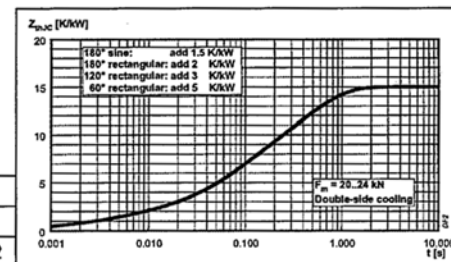
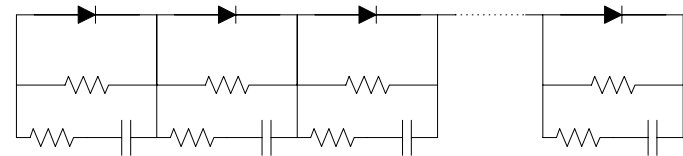
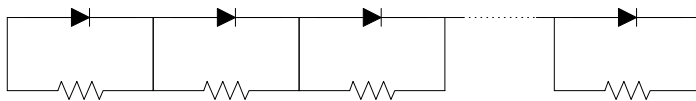


Fig. 1 Transient thermal impedance junction to case

Díodos em série (repartir tensões inversas)



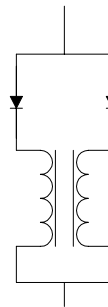
Díodos em paralelo (repartir correntes directas)

Equalização por dispositivo

Seleção de díodos com características muito semelhantes

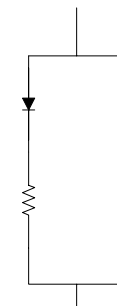
Equalização por acomplamento magnético

Só para correntes de kA; processo caro e complexo; mais peso, mais volume.

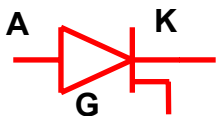


Equalização por resistências

Só para correntes mais baixas



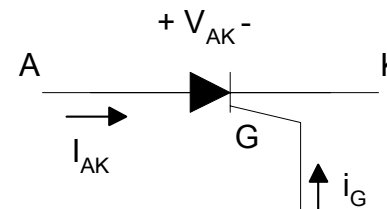
Tiristor SCR



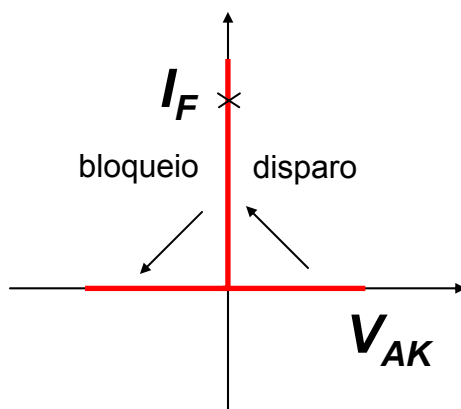
Conduz se v_{AK} for positivo e se existir um impulso de corrente na “gate”, de curta duração. Bloqueia se a corrente I_F se anular.

Semi-controlado

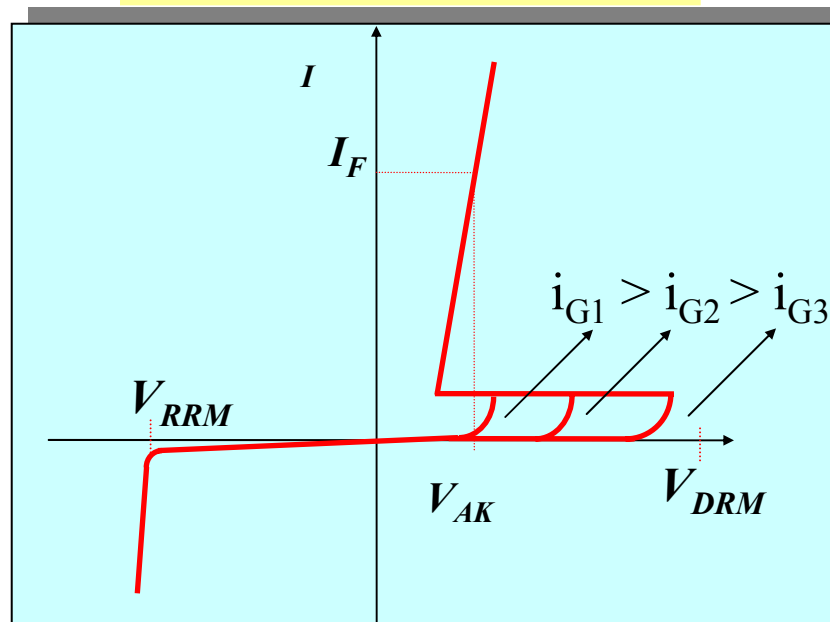
Controlo apenas na passagem a **ON**



Característica
ideal



Característica real



Transição **OFF-ON**

- $v_{GK} = V_{GKT} > 0$, $i_G = i_{GT} > 0$ durante um intervalo de tempo mínimo

Transição **ON-OFF**

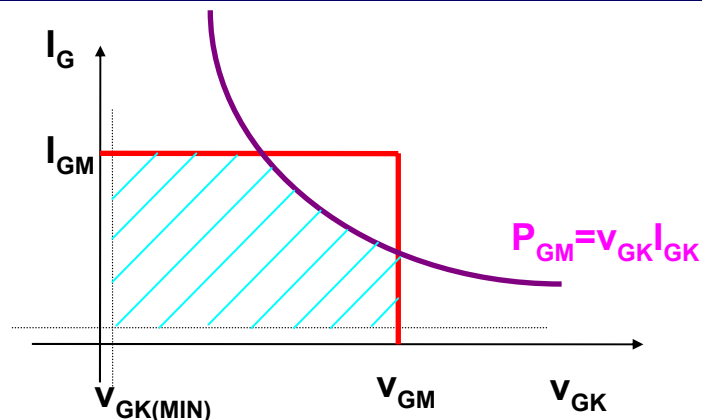
- inversão de tensão
- $I_{AK} < I_H$ (corrente de manutenção)

Limites de operação:

V_{RRM}	-	tensão inversa máxima de pico repetitivo
V_{DRM}	-	tensão directa máxima de pico repetitivo com o tiristor no corte
I_{TRMS}	-	máximo valor eficaz da corrente directa
I_{TAV}	-	máximo valor médio da corrente directa
I_{TRM}	-	máximo valor de pico rep. da corrente directa
I_{TSM}	-	máximo valor de pico não rep. da corrente directa
I^2t	-	característica de choque térmico
$(di/dt)_{max}$	-	máxima taxa de crescimento da corrente directa
$(dv_{AK}/dt)_{max}$	-	máxima taxa de crescimento da tensão ânodo cátodo
I_H	-	corrente de manutenção (“holding current”) ($1\% I_{TAV}$)
I_L	-	corrente de lançamento (“latching current”) ($> I_H$)
t_d	-	tempo de passagem à condução $0,1\mu s - 10\mu s$
t_q	-	tempo de passagem ao corte $1\mu s - 110\mu s$

Características de “GATE”

V_{GM} -----	máximo valor da tensão “gate”- cátodo
P_{GM} -----	máximo valor da potência na “gate”
P_{Gav} -----	máximo valor da potência média na “gate”
I_{GM} -----	máximo valor da corrente de “gate”



t_d - tempo de disparo (diminui com o aumento de energia fornecida à “gate”)

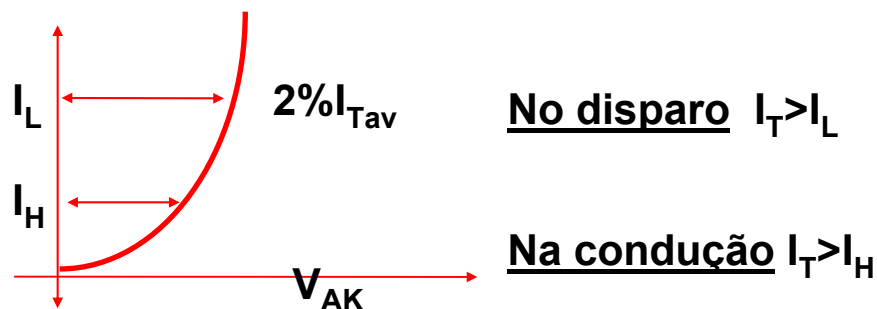
o impulso de “gate”



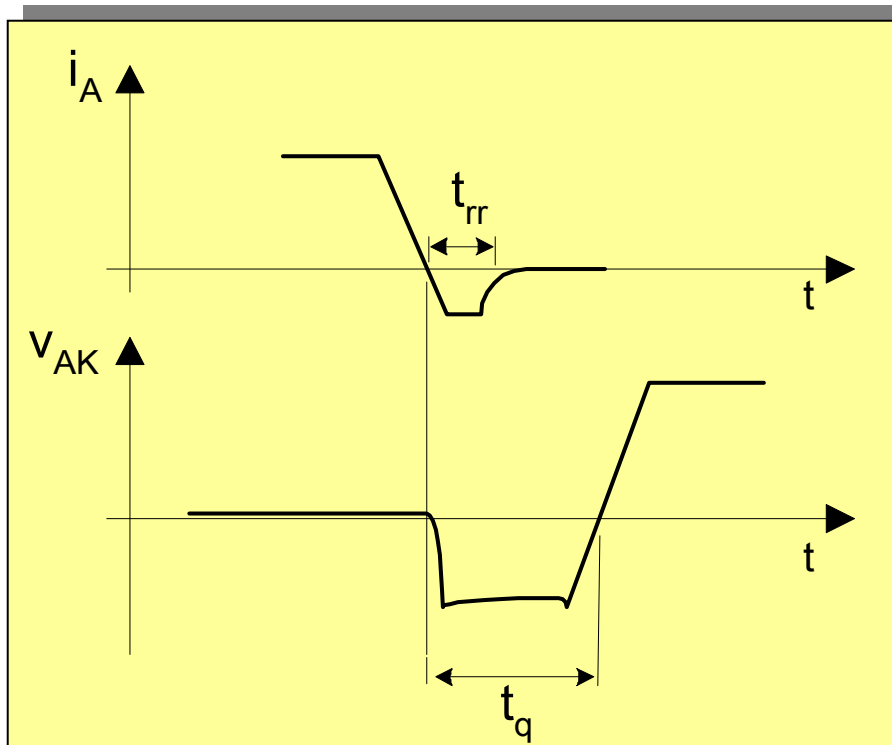
Correntes de fuga:

$$I_f \cong \frac{I_{Tav}}{10^4} \quad Req_{off} \cong \frac{V_{RRM}}{I_f}$$

Correntes de lançamento e manutenção:



Característica dinâmica



t_q – tempo de recuperação ou
tempo de passagem ao corte

É necessário assegurar uma tensão negativa durante um tempo superior a t_q para que o tiristor corte; caso contrário conduz logo que polarizado directamente, mesmo sem impulso de gate.

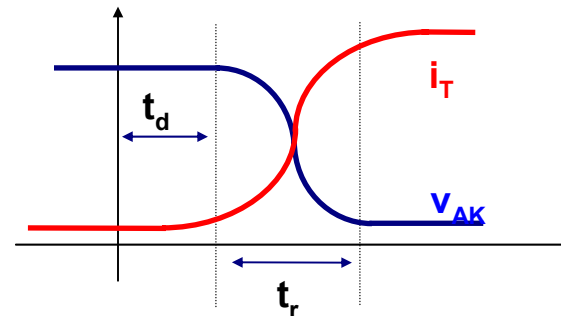
Outras limitações
dos tiristores

Taxa máxima de variação da corrente di_A / dt

Taxa máxima de variação da tensão dv_{AK} / dt

entrada em condução

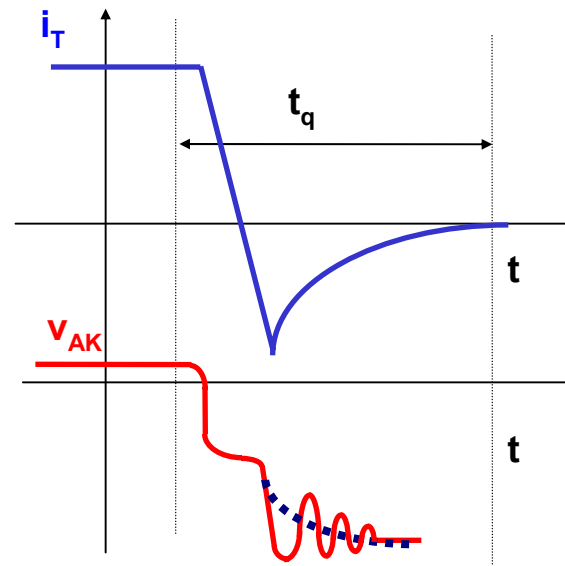
$t_d + t_r$ tempo de passagem à condução



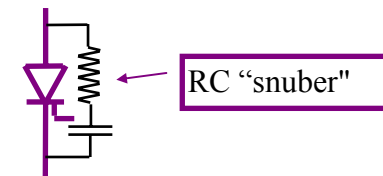
ATENÇÃO a:
Potência dissipada
 di/dt máximo
 t_r (depende do circuito exterior)

passagem ao corte

t_q tempo de passagem ao corte (depende da temperatura)



ATENÇÃO a:
Potência dissipada
 dv_{AK}/dt máximo
 $1\mu s < t_q < 110\mu s$
protecções



não deve ser aplicada tensão directa ao tiristor enquanto não decorrer t_q , caso contrário o tiristor retoma a condução.

Protecções contra di/dt e dv_{AK}/dt excessivos

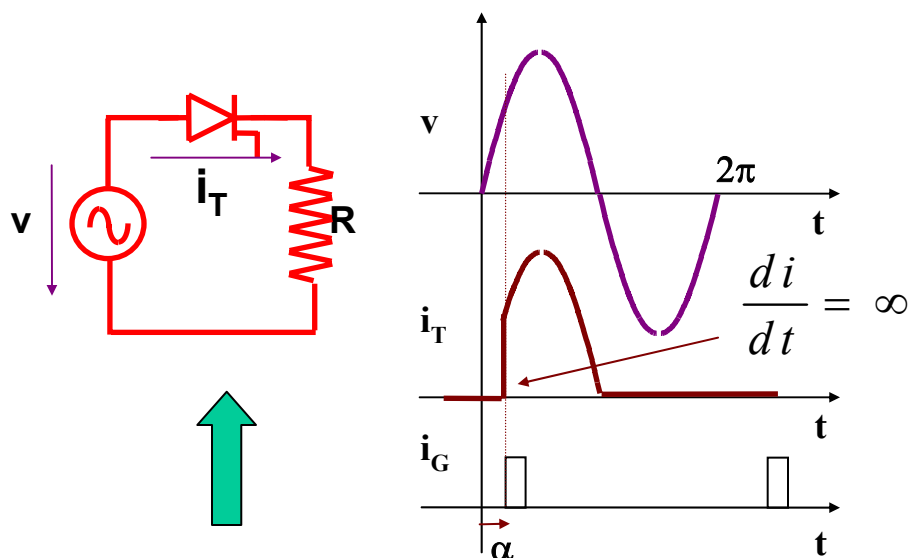
di/dt

concentração de corrente numa
área muito pequena $\longrightarrow$ dissipação de potência elevada
que pode levar à destruição do tiristor

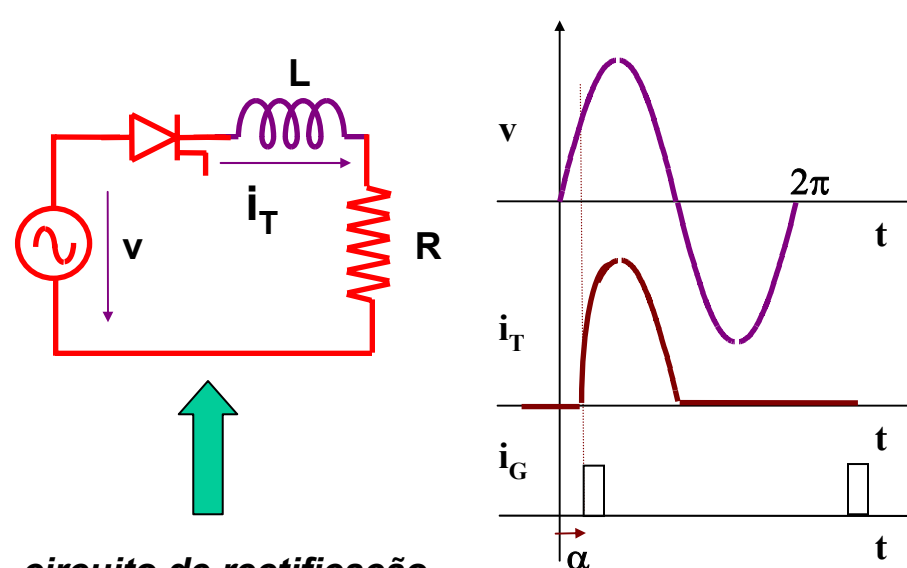
Para proteger o
tiristor contra di/dt
utiliza-se uma bobine
em série

$(di/dt)_{máx} - 200A/\mu s$ lentos

$(di/dt)_{máx} - 2000A/\mu s$ rápidos



circuito de rectificação
sem
protecção contra di/dt



circuito de rectificação
com
protecção contra di/dt

Dimensionamento da bobine de protecção:

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad i(\omega t = 0) = 0 \quad (\text{existência da bobine})$$

$$v = L \frac{di}{dt} \quad \text{em } t = 0$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{v}{L} < \left(\frac{di}{dt} \right)_{\max}$$

$$L > \frac{v}{\left(\frac{di}{dt} \right)_{\max}}$$

Exemplo:

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{\max} = 200 \text{ A} / \mu\text{s}$$

$$v(\max) \text{ --- } \alpha = 90^\circ \quad v = \sqrt{2}220$$

$$R = 10\Omega$$

$$L > \frac{\sqrt{2}220}{200} = 1.56 \mu\text{H}$$

$$L = 2 \mu\text{H}$$

(não afecta as características do circuito)

($\omega L = .6 \text{ m}\Omega$ para $f = 50 \text{ Hz}$ e $R = 10\Omega$)

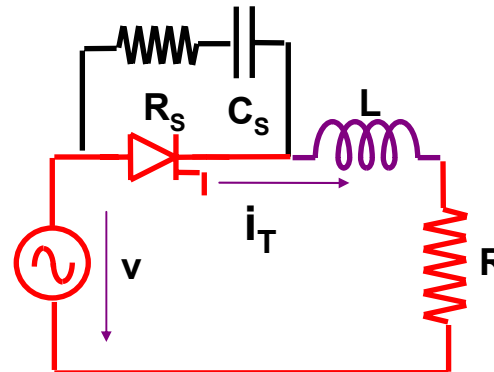
dv_{AK}/dt

- surge quando se estabelece o circuito
- na comutação de cargas indutivas
- na passagem ao corte ou à condução de outro tiristor

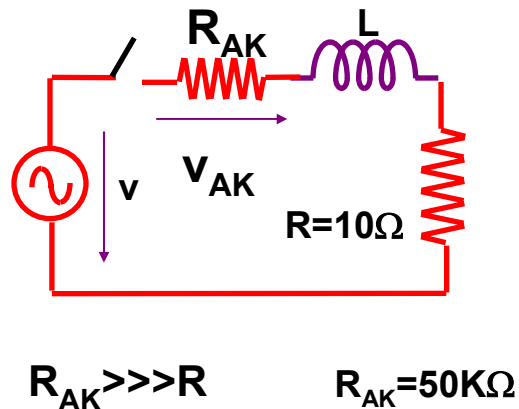
- as cargas eléctricas armazenadas na região espacial de um tiristor bloqueado equivalem a uma capacidade C
- se dv_{AK}/dt é excessivo a corrente $i = Cdv_{AK}/dt$ pode ser suficiente para lançar o dispositivo na condução, intempestivamente

Para proteger o tiristor contra dv_{AK}/dt utiliza-se uma malha capacitiva RC em paralelo com o tiristor

Rectificador com protecções contra dv_{AK}/dt e di/dt



Esquema equivalente com o tiristor no corte sem protecção contra dv_{AK}/dt .



$$v = R_{AK}i + L \frac{di}{dt}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di}{dt} = \frac{v}{L} \\ v_{AK} = R_{AK}i \end{array} \right.$$

$$\frac{dv_{AK}}{dt} = R_{AK} \left(\frac{di}{dt} \right)$$

$$\frac{dv_{AK}}{dt} = R_{AK} \left(\frac{V_{max}}{L} \right)$$

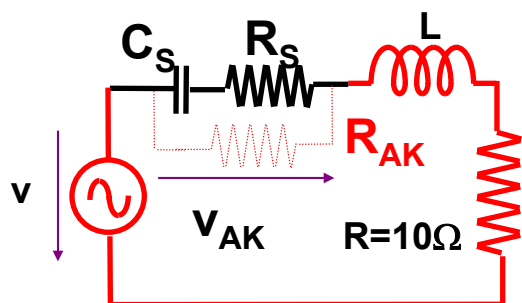
Se $dv_{AK}/dt = 300V/\mu s$
e $di/dt = 200A/\mu s$

$$L = \frac{50 \times 220 \times \sqrt{2}}{300} \times 10^{-3} = 52mH \rightarrow$$

valor muito elevado
 $\omega L = 16\Omega$ $f = 50Hz$ $R = 10\Omega$

Dimensionamento da malha capacitiva:

Esquema equivalente com o tiristor no corte com protecção contra dv_{AK}/dt .



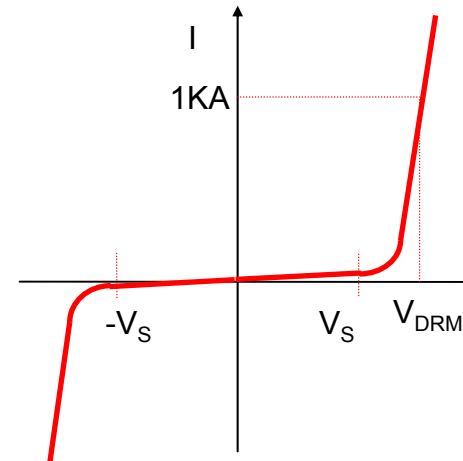
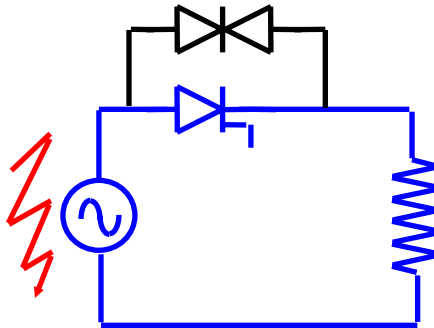
A resistência total medida aos terminais do tiristor fica diminuída quando se põe, em paralelo, a resistência R_s . Assim para $R_s \ll R_{AK}$ tem-se:

$$\frac{dv_{AK}}{dt} = R_{AK} \left(\frac{V_{\max}}{L} \right) \rightarrow \frac{dv_{AK}}{dt} = R_s \left(\frac{V_{\max}}{L} \right) \rightarrow L > \frac{R_s v_{\max}}{\left(\frac{dv_{AK}}{dt} \right)_{\max}}$$
$$L = \frac{50 \times 220 \times \sqrt{2}}{300} \times 10^{-6} = 52 \mu H \rightarrow \text{valor aceitável}$$

R_s pode baixar mas ficará limitado pelo valor da corrente que percorre o circuito com o transistor bloqueado. $C_s = 0,1 \mu F$ valor típico $C_s \gg C_{off} = 1 nF$

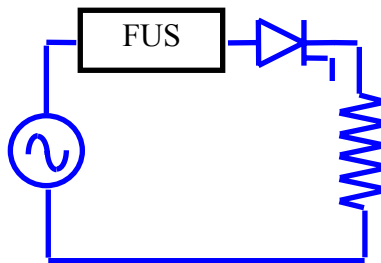
A corrente que percorre o tiristor no corte aproximadamente 10mA $\rightarrow Z_c = 32 K\Omega$ $f = 50 Hz$
 $Z_c = 1/\omega C$

Supressão de transitórios



curva
característica
de um varistor

Protecção contra sobre-intensidades



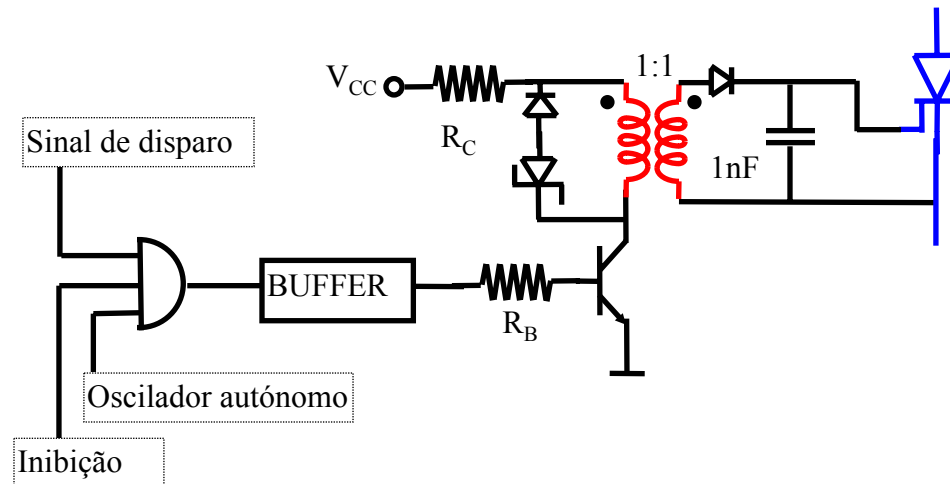
Fusíveis rápidos ou ultra rápidos

i) $V_{\max FUS} > V_{\max}$

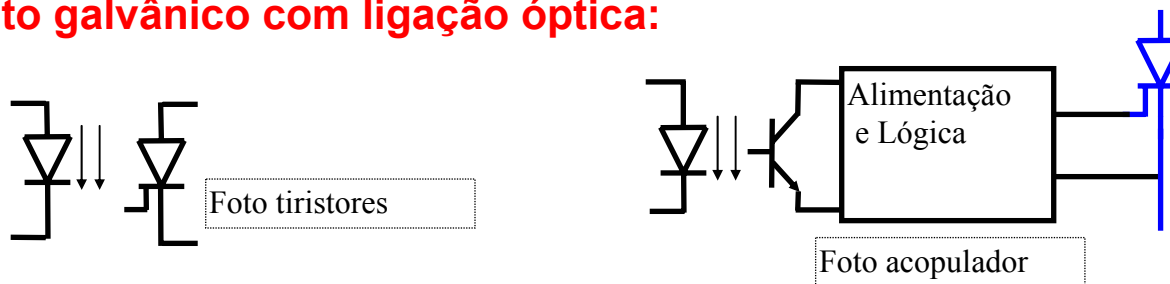
ii) $I^2t_{FUS} > I^2t_{\text{tiristor}}$

Circuitos de disparo de tiristores “drives”

1 - Isolamento galvânico com transformador de impulso:



2 - Isolamento galvânico com ligação óptica:



Classificação de Tiristores

Tiristores Lentos (Controlo de fase)

- $I_{\text{máx}}$: 4 kA
- $V_{\text{máx}}$: 5-7 kV
- V_{on} : 1,5V (@1kV); 3V (@5-7kV)

Aplicações rede
1 ϕ , 3 ϕ , **50-60 Hz**

Tiristores rápidos (Inversores)

- t_q baixos, 1-100 μs Freqs: 1 -2 kHz
- $V_{\text{máx}}$: 2,5 kV, $I_{\text{máx}}$: 1,5 kA
- V_{on} mais baixos

Inversores com
circuitos de
comutação forçada

Foto-Tiristores (HVDC)

disparados
por impulso
luminoso
(fibra óptica)

- potência no disparo: mW
- $V_{\text{máx}}$: **8 kV**, $I_{\text{máx}}$: 3,5 kA
- V_{on} : 2-3 V @3,5 kA

HVDC

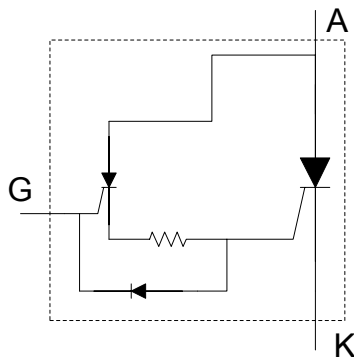
LTT – Ligth triggered T

LASCR – Ligth Activated T

Outros Tiristores

GATT

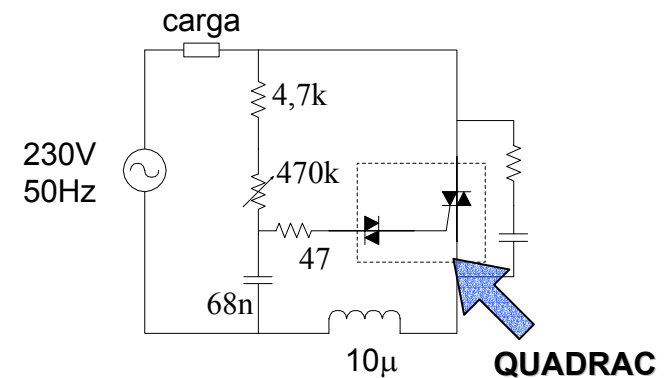
Gate-assisted turn-off Tiristor
(T de corte assistido pela gate)



(Electrónica Geral)

TRIAC, DIAC, QUADRAC

(1200V, 300A)

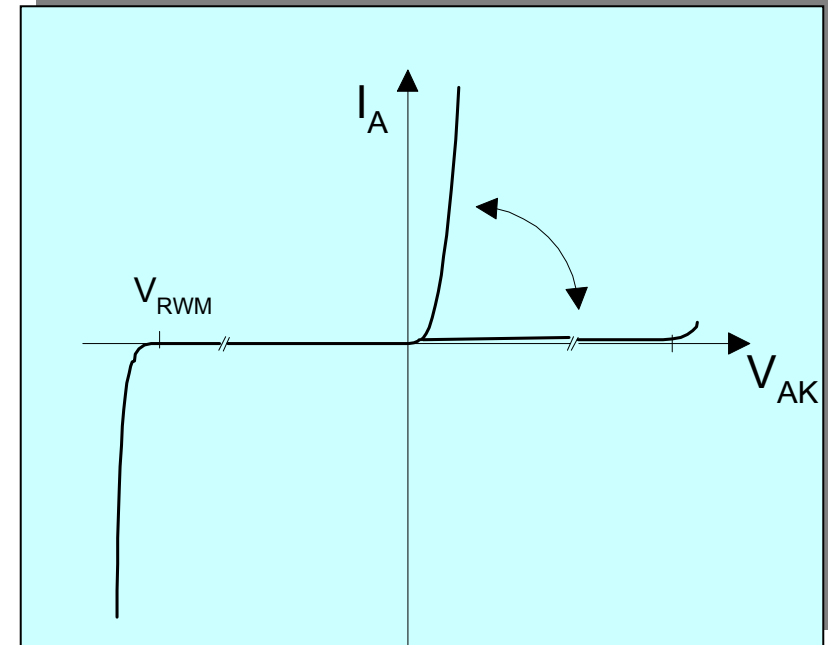
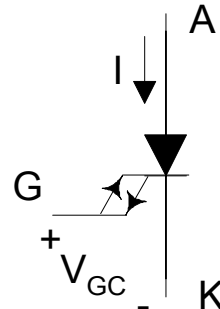


GTO

Gate-turn-off Tiristor

GTO

Gate-Turn-Off Tiristor



Principais campos de aplicação:

- comboios de alta velocidade
- transporte HVDC*

V_{on}	$V_{m\acute{a}x}$	$I_{m\acute{a}x}$	t_q	f_c
2-3 V	9 kV	3 kA	10-25 μs	< 10 kHz

* transporte de energia eléctrica em cc a muito alta tensão

OFF- ON

semelhante ao tiristor convencional ($1 < V_{GT} < 2 \text{ V}$; I_{GT}) mas a corrente de gate tem que se manter durante toda a condução

ON-OFF

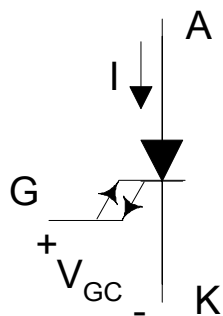
Aplicação de uma tensão **negativa** V_{GC}



$$-20\text{V} < V_{GC} < -7\text{V}$$

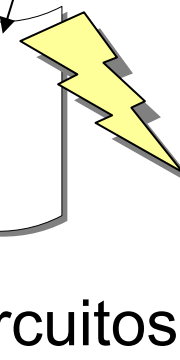
Duração de **alguns** μs superiores a t_q

- $i_G < 0\text{A}$
- $di_G/dt \sim 30\text{-}100 \text{ A}/\mu\text{s}$
- cerca de 30% de I_A



exemplo

$i_G = 200\text{A}$
@ 1000 A ,
 $10 \mu\text{s}$



Potência de
Controlo !!!

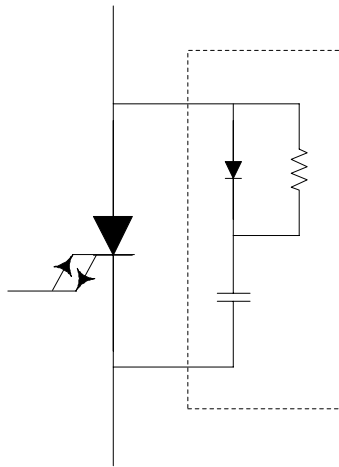
Circuitos de drive
Complexos e caros!!!

Outro problema
dos GTOs

Muito sensível a dv_{AK}/dt elevados
especialmente de OFF-ON

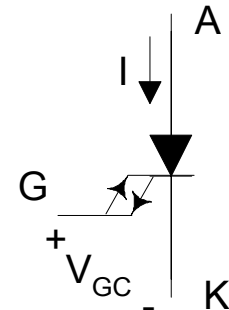
máximo de 1-2 kV/ μ s

Circuitos
de protecção



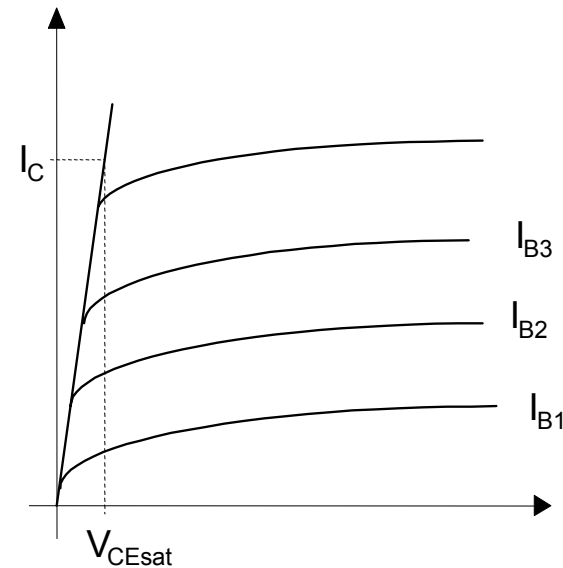
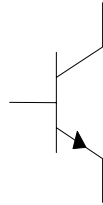
Problemático para
circuitos indutivos

solução



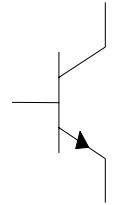
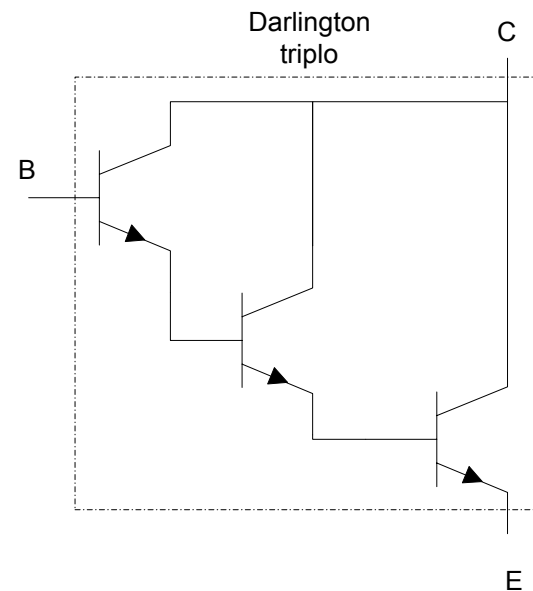
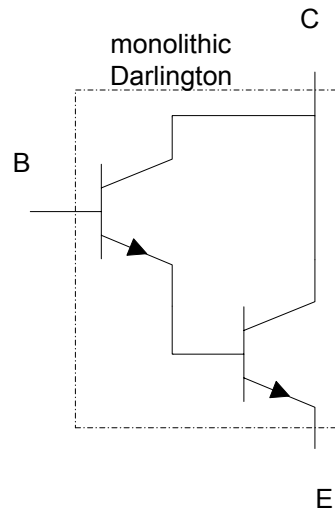
Transistor de junção bipolar

TJB



- baixos h_{FE} $5 < h_{FE} < 10$
- considerável tempo de atraso na passagem ao corte
- décimas $\mu s < \text{tempos de comutação} < \text{alguns } \mu s$
- 1400 V, centenas de A
- coeficiente “negativo” de T (embalamento térmico)

Soluções para h_{FE} maior

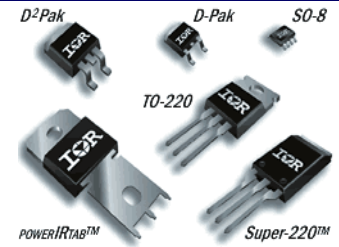
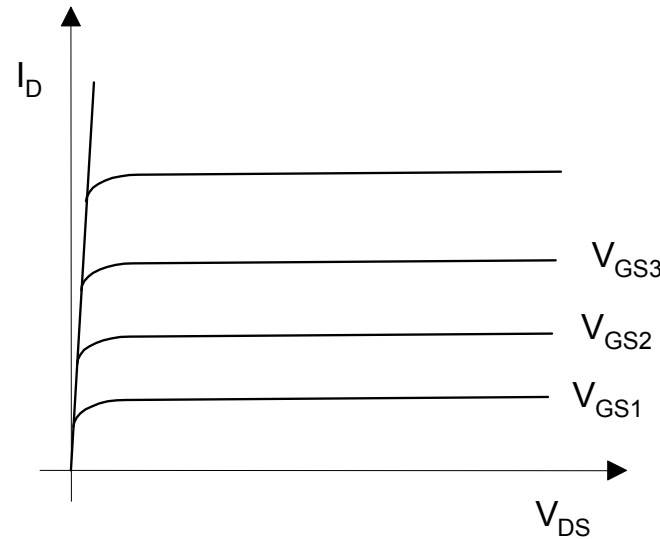
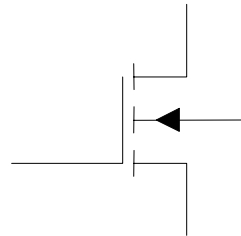


desvantagens

- maior V_{CEsat}
- menos rápidos a comutar

Transistor de efeito de campo de potência

MOSFET



- dissipação na condução dependente de R_{ON}
- competitivos com TJB para $< 300/400V$ e $> 100kHz$
- dezenas ns $<$ tempos de comutação $<$ décimas μs
- 1000 V, < 100 A
- controlo menos complexo
- coeficiente “positivo” de T (auto protecção)

limites de operação:

V_{DS} -	Máxima tensão Dreno Fonte
V_{DG} -	Máxima tensão Dreno Gate
I_D -	Máxima corrente de Dreno
V_{GS} -	Máxima tensão “gate” Fonte
P_D -	Potência Máxima dissipada

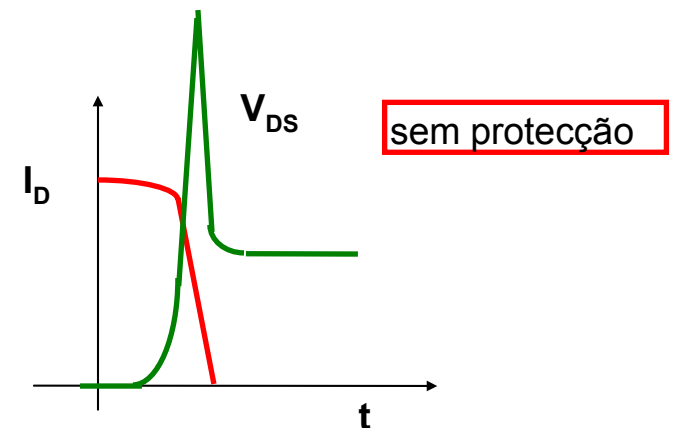
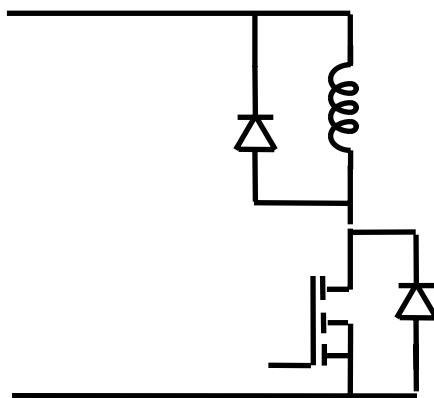
$$P_{\text{cond}} = r_{DS(\text{on})} I_{\text{Def}}^2$$

$r_{DS(\text{on})}$ - Resistência em condução (limita a escolha do FET)

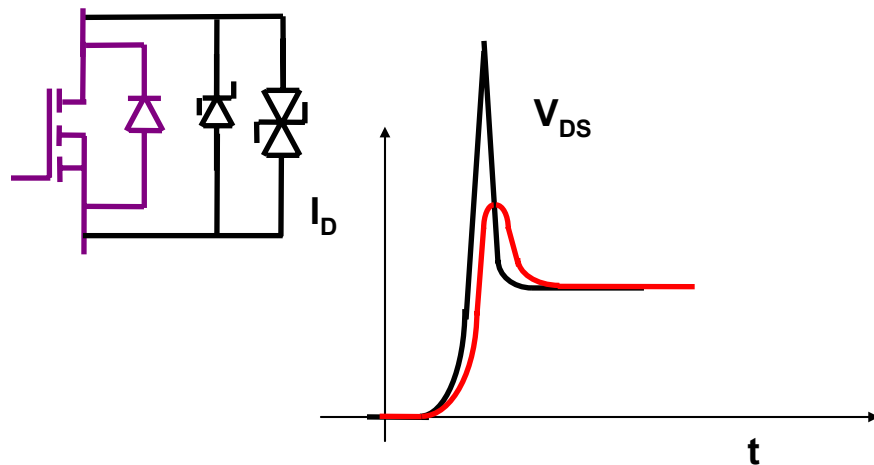
Tempos de condução da ordem dos 50 a 300ns

Circuitos de protecção:

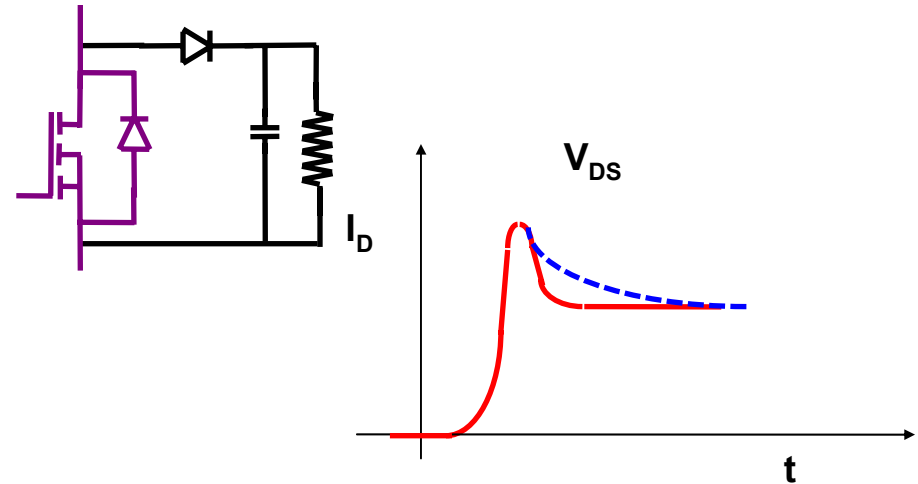
Sendo os tempos de comutação muito baixos há necessidade de proteger o MOSFET contra sobretensões na comutação. Durante a comutação o dispositivo requer correntes elevadas na “gate” (carga descarga de capacidade)



protecção com zenner

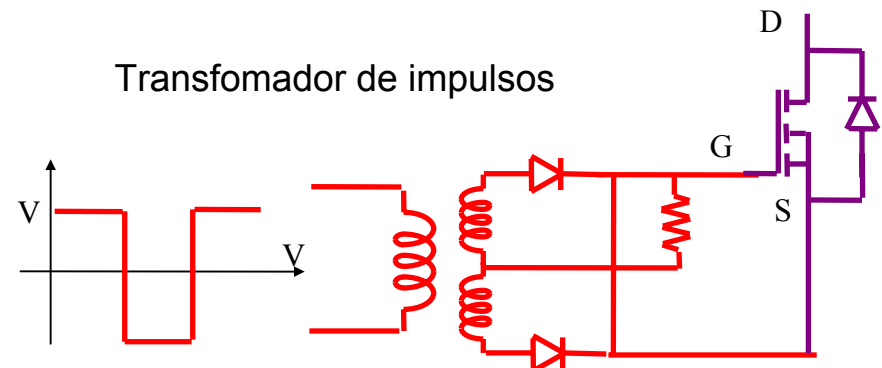
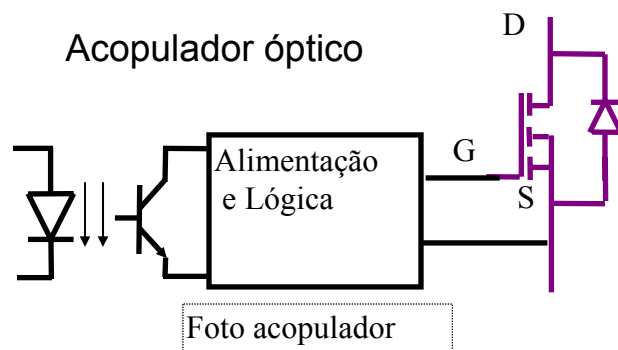


protecção com "snubber"

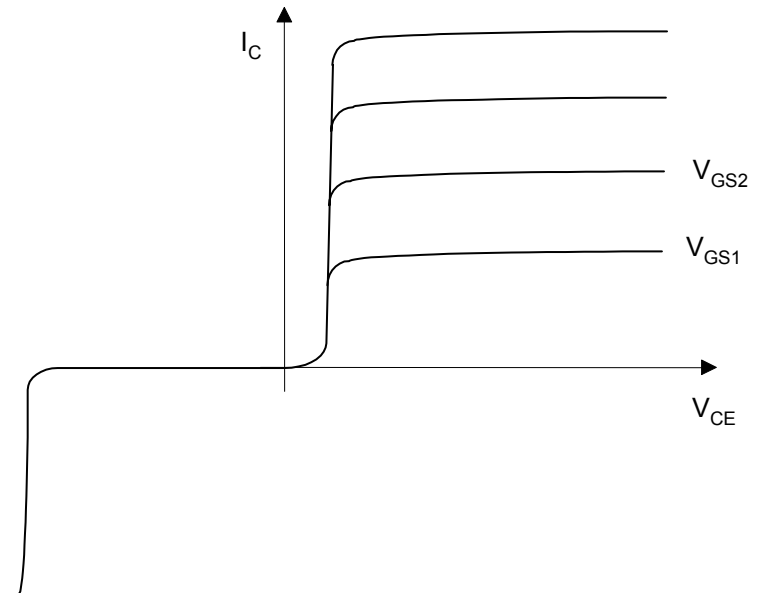
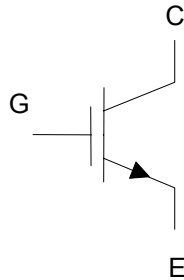


diodo de substracto (diodo parasita) pode ser utilizado como diodo de roda livre (diodo lento)

circuitos de disparo:



Transistor de gate isolada IGBT



“Insulated Gate Bipolar Transistor”

- gate isolada como no MOSFET
- V_{on} baixos mesmo em dispositivos de HV (2-3V IGBT de 1000V)
- tempos de comutação $> \mu s$
- 3 kV, 1200 A

Comparação dos Dispositivos semicondutores

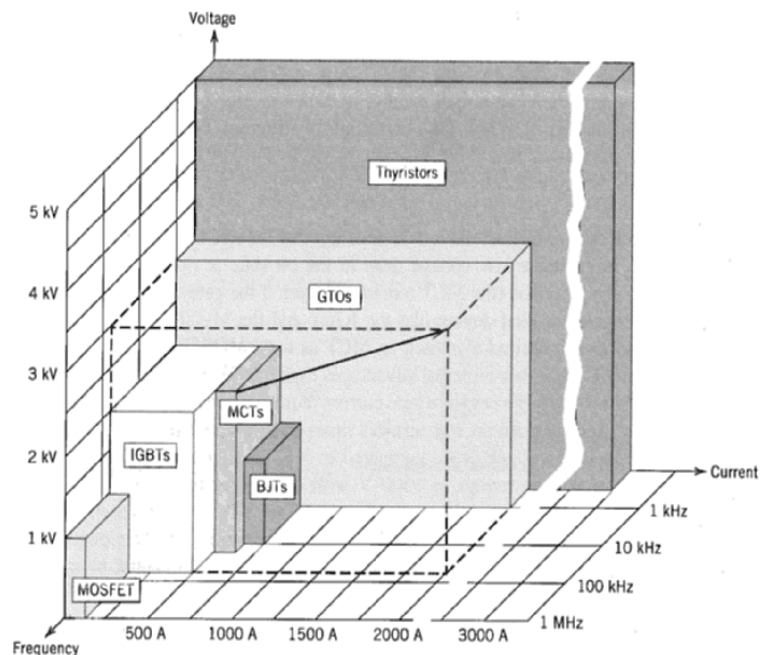
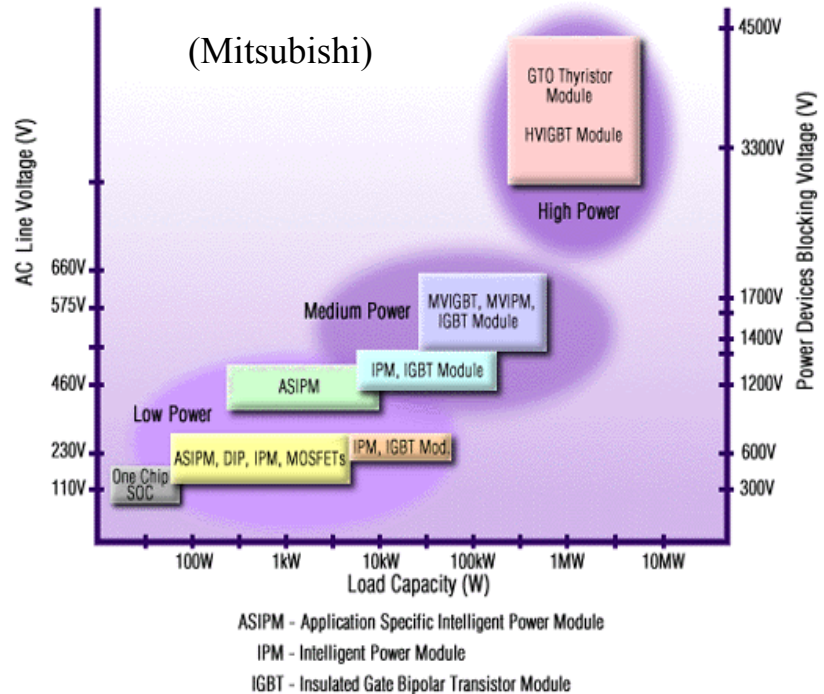


Figure 2-14 Summary of power semiconductor device capabilities. All devices except the MCT have a relatively mature technology, and only evolutionary improvements in the device capabilities are anticipated in the next few years. However, MCT technology is in a state of rapid expansion, and significant improvements in the device capabilities are possible, as indicated by the expansion arrow in the diagram.



semicondutor	Capacidade em potência	Velocidade comutação
TBJ / MD	média	média
MOSFET	baixa	alta
GTO	alta	baixa
IGBT	média	média
Tiristor	alta	baixa

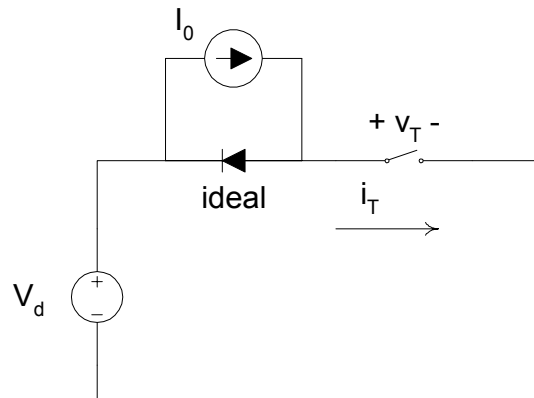
Critérios de escolha de semicondutores de potência

- **potência do dispositivo** (correntes e tensões máximas no circuito)
- **frequência de comutação** (tempos de comutação)
- **perdas de condução** (tensões de condução ou resistência de condução)
- **complexidade e potência** dos circuitos de “drive”
- **custo** do semicondutor

Semicondutores em comutação

IDEAL

- Perdas nulas na condução ($v=0$ quando fechado)
- corrente nula ao corte ($i=0$ quando aberto)
- tempos de comutação nulos (abertura e corte instantâneos)
- potência de controlo nula



REAL

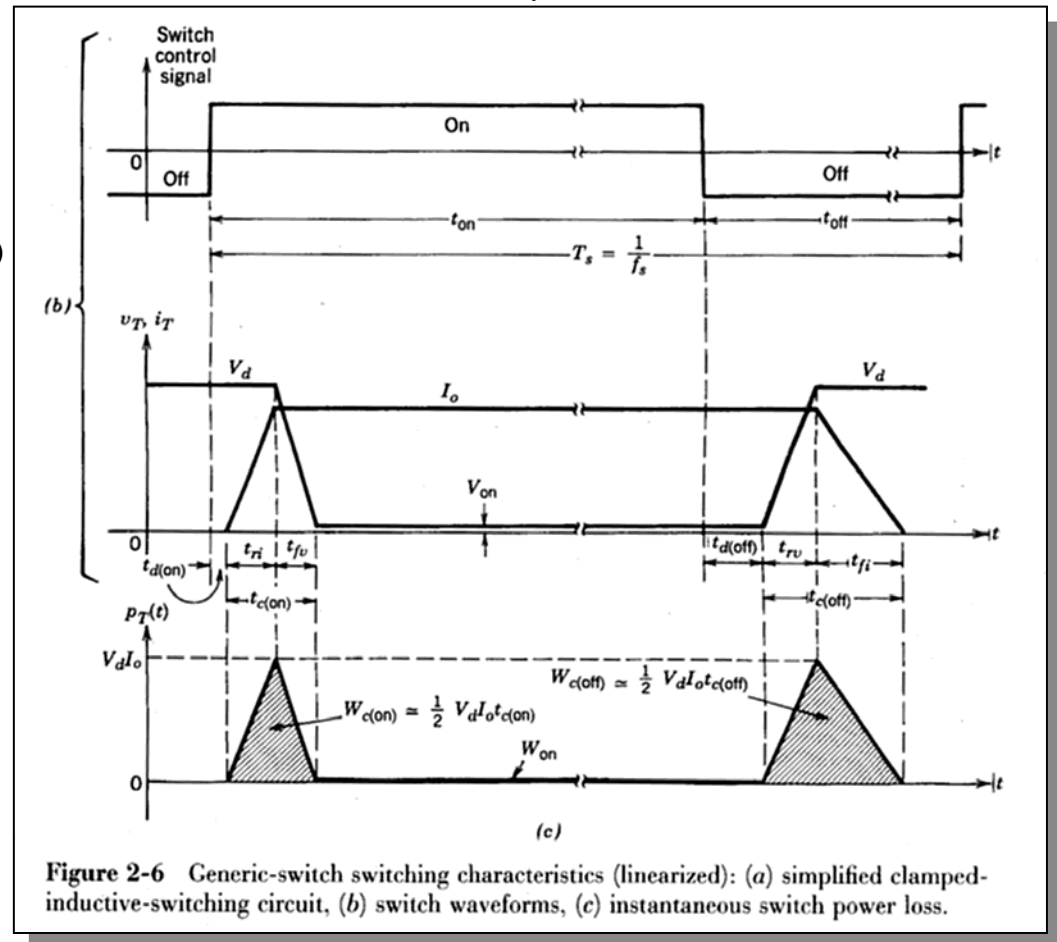


Figure 2-6 Generic-switch switching characteristics (linearized): (a) simplified clamped-inductive-switching circuit, (b) switch waveforms, (c) instantaneous switch power loss.

$$t_{c(on)} = t_{ri} + t_{fv}$$

$$t_{c(off)} = t_{rv} + t_{fi}$$

Perdas na condução

$$P_{on} = V_{on} I_0 t_{on} / T_C$$

Perdas na comutação

$$P_c = \frac{1}{2} V_d I_0 f_c (t_{c(on)} + t_{c(off)})$$

Perdas totais

$$P_T = P_{on} + P_c$$