

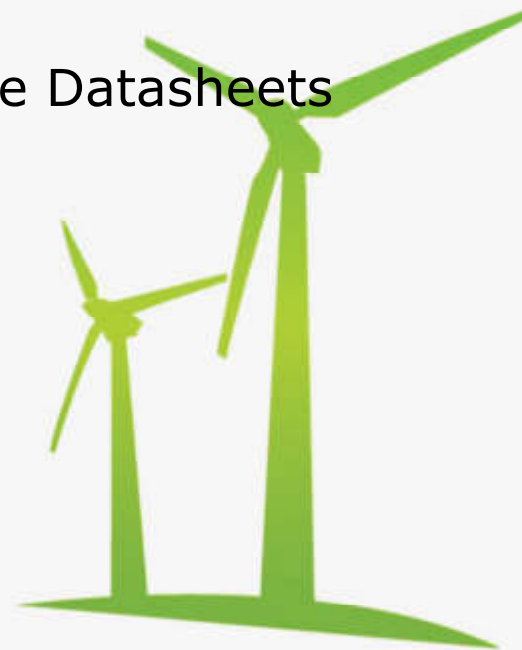
Eletrônica de Potência

Aula 02 – Diodos Semicondutores de potência

Parte 1 - Tipos de diodos, curvas características e Datasheets



Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br

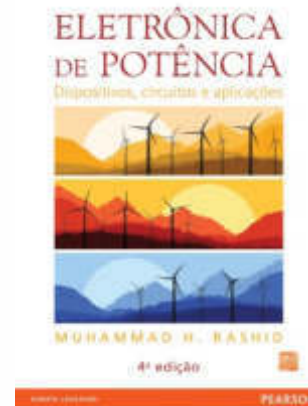


Introdução

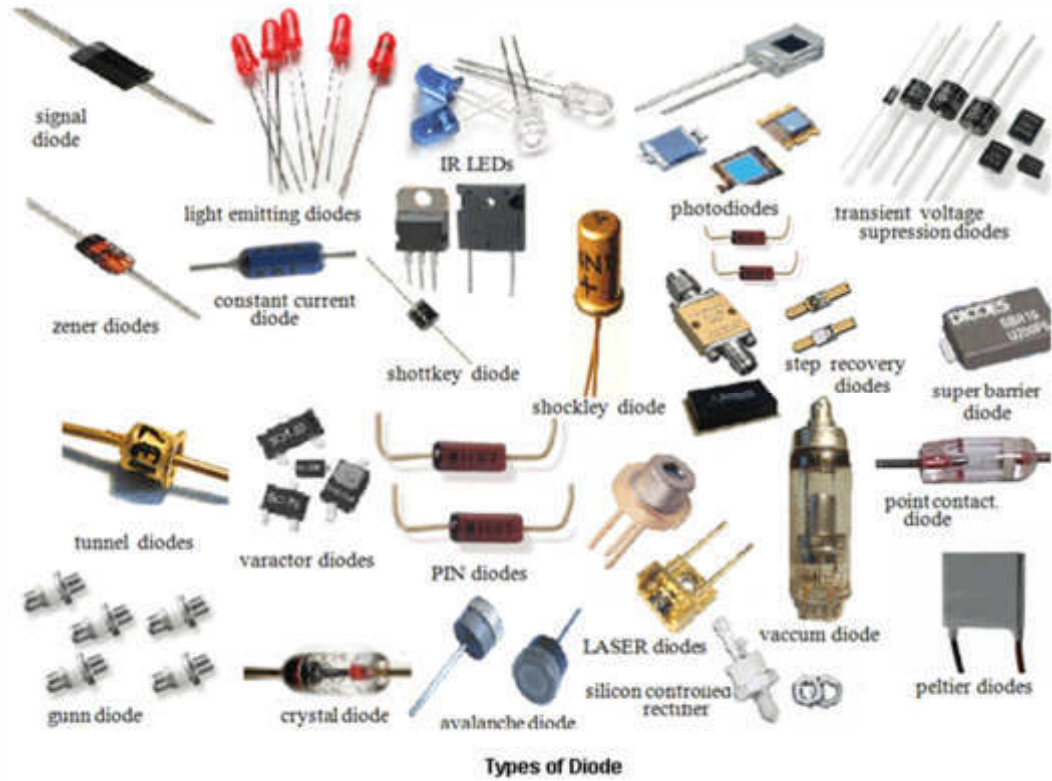
| | | Tópicos |
|----|---|--|
| 01 | - | Introdução |
| 02 | - | Diodos de potência e circuitos RLC chaveados |
| 03 | - | Retificadores com diodos |
| 04 | - | Transistores de potência |
| 05 | | Conversores CC-CC |
| 06 | | Tiristores |
| 07 | | Retificadores controlados |
| 08 | - | Conversores CC-CA |
| 09 | - | Controladores de tensão CA |
| 10 | - | Inversores de pulso ressonante |

Capítulo 2 do Livro

M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014

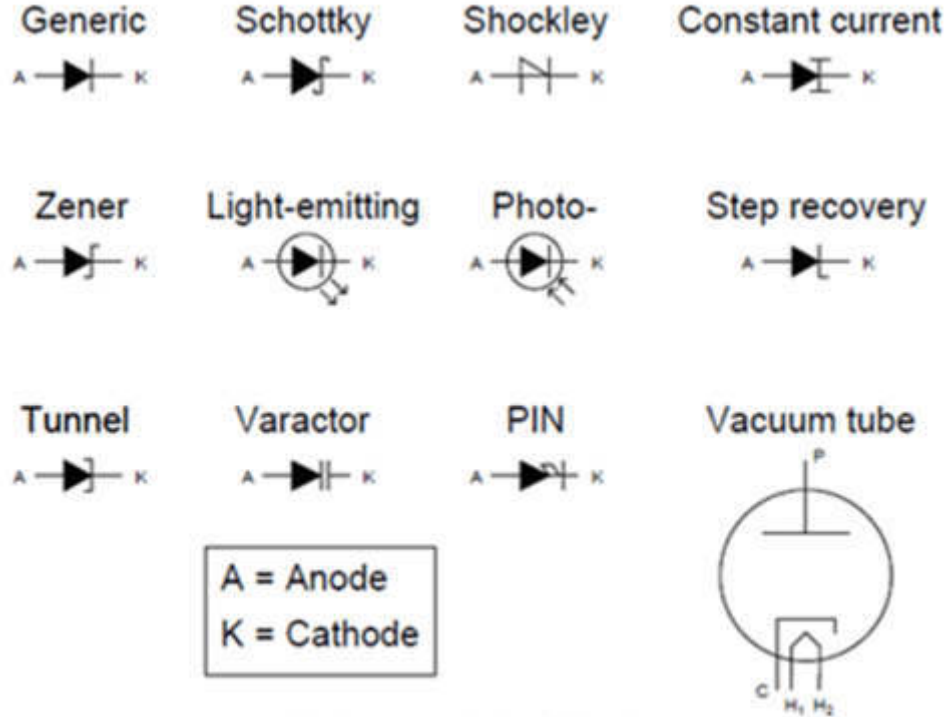


Introdução



Fonte: <https://www.instructables.com/id/Types-of-Diodes/>

Introdução



Various symbols of Diode

Introdução

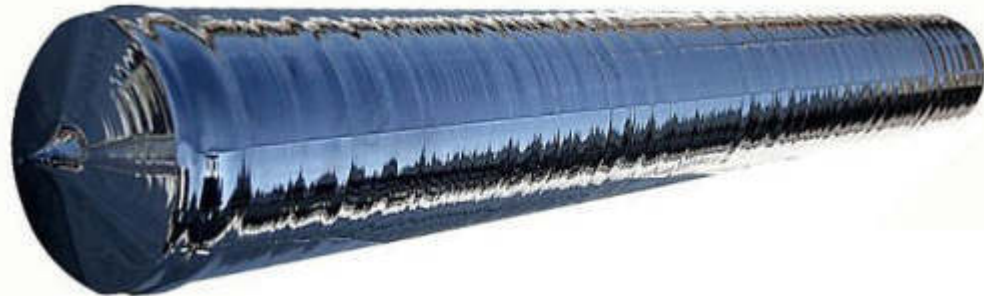
Principais funções:

- Chaves em retificadores
- Roda livre (freewheeling)
- Inversão de carga de capacitores
- Transferência de energia entre componentes
- Isolação de tensão

Conceitos de Materiais Semicondutores

Silício Monocristalino

- Vários metros e diâmetro de 150 mm
- Forno de zona de flutuação
- Silício, Germânio e Arseneto de Gálio são os mais utilizados
- Silício x Germânio – O Si é mais barato e menos sensível a temperatura
- Silício puro é chamado semicondutor intrínseco
- Resistividade e rigidez dielétrica muito elevada – 200kV/cm
- Processo de dopagem: 1 átomo de impureza para 1 milhão de átomos de silício



Conceitos de Materiais Semicondutores

Material tipo n: fósforo, arsênio e antimônio

- Aumenta o número de elétrons livres
- Aumenta a condutividade
- Se for fortemente dopado é conhecido com n+

Material tipo p: boro, gálio e índio

- Introduz lacunas
- Se for fortemente dopado é conhecido com p+

Conceitos de Materiais Semicondutores

Carbeto de Silício

- Banda proibida muito larga
- Os elétrons precisam de 3x mais energia para atingir a banda de condução
- Suportam tensões e temperaturas muito elevadas
- Comparados com Si, SiC podem ter 1/10 da espessura
- Mais rápidos
- Mais eficientes

Conceitos de Materiais Semicondutores

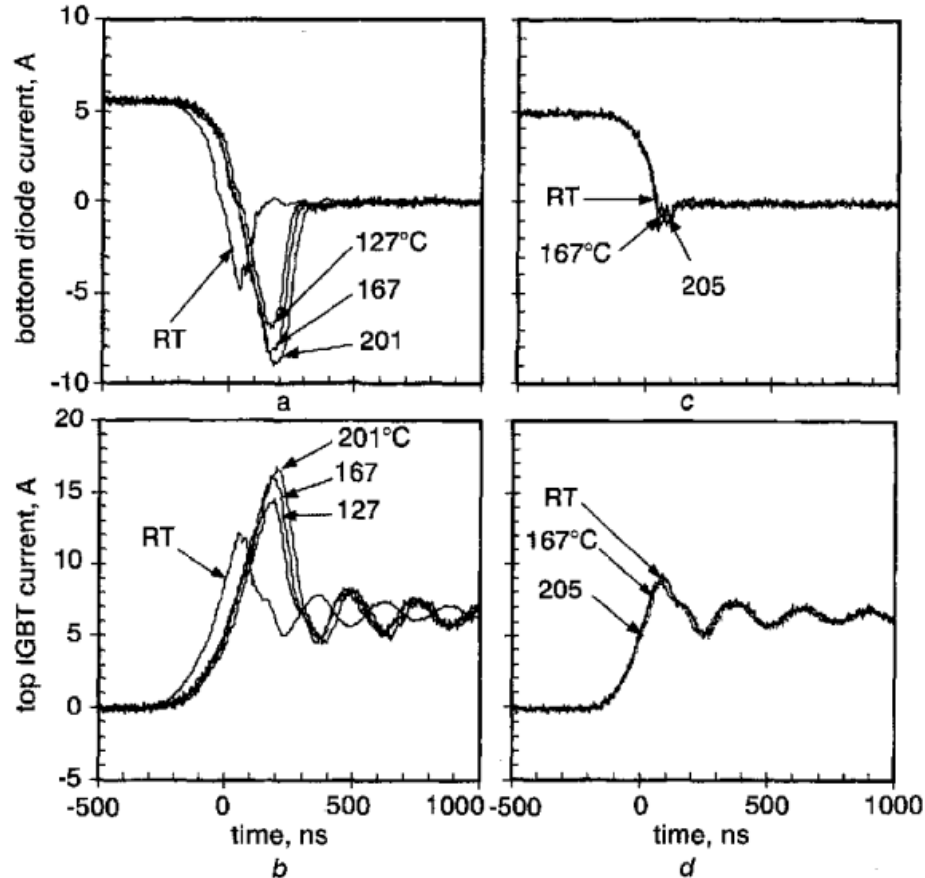


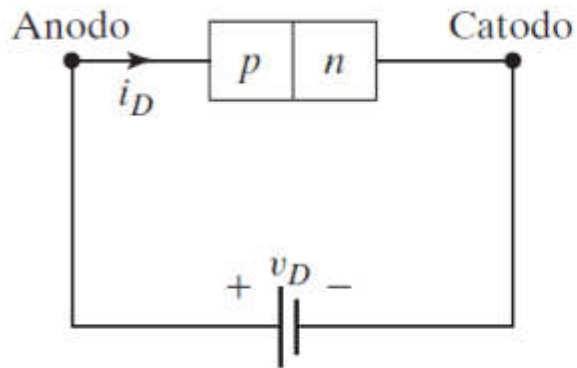
Fig. 3 Comparative current waveforms for lower free-wheeling diode and upper Si IGBT for one of three phases when using either Si diodes or SiC JBS diodes

Square wave frequency is 60 Hz. DC bus voltage is 100 V and dc current is 6.0 A

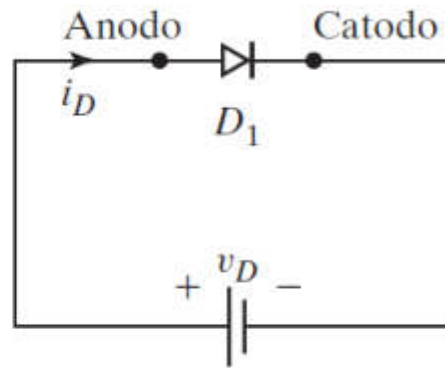
- a With Si diode
- b With Si diode
- c With SiC diode
- d With SiC diode

Diodo

- Um diodo de potência é um dispositivo de junção pn de dois terminais
- A junção pn é normalmente formada por fusão, difusão ou crescimento epitaxial



(a) *Junção pn*



(b) *Símbolo do diodo*

Características do Diodo

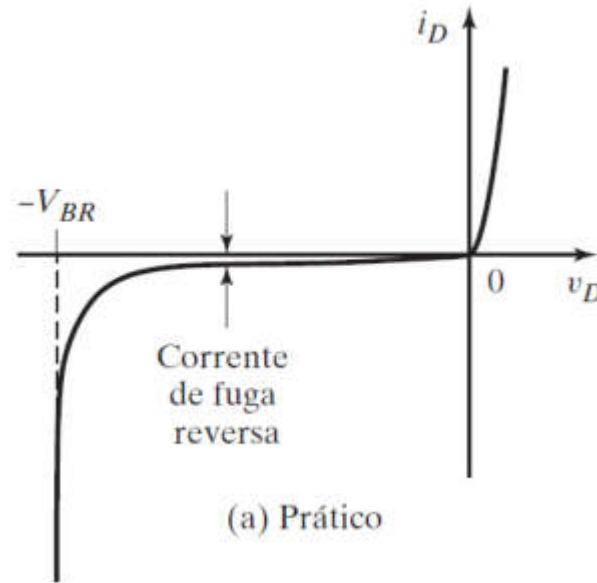
Equação de Shockley:

$$I_D = I_S (e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1)$$

Onde:

- I_D – corrente através do diodo
- I_S – corrente de fuga ou de saturação reversa 10^{-6} a 10^{-15} A
- V_D – tensão no diodo
- n – constante empírica, depende do material. Varia de 1,1 a 1,8 em diodos comerciais
- V_T - tensão térmica

$$V_T = \frac{kT}{q}$$



Características do Diodo

Tensão térmica

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

Onde:

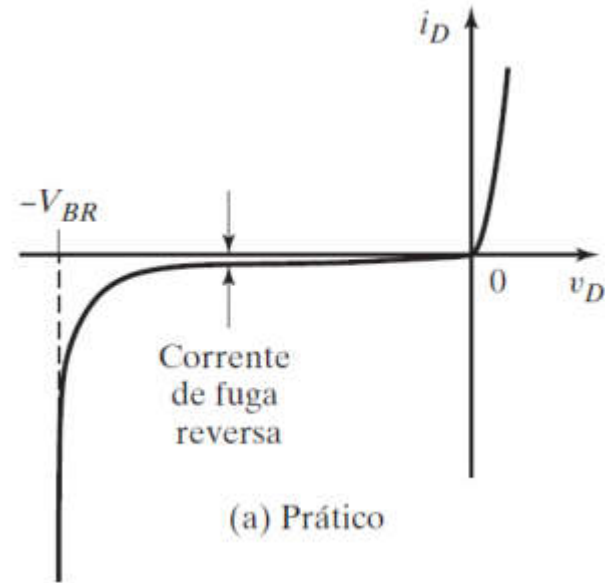
- T – temperatura absoluta em Kelvin

- k – constante de Boltzmann

$$k = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

- q = carga do elétron

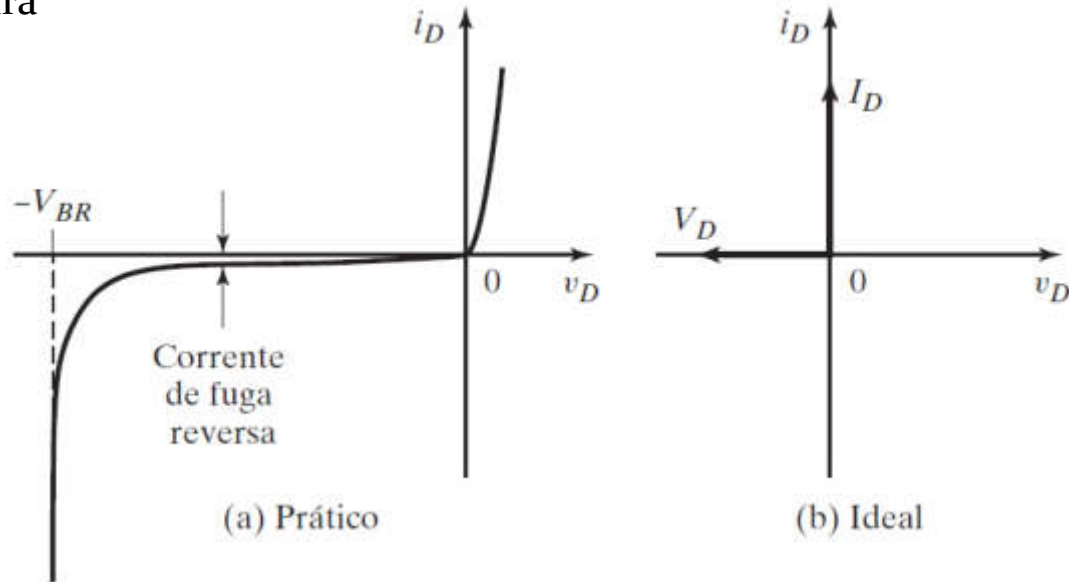
$$q = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$



Características do Diodo

Curva característica v - i de um diodo:

- Queda de tensão durante a polarização direta
- Corrente de fuga durante a polarização reversa
- Tensão de ruptura



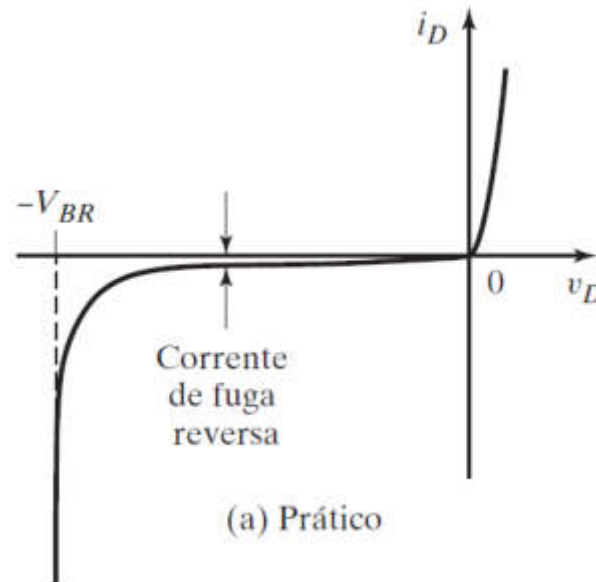
Características do Diodo

Durante a polarização direta:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

Durante a polarização reversa:

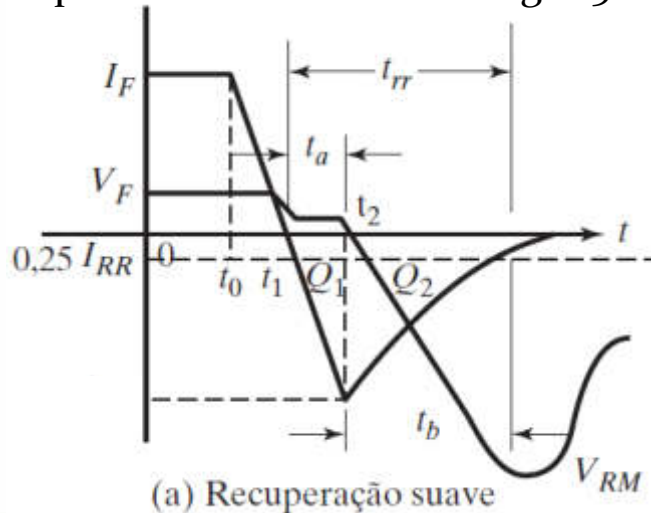
$$I_D = -I_S$$



Recuperação Reversa

Portadores minoritários precisam de um tempo para se recombinar

- Esse tempo é chamado tempo de recuperação reversa
- Processo não linear
- t_{RR} é o tempo em que a corrente passa por zero (condução-bloqueio) e o momento em que a corrente reversa atinge 25% de I_{RR}

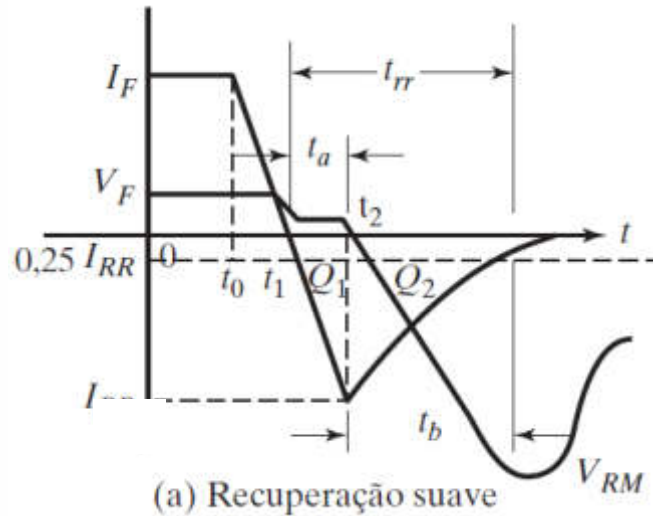


Recuperação Reversa

Para fins práticos, é preciso se preocupar com:

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

- O tempo de recuperação total t_{rr}



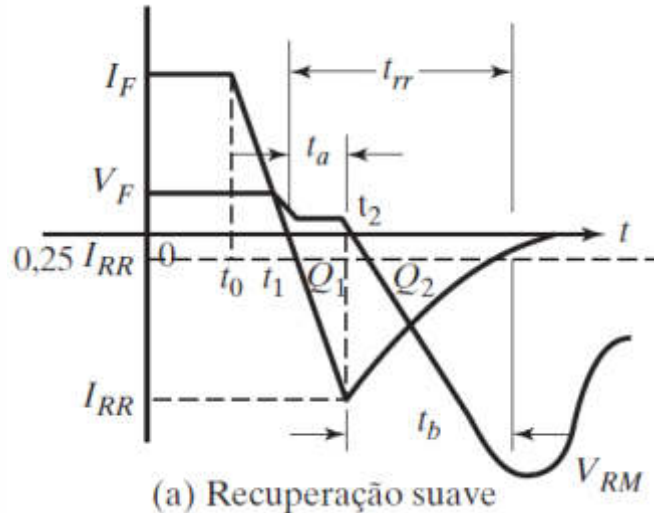
Recuperação Reversa

Para fins práticos, é preciso se preocupar com:

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

- O tempo de recuperação total t_{rr}
- O valor de pico da corrente reversa I_{RR} .

$$I_{RR} = t_a \frac{di}{dt}$$



Recuperação Reversa

Para fins práticos, é preciso se preocupar com:

- O tempo de recuperação total t_{rr}
- O valor de pico da corrente reversa I_{RR} .
- A carga armazenada Q_{RR} , que é a área delimitada pela curva da corrente de recuperação, é aproximadamente

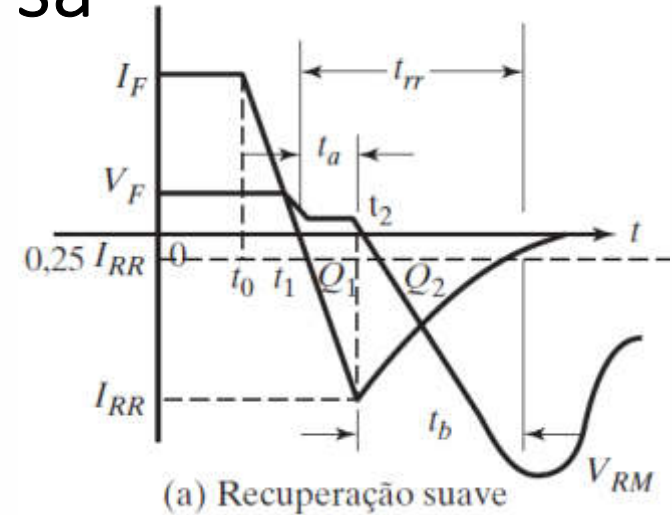
$$t_{rr} = t_a + t_b$$

$$I_{RR} = t_a \frac{di}{dt}$$

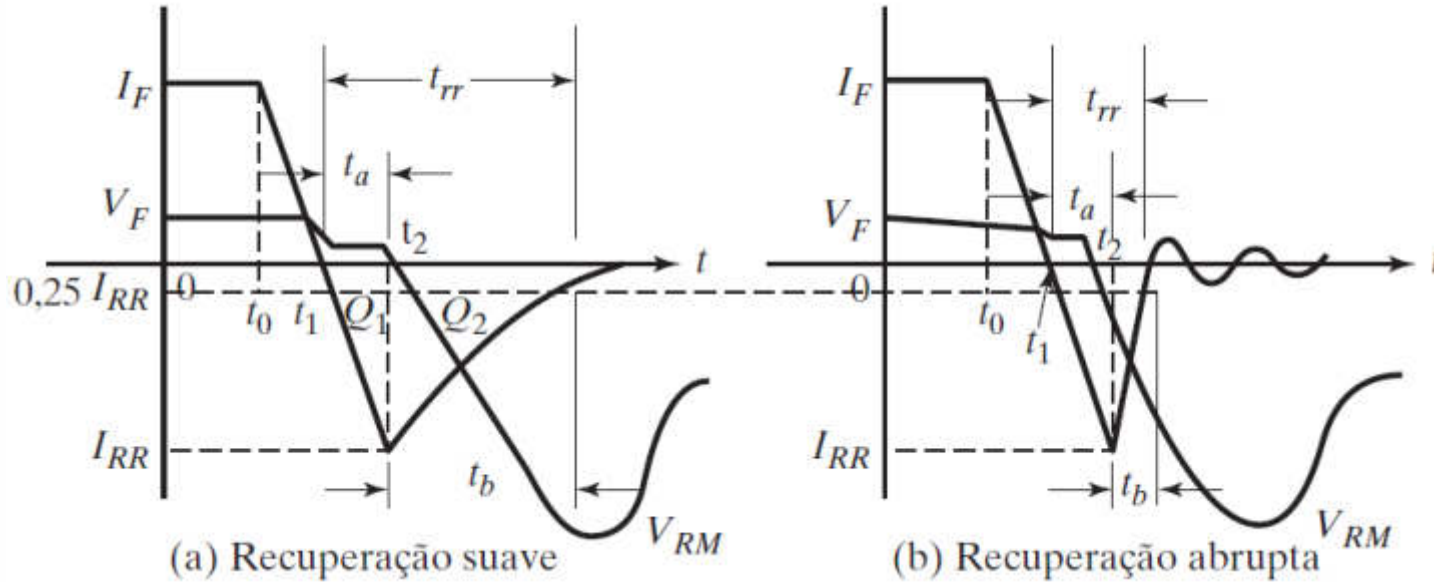
$$I_{RR} \cong \frac{2Q_{RR}}{t_{rr}}$$

- Fator de suavidade

$$FS = \frac{t_b}{t_a}$$



Recuperação Reversa



Tipos de Diodo de Potência

- Os diodos de potência podem ser classificados em três categorias:
 1. Diodos-padrão ou de uso geral.
 2. Diodos de recuperação rápida.
 3. Diodos Schottky.

- Várias configurações de diodos de uso geral:

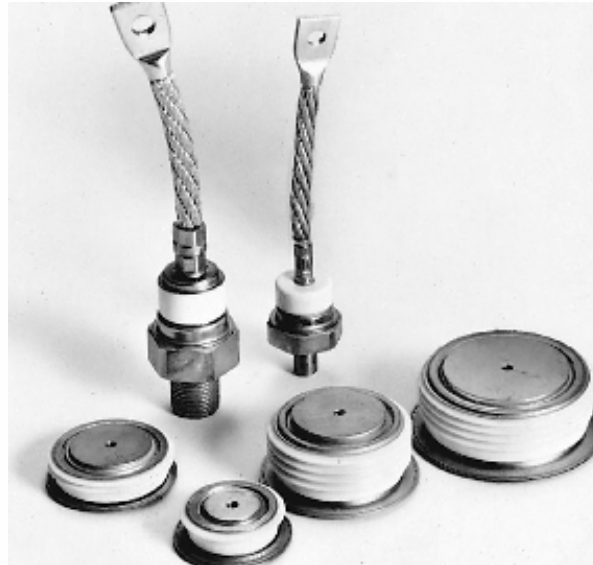


Diodos-padrão ou de uso geral

- Faixa de aplicação até 6.000V – 4500 A
- Tempo de recuperação de 25us
- Em máquinas de solda são diodos de junção fundida, por serem mais baratos e mais robustos

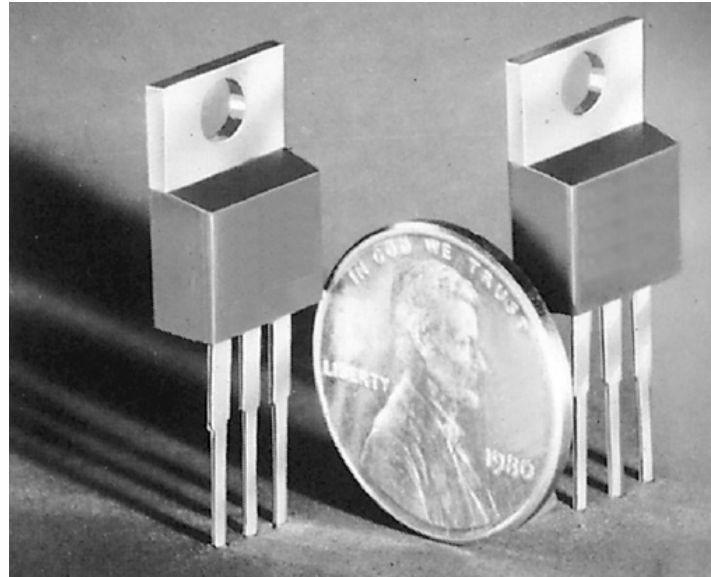
Diodos de recuperação rápida:

- Faixa de aplicação até 6.000V – 1100 A
- Tempo de recuperação de 0,1 a 5 μ s
- Acima de 400V feitos por difusão
- Abaixo de 400V crescimento epitaxial



Tipos de Diodo de Potência

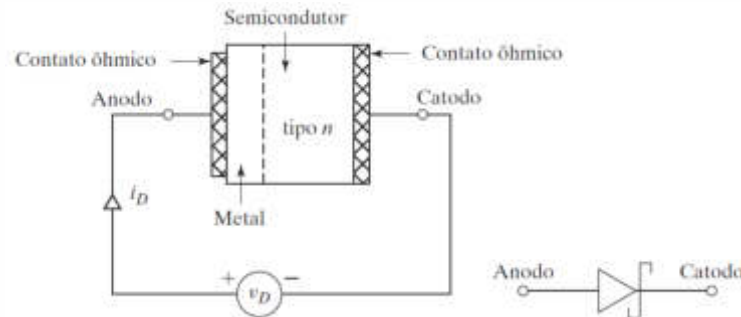
- Faixa de aplicação até 100V – 300 A
 - Queda de tensão de 0,5 a 1,2V
 - Tempo de recuperação de nanosegundos
 - Armazenamento de carga é reduzido através de uma barreira de potencial com um contato entre um metal e um semicondutor
 - Aplicações em fonte de alimentação
 - Baixa tensão de condução
 - Corrente de fuga maior
- Diodos Schottky duais de 20 e 30 A:



Diodos de carbeto de silício

- O carbeto de silício (SiC) é um novo material para a eletrônica de potência.
- Suas propriedades físicas superam as do Si e as do GaAs.
- Por exemplo, os diodos Schottky SiC fabricados pela Infineon Technologies têm perdas de potência ultrabaixas e alta confiabilidade. Eles também têm as seguintes características:
- não possuem tempo de recuperação reversa;
- apresentam chaveamento ultrarrápido;
- a temperatura não influi no chaveamento.

Diodos Schottky de carbeto de silício



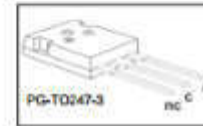
Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon

Fast Switching Emitter Controlled Diode



Features:

- 600V Emitter Controlled technology
- Fast recovery
- Soft switching
- Low reverse recovery charge
- Low forward voltage
- 175°C junction operating temperature
- Easy paralleling
- Pb-free lead plating; RoHS compliant
- Complete product spectrum and PSpice Models:
<http://www.infineon.com>



Applications:

- Welding
- Motor drives

| Type | V_{RRM} | I_F | $V_{F, T_j=25^\circ\text{C}}$ | $T_{j,max}$ | Marking | Package |
|-----------|-----------|-------|-------------------------------|-------------|---------|------------|
| IDW100E60 | 600V | 100A | 1.65V | 175°C | D100E60 | PG-TO247-3 |

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon

| Maximum Ratings | | | |
|--|---------------|--|-------------|
| Parameter | Symbol | Value | Unit |
| Repetitive peak reverse voltage | V_{RRM} | 600 | V |
| Continuous forward current | I_F | $T_C = 25^\circ\text{C}$ | A |
| $T_C = 90^\circ\text{C}$ | | 150 | |
| $T_C = 100^\circ\text{C}$ | | 104 | |
| Surge non repetitive forward current | I_{FSM} | $T_C = 25^\circ\text{C}, t_p = 10 \text{ ms, sine halfwave}$ | A |
| Maximum repetitive forward current | | 400 | |
| $T_C = 25^\circ\text{C}, t_p \text{ limited by } t_{j,max}, D = 0.5$ | I_{FRM} | 300 | A |
| Power dissipation | P_{tot} | $T_C = 25^\circ\text{C}$ | W |
| $T_C = 90^\circ\text{C}$ | | 375 | |
| $T_C = 100^\circ\text{C}$ | | 212 | |
| | | 198 | |
| Operating junction temperature | T_J | -40...+175 | °C |
| Storage temperature | T_{stg} | -55...+150 | |
| Soldering temperature 1.6mm (0.063 in.) from case for 10 s | T_S | 260 | |

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon

Thermal Resistance

| Parameter | Symbol | Conditions | Max. Value | Unit |
|--|------------|------------|------------|------|
| Characteristic | | | | |
| Thermal resistance, junction – case | R_{thJC} | | 0.40 | KW |
| Thermal resistance, junction – ambient | R_{thJA} | | 40 | |

Electrical Characteristic, at $T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

| Parameter | Symbol | Conditions | Value | | | Unit |
|-------------------------------------|-----------|---------------------------|-------|------|------|---------------|
| | | | min. | typ. | max. | |
| Static Characteristic | | | | | | |
| Collector-emitter breakdown voltage | V_{RRM} | $I_R = 0.25\text{mA}$ | 600 | - | - | V |
| Diode forward voltage | V_F | $I_F = 100\text{A}$ | - | 1.65 | 2.0 | |
| | | $T_J = 175^\circ\text{C}$ | - | 1.65 | - | |
| Reverse leakage current | I_R | $V_R = 600\text{V}$ | - | - | 40 | μA |
| | | $T_J = 175^\circ\text{C}$ | - | - | 3300 | |

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon

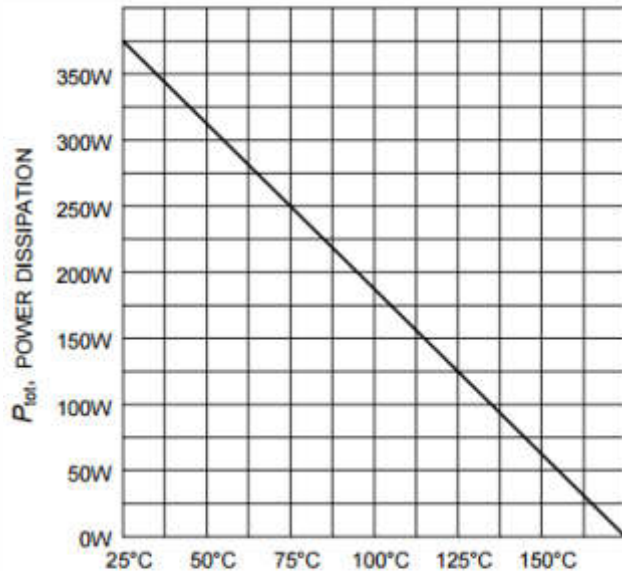
Dynamic Electrical Characteristics

| | | | | | | |
|--|--------------|--|---|------|---|------------------------|
| Diode reverse recovery time | t_{rr} | $T_J=25^{\circ}\text{C}$ $V_R=400\text{V},$ $I_F=100\text{A},$ $di_F/dt=1200\text{A}/\mu\text{s}$ | - | 120 | - | ns |
| Diode reverse recovery charge | Q_{rr} | | - | 3.6 | - | μC |
| Diode peak reverse recovery current | I_{rr} | | - | 49.5 | - | A |
| Diode peak rate of fall of reverse recovery current during t_b | di_{rr}/dt | | - | 750 | - | $\text{A}/\mu\text{s}$ |

| | | | | | | |
|--|--------------|---|---|------|---|------------------------|
| Diode reverse recovery time | t_{rr} | $T_J=125^{\circ}\text{C}$ $V_R=400\text{V},$ $I_F=100\text{A},$ $di_F/dt=1200\text{A}/\mu\text{s}$ | - | 168 | - | ns |
| Diode reverse recovery charge | Q_{rrm} | | - | 5.8 | - | μC |
| Diode peak reverse recovery current | I_{rr} | | - | 61.6 | - | A |
| Diode peak rate of fall of reverse recovery current during t_b | di_{rr}/dt | | - | 705 | - | $\text{A}/\mu\text{s}$ |

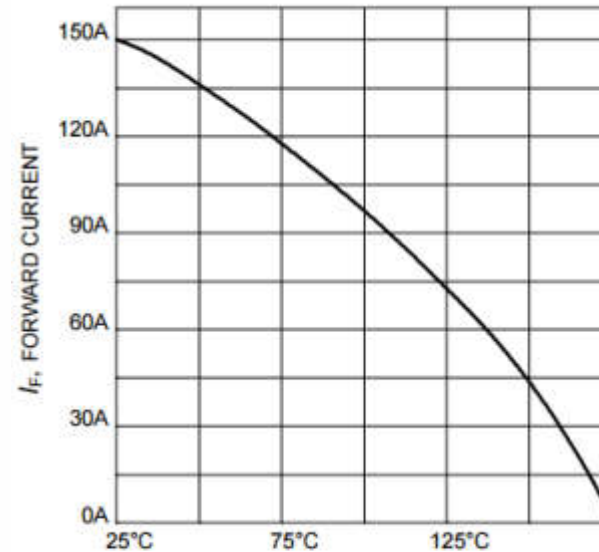
| | | | | | | |
|--|--------------|---|---|------|---|------------------------|
| Diode reverse recovery time | t_{rr} | $T_J=175^{\circ}\text{C}$ $V_R=400\text{V},$ $I_F=100\text{A},$ $di_F/dt=1200\text{A}/\mu\text{s}$ | - | 200 | - | ns |
| Diode reverse recovery charge | Q_{rrm} | | - | 7.8 | - | μC |
| Diode peak reverse recovery current | I_{rr} | | - | 67.0 | - | A |
| Diode peak rate of fall of reverse recovery current during t_b | di_{rr}/dt | | - | 650 | - | $\text{A}/\mu\text{s}$ |

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon



T_C , CASE TEMPERATURE

Figure 1. Power dissipation as a function of case temperature
($T_j \leq 175^\circ\text{C}$)



T_C , CASE TEMPERATURE

Figure 2. Diode forward current as a function of case temperature
($T_j \leq 175^\circ\text{C}$)

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon

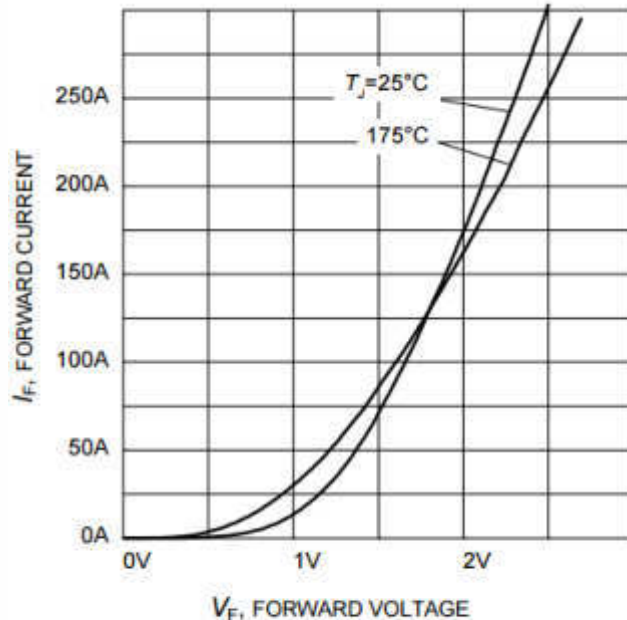


Figure 3. Typical diode forward current as a function of forward voltage

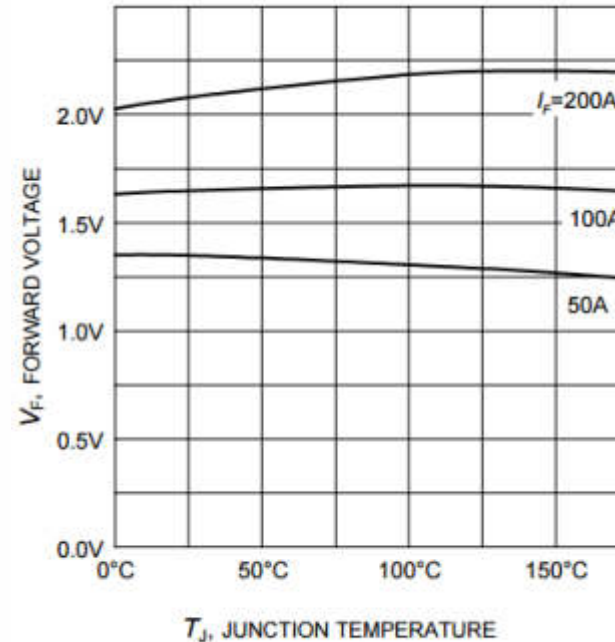


Figure 4. Typical diode forward voltage as a function of junction temperature

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon

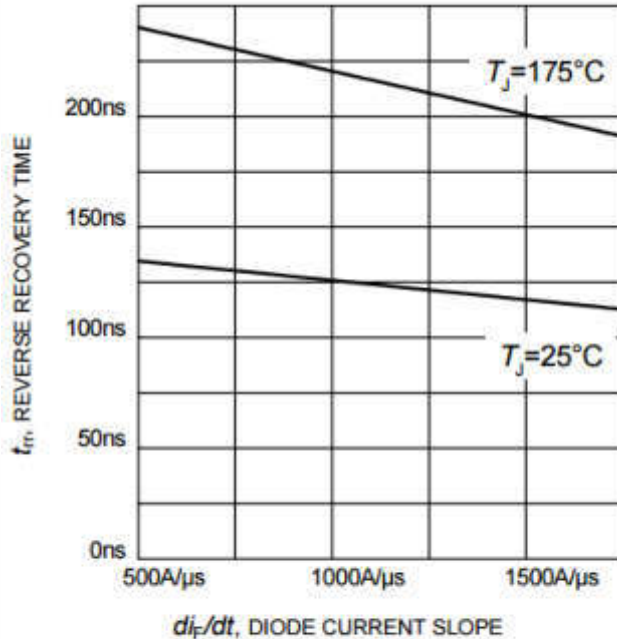


Figure 5. Typical reverse recovery time as a function of diode current slope ($V_R=400V$, $I_F=100A$, Dynamic test circuit in Figure E)

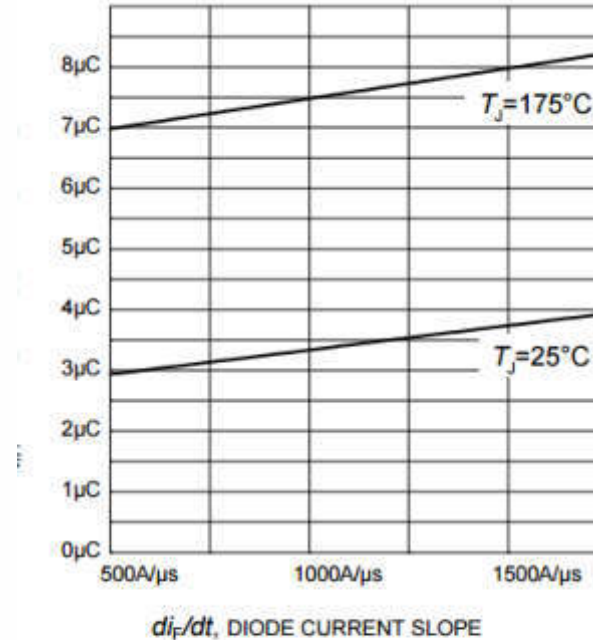
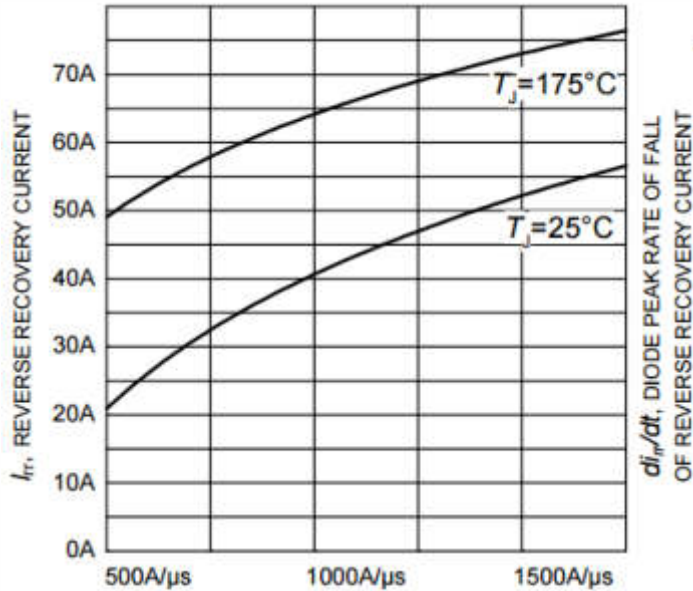


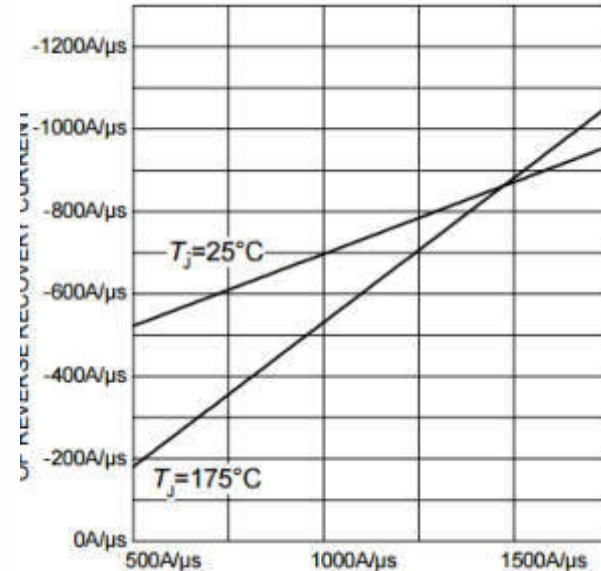
Figure 6. Typical reverse recovery charge as a function of diode current slope ($V_R = 400V$, $I_F = 100A$, Dynamic test circuit in Figure E)

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon



di_F/dt , DIODE CURRENT SLOPE

Figure 7. Typical reverse recovery current as a function of diode current slope
 ($V_R = 400V$, $I_F = 100A$,
 Dynamic test circuit in Figure E)



di_F/dt , DIODE CURRENT SLOPE

Figure 8. Typical diode peak rate of fall of reverse recovery current as a function of diode current slope
 ($V_R = 400V$, $I_F = 100A$,
 Dynamic test circuit in Figure E)

Datasheet - Diodo IDW100E60 da Infineon

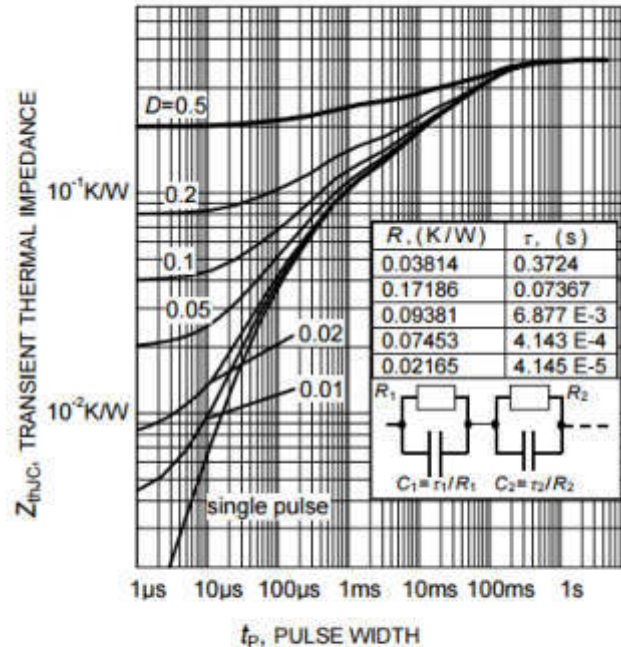


Figure 9. Diode transient thermal impedance as a function of pulse width
 $(D = t_p / T)$



Obrigado!

Heverton Augusto Pereira

Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: heverton.pereira@ufv.br