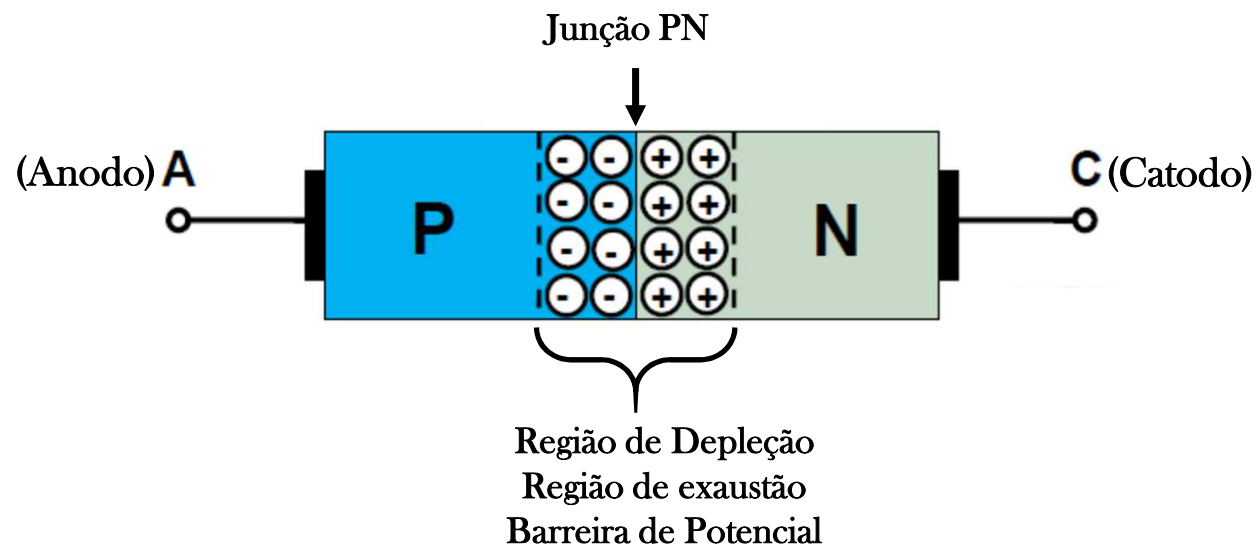


# E204

# DIODOS SEMICONDUCTORES

# PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

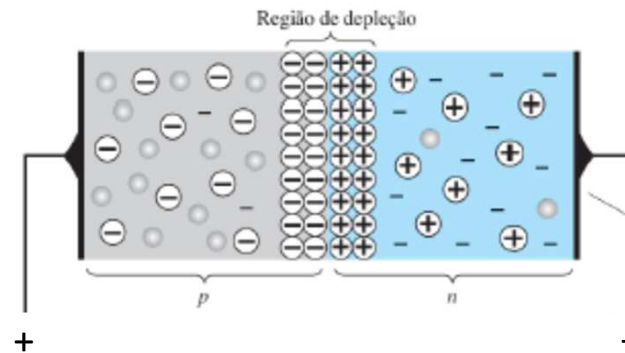
## 2.1. Princípio de Funcionamento



Símbolo

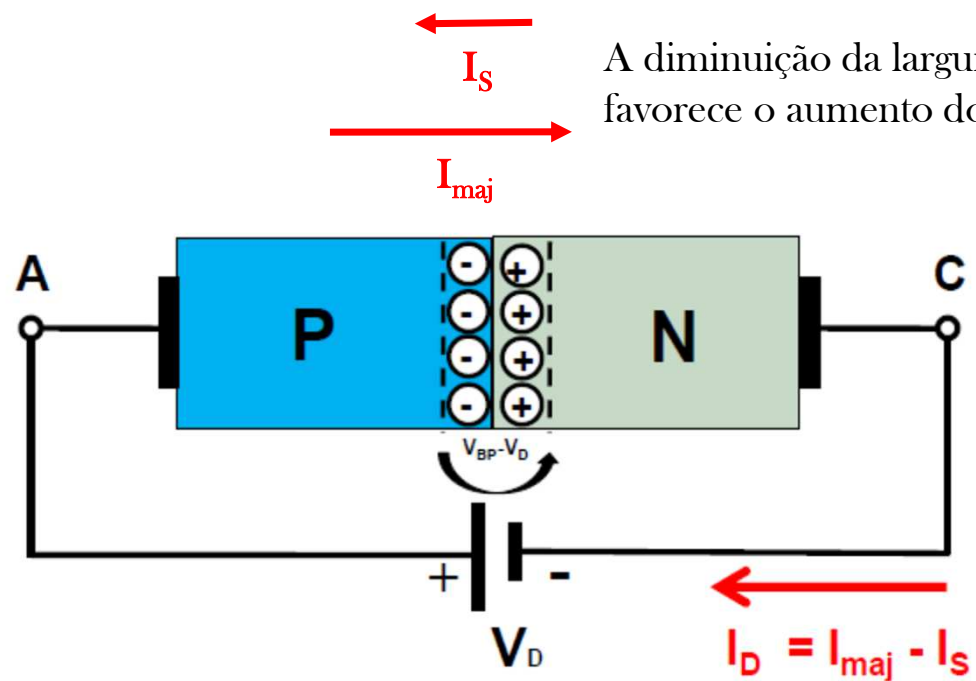


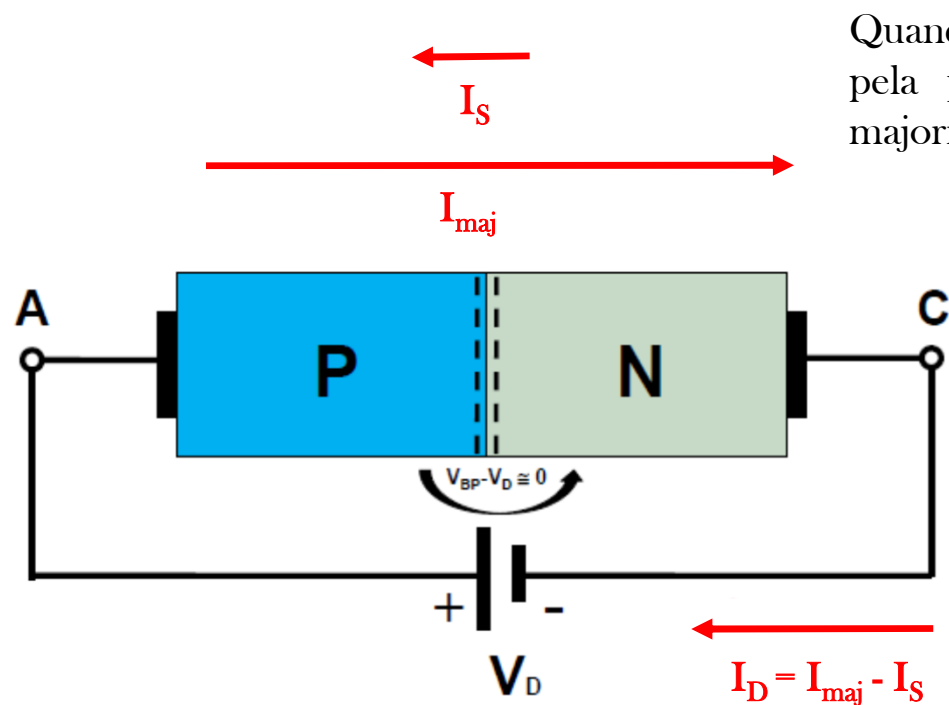
## 2.2. Diodo com Polarização Direta



- O terminal negativo da fonte é conectado ao material *n* e o terminal positivo da fonte ao material *p*.
- A bateria força os elétrons e as lacunas a se mover em direção à junção.
- Quando os elétrons livres se movem para a junção, íons positivos são gerados na extrema direita do cristal.
- Esses íons positivos puxam os elétrons do circuito externo para o cristal.
- Assim, elétrons livres podem sair do terminal negativo da fonte cc e circular para a extrema direita do cristal.

## 2.2. Diodo com Polarização Direta ( $0 < V_D < V_{BP}$ )

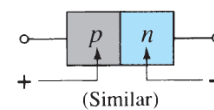
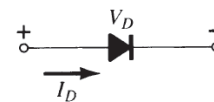
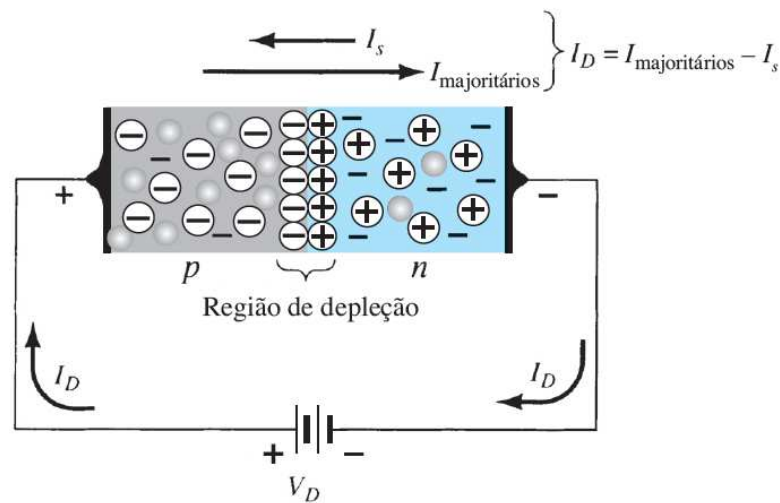


2.2. Diodo com Polarização Direta ( $V_D = V_{BP}$ )

Quando a região de depleção é anulada pela polarização, o fluxo de portadores majoritários aumenta rapidamente.

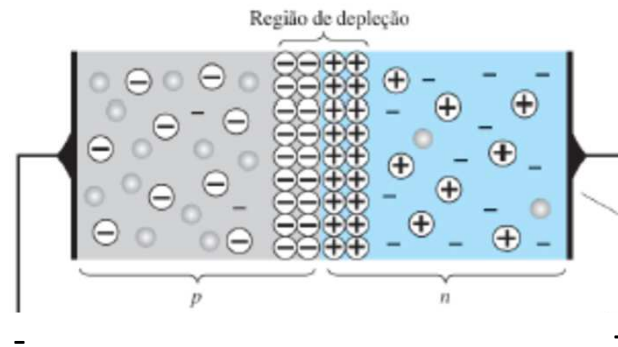
## 2.2. Diodo com Polarização Direta ( $V_D = V_{BP}$ )

- Sob condições de polarização direta, quando a região de depleção é anulada, a corrente resultante ( $I_D = I_{MAJ} - I_S$ ) cresce exponencialmente.
- A corrente de polarização direta está na faixa de miliampères, podendo chegar a ampères.





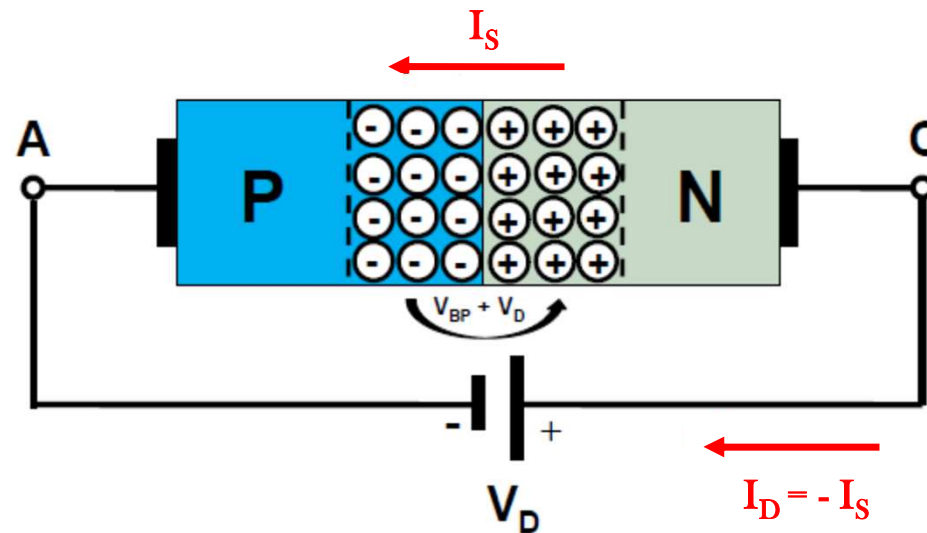
## 2.2. Diodo com Polarização Reversa



- O terminal negativo da fonte é conectado ao material *p* e o terminal positivo da fonte ao material *n*.
- O negativo atrai as lacunas e o terminal positivo atrai os elétrons livres.
- Assim, elétrons livres e lacunas circulam afastando-se da junção. Logo, a camada de depleção fica maior.
- Desse modo, os novos íons gerados aumentam a diferença de potencial. Quanto mais larga a camada de depleção maior a ddp.
- A camada de depleção para de aumentar quando a ddp se iguala a tensão reversa aplicada.

## 2.2. Diodo com Polarização Reversa ( $V_D < 0$ )

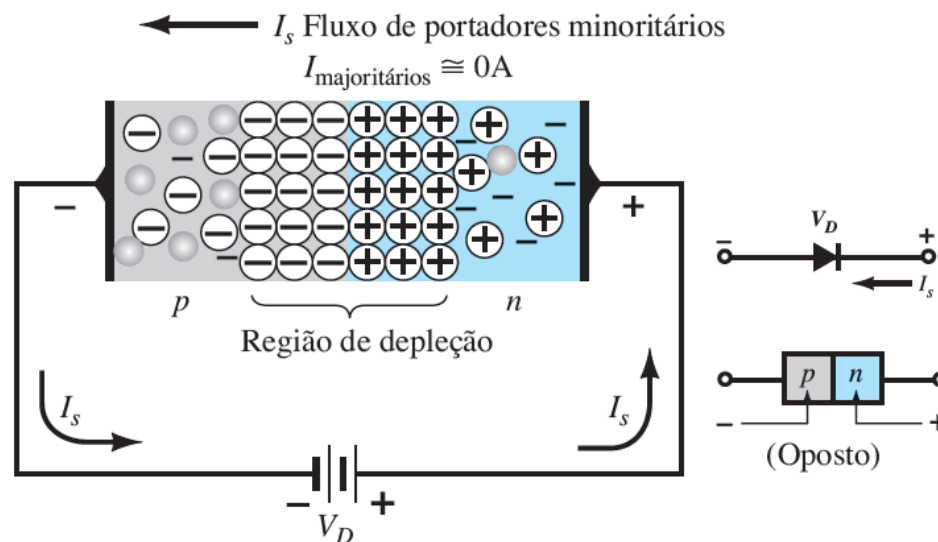
O aumento da barreira de potencial, reduz o fluxo de portadores majoritário a zero.



- $I_S$  dobra de cada  $10^\circ \text{C}$  de aumento na temperatura.
- Isso representa um aumento de 7% na  $I_S$  para cada grau Celsius de aumento.

## 2.2. Diodo com Polarização Reversa ( $V_D < 0$ )

- A corrente resultante, sob condições de polarização reversa, é denominada Corrente de Saturação sendo representada por  $I_s$ .
- A corrente de saturação está na faixa de pico ampères para dispositivos de GaAs, de nano ampères para dispositivos de Si e de alguns microampères para dispositivos de Ge.



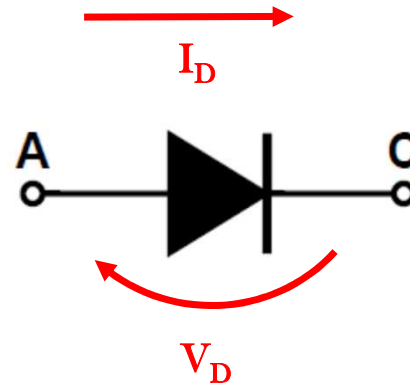
## 2.2. Diodo com Polarização Reversa

Exercícios 2.2.1. Um diodo de silício tem uma corrente de saturação de 5nA a 25° C. Estime o valor da corrente de saturação a 100°C.

### 2.3. Curva Característica

Equação da Curva do Diodo:  $I_D = f(V_D)$

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} - 1 \right) \quad (1)$$



Onde:

- $I_D$  - Corrente pela junção do diodo
- $V_D$  - Tensão sobre a junção do diodo
- $I_S(I_r)$  - Corrente de saturação (corrente reversa)
- $q$  - Carga do elétron =  $1,6 \times 10^{-19}$  (C)
- $k$  - Constante de Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  (J/K)
- $T_k$  - Temperatura em Kelvin (K):  $T_c + 273^\circ\text{C}$

Sendo  $\eta$  um fator de idealidade, que é função das condições de operação e construção física do diodo; tem valor entre 1 e 2, dependendo de uma grande variedade de fatores. Adota-se  $\eta = 1$  para o Ge e para o Si após o limiar de disparo e  $\eta = 2$  para o Si até o limiar de disparo.

## 2.3. Curva Característica

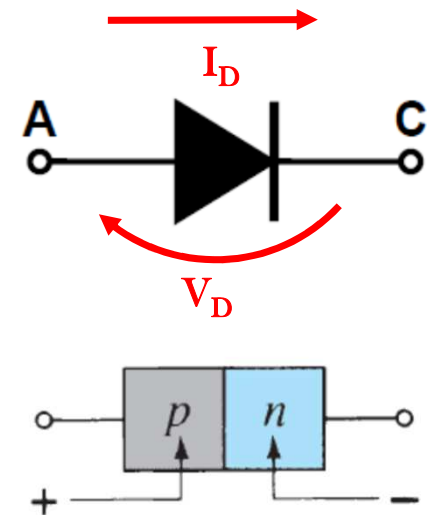
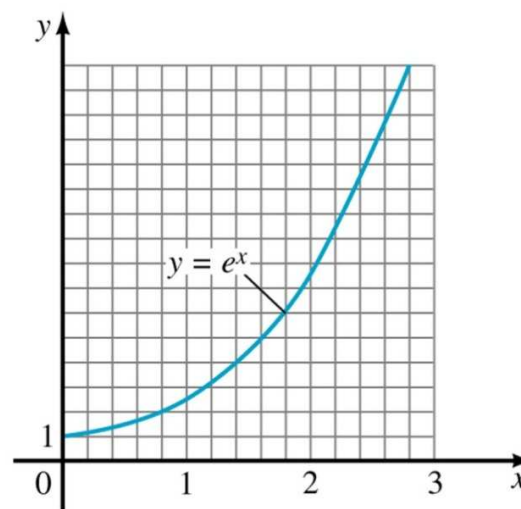
Equação da Curva do Diodo:  $I_D = f(V_D)$

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} - 1 \right) \quad (1)$$

$$V_D = 0 \rightarrow I_D = 0$$

$$V_D > 0 \rightarrow I_D \approx I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} \right)$$

$$V_D < 0 \rightarrow I_D = -I_S$$



## 2.3. Curva Característica

Equação da Curva do Diodo:  $I_D = f(V_D)$

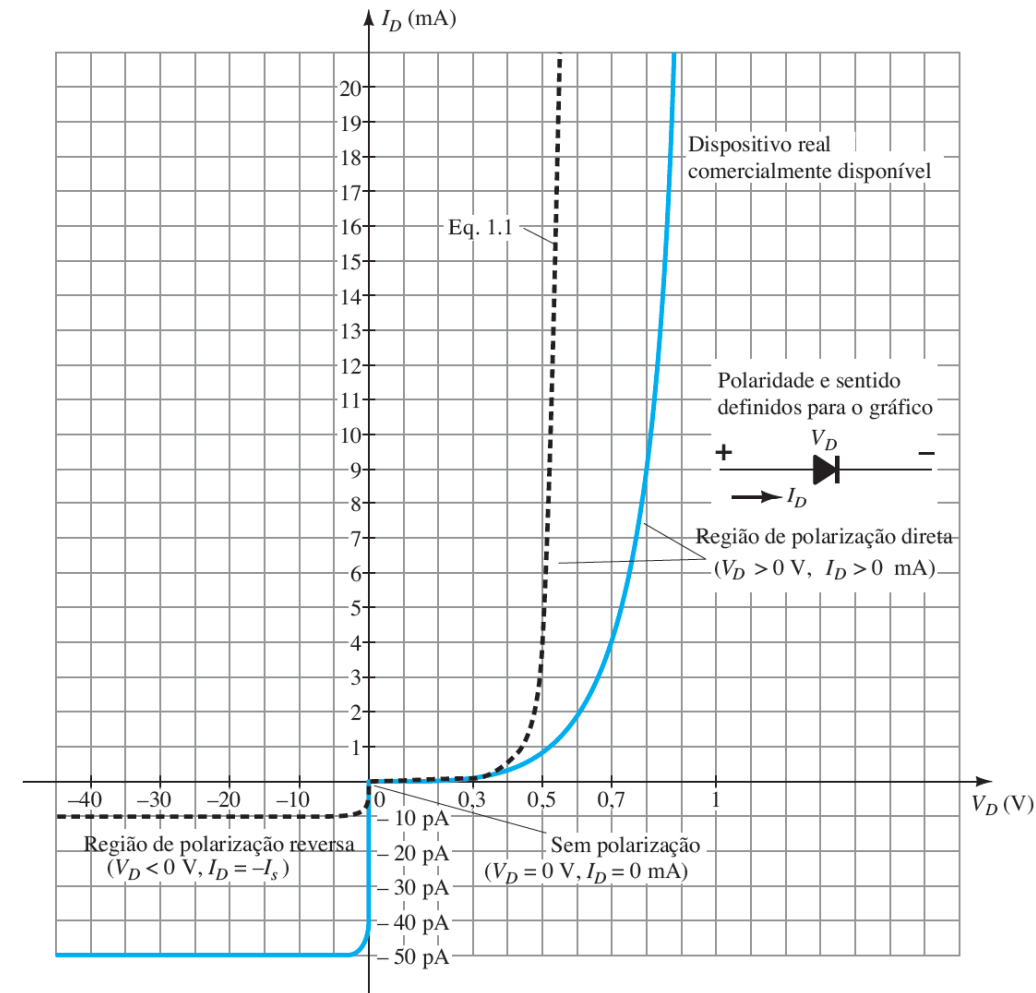
Até o limiar de disparo:  $I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$

A partir do limiar de disparo:  $I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$

Tensão equivalente térmica:  $V_T = \frac{k T_k}{q}$

Para  $T = 300K$ ,  $V_T = 25,88[mV] \approx 26[mV]$

Lei de Ohm:  $V = I R \therefore I = \frac{V}{R} \therefore I = \frac{V(\uparrow)}{R(\uparrow)}$



## 2.3. Curva Característica

### Limiar de Disparo e Região de Ruptura

- **Limiar de Disparo**
  - O potencial aplicado a junção a partir do qual ocorre o aumento exponencial da corrente é denominado de Potencial de Offset ou limiar de Disparo (*Threshold Voltage*).
  - O limiar de disparo é também conhecido por Tensão de Joelho (*Knee Voltage*).
- **Limiar de Ruptura**
  - Ocorre quando, sob condições de polarização reversa, há um aumento no número de portadores minoritários gerados a partir do aumento da tensão reversa.
  - Os mecanismos que provocam a ruptura são Efeito Zener e o Efeito Avalanche.
  - A tensão de polarização reversa que resulta na ruptura é denominada de Tensão Zener ( $V_Z$ ) ou *Breakdown Voltage* ( $V_{BV}$ ).

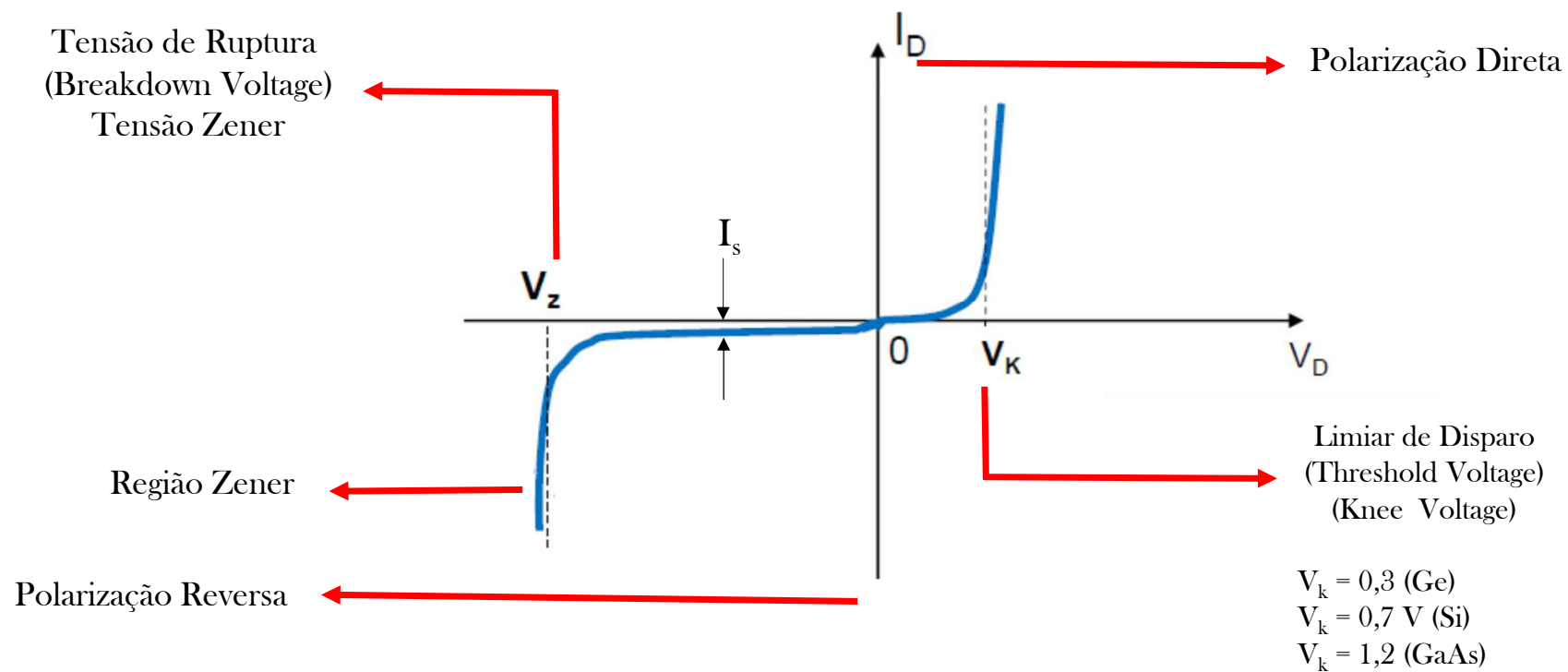


### 2.3. Curva Característica

- Efeito Zener X Efeito Avalanche
- Efeito Zener
  - Ocorre quando o campo elétrico na camada de depleção é suficiente para quebrar ligações covalentes, gerando novos pares elétron-lacunas.
  - Para  $V_{BV} < 5V$ , a ruptura se dá por efeito Zener.
- Efeito Avalanche
  - Ocorre quando os portadores minoritários ganham energia cinética suficiente e se tornaram capazes de quebrar ligações covalentes nos átomos com os quais colidem. O resultado é um processo de ionização, onde o elétron da camada de valência absorve energia suficiente para deixar o átomo de origem estabelecendo uma alta corrente chamada de Avalanche.
  - Para  $V_{BV} > 7V$ , a ruptura se dá por efeito Avalanche.
  - Os mecanismos que provocam a ruptura são Efeito Zener e o Efeito Avalanche.
  - Respeitando o limite de dissipação de potência, a ruptura da junção PN não é um processo destrutivo.

## 2.3. Curva Característica

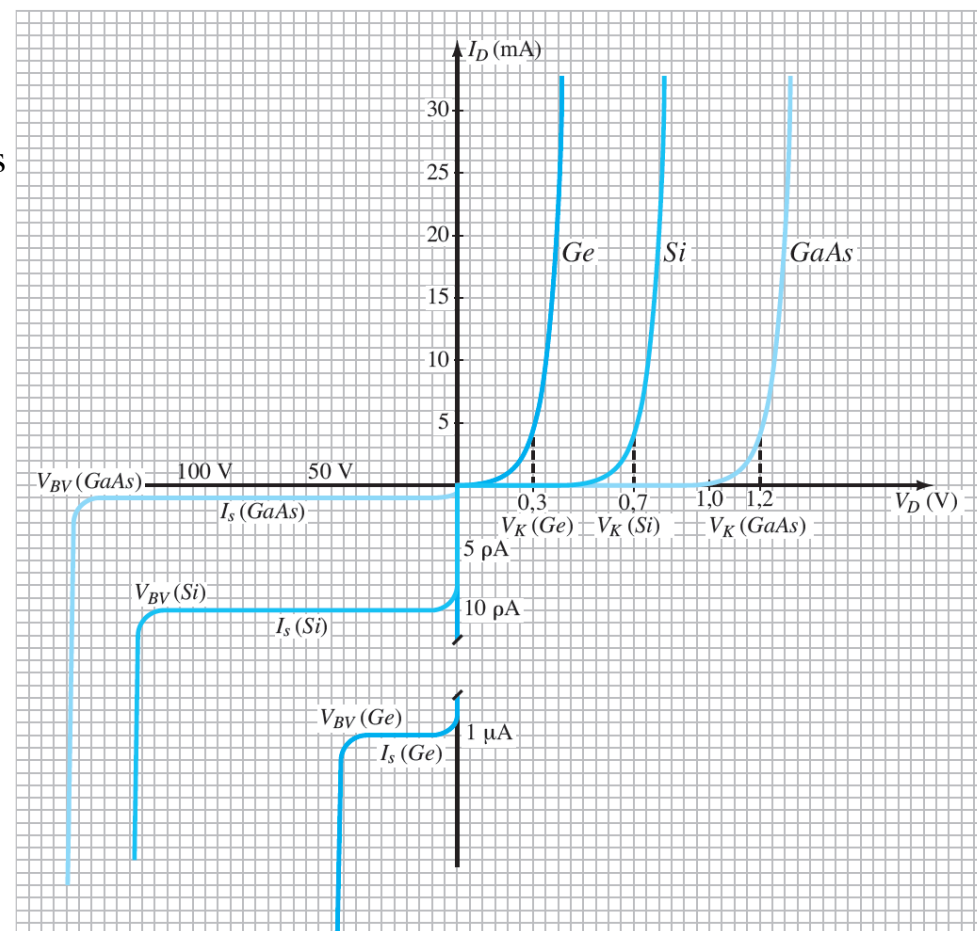
- Polarização Direta e Reversa



## 2.3. Curva Característica

## Arseneto de Gálio x Silício x Germânio

- O potencial máximo de polarização reversa que pode ser aplicado antes que o diodo entre na região Zener é chamado de tensão de pico reversa PIV (*Peak Inverse Voltage*) ou PRV (*Peak Reverse Voltage*).
- Diodos de Si tem PIV em correntes e temperaturas maiores do que o diodos de Ge.
- Si - Temperatura de 200° C
- Ge - Temperatura de 100° C
- Desvantagem do Si é que possui maior  $V_k$  com relação ao Ge.
- Isso ocorre devido ao maior valor de  $\eta$  na Equação (1).



### 2.3. Curva Característica

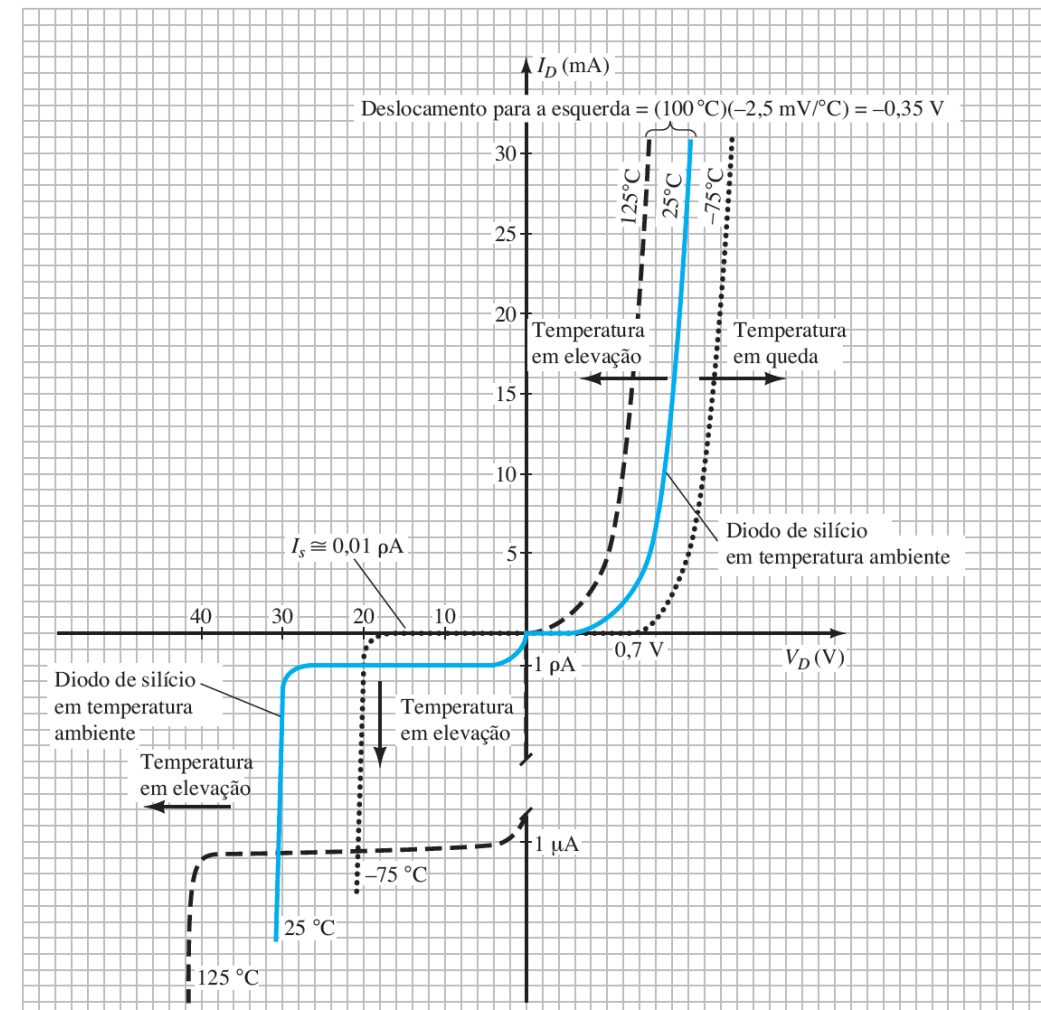
#### Efeito da Temperatura

- Para o Si,  $I_S$  terá sua amplitude dobrada para cada  $10^\circ\text{C}$  de aumento de temperatura.

$$I_S (25^\circ\text{C}) = 10 \text{ pA} : I_S (125^\circ\text{C}) = 10 \text{ nA}$$

- A curva característica do Si se desloca à esquerda a uma taxa de aproximadamente  $2,5 \text{ mV}$  por  $^\circ\text{C}$  de aumento da temperatura, logo a tensão de limiar diminui com o aumento da temperatura.

$$V_k (25^\circ\text{C}) = 0,7 \text{ V} : V_k (125^\circ\text{C}) = 0,45 \text{ V}$$

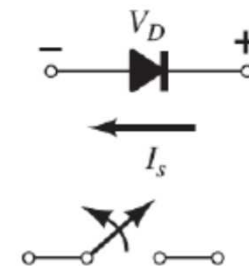
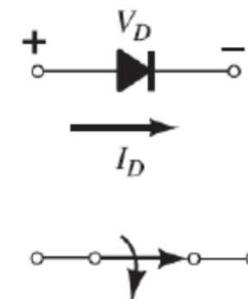
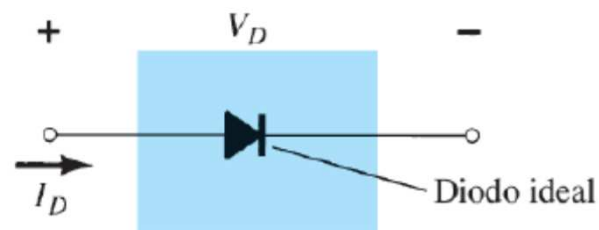
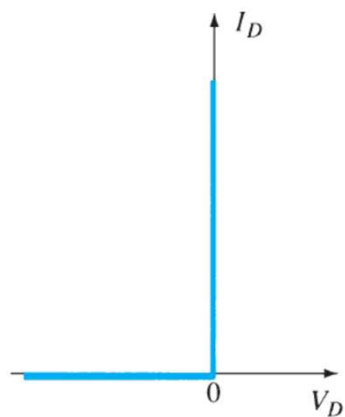


## 2.4. Modelagem do Diodo

### Circuito Equivalente

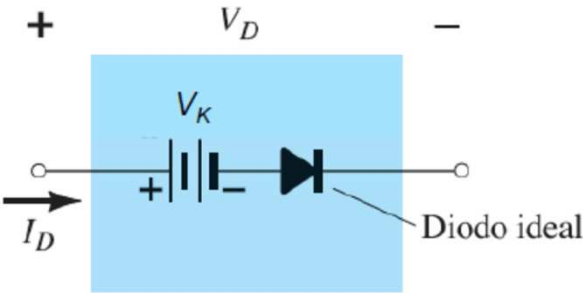
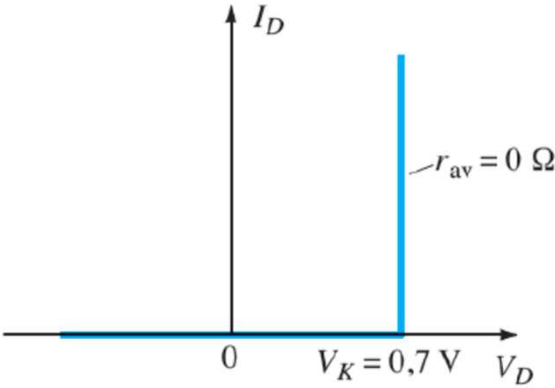
- O circuito equivalente é uma combinação de elementos corretamente selecionados para melhor representar as características reais de um dispositivo, de um sistema ou de uma região específica de operação.
- Ou seja, uma vez definido o circuito equivalente, o símbolo do dispositivo pode ser removido e esse circuito equivalente pode ser inserido em seu lugar sem afetar o comportamento do sistema.

### Modelo Ideal



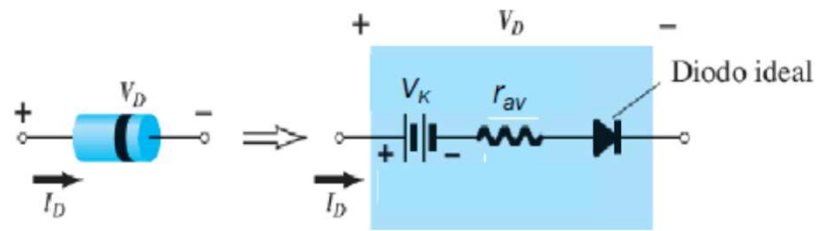
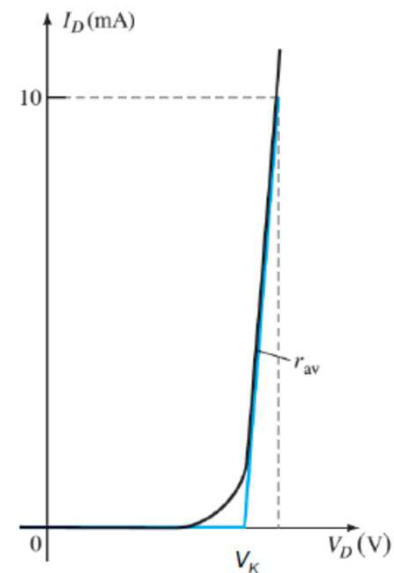
# 2.4. Modelagem do Diodo

## Modelo Simplificado



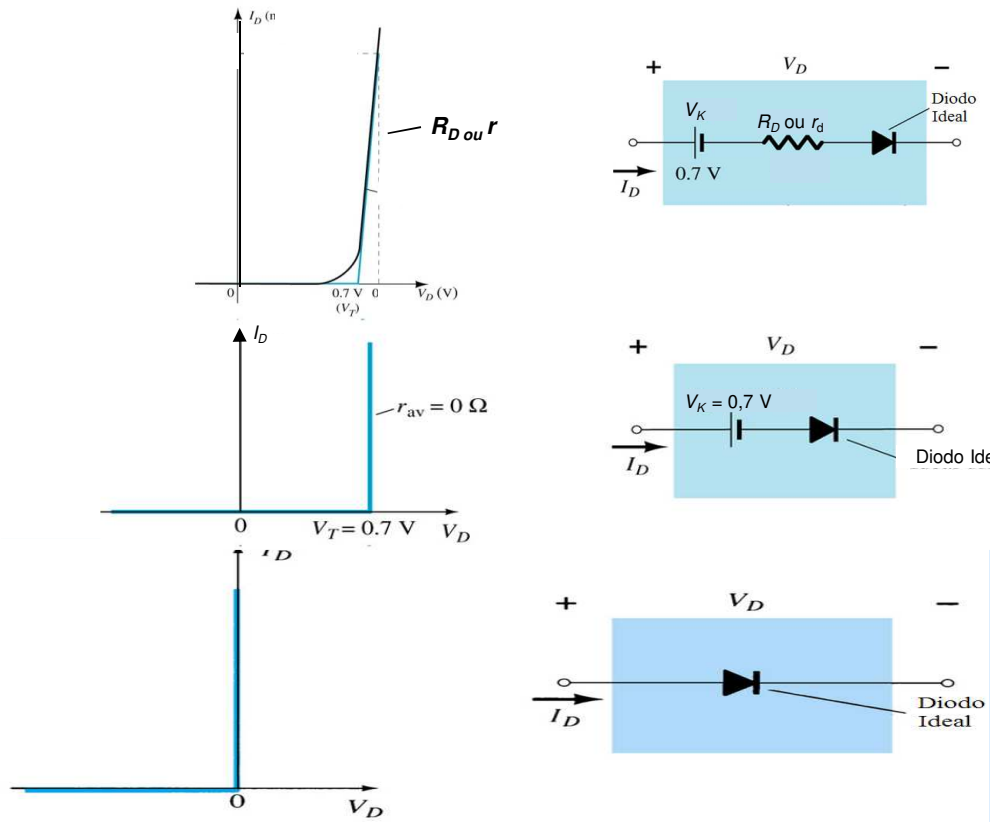
# 2.4. Modelagem do Diodo

## Modelo Linear por Partes



### 2.4. Modelagem do Diodo

#### Modelos Aproximados para Diodo Semicondutor (Si) (Resumo)



Modelo: Linear por Partes

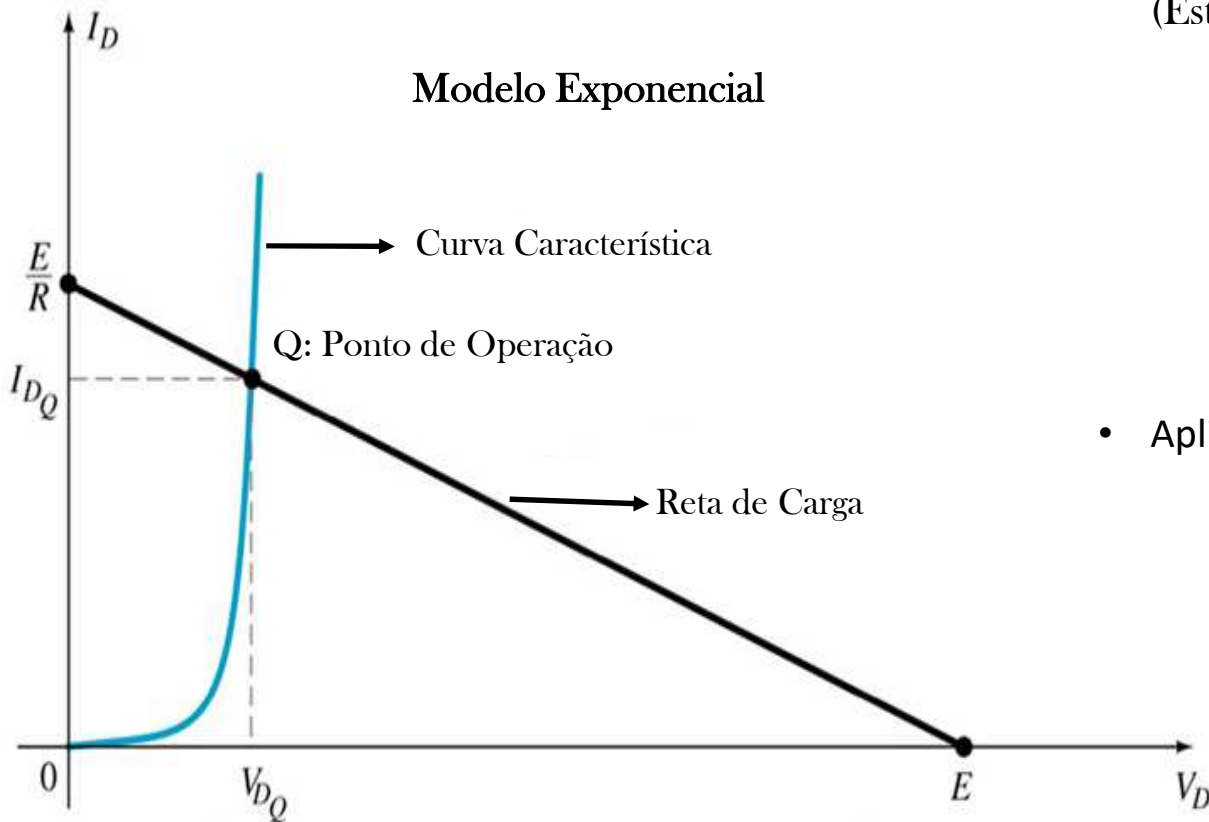
Modelo: Simplificado  
 $R_{\text{Circuito}} \gg r_{av}$

Diodo Ideal  
 $R_{\text{Circuito}} \gg r_{av}$   
 $E_{\text{Circuito}} \gg V_K$

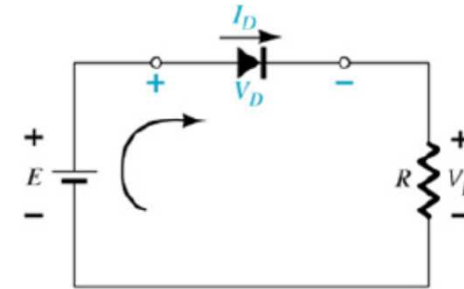


## 2.5. Ponto Quiescente

## Reta de Carga e Ponto de Operação



- A interseção da reta de carga com a curva característica determinará o ponto de operação do sistema (Q), Quiescente (Estacionário ou invariável). Análise da reta de carga.



- Aplicando a lei de Kirchhoff para tensão:

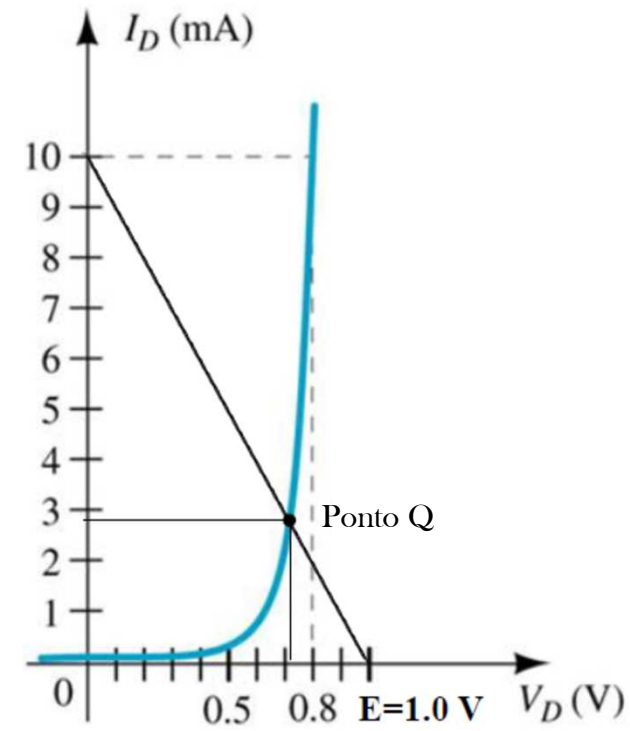
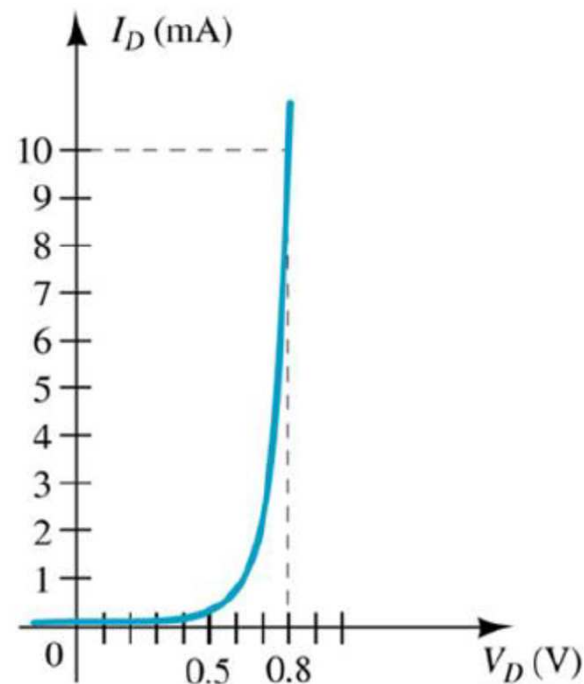
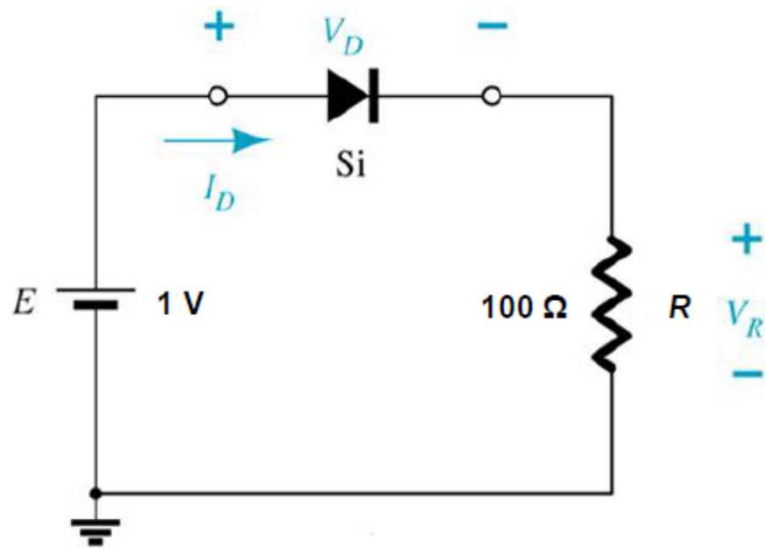
$$(1) \quad E - V_D - V_R = 0 \therefore E = V_D + V_R \therefore E = V_D + I_D R$$

$$(2) \quad E = V_D + I_D R \left\{ \begin{array}{l} V_D = 0 \rightarrow I_D = \frac{E}{R} \\ I_D = 0 \rightarrow V_D = E \end{array} \right.$$

### 2.5. Ponto Quiescente

Exemplo 2.5.1. Para o circuito da figura, empregando a curva característica do diodo, determine:

- a)  $V_{DQ}$  e  $I_{DQ}$
- b)  $V_R$



$$I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0} = \frac{1\text{ V}}{100\Omega} = 10\text{ mA}$$

$$V_D = E \Big|_{I_D=0} = 1\text{ V}$$

$$V_{D_Q} \approx 0,72\text{ V}$$

$$I_{D_Q} \approx 2,8\text{ mA}$$

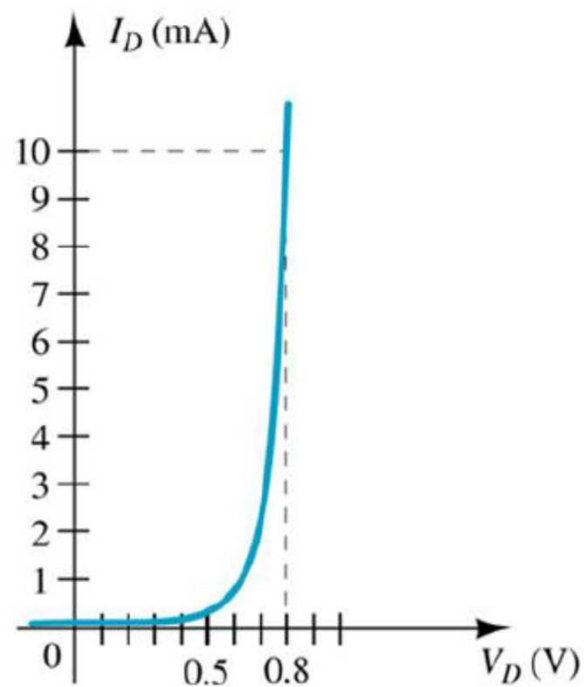
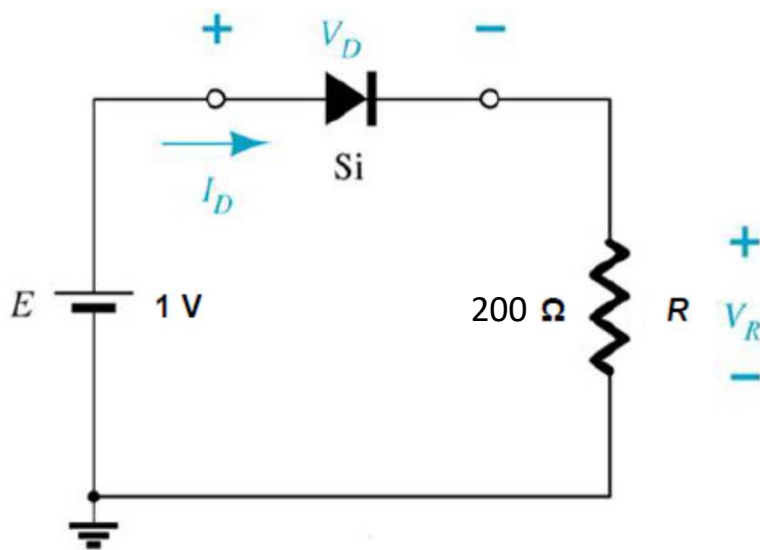
$$V_R = I_R R = I_{D_Q} R = (2,8\text{ mA})(100\Omega) = 0,28\text{ V}$$

$$V_R = E - V_D = 1\text{ V} - 0,7\text{ V} = 0,30\text{ V}$$

## 2.5. Ponto Quiescente

Exemplo 2.5.2. Para o circuito da figura do exemplo 2.1, com  $R = 200\ \Omega$  empregando a curva característica do diodo, determine:

- a)  $V_{DQ}$  e  $I_{DQ}$
- b)  $V_R$

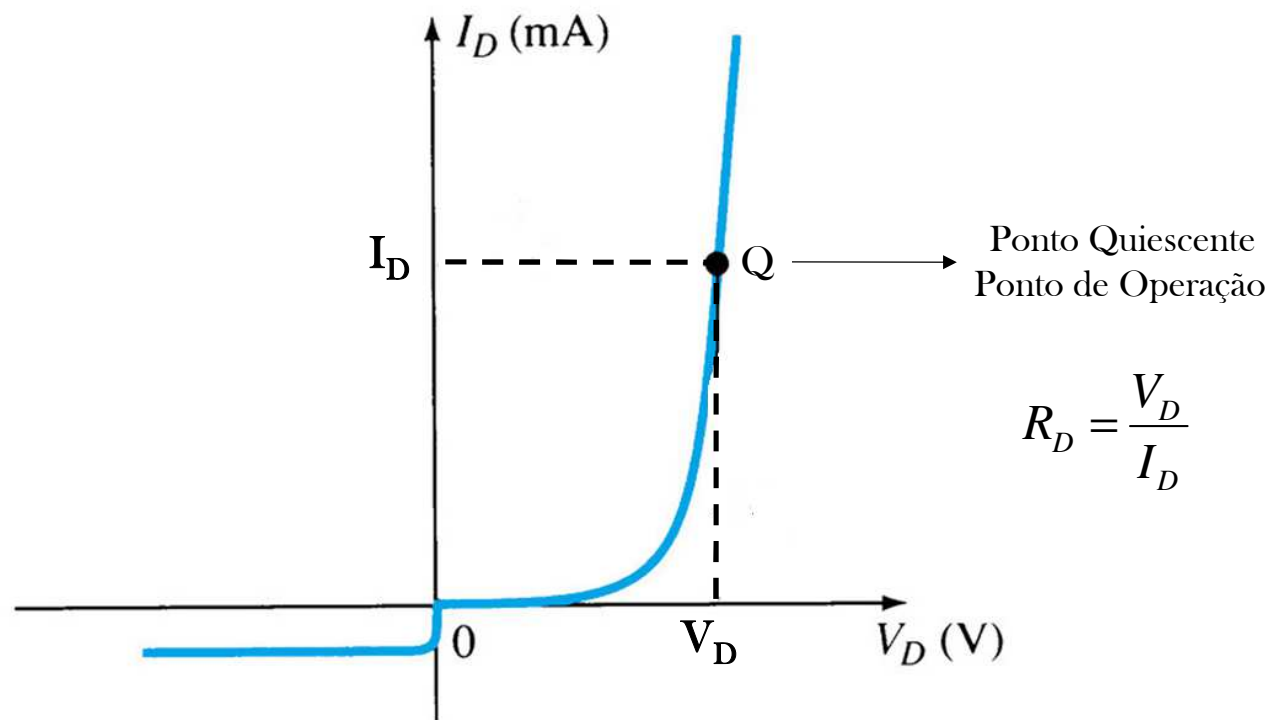
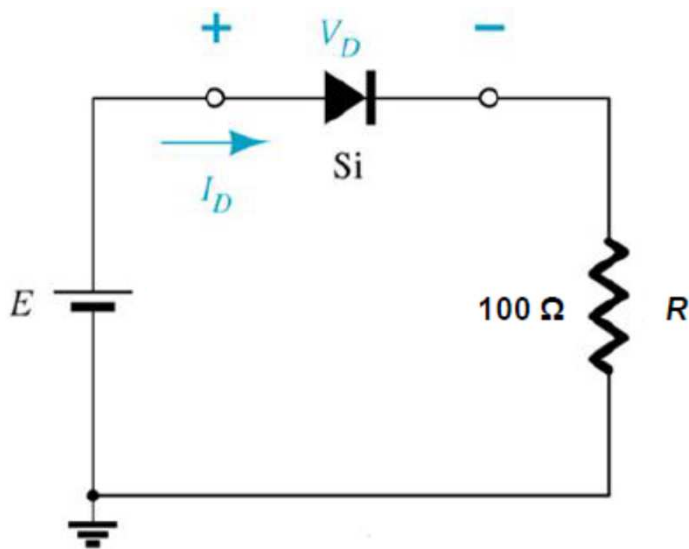


## 2.5. Ponto Quiescente

Considerações finais:

- A diferença de valores deve-se a precisão que o gráfico pode ser lido.
- Os resultados obtidos em ambos os métodos deveriam ser, em tese, os mesmos.
- A Reta de Carga: Determinado pelo circuito equivalente.
- Curva Característica: Determinada pelo dispositivo.

## 2.6. Resistência do Diodo

Resistência Estática ou DC:  $R_D$ 

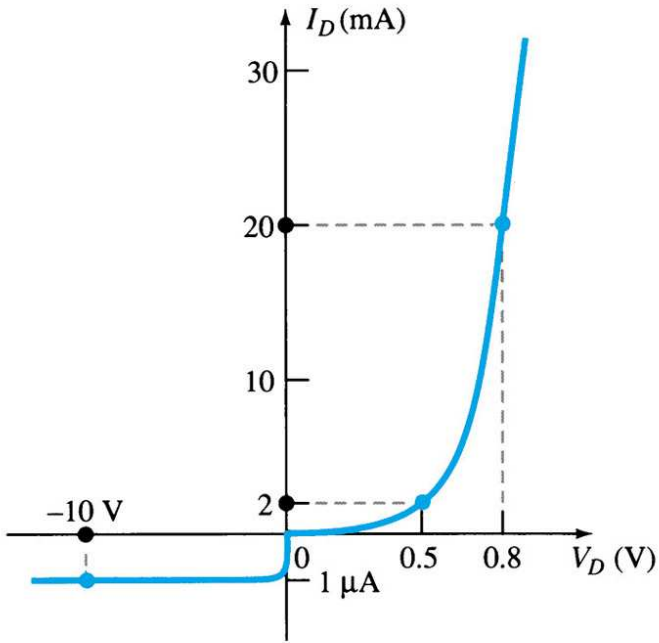
### 2.6. Resistência do Diodo

Exemplo 2.6.1. Para um diodo cuja curva caraterística é mostrada abaixo determine os valores de resistência estática para:

a)  $I_D = 2mA$

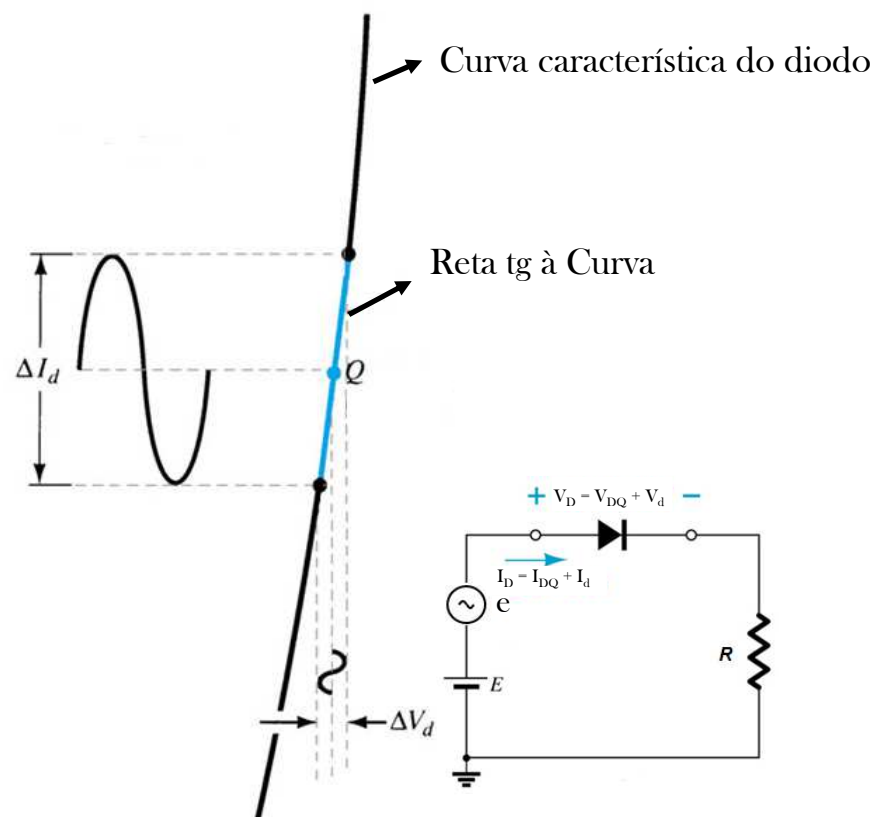
b)  $I_D = 20mA$

c)  $V_D = -10V$



Respostas	
$R_D [\Omega]$	250
$R_D [\Omega]$	40
$R_D [M\Omega]$	10

## 2.6. Resistência do Diodo

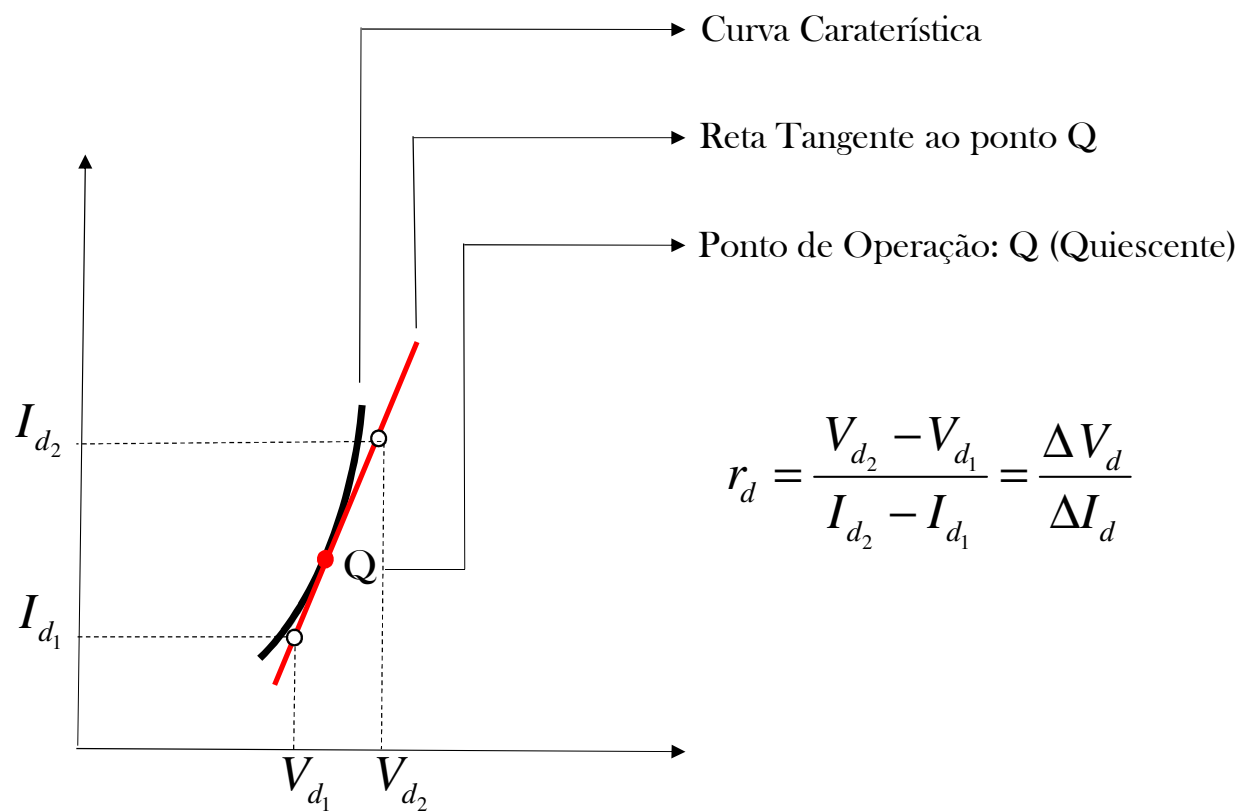
Resistência Dinâmica ou AC:  $r_d$ 

- Para DC, a  $R_D$  do diodo independe da forma da curva característica na região ao redor do ponto de interesse. Mas para o caso AC isso muda totalmente.
- Ao ser submetido a uma corrente alternada, superposta a uma corrente contínua, o diodo apresenta um valor de resistência que depende da variação da tensão e da corrente em torno do ponto de operação. Esta resistência é denominada de Resistência Dinâmica sendo dada por

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}$$

- $\Delta$  significa uma variação finita no parâmetro.
- Em geral, quanto mais baixo o ponto Q de operação (menor a corrente e mais baixa a voltagem), mais alta a resistência de AC.

## 2.6. Resistência do Diodo

Resistência Dinâmica ou AC:  $r_d$ 

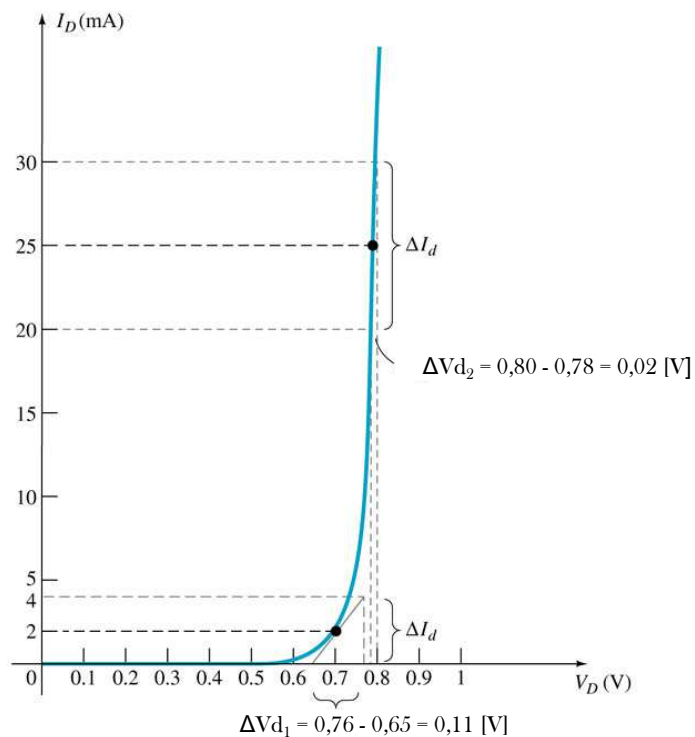


## 2.6. Resistência do Diodo

Exemplo 2.6.2. Para um diodo cuja curva característica é mostrada abaixo determine os valores de resistência dinâmica para:

a)  $I_D = 2\text{mA}$

b)  $I_D = 25\text{mA}$

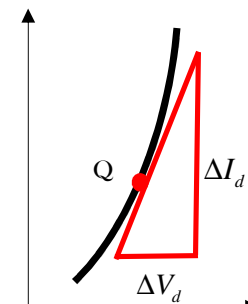


## 2.6. Resistência do Diodo

Resistência Dinâmica ou AC:  $r_d$ 

- Definição de Cálculo: A derivada de uma função em um ponto é igual a inclinação da reta tangente traçada nesse ponto.
- Tendo em vista que  $\Delta V_D$  é muito pequeno, o que dificulta a sua determinação gráfica, a resistência dinâmica pode ser determinada matematicamente através da derivação da equação  $I_D$  e a inversão dos termos de derivação conforme:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} - 1 \right) \quad r_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

$$\frac{1}{r_d} = \lim_{\Delta V_D \rightarrow 0} \frac{\Delta I_D}{\Delta V_D} = \lim_{\Delta V_D \rightarrow 0} \frac{I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} - 1 \right)}{\Delta V_D} = \frac{d}{dV_D} [I_D] = \frac{d}{dV_D} \left[ I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} - 1 \right) \right] \Rightarrow \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{q}{kT_k \eta} \left( I_S e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} \right)$$


The graph shows the diode current  $I_D$  versus voltage  $V_D$ . A black curve represents the characteristic. A red tangent line is drawn at point Q on the curve. The slope of this tangent is indicated by a red triangle with horizontal side  $\Delta V_d$  and vertical side  $\Delta I_d$ .

- Temos que  $I_D = I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} - 1 \right)$ , porém em geral  $I_D \gg I_S$ , na região de inclinação vertical da curva característica, logo:

$$\frac{1}{r_d} \approx \frac{q I_D}{k T_k \eta} \therefore r_d \approx \frac{k T_k \eta}{q I_D}$$

## 2.6. Resistência do Diodo

### Resistência Dinâmica ou AC: $r_d$

- No modo de operação ( $I_D = I_{DQ}$ ) e a temperatura ambiente ( $T_k = 300K$ ), substituindo os valores de  $q$  ( $1,6 \times 10^{-19}$  C) e  $k$  ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K) na expressão

$$r_d \approx \frac{k T_k \eta}{q I_D}$$

encontra-se para o Si e Ge e com  $\eta = 1$  a seguinte resistência dinâmica (Na parte mais vertical da curva característica)

$$r_d \approx \left. \frac{26(mV)}{I_{DQ}(mA)} \right|_{\eta=1}$$

encontra-se também para o Si e Ge e com  $\eta = 2$  a seguinte resistência dinâmica (No joelho da curva característica)

$$r_d \approx \left. \frac{52(mV)}{I_{DQ}(mA)} \right|_{\eta=2}$$

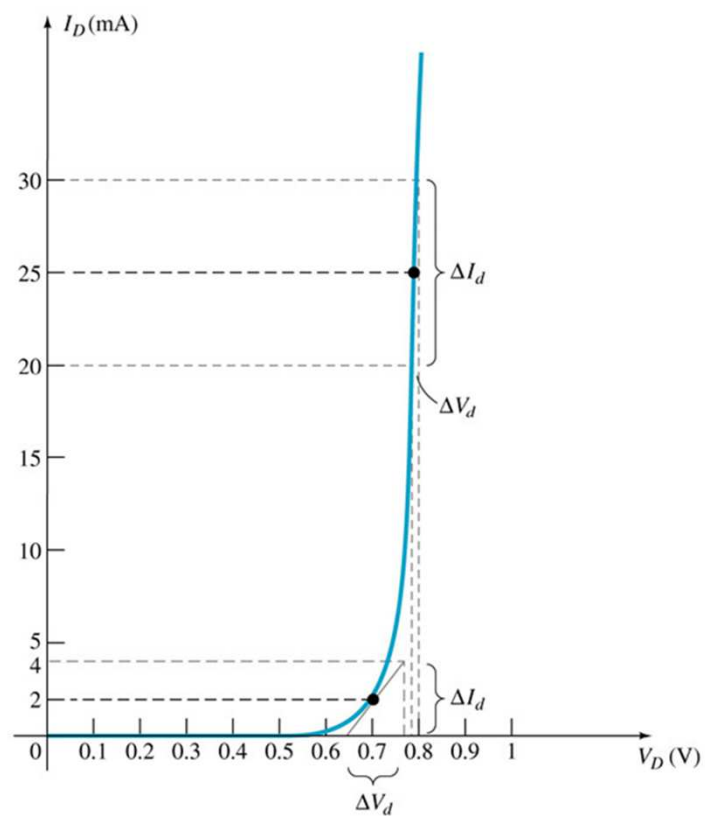
Essas equações implica que a resistência dinâmica pode ser calculada simplesmente substituindo o valor quiescente da corrente de diodo na equação. Não foi levada em consideração a resistência do corpo e do contato que tem valores  $r_b = 0,1$  até 2 Ohms.

## 2.6. Resistência do Diodo

Exemplo 2.6.3. Repita o exemplo 2.6.2, a partir da equação da curva característica:

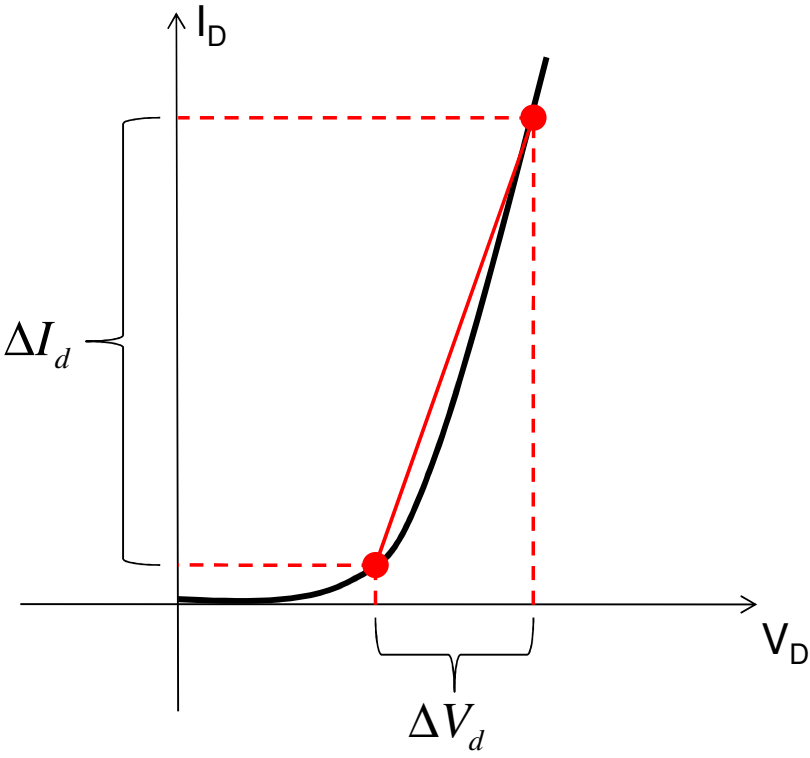
a)  $I_D = 2\text{mA}$

b)  $I_D = 25\text{mA}$

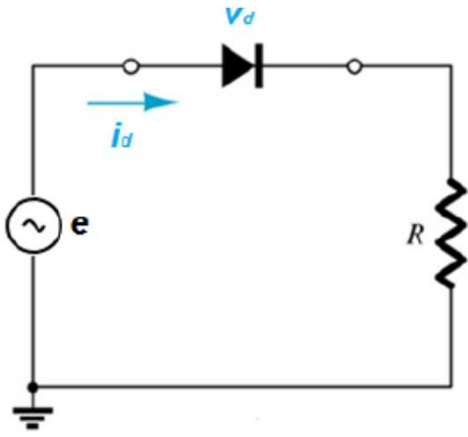


# 2.6. Resistência do Diodo

Resistência AC Média:  $r_{AV}$

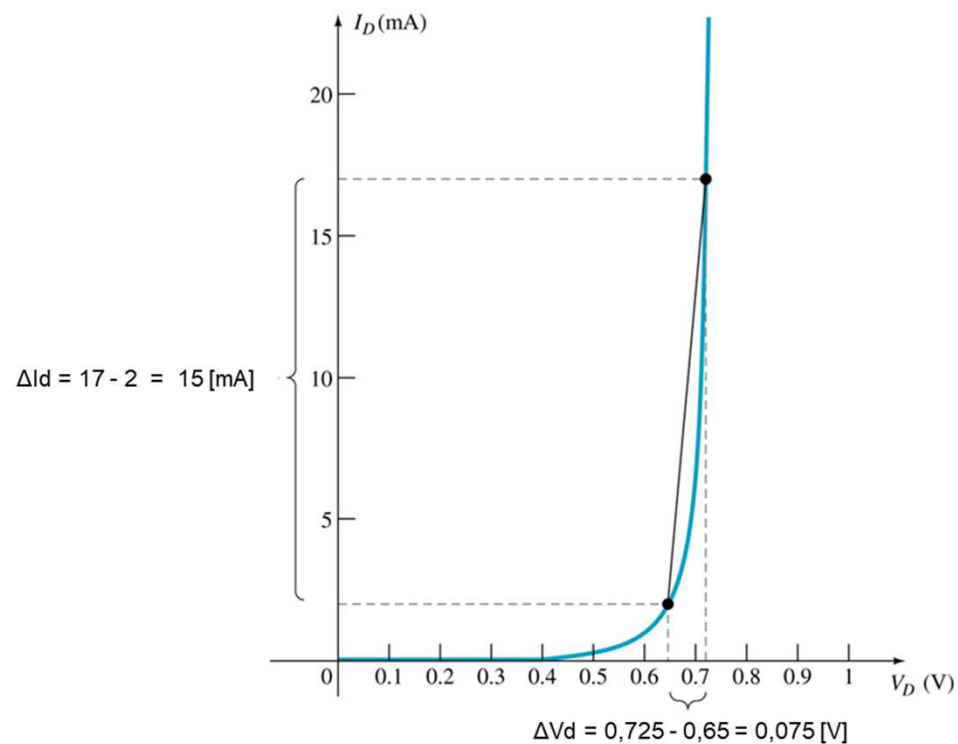


$$r_{AV} \approx \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right|_{pt \ a \ pt}$$



## 2.6. Resistência do Diodo

Exemplo 2.6.4. Determine  $r_{av}$  para o diodo cuja curva característica é ilustrada a seguir, na região compreendida entre  $I_D$  igual a 2 e 17 mA.



### 2.7. Folha de dados (*Data Sheet*)

- Normalmente apresentada pelos fabricantes em duas formas:
  - Folha com uma breve descrição das especificações básicas
  - Gráficos, desenhos tabelas com especificações completas
- Dados específicos que devem ser apresentados:
  1. Tensão Direta  $V_F$  (em corrente e temperatura específica)
  2. Corrente direta média máxima  $I_{F(AV)}$ , corrente direta de pico repetitiva  $I_{FRM}$  e corrente direta de surto máxima  $I_{FSM}$
  3. Corrente de saturação reversa  $I_R$  (a uma tensão e temperatura específicas)
  4. Tensão reversa nominal  $V_{BV}$  ou **PIV** (a uma temperatura específica)
  5. O valor máximo de dissipação de potência a uma temperatura específica
  6. Valores de capacitâncias intrínsecas
  7. Tempo de recuperação reversa  $t_{rr}$
  8. Faixa de temperatura de operação

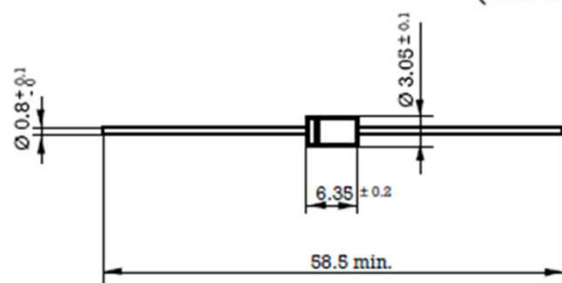
2.7. Folha de dados (*Data Sheet*)

1N4001 ..... 1N4007  
BY133..... P513

## 1 Amp. Silicon Rectifier Diodes

Dimensions in mm.

DO-15  
(Plastic)



Voltage  
50 to 1600 V.

Current  
1.0 A. at 75°C.

## Mounting instructions

1. Min. distance from body to soldering point, 4 mm.
2. Max. solder temperature, 350°C.
3. Max. soldering time, 3,5 sec.
4. Do not bend lead at a point closer than 2 mm. to the body.

- Low cost
- Diffused junction
- High current capability
- The plastic material carries U/L recognition 94 V-0
- Terminals: Axial Leads
- Polarity: Color band denotes cathode



2.7. Folha de dados (*Data Sheet*)

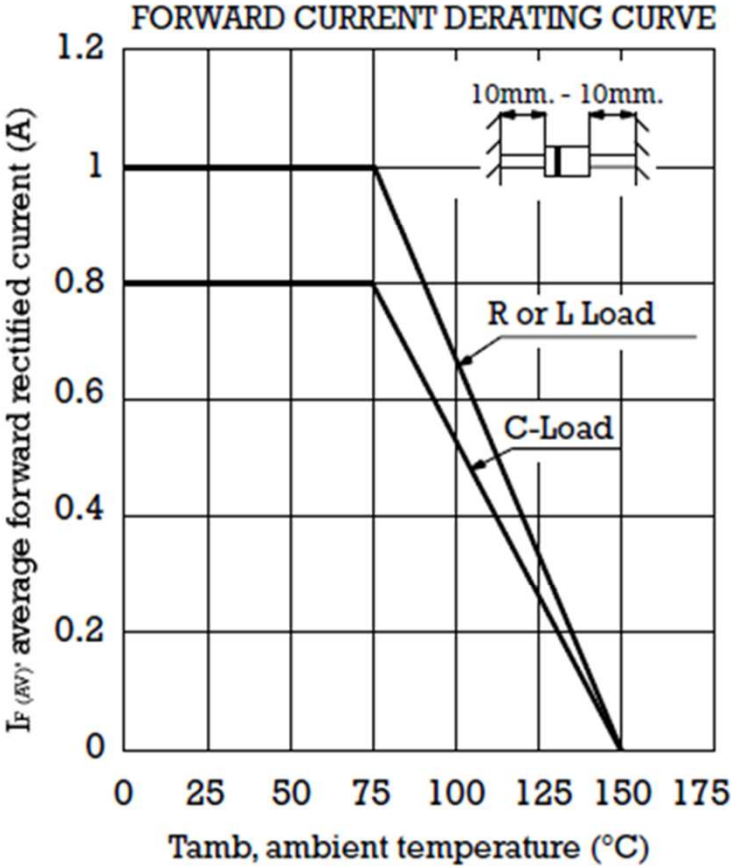
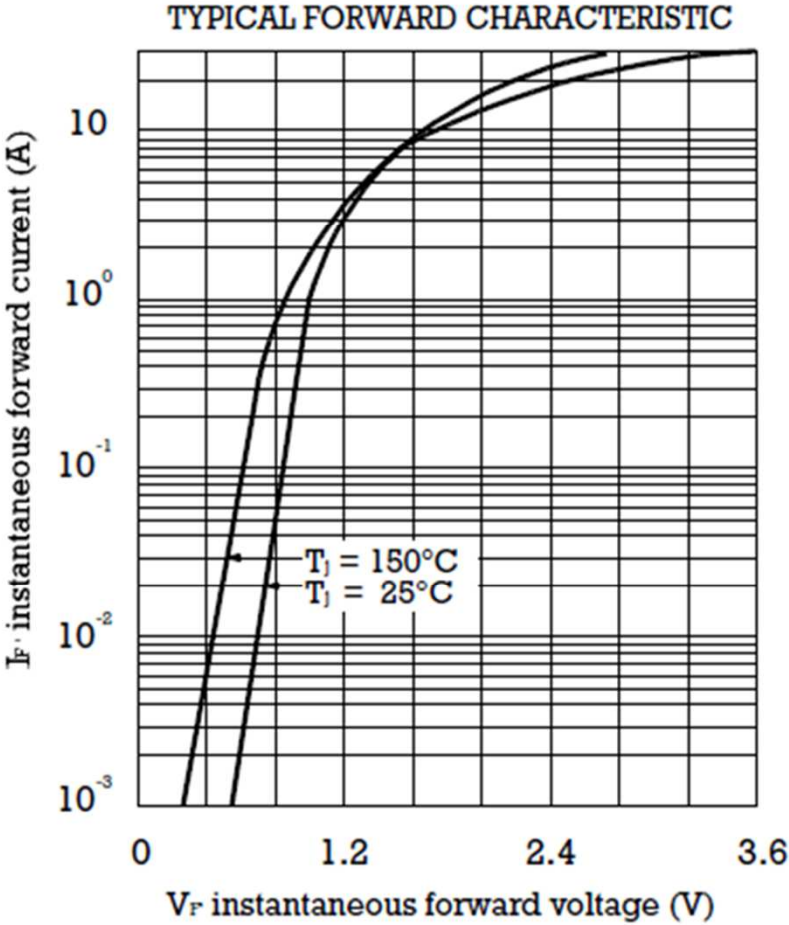
Maximum Ratings, according to IEC publication No. 134

		1N 4001	1N 4002	1N 4003	1N 4004	1N 4005	1N 4006	1N 4007	BY 133	P 513
$V_{RRM}$	Peak recurrent reverse voltage (V)	50	100	200	400	600	800	1000	1300	1600
$I_{F(AV)}$	Forward current at $T_{amb} = 75^{\circ}\text{C}$	1 A								
$I_{FRM}$	Recurrent peak forward current	10 A								
$I_{FSM}$	10 ms. peak forward surge current	50 A								
$T_j$	Operating temperature range	– 65 to + 150 °C								
$T_{stg}$	Storage temperature range	– 65 to + 150 °C								

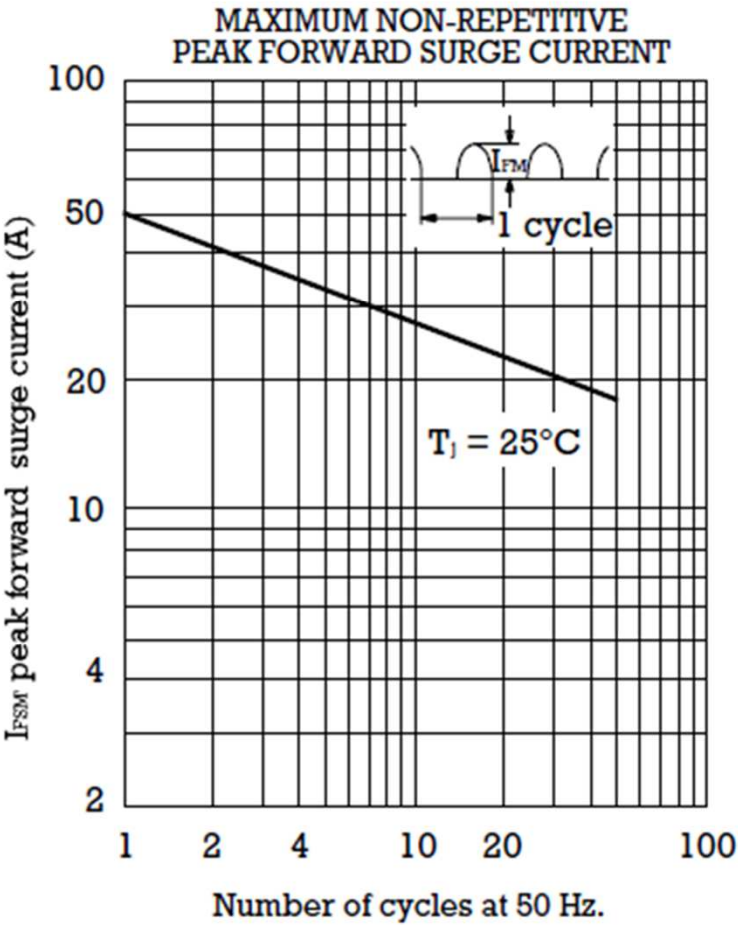
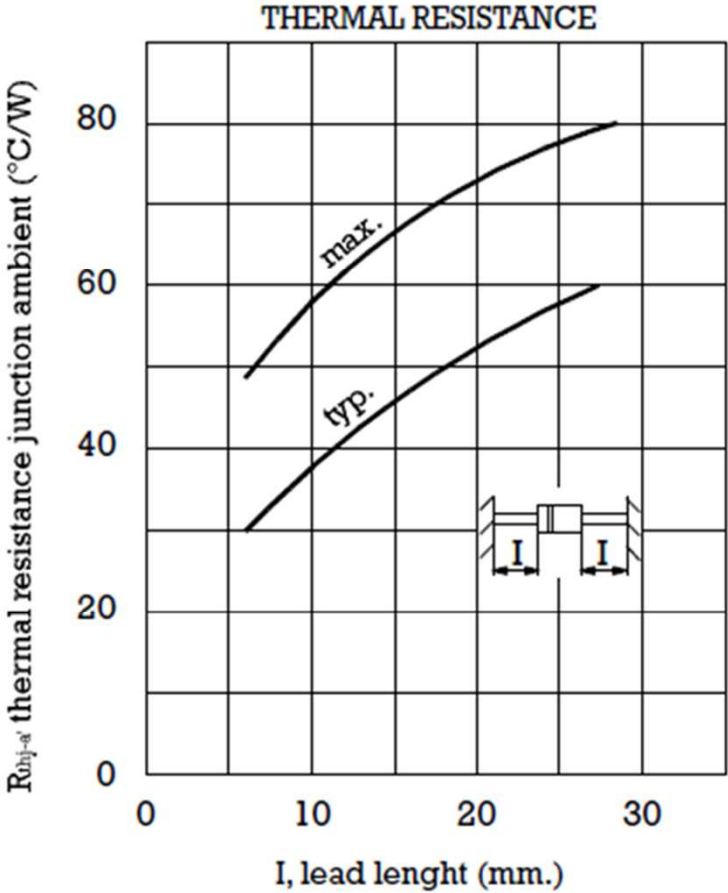
Electrical Characteristics at  $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ 

$V_F$	Max. forward voltage drop at $I_F = 1\text{ A}$	1.1V
$I_R$	Max. reverse current at $V_{RRM}$ at 25°C at 100°C	5 $\mu\text{A}$ 100 $\mu\text{A}$
$R_{thj-a}$	Max. thermal resistance ( $l = 10\text{ mm.}$ )	60° C/W

2.7. Folha de dados (*Data Sheet*)



2.7. Folha de dados (*Data Sheet*)



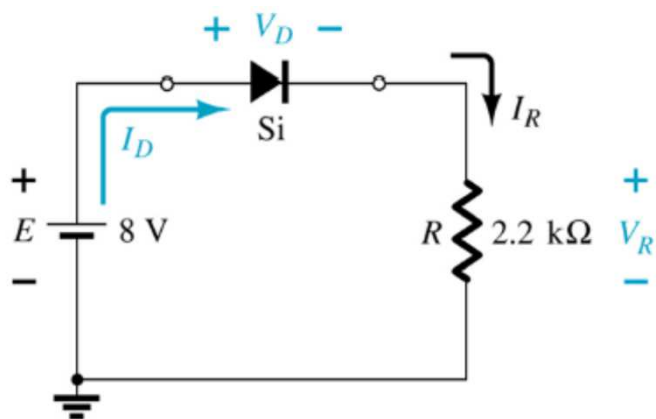
## 2.7. Exercícios

Exemplo 2.7.1. Para a configuração com diodo em série a seguir, determine:

a)  $V_D$

b)  $I_D$

c)  $V_R$



Respostas	
$V_D$ [V]	0,7
$I_D$ [mA]	3,32
$V_R$ [V]	7,3

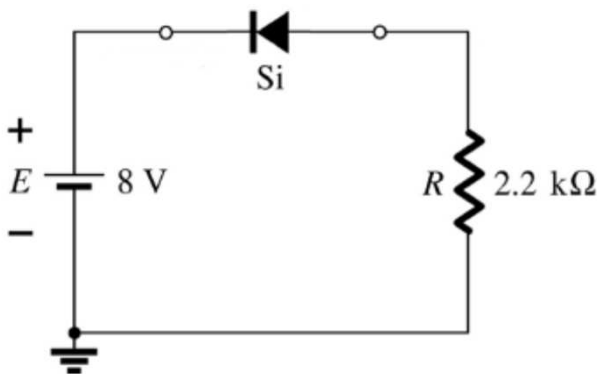
## 2.7. Exercícios

Exemplo 2.7.2. Para a configuração com diodo em série a seguir, determine:

a)  $V_D$

b)  $I_D$

c)  $V_R$



Respostas	
$V_D$ [V]	-8
$I_D$ [mA]	0
$V_R$ [V]	0

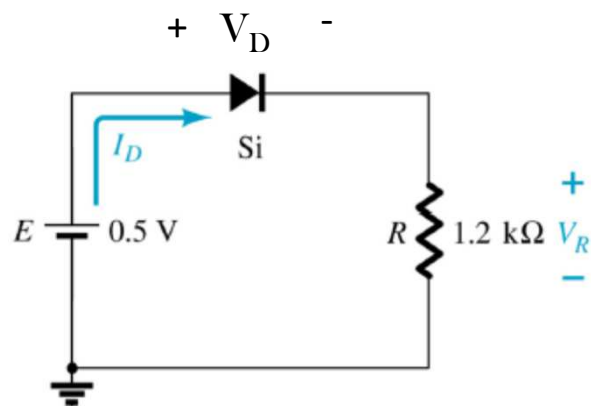
## 2.7. Exercícios

Exemplo 2.7.3. Para a configuração com diodo em série a seguir, determine:

a)  $V_D$

b)  $I_D$

c)  $V_R$



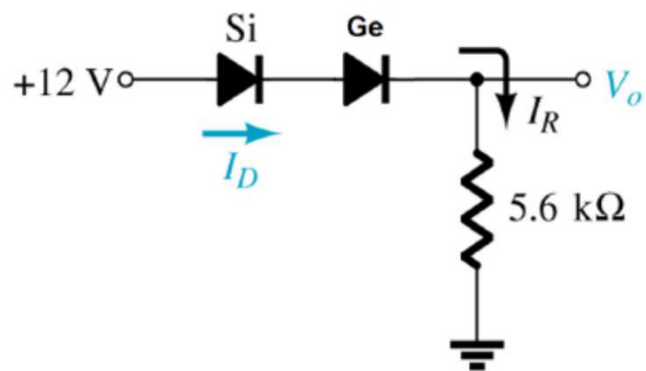
Respostas	
$V_D$ [V]	0,5
$I_D$ [mA]	0
$V_R$ [V]	0

## 2.7. Exercícios

Exemplo 2.7.4. Para a configuração com diodo em série a seguir, determine:

a)  $V_o$

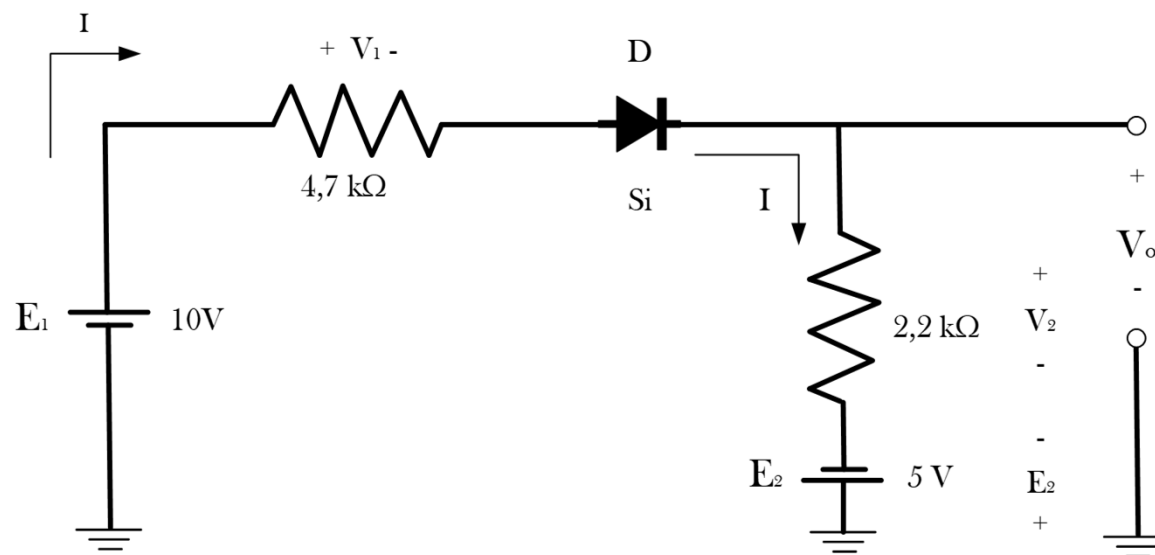
b)  $I_D$



Respostas	
$V_o$ [V]	11
$I_D$ [mA]	1,96

## 2.7. Exercícios

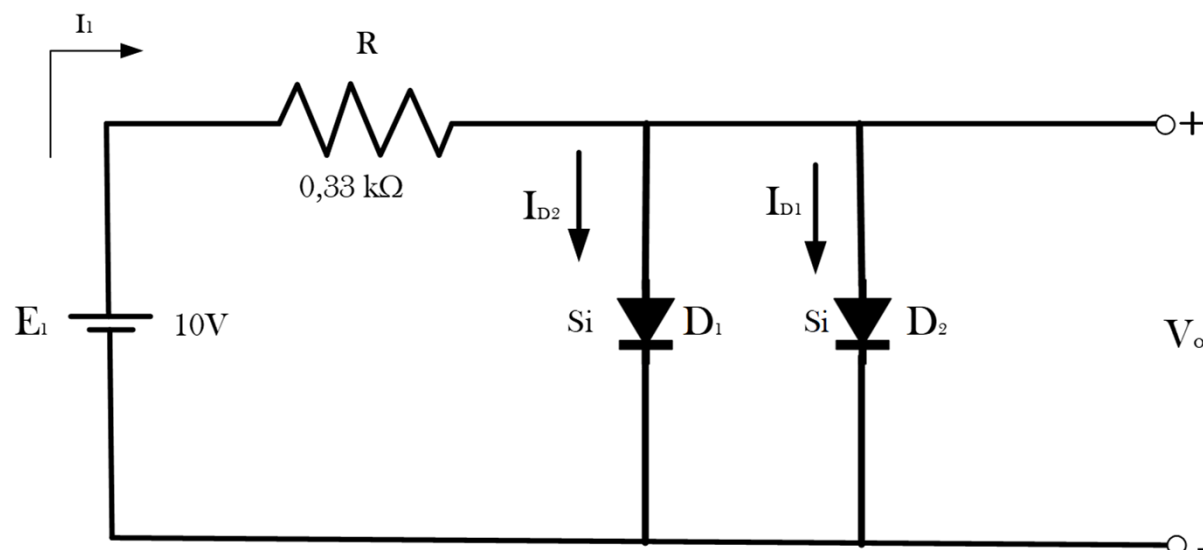
Exemplo 2.7.5. Determine  $I$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_0$  para a configuração em série a seguir.





## 2.7. Exercícios

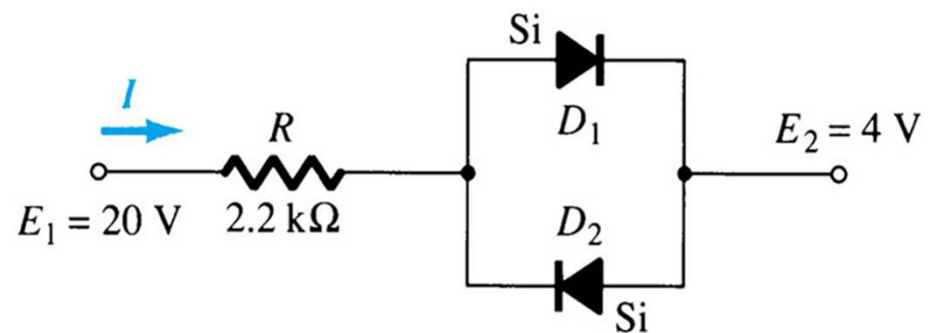
Exemplo 2.7.6. Determine  $V_o$ ,  $I_1$ ,  $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$  para a configuração a seguir.



Respostas	
$I_1$ [mA]	28,18
$I_{D1}$ [mA]	14,09
$I_{D2}$ [mA]	14,09
$V_o$ [V]	0,7

## 2.7. Exercícios

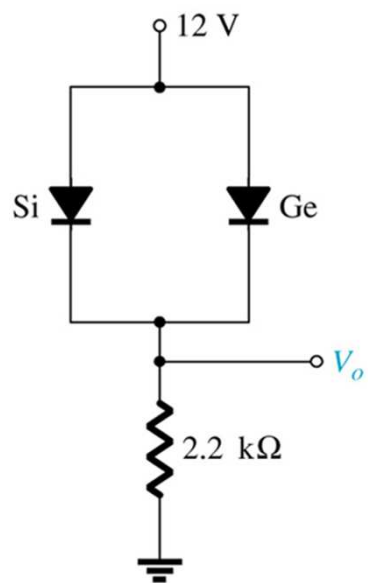
Exemplo 2.7.7. Determine  $I$  para a configuração a seguir.



Resposta	
$I\text{ [mA]}$	6,95

## 2.7. Exercícios

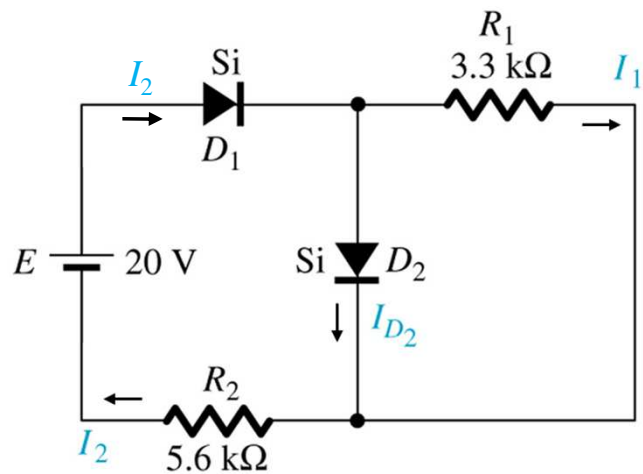
Exemplo 2.7.8. Determine a tensão  $V_o$  para o circuito a seguir.



Respostas	
$V_o$ [V]	11,7

## 2.7. Exercícios

Exemplo 2.7.9. Determine a tensão  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_{D2}$  para o circuito a seguir.

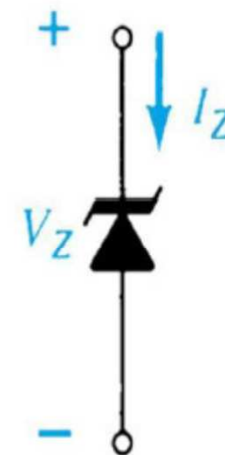
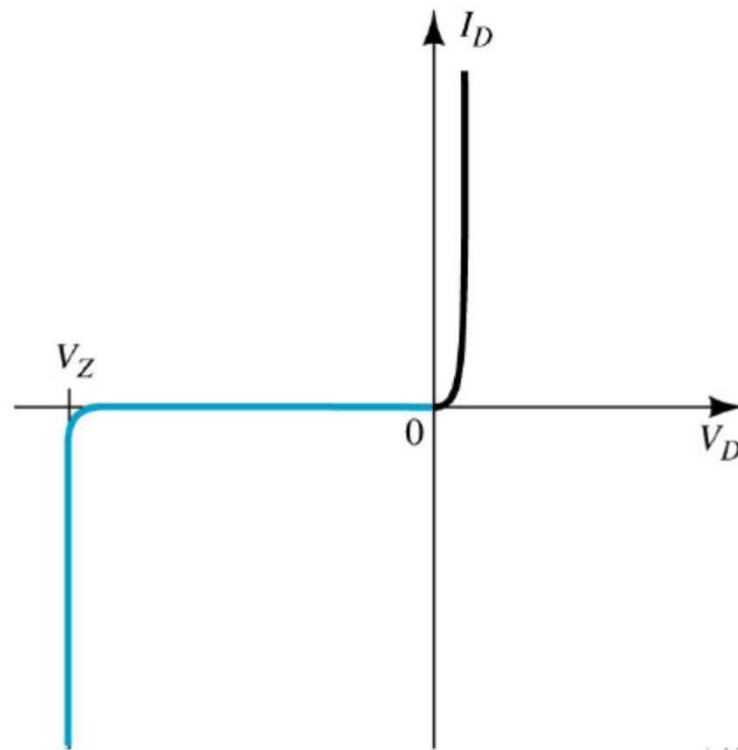


Respostas	
$I_1$ [mA]	0,212
$I_2$ [mA]	3,32
$I_{D2}$ [mA]	3,108

DIODO ZENER

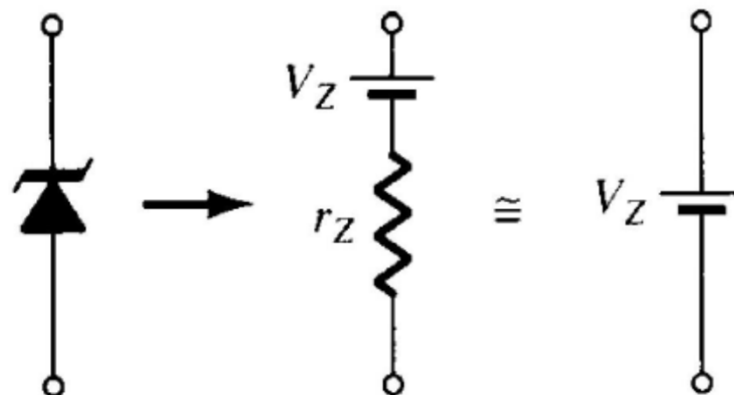
## 2.8. Diodo Zener

- Diodos Zener são diodos, normalmente de Si, que operam na região zener, com potenciais entre 1,8 e 200 V e especificações de potência Zener de 250 mW até 50 W.



## 2.8. Diodo Zener

## 2.8.1. Simbologia

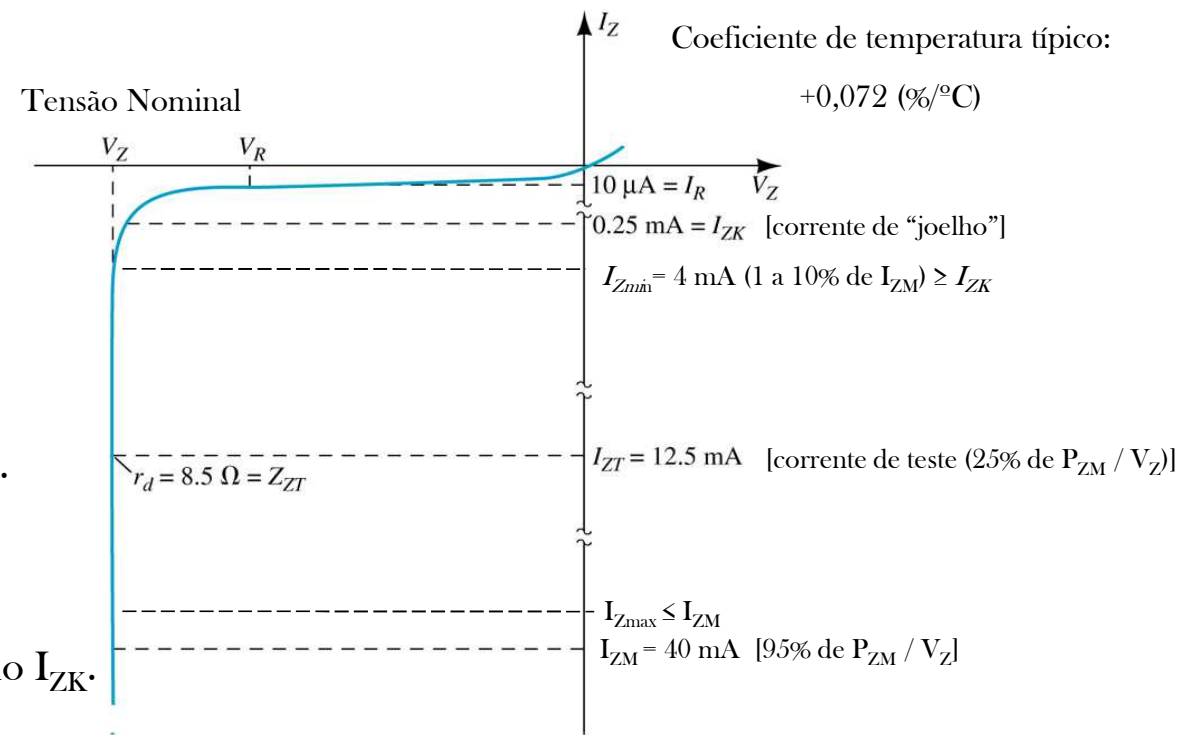


### 2.8. Diodo Zener

#### 2.8.2. Características Elétricas

Exemplo de um diodo com  $V_Z = 10V$ ,  $P_{ZM} = 500 \text{ mW}$  e tolerância de 20%.

- Tolerância de 20% significa que  $V_Z$  pode variar de  $10 V \pm 20\%$ , ou de 8V a 12 V em sua faixa de aplicação.
- Valor nominal: Valor médio típico.
- Corrente de teste  $I_{ZT}$  definida pelo nível de potência  $\frac{1}{4} \text{ W}$ .
- $Z_{ZT} = r_d$  (Impedância Dinâmica) é para  $I_{ZT}$ .
- $Z_{\max} = Z_{ZK}$  (Impedância máxima) é para a corrente no joelho  $I_{ZK}$ .
- $I_{ZK}$ : Definido pelo *datasheet*.





## 2.8. Diodo Zener

### 2.8.2. Características Elétricas

- $P_{ZM} = V_Z \times (I_{ZM} / 0,95)$ , fornecida pelo *datasheet*, corresponde a máxima potência que o Diodo Zener pode dissipar.
- $I_{ZM}$ , calculada a 95% de  $P_{ZM}$  [ $I_{ZM} = 0,95 \times (P_{ZM} / V_Z)$ ], corresponde a máxima corrente que pode circular pelo Diodo Zener. Para diodos com tolerância elevada, dever ser calculada considerando-se o limite superior de  $V_Z$ .
- $I_{Z(max)}$ , corresponde a máxima corrente que irá circular pelo Diodo Zener devendo ser menor ou igual a  $I_{ZM}$ .
- $I_{ZK}$ , fornecida pelo *datasheet*, corresponde a corrente de joelho, a partir do qual ocorre a ruptura da junção ( $V_{BV}$ ).
- $I_{Z(min)}$ , corresponde a mínima corrente pelo Diodo Zener que mantém a regulação da tensão Zener.  $I_{Z(min)}$  deve ser superior  $I_{ZK}$ , normalmente adota-se de 1 a 10%  $I_{ZM}$ , mas pode ser reduzida quando se trata de Diodos Zener de potência elevada.
- $I_{ZT}$ , calculada a 25% de  $P_{ZM}$  [ $I_{ZT} = 0,25 \times (P_{ZM} / V_Z)$ ], corresponde a corrente de teste do Diodo Zener, usada para o levantamento dos seus parâmetros nominais.
- Coeficiente de temperatura:  $T_c = \frac{\Delta V_Z}{V_Z (T_1 - T_0)} \cdot 100\% \text{ } \% / ^\circ C$

2.8. Diodo Zener

2.8.3. Especificação Técnica

- A especificação do diodo Zener é feita, principalmente, através dos seus parâmetros  $V_Z$  e  $P_{ZM}$  ou  $I_{ZM}$ .
- Porém, no *datasheet* encontra-se outras especificações tais como:
  - $I_{ZK}$ , regulação de tensão, corrente reversa, corrente de surto, impedâncias, coeficiente de temperatura e tolerância, como mostrado na tabela a seguir para o diodo Zener 1N5349B.

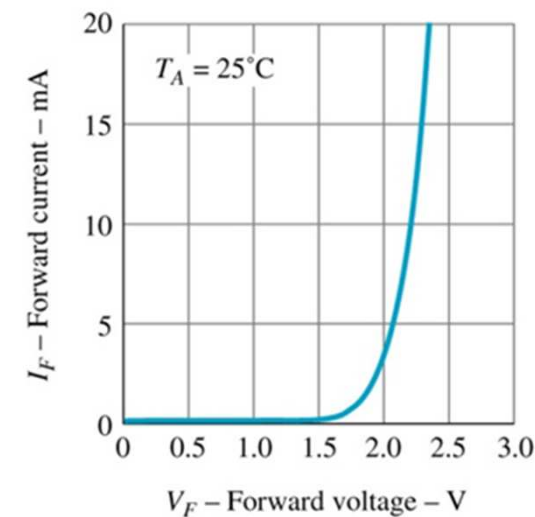
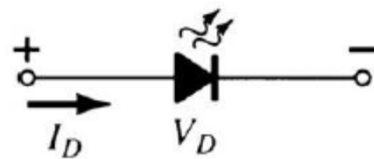
Part Number	$V_Z@I_{ZT}$ [V]	$I_{ZT}$ [mA]	Máxima Impedância [Ω]			Máxima Corrente Reversa		Corrente de Surto [A]	Regulação de Tensão [V]	Corrente Máxima [mA]
			$Z_{ZT}@I_{ZT}$	$Z_{ZK}@I_{ZK}$	$I_{ZK}$ [mA]	$I_R$ [μA]	$V_R$ [V]			
1N5349B	12	100	2,5	125	1	2	9,1	7,5	0,25	395

- O sufixo existente no *Part Number* indica a tolerância, sendo  $A \rightarrow \pm 10\% \therefore B \rightarrow \pm 5\% \therefore C \rightarrow \pm 2\% \therefore D \rightarrow \pm 1\%$ .
- A ausência de sufixo indica tolerância de  $\pm 20\%$ .

LED

## 2.9. Diodo Emissor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

- Em uma junção PN polarizada diretamente a recombinação de elétrons e lacunas livres transfere energia na forma de calor e de fótons.
- No Si e no Ge a maior parte da energia é radiada na forma de calor.
- Já no GaAs, durante o processo de recombinação na junção PN, o número de fótons emitidos é suficientemente elevado para criar uma fonte de luz (invisível) na zona de infravermelho.



### 2.9. Diodo Emissor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

- A quantidade de energia necessária para mover um elétron de um nível de energia distinto para outro é dada por

$$E_g = h f = \frac{h c}{\lambda}$$

onde:

$E_g$  = energia em joules [J]

$h$  = constante de Planck =  $6,62 \times 10^{-34}$  [J.s]

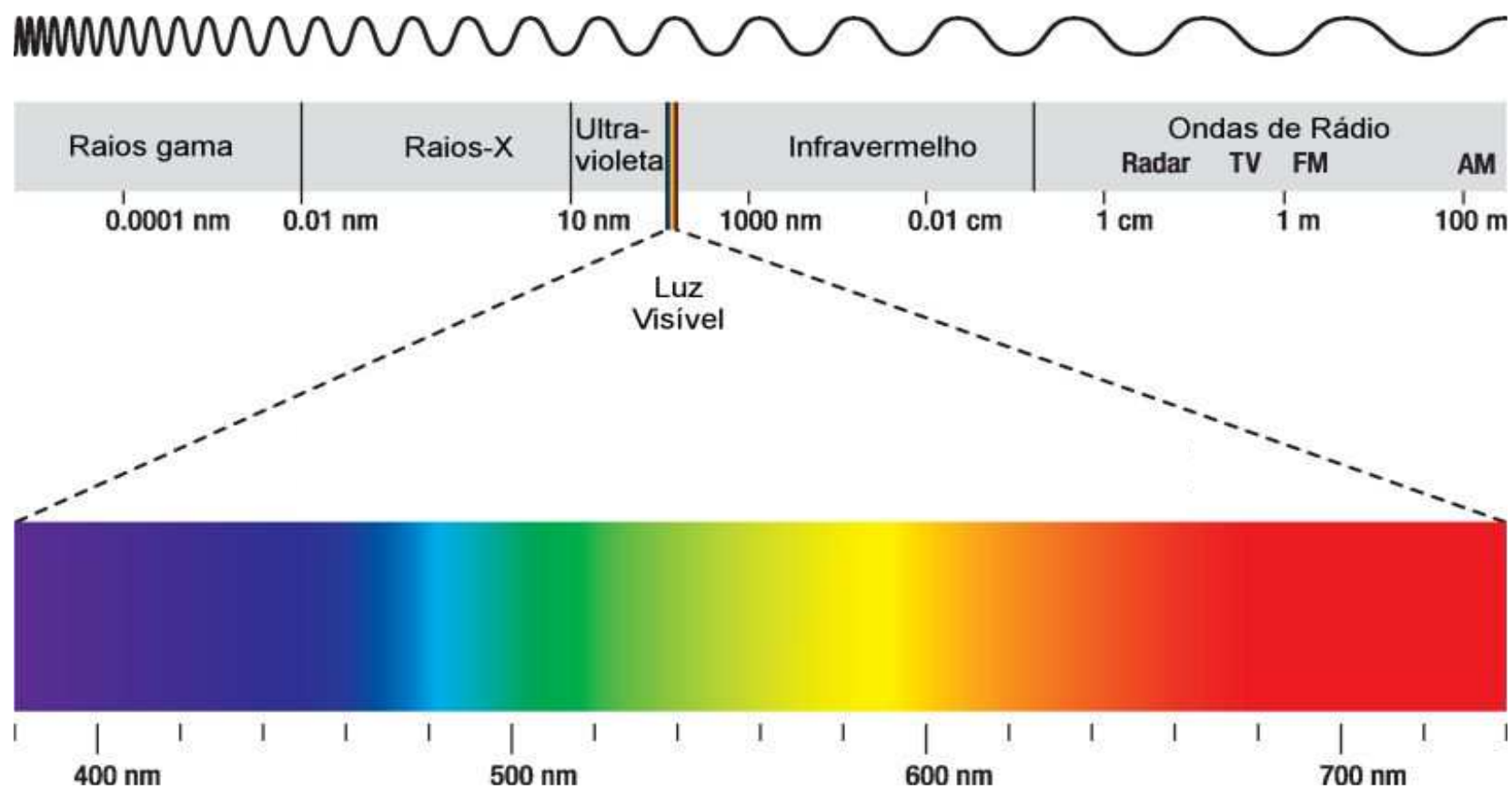
$c$  = velocidade da luz =  $3 \times 10^8$  [m/s]

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação [m]

$f$  = frequência [Hz]

## 2.9. Diodo Emissor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

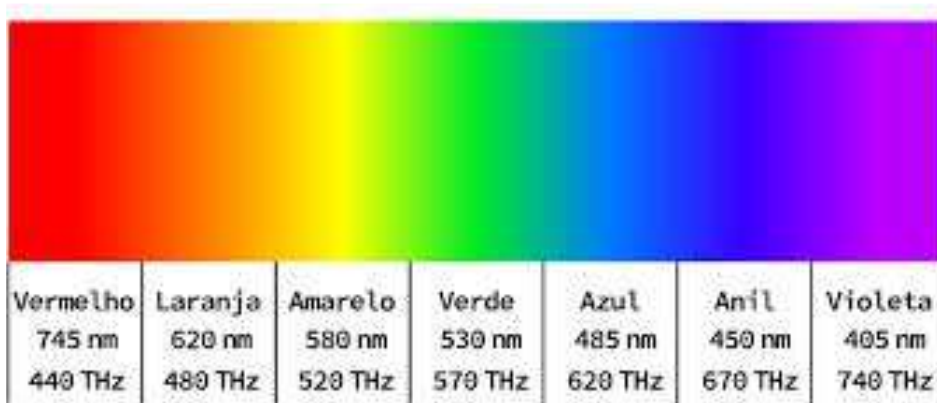
### 2.9.1. Curva de Resposta padrão do olho humano



## 2.9. Diodo Emissor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

### 2.9.1. Curva de Resposta padrão do olho humano

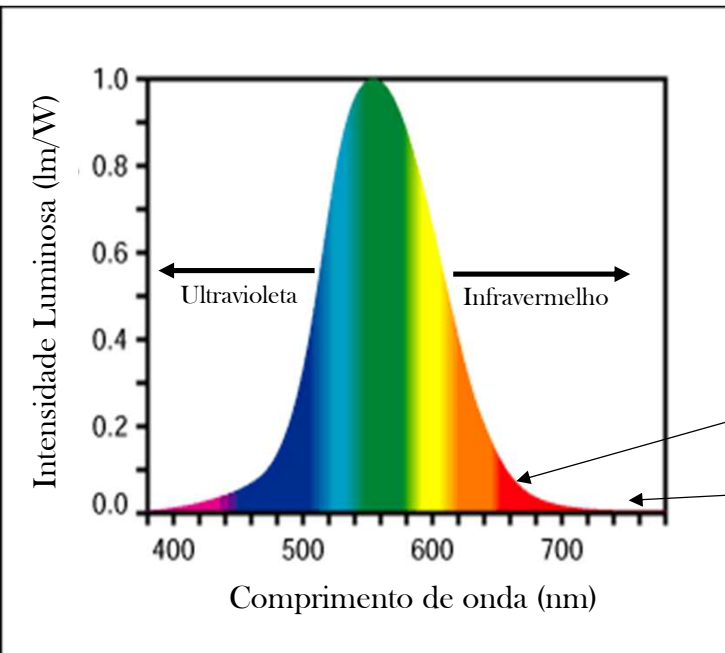
Espectro Visível



- O espectro de frequência para a luz visível estende-se de cerca de 400 THz a 750 THz (400 *nm* a 750 *nm*).
- O espectro de frequência para a luz infravermelha estende-se de 100THz a 400THz (750 *nm* a 3000 *nm*).

## 2.9. Diodo Emissor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

### 2.9.1. Curva de Resposta padrão do olho humano



- Para o GaAs, o Gap de energia é de 1,43 eV, o que resulta em um comprimento de onda de 868,8 nm (345,3 THz), que corresponde a uma radiação infravermelho.
- Para o GaAsP, o Gap de energia é de 1,9 eV, o que resulta em um comprimento de onda de 653,9 nm (458,8 THz), que corresponde a uma radiação de luz visível.

$$\lambda_{GaAsP} = \frac{h.c}{E_g} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{1,9 \times 1,6 \times 10^{-19}} = 653,9 \times 10^{-9} (m) = 653,9 (nm)$$

$$\lambda_{GaAs} = \frac{h.c}{E_g} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{1,43 \times 1,6 \times 10^{-19}} = 868,8 \times 10^{-9} (m) = 868,8 (nm)$$

$$\lambda_{Si} = 1.130 (nm)$$

$$\lambda_{Ge} = 1.855 (nm)$$



## 2.9. Diodo Emissor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

### 2.9.1. Curva de Resposta padrão do olho humano

Cor	Construção	Tensão direta comum (V)
Âmbar	AlInGaP	2,1
Azul	GaN	5,0
Verde	GaP	2,2
Laranja	GaAsP	2,0
Vermelho	GaAsP	1,8
Branco	GaN	4,1
Amarelo	AlInGaP	2,1

- A intensidade de luz de um LED aumenta com a corrente direta, até atingir um ponto de saturação
- Uma das principais preocupações ao se usar um LED é a tensão de ruptura reversa ( $V_{BV}$ ), que normalmente está na faixa de 3 a 5 V.

## 2.9. Diodo Emisor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

### 2.9.2. Data Sheet

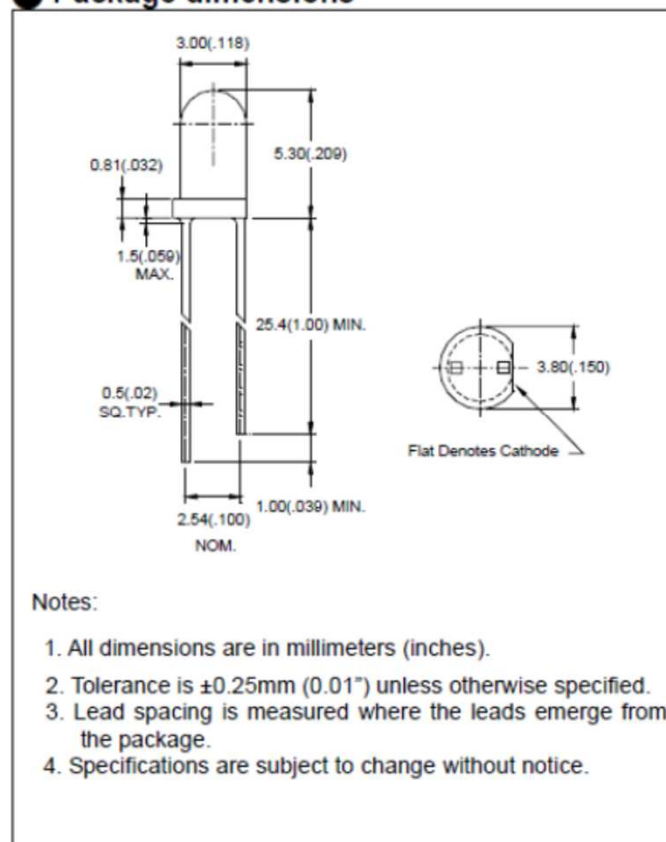
#### ● Features:

1. Chip material: GaP/GaP
2. Emitted color : Green
3. Lens Appearance : Green diffused
4. Low power consumption.
5. High efficiency.
6. Versatile mounting on P.C. Board or panel.
7. Low current requirement.
8. 3mm diameter package.
9. This product don't contained restriction substance, compliance ROHS standard.

#### ● Applications:

1. TV set
2. Monitor
3. Telephone
4. Computer
5. Circuit board

#### ● Package dimensions



### 2.9. Diodo Emisor de Luz (LED: *Light-Emitting Diode*)

#### 2.9.2. Data Sheet

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Power Dissipation	Pd	80	mW
Forward Current	I <sub>F</sub>	30	mA
Peak Forward Current <sup>*1</sup>	I <sub>FP</sub>	150	mA
Reverse Voltage	V <sub>R</sub>	5	V
Operating Temperature	Topr	-40°C~80°C	
Storage Temperature	Tstg	-40°C~85°C	
Soldering Temperature	Tsol	260°C (for 5 seconds)	

<sup>\*1</sup> Condition for I<sub>FP</sub> is pulse of 1/10 duty and 0.1msec width.

● Electrical and optical characteristics(Ta=25°C)						
Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward Voltage	V <sub>F</sub>	I <sub>F</sub> =20mA	-	2.2	2.6	V
Luminous Intensity	I <sub>v</sub>	I <sub>F</sub> =20mA	-	40	-	mcd
Reverse Current	I <sub>R</sub>	V <sub>R</sub> =5V	-	-	100	μA
Peak Wave Length	λ <sub>p</sub>	I <sub>F</sub> =20mA	-	568	-	nm
Dominant Wave Length	λ <sub>d</sub>	I <sub>F</sub> =20mA	560	-	576	nm
Spectral Line Half-width	Δλ	I <sub>F</sub> =20mA	-	30	-	nm
Viewing Angle	2θ <sub>1/2</sub>	I <sub>F</sub> =20mA	-	35	-	deg

DIODO SCHOTTKY

### 2.10. Diodo Schottky (SBD)

- O diodo de barreira Schottky é formado colocando-se um metal em contato com um material semiconductor tipo  $n$  moderadamente dopado. O resultado é um diodo que conduz corrente somente em uma direção (do anodo para o catodo), atuando como circuito aberto na outra direção.
- A sua curva característica  $I_D = f(V_D)$  é similar à do diodo de junção  $pn$ , com duas importantes exceções:
  - Na junção  $pn$ , quando há a migração de portadores de um cristal par o outro ocorre a recombinação entre elétron e lacunas. No diodo Schottky a condução se dá apenas por portadores majoritários do metal e do Si (elétrons) e, portanto, não há tempo de recuperação reversa, o que permite maior velocidade no chaveamento.
  - A queda de tensão direta no diodo Schottky (0,3 V) é menor do que a do diodo de Si de junção  $pn$  (0,7 V). Já para diodos de GaAs, a queda de tensão direta é da ordem de 0,7 V.
- Quando os materiais são unidos os elétrons do semiconductor de Si fluem para o metal agregado estabelecendo um fluxo intenso de portadores majoritários.
- O fluxo de elétrons para o metal cria no material do Si uma região de depleção semelhante à do diodo de junção  $pn$ .
- Os elétrons adicionados ao metal estabelecem nele uma parede negativa na fronteira entre o metal e o Si.

### 2.10. Diodo Schottky (SBD)

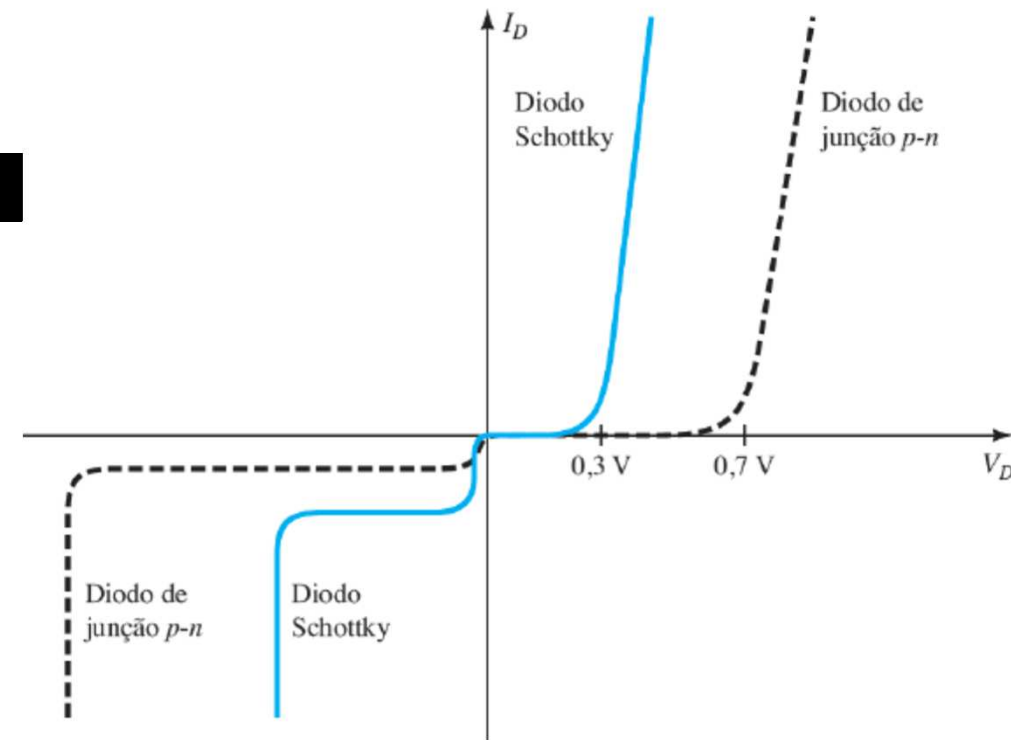
- O resultado é uma barreira de superfície entre os dois materiais, impedindo qualquer novo fluxo de corrente.
- A aplicação de uma polarização direta atrai os elétrons da barreira, reduzindo sua força, o que irá permitir o retorno de um fluxo intenso de elétrons através da junção.
- Porém, a corrente reversa devida aos elétrons do metal que passam para o Si é maior no diodo Schottky do que no diodo de junção *pn* o que é desejável.

## 2.10. Diodo Schottky (SBD)

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q}{kT_k \eta} V_D} - 1 \right)$$

Onde:

- $I_S$  - Corrente devida aos elétrons que fluem do metal para o Si
  - $\eta$  - Depende do metal usado e da técnica de construção
  - Metais usados: Molibdênio, Platina, Cromo, Tungstênio
- 
- Vale ressaltar que nem todo contato entre o metal e semicondutor forma um diodo. Metais são depositados sobre superfícies semicondutoras na construção dos terminais dos dispositivos, denominados contatos ôhmicos, os quais são feitos por deposição de metais sobre regiões semicondutoras altamente dopadas.



Diodo Schottky X Diodo de junção  $pn$

### 2.11. Diodo tipos:

Para os dispositivos a seguir pesquise sobre o princípio de funcionamento, curvas características, principais parâmetros aplicações, circuitos típicos parâmetros importantes do *DataSheet*.

- Diodo de Potência
  - Diodo Túnel
  - Diodo Gunn
  - Diodo PIN
  - Diodo emissores de IV
  - Fotodiodos
  - Células Fotocondutivas
  - Display de Cristal Líquido
  - Células Solares
  - Termistores
- 
- Fazer co-criação no documento vivo do google docs:



### 2.11. Pesquisa com co-criação: Diodo tipos:

Para os dispositivos a seguir pesquise sobre o princípio de funcionamento, curvas características, principais parâmetros, aplicações, circuitos típicos parâmetros importantes do *DataSheet*.

- Diodo de Potência
- Diodo Túnel
- Diodo Gunn
- Diodo PIN
- Diodo emissores de IV
- Fotodiodos
- Células Fotocondutivas
- Display de Cristal Líquido
- Células Solares
- Termistores