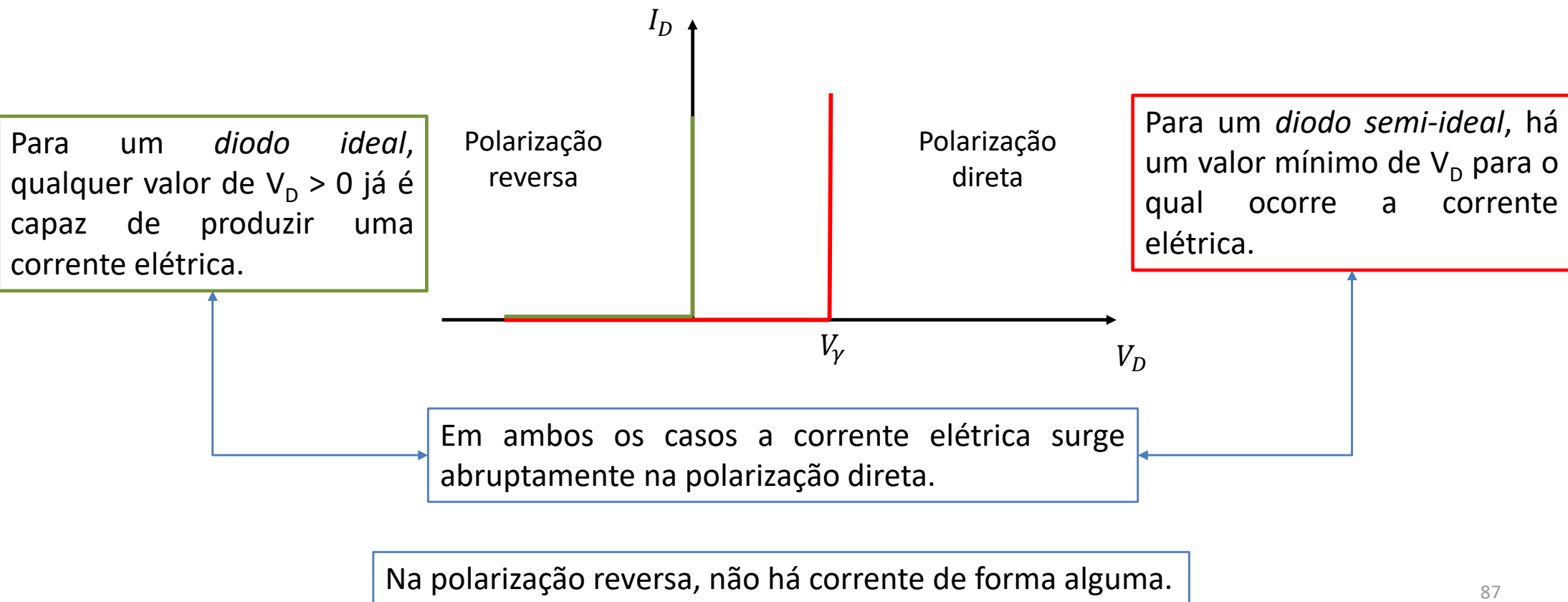


# Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

- Polarização do diodo **ideal** vs **semi ideal**: curva característica



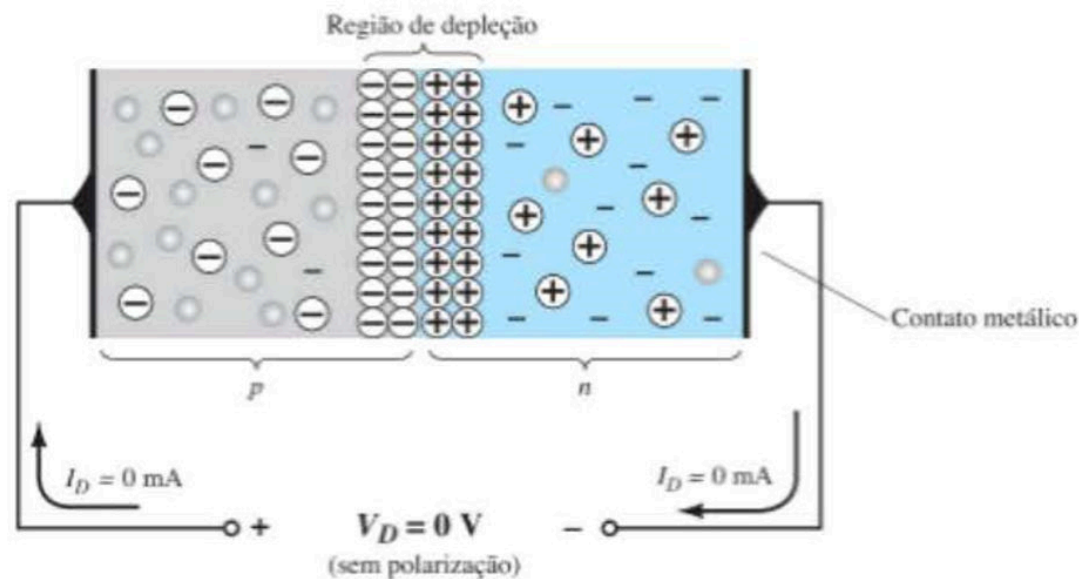
## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

Um diodo ideal ou semi ideal atua de forma semelhante a um interruptor, exceto pelo fato de que o diodo só pode conduzir em um único sentido.

Atuam como um curto circuito na configuração de condução e como um circuito aberto (resistência elétrica infinita) na configuração de não condução.

## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

- Quando a junção “p-n” é formada, os elétrons e as lacunas se combinam na região de contato, formando uma região que se denomina de *região de depleção*.



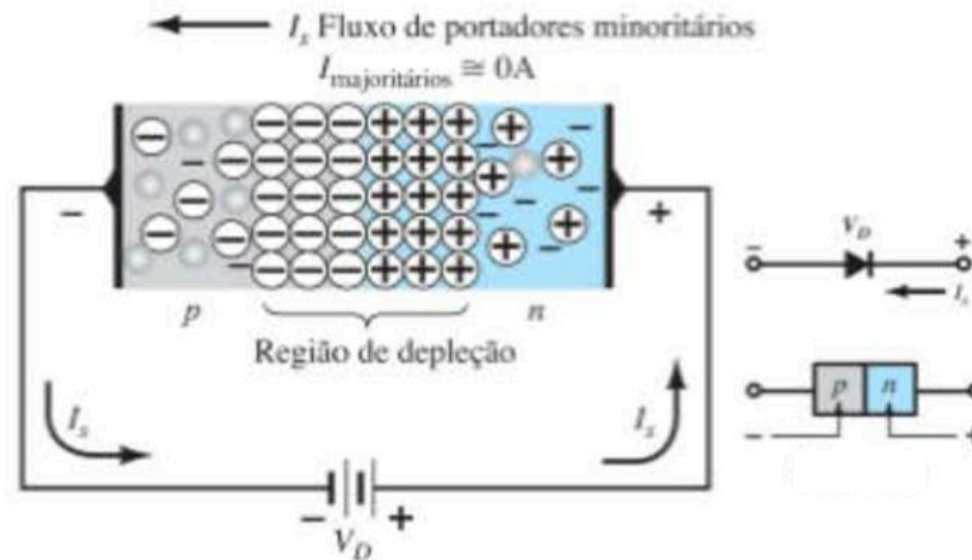
Naturalmente, sem polarização não há possibilidade de haver corrente elétrica.

Para essa configuração, existem três possibilidades:  
*Sem polarização; polarização reversa e polarização direta.*

## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

- Polarização reversa: provoca um aumento da região de depleção, gerando uma barreira ao fluxo dos portadores majoritários.

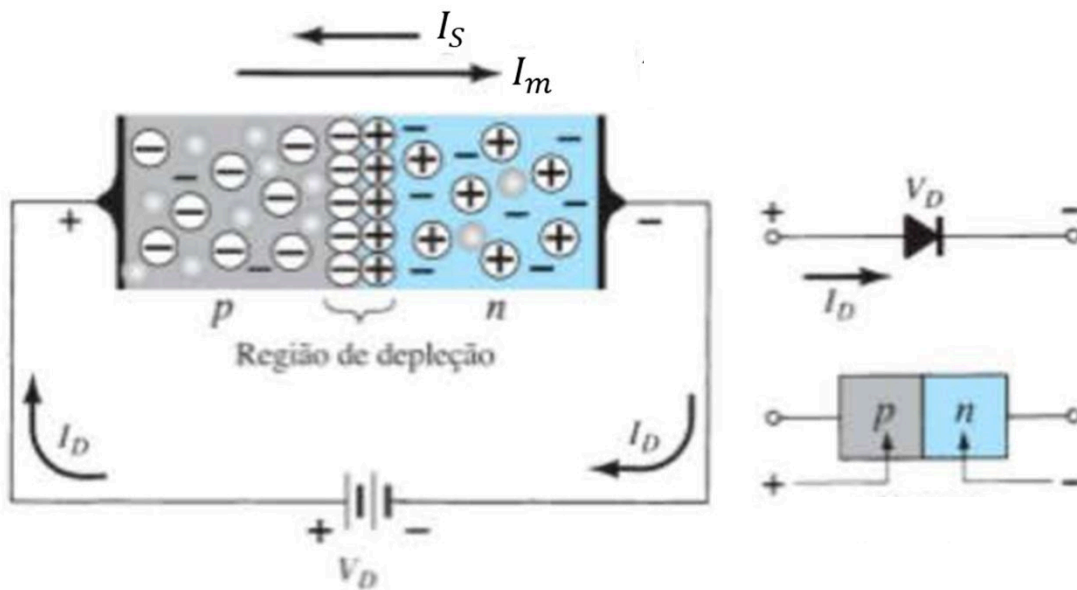
A corrente de saturação reversa " $I_s$ " é da ordem do nA a pA, atinge rapidamente a intensidade máxima (saturação) e varia muito pouco com o aumento do valor de  $V_D$ .



Os elétrons "livres" no material do tipo "n" são atraídos pelo polo positivo aumentando as cargas positivas na região da depleção. De forma semelhante, os elétrons "livres" do material do tipo p são repelidos para a região de depleção.

## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

- Polarização direta: provoca uma diminuição da região de depleção, pois o movimento dos elétrons ocorre no sentido oposto ao da polarização reversa.



Nessa condição, a corrente de diodo  $I_D$  é o resultado da diferença entre as correntes  $I_m$  e  $I_s$ .

$$I_D = I_m - I_s$$

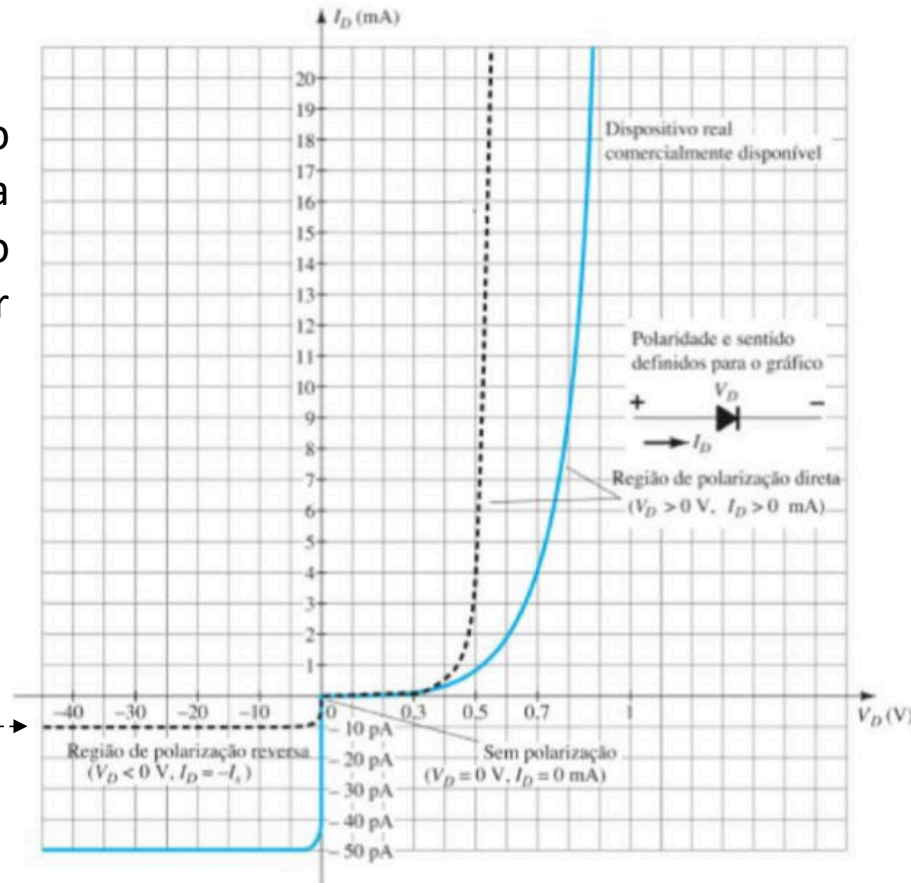
# Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

- Polarização do diodo real: curva característica

O modelo matemático conhecido como Equação de Shockley é uma aproximação do comportamento real de um diodo, como pode ser verificado no gráfico ao lado.

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

Eq. de Shockley



Curva característica do diodo de Si.

Na medida em que o valor de  $V_D$  é aumentado, a região de depleção diminui até que ocorra um aumento significativo do número de elétrons através dessa região, quando a corrente elétrica  $I_D$  se estabelece plenamente.

## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

Na Eq. de *Schockley*:  $I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$

➤  $V_D$  é a tensão de polarização aplicada ao diodo;

➤  $V_T$  é a tensão térmica, dada por

$$V_T = \frac{k_B T}{q}$$

Onde  $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K, é a constante de Boltzmann;  
“T” é a temperatura em kelvin (K) e  $q = 1,602 \times 10^{-19}$  C,  
é a carga elétrica elementar.

➤  $n$  é o fator de idealidade, determinado experimentalmente. Em geral, assume valores entre 1 e 2.

Aproximações usuais:

$$I_D \cong -I_s$$

Polarização reversa

$$I_D \cong I_s e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

Polarização direta

## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

Um diodo, sob uma temperatura de 27 °C, é atravessado por uma corrente  $I_D = 12 \text{ mA}$ .

A corrente de saturação reversa é de 5,0 pA e o fator de idealidade é 1,2. Qual é, aproximadamente, o valor da ddp a qual o diodo está submetido?

$$I_D \cong I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad \rightarrow \quad \frac{I_D}{I_S} = e^{\frac{qV_D}{nk_B T}} \quad \rightarrow \quad \ln \left( \frac{I_D}{I_S} \right) = \frac{qV_D}{nk_B T}$$

$$V_T = \frac{k_B T}{q}$$

$$\therefore V_D = \frac{nk_B T}{q} \ln \left( \frac{I_D}{I_S} \right) = \frac{1,2 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \times 10^{-19}} \ln \left( \frac{12 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-12}} \right) \cong 0,7 \text{ V}$$



## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

Dada uma corrente de diodo de 6 mA,  $V_T = 26$  mV,  $n = 1$  e  $I_s = 1$  nA, determine (a) a tensão aplicada e (b) a temperatura de operação.

$$\text{a) } I_D = I_s e^{\frac{V_D}{nV_T}} \quad \rightarrow \quad \ln\left(\frac{I_D}{I_s}\right) = \frac{V_D}{V_T}$$

$$\rightarrow V_D = V_T \ln\left(\frac{I_D}{I_s}\right) = 26 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{6 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-9}}\right) \cong 0,4 \text{ V}$$

$$\text{b) } V_T = \frac{kT}{q} \rightarrow T = \frac{qV_T}{k} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \cdot 26 \times 10^{-3}}{1,38 \times 10^{-23}} = 301 \text{ K}$$

## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

Determine a corrente de diodo a 20 °C para um diodo de silício com  $n = 2$ ,  $I_s = 0,1 \mu A$  e um potencial de polarização reversa de  $-10 V$ .

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) = 0,1 \times 10^{-6} \left( e^{\frac{-10}{2 \cdot 0,253}} - 1 \right) \cong -0,1 \mu A$$

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{1,38 \times 10^{-23} \cdot 293}{1,6 \times 10^{-19}} = 253 \text{ mV}$$

# Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

## Resistência elétrica do diodo

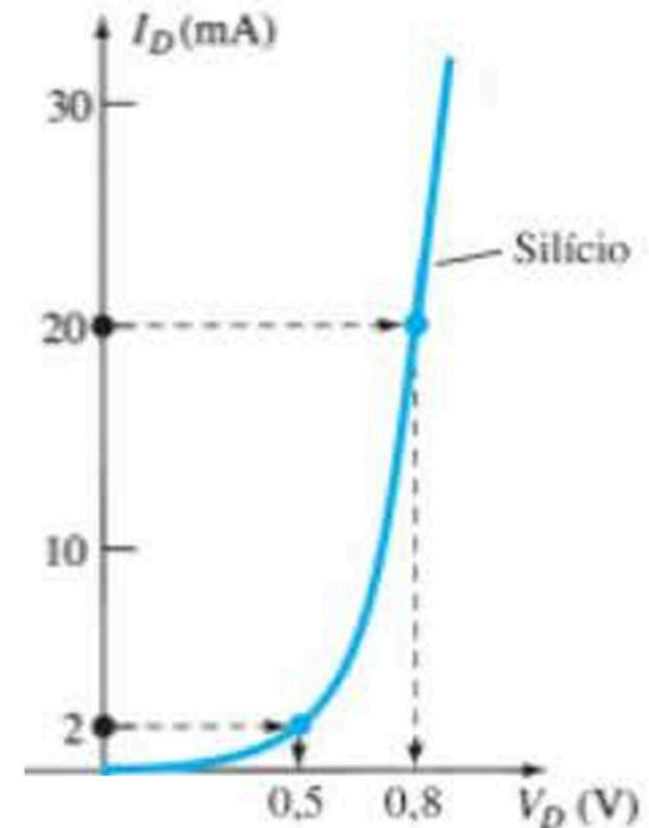
Devido a forma da curva característica do diodo, a sua resistência elétrica se altera conforme o seu ponto de operação é alterado, ou seja, os valores para  $V_D$  e  $I_D$ .

Entretanto, quando uma tensão CC é aplicada, a resistência do diodo no ponto de operação pode ser determinada utilizando a expressão que define resistência elétrica.

$$R_D = \frac{V_D}{i_D}$$

*Resistência CC ou estática.*

*Os níveis de resistência elétrica abaixo do “joelho” são maiores do que acima dele, na parte mais vertical da curva.*



# Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

## Resistência elétrica do diodo

Calcule a resistência elétrica para os semicondutores mostrados no gráfico para uma corrente  $I_D = 1 \text{ mA}$ .

Ge:

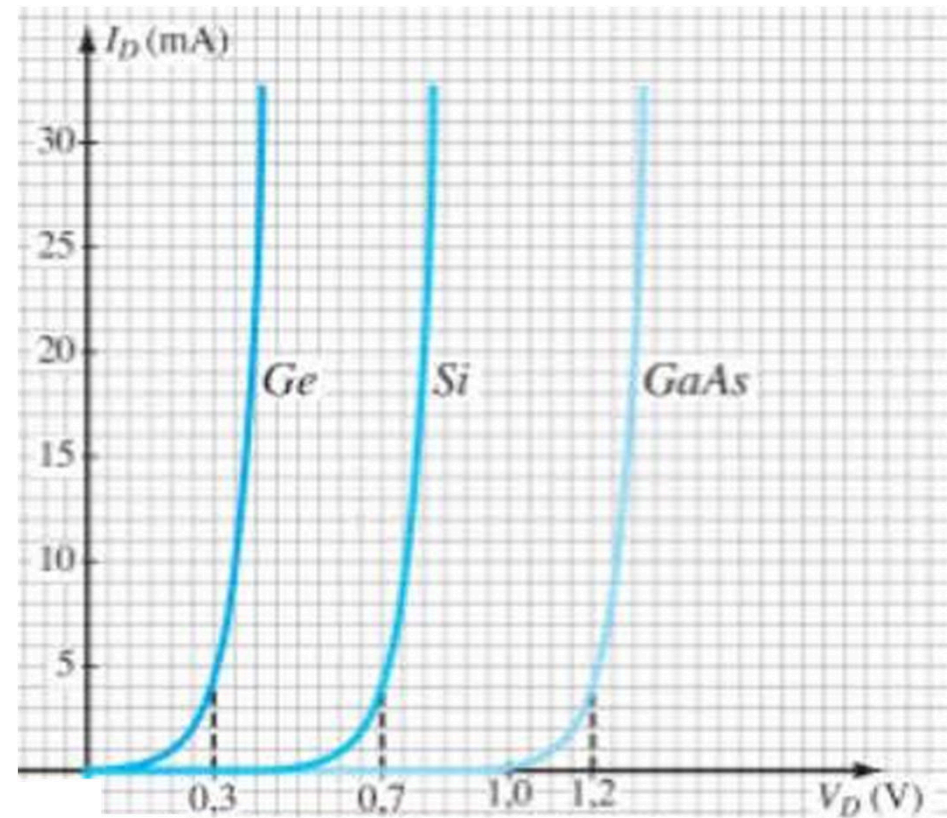
$$V_D = 0,2 \text{ V} \quad R_D = \frac{0,2}{1 \times 10^{-3}} = 200 \, \Omega$$

Si:

$$V_D = 0,6 \text{ V} \quad R_D = \frac{0,6}{1 \times 10^{-3}} = 600 \, \Omega$$

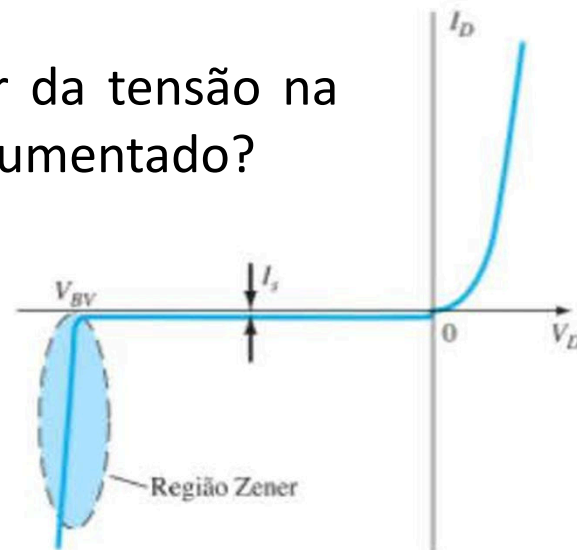
GaAs:

$$V_D = 1,1 \text{ V} \quad R_D = \frac{1,1}{1 \times 10^{-3}} = 1100 \, \Omega$$



## Aplicações de materiais semicondutores: Diodo

O que ocorre se o valor da tensão na polarização reversa for aumentado?

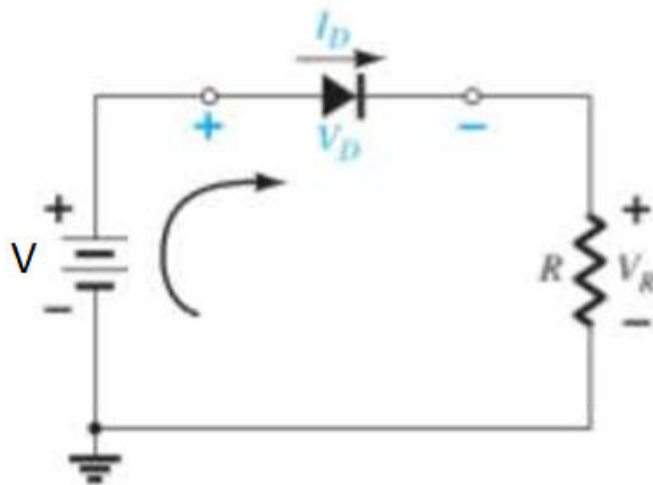


À medida que a tensão através do diodo aumenta na região de polarização reversa, a velocidade dos portadores minoritários responsáveis pela corrente de saturação reversa  $I_s$  também aumentará. Eventualmente, sua velocidade e energia cinética associada ( $W_k = \frac{1}{2}mv^2$ ) serão suficientes para liberar portadores adicionais por meio de colisões com outras estruturas atômicas estáveis. Isto é, um processo de *ionização* fará com que elétrons de valência absorvam energia suficiente para deixar o átomo de origem. Esses portadores adicionais poderão, então, auxiliar no processo de ionização até que se estabeleça uma alta corrente de *avalanche* e que se determine a região de *ruptura por avalanche*.

*O potencial máximo de polarização reversa que pode ser aplicado antes da entrada na região de ruptura é chamado de tensão de pico inversa (ou simplesmente PIV, do inglês Peak Inverse Voltage) ou tensão de pico reversa (PRV, do inglês Peak Reverse Voltage).*

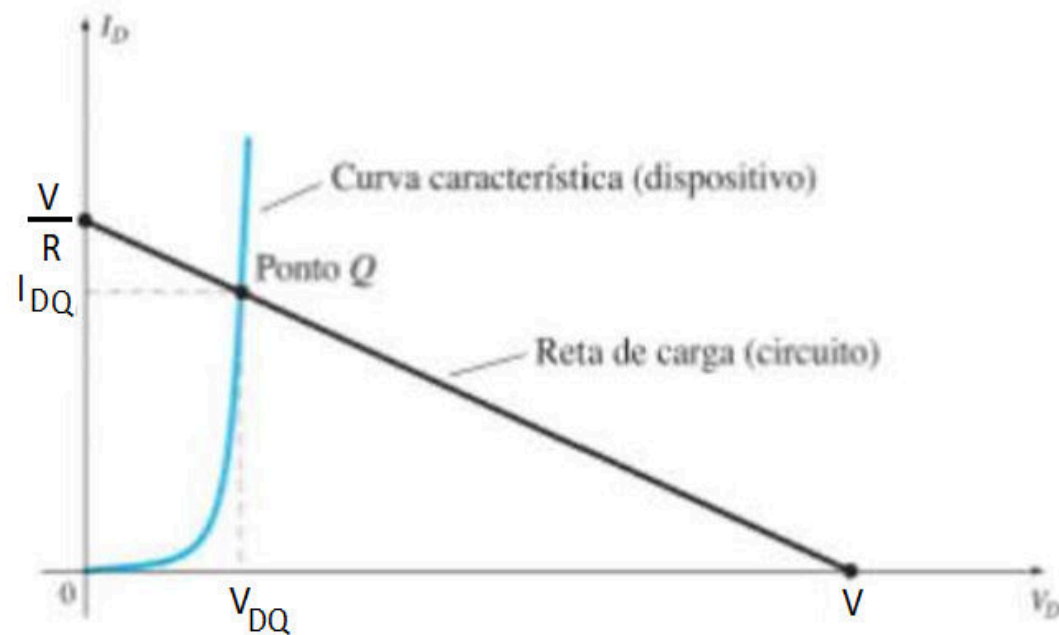
## Análise por reta de carga

Analisar um circuito simples, como o mostrado abaixo, utilizando a curva característica do diodo implica em lidar com uma expressão não linear. Contudo, a análise por reta de carga oferece uma boa aproximação para se obter de forma mais facilitada o *ponto de operação do circuito*, a partir do qual podemos determinar a corrente e a tensão adequadas ao diodo.



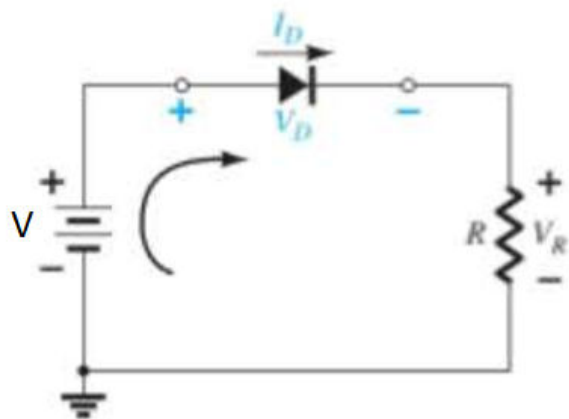
## Análise por reta de carga

A reta de carga é traçada juntamente da curva característica, onde o ponto de interseção, identificado como “Q” (ponto quiescente), indica os valores de tensão e corrente para o funcionamento adequado do circuito.



## Análise por reta de carga

Naturalmente, a curva característica está associada ao dispositivo escolhido, mas a reta de carga está atrelada a cada circuito e os valores dos eixos horizontal e vertical, nos quais a reta intersecciona, precisam ser determinados. Isso é realizado utilizando a regra das malhas de *Kirchhoff*.



$$V - V_D - RI_D = 0 \rightarrow I_D = \frac{V}{R} - \frac{V_D}{R}$$

Com  $V_D = 0$  V:

$$I_D = \frac{V}{R}$$

Com  $I_D = 0$  A:

$$0 = \frac{V}{R} - \frac{V_D}{R} \rightarrow V_D = V$$

