

Semicondutores



Semicondutores

Materiais que apresentam características elétricas intermediárias entre um condutor e um isolante.

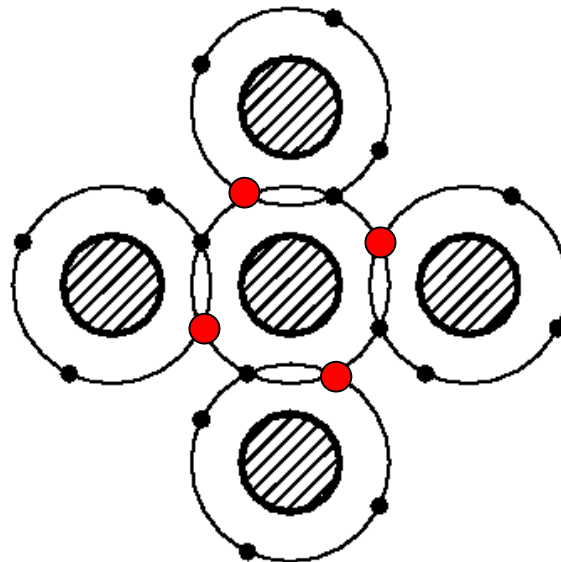
Ex.: Silício e Germânio.

(elementos da coluna 4A da tabela periódica)

Os **materiais semicondutores** são formados por átomos **tetravalentes** (4 elétrons na camada de valência) que formam uma estrutura cristalina através de **ligações covalentes**.

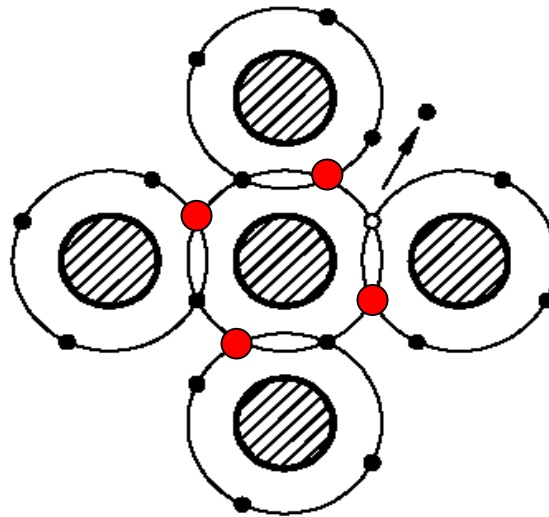
Cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, através de ligações covalentes, e cada um dos quatro **elétrons de valência** de um átomo é **compartilhado com um átomo vizinho**. Dois átomos adjacentes compartilham dois elétrons.

Se nas estruturas com germânio ou silício **não fosse possível romper** a ligações covalentes, elas seriam **materiais isolantes**.



Porém com o **aumento da temperatura** algumas **ligações** covalentes recebem energia suficiente para se **romperem**, criando **elétrons livres**.

No local da camada de valência onde tinha-se um elétron passa-se a ter uma lacuna.



Quando o cristal de silício ou germânio é submetido a uma diferença de potencial, os elétrons livres se movem no sentido do maior potencial elétrico e as lacunas por consequência se movem no sentido contrário ao movimento dos elétrons.

Impurezas:

Os cristais de silício ou germânio são encontrados na natureza misturados com outros elementos, tornando-se **difícil o controle das características destes cristais**.

Dopagem:

Processo de **purificação do cristal** e em seguida é **injetado impurezas** (1 para cada 10 milhões de átomos) através de um processo controlado alterando o número de elétrons livres e lacunas.

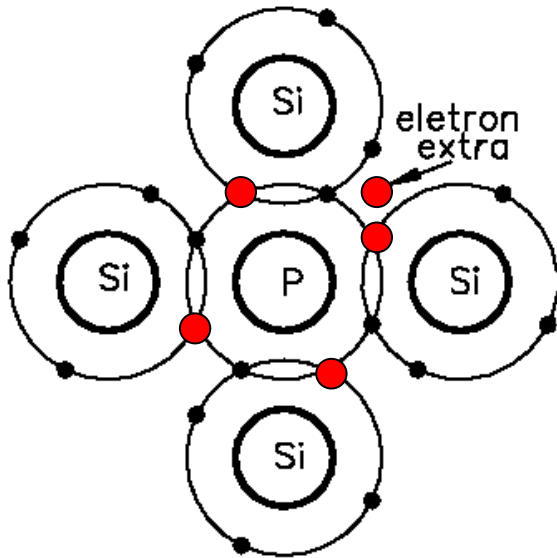
Dopagem:

Impurezas doadoras:

Átomos pentavalentes

(5 elétrons na camada de valência).

Ex.: Fósforo e Antimônio.



Semicondutor tipo N

Elétrons portadores majoritários

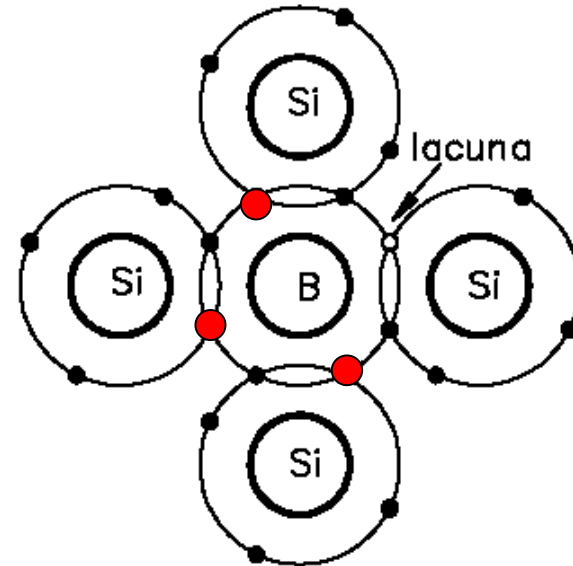
Lacunas portadores minoritários

Impurezas aceitadoras:

Átomos trivalentes

(3 elétrons na camada de valência).

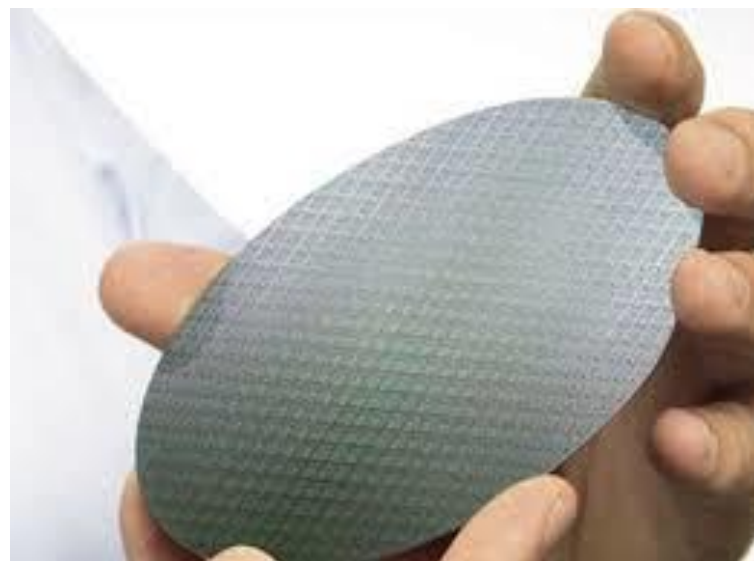
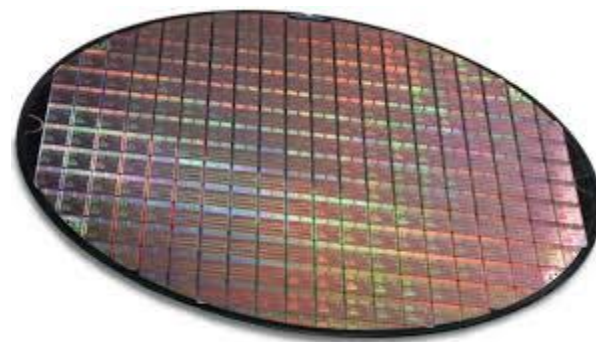
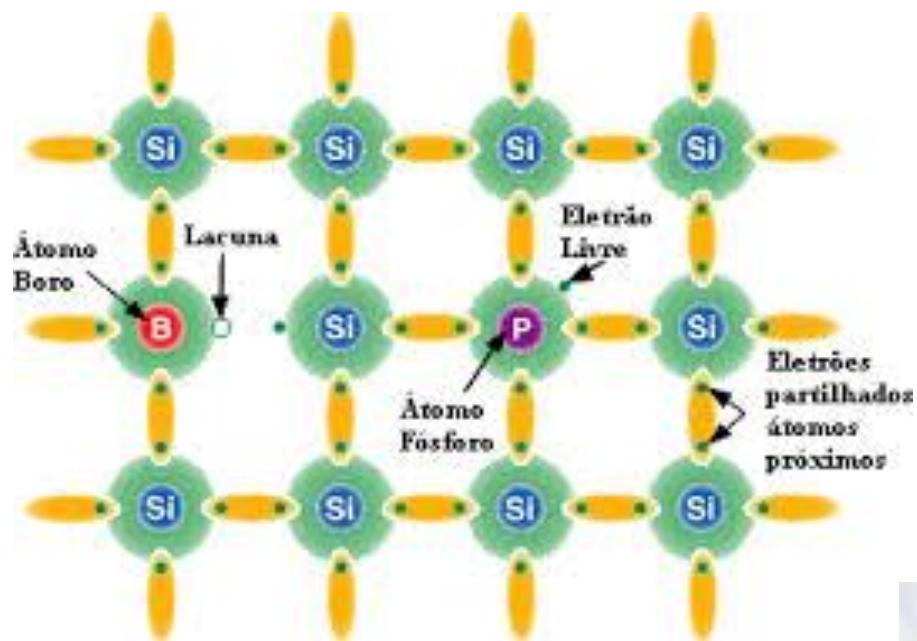
Ex.: Boro, Alumínio e Gálio.



Semicondutor tipo P

Lacunas portadores majoritários

Elétrons portadores minoritários



Número Atômico

1

Peso Atômico

100794

Símbolo Químico

H

Nome do Elemento

Hidrogênio

1A
(1)

2A
(2)

3A
(13)

4A
(14)

5A
(15)

6A
(16)

7A
(17)

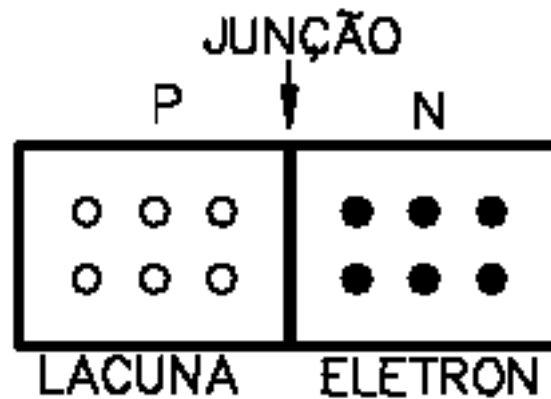
8A
(18)

1 100794 H Hidrogênio	2 4,002602 He Hélio										
3 6,941 Li Lítio	4 9,012182 Be Berílio										
11 22,989770 Na Sódio	12 24,3050 Mg Magnésio	5 10,811 B Boro	6 12,0107 C Carbono	7 14,00674 N Nitrogênio	8 15,9994 O Oxigênio	9 18,99840 F Flúor	10 20,1797 Ne Neônio				
19 39,0983 K Potássio	20 40,078 Ca Cálcio	21 44,9559 Sc Escândio	22 47,867 Ti Titânio	23 50,9415 V Vanádio	24 51,9661 Cr Cromo	25 54,938 Mn Manganês	26 55,845 Fe Ferro	27 58,9332 Co Cobalto	28 58,6934 Ni Níquel	29 63,546 Cu Cobre	30 65,39 Zn Zinco
37 85,4678 Rb Rubídio	38 87,62 Sr Estrôncio	39 88,905 Y Ítrio	40 91,224 Zr Zircônio	41 92,906 Nb Nióbio	42 95,94 Mo Molibdênio	43 96,049 Tc Tecnécio	44 101,07 Ru Rutênio	45 102,9055 Rh Ródio	46 106,42 Pd Paládio	47 107,8682 Ag Prata	48 112,411 Cd Cádmio
55 132,90545 Cs Césio	56 137,327 Ba Bário	57 71 *	72 178,49 Hf Háfnio	73 180,947 Ta Tântalo	74 183,84 W Tungstênio	75 186,207 Re Rênio	76 190,23 Os Ósmio	77 192,217 Ir Iridio	78 195,078 Pt Platina	79 196,966 Au Ouro	80 200,59 Hg Mercúrio
87 223,0197 Fr Frâncio	88 226,02 Ra Rádio	89 103 **	104 261,11 Rf Ruterfórdio	105 262,11 Db Dúbnio	106 263,11 Sg Seabórgio	107 262,12 Bh Bóhrio	108 269 Hs Hássio	109 268 Mt Meiteneóio	110 269 Uun Unúnio	111 272 Uuu Unúmbio	112 277 Uub Anúmbio

Diodo Semicondutor de Junção:

União do cristal tipo P com tipo N → Junção PN

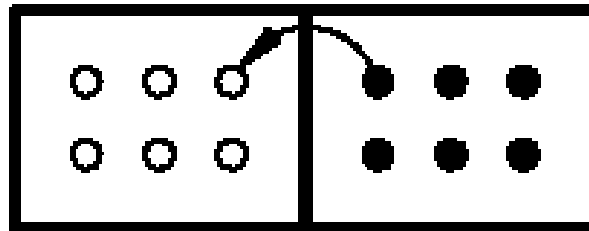
Dispositivo de estado sólido → **Diodo de junção**



Diodo Semicondutor de Junção:

Devido a repulsão mútua, os elétrons livres do lado n espalham-se em todas direções, alguns atravessam a junção e se combinam com as lacunas.

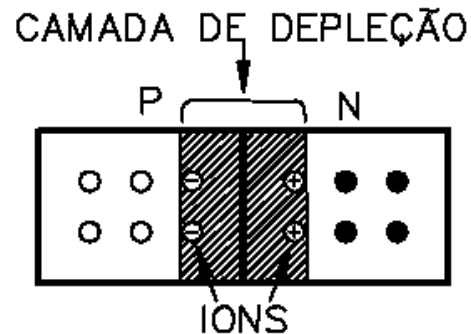
Quando isto ocorre, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente (um íon negativo).



Diodo Semicondutor de Junção:

Cada elétron que atravessa a junção cria um **par de íons**.

A medida que o número de íons aumenta, a região próxima à junção fica sem elétrons livres e lacunas.

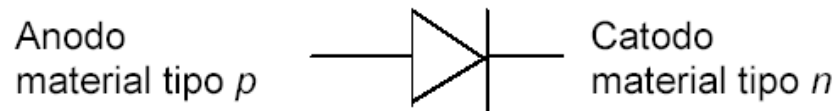
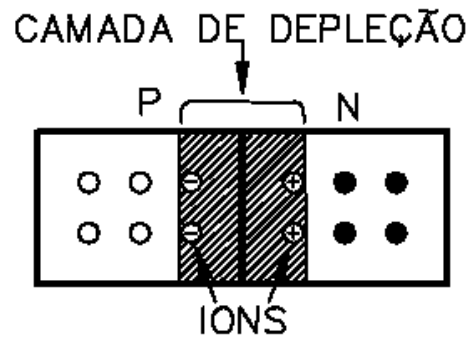


Camada de depleção: barreira que impede a difusão de elétrons livres. Ela **aumenta até atingir o equilíbrio**.

Diodo Semicondutor de Junção:

A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada de barreira de potencial.

A **25°C**, esta barreira é de **0,7V** para o **silício** e **0,3V** para o **germânio**.



Polarização do Diodo

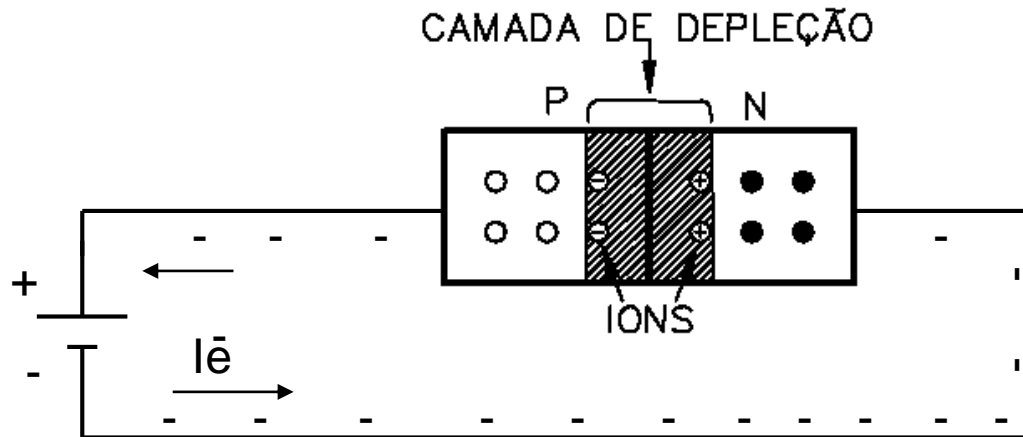
Polarização Direta:

Pólo **positivo** da bateria ligado ao material tipo **P** e pólo **negativo** ao terminal tipo **N**.

No material tipo **N** os elétrons são **repelidos** pelo terminal da **bateria** e **empurrado** para a **junção**.

No material tipo **P** as lacunas também são **repelidas** pelo terminal e tendem a **penetrar na junção**, e isto **diminui a camada de depleção**.

Para haver **fluxo** livre de **elétrons** a **tensão da bateria** tem de **sobrepujar** o efeito da **camada de depleção**.



Polarização do Diodo

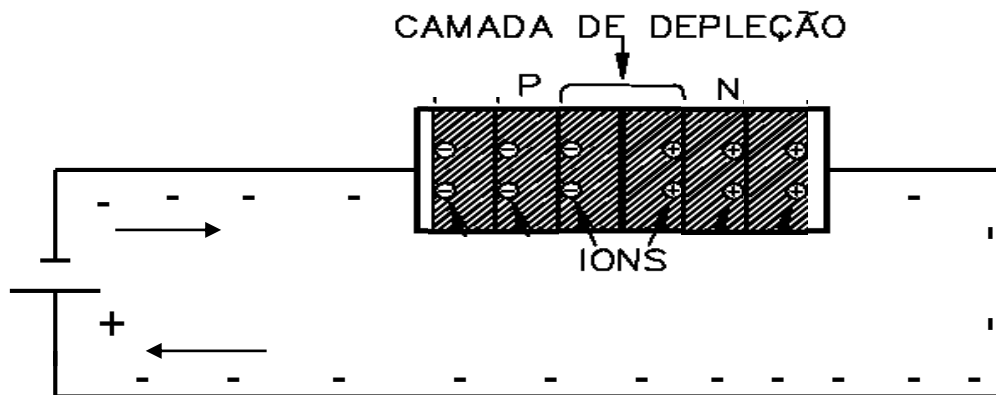
Polarização Reversa:

Pólo **positivo** da bateria ligado ao material tipo **N** e pólo **negativo** ao terminal tipo **P**.

No material tipo **N** os elétrons são **atraídos** para o terminal **positivo**, **afastando-se da junção**.

No material tipo **P** as lacunas também são **atraídas pelo terminal** e tendem a se **afastar da junção**.

Podemos dizer que a bateria **aumenta a camada de depleção**, tornando praticamente **impossível o deslocamento de elétrons** de uma camada para outra.



Polarização Reversa:

Corrente de portadores minoritários:

Existe uma pequena corrente de polarização reversa devido a pares de elétrons livres e lacunas que são gerados por energia térmica (portadores minoritários = corrente de saturação I_s).

A corrente de saturação é dependente da temperatura e não depende da tensão de polarização reversa.

$I_s \rightarrow$ portadores minoritários.

Maior T maior I_s .

I_s Silício < I_s Germânio

Polarização Reversa:

Corrente de Fuga da Superfície:

Além da corrente de saturação gerada termicamente, existe uma corrente que circula pela superfície do cristal, chamada de corrente de fuga.

O motivo desta corrente é devido as impurezas na superfície do cristal e imperfeições da estrutura do cristal.

Esta corrente depende da tensão aplicada ao diodo.

Polarização Reversa:

Existe uma corrente reversa em um diodo formada pela corrente de portadores minoritários (proporcional a temperatura) e por uma corrente de fuga superficial (proporcional a tensão reversa).

Esta corrente é muito pequena podendo considerar que em um diodo reversamente polarizado a corrente é zero.

Polarização Reversa:

Tensão de Ruptura:

Existe um valor máximo de tensão reversa que um diodo pode suportar antes de ser destruído.

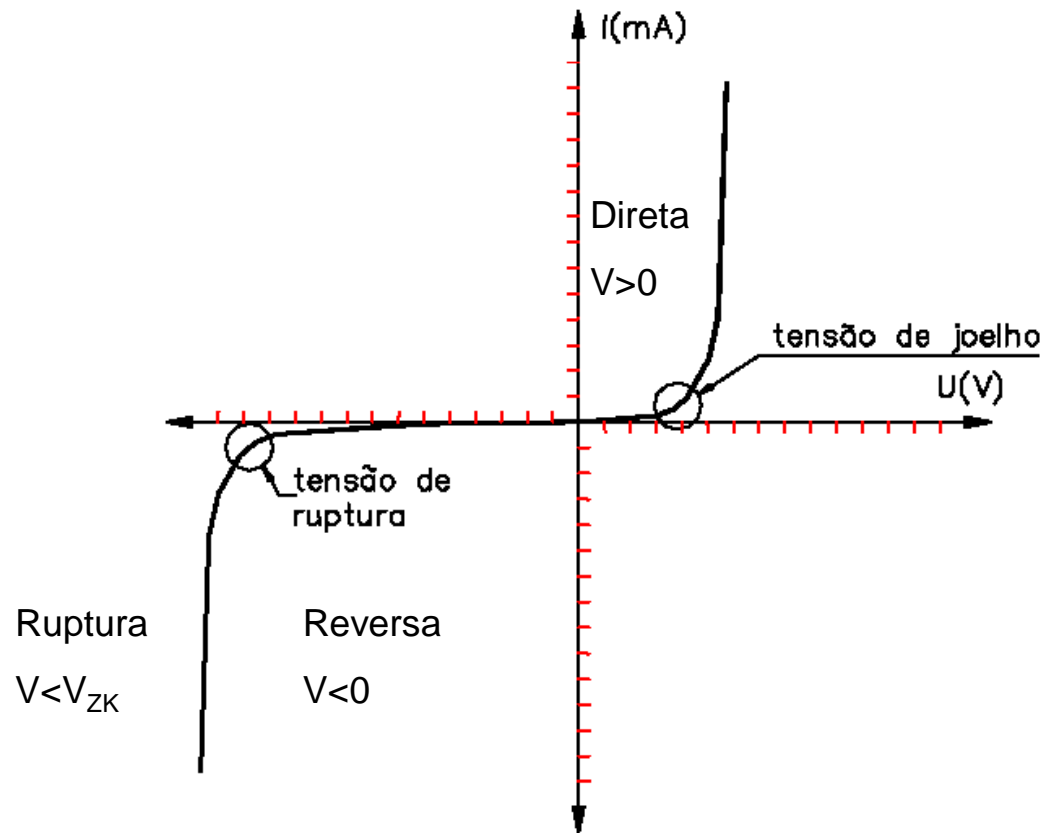
Efeito Avalanche:

Atingindo-se a tensão de ruptura, um grande número de portadores minoritários aparece repentinamente na camada de depleção e o diodo conduz fortemente.

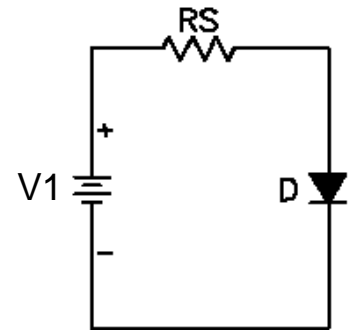
Aumentando-se a tensão reversa existe um aceleração dos portadores minoritários que colidem com os átomos de cristais liberando elétrons de valência (elétrons livres). Este processo é geométrico (efeito avalanche) aumentando muito o número de portadores minoritários e o diodo conduz intensamente.

A tensão de ruptura de um diodo depende do nível de dopagem.

Curva característica de um diodo:



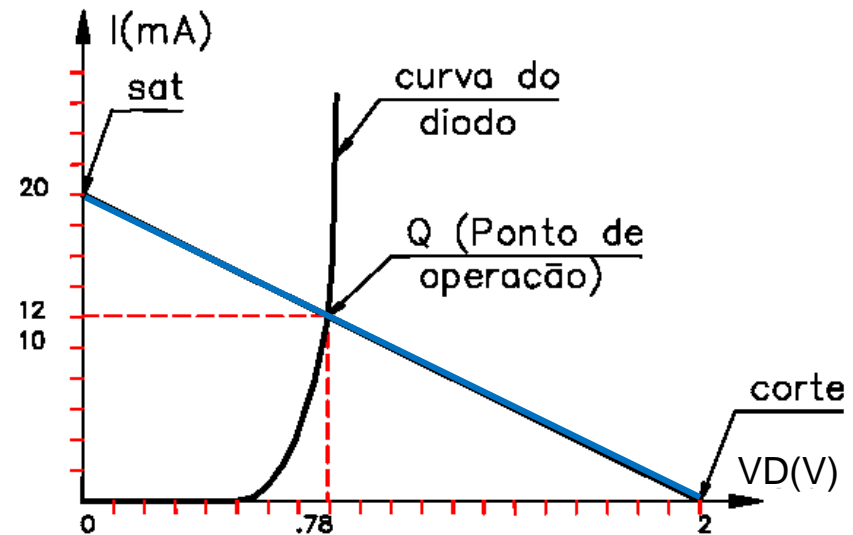
Reta de carga:



$$I = \frac{V_{R_S}}{R_S} = \frac{V1 - V_D}{R_S}$$

Considerando-se:
 $V1 = 2V$ e $R_S = 100\Omega$

$$I = \frac{2 - V_D}{100} = -0,01 \cdot V_D + 20mA$$



Análise Gráfica

Obtenção dos pontos da reta de carga:

Se $V_D = 0V \rightarrow I = 20mA$ (Saturação)

E se $I = 0A \rightarrow V_D = 2V$ (Corte)

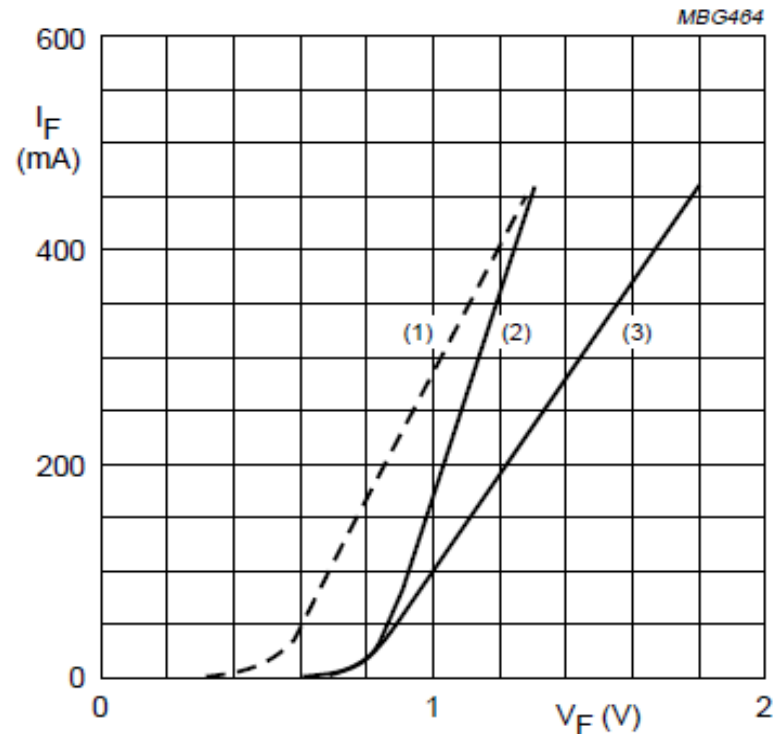
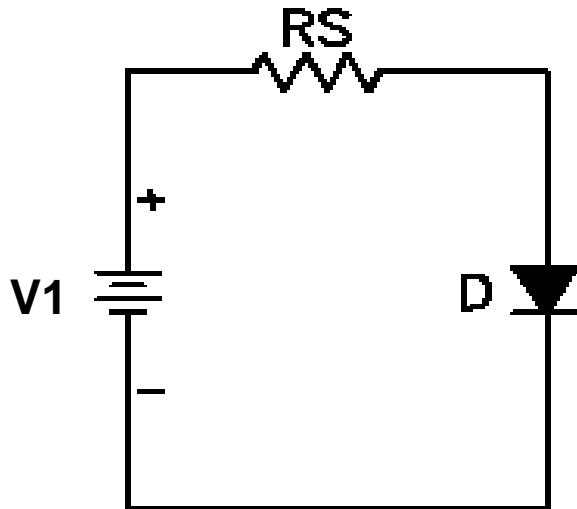
($I = 0A, V = 2V$) - Ponto de corte \Rightarrow Corrente mínima do circuito

($I = 20mA, V = 0V$) - Ponto de saturação \Rightarrow Corrente máxima do circuito

($I = 12mA, V = 0,78V$) - Ponto de operação ou quiescente \Rightarrow Representa a corrente através do diodo e do resistor. Sobre o diodo existe uma tensão de 0,78V.

Exercício Reta de Carga

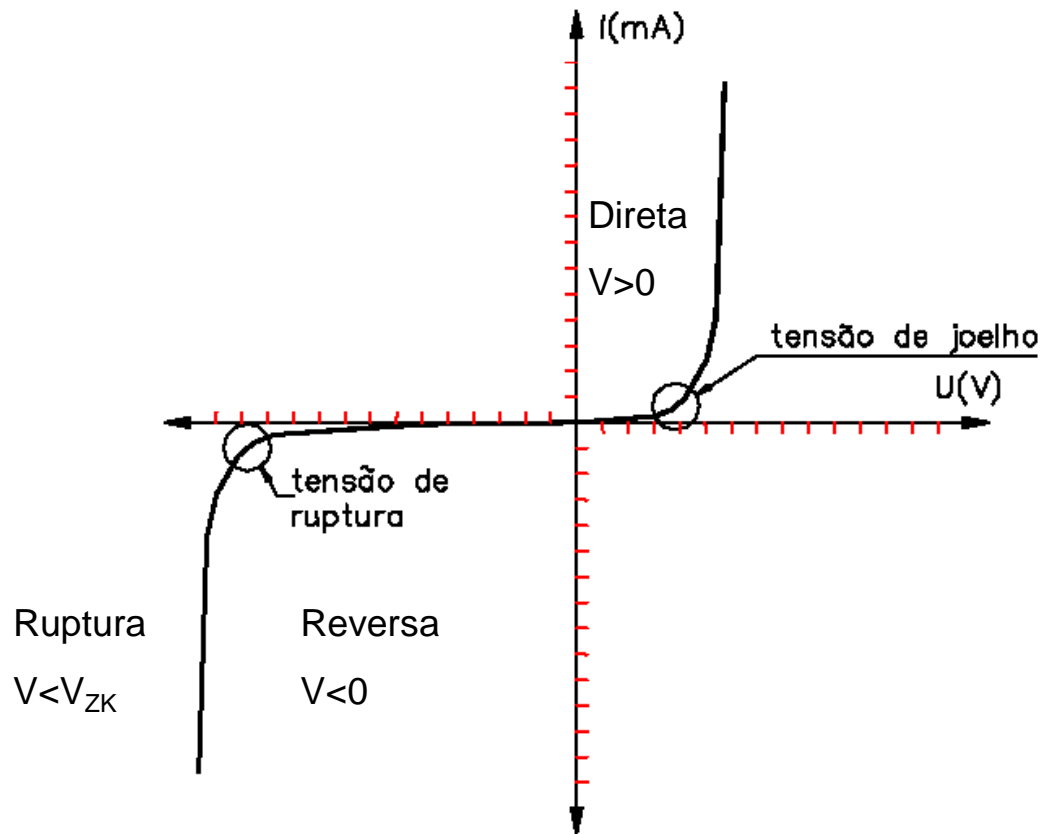
Exercício 01 – Para o circuito abaixo, considerando $V_1 = 1,8V$ e $R_s = 3\ \Omega$, determine a tensão e corrente no diodo D para temperatura $T_j = 25^\circ C$ máximo valor (curva 3).



- (1) $T_j = 175\ ^\circ C$; typical values.
- (2) $T_j = 25\ ^\circ C$; typical values.
- (3) $T_j = 25\ ^\circ C$; maximum values.

Fig.3 Forward current as a function of forward voltage.

Características Terminais dos Diodos de Junção.



Região de Polarização Direta

Relação i-v aproximada (solução analítica):

$$i = I_S \cdot \left(e^{\frac{v}{n \cdot V_T}} - 1 \right)$$

Modelo Exponencial

I_S

- Corrente de saturação;
- Constante para um dado diodo em uma certa temperatura;
- Corrente de escala → diretamente proporcional à área da seção transversal do diodo;
- Diodo de Sinal → $I_S = 10^{-15}\text{A}$;
- I_S é dependente da temperatura → I_S dobra a cada 5C.

Região de Polarização Direta

Relação i-v aproximada:

$$i = I_s \cdot \left(e^{\frac{v}{n V_T}} - 1 \right)$$

V_T

- Constante chamada Tensão Térmica;

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

$k \rightarrow$ constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ Joule/Kelvin;

$T \rightarrow$ temperatura absoluta em Kelvin = $273 + TC$;

$Q \rightarrow$ o valor da carga do elétron = $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb.

A temperatura ambiente (20C) $\rightarrow V_T = 25,2\text{mV}$.

Região de Polarização Direta

Relação i-v aproximada:

$$i = I_s \cdot \left(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1 \right)$$

n

- Valor entre 1 e 2;
- Depende do material e da estrutura física do diodo;
- Diodos integrados $n=1$;
- Diodos discretos $n=2$.

Região de Polarização Direta

Para valores de $i \gg I_s$ pode-se usar a eq. aproximada.

$$i \cong I_s \cdot e^{\frac{v}{n \cdot V_T}}$$

Representação na forma logarítmica:

$$v = n \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{i}{I_s} \right)$$

Região de Polarização Direta

Considerando V_1 e I_1 tem-se:

$$I_1 = I_s \cdot e^{\frac{V_1}{n \cdot V_T}}$$

Considerando V_2 e I_2 tem-se:

$$I_2 = I_s \cdot e^{\frac{V_2}{n \cdot V_T}}$$

Portanto:

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{\frac{V_2 - V_1}{n \cdot V_T}}$$

Região de Polarização Direta

$$V_2 - V_1 = n \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

Em Log:

$$V_2 - V_1 = 2,3 \cdot n \cdot V_T \cdot \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

Se variarmos em 1 década (10x) a corrente no diodo:

→ a queda de tensão varia no fator de $2,3 \cdot n \cdot V_T$;

→ $\cong 60\text{mV}$ para $n=1$

→ $\cong 120\text{mV}$ para $n = 2$

Região de Polarização Reversa

$$i \cong -I_S$$

Exemplo 01:

Solução Analítica

Em um experimento com diodo, foi medido uma tensão V_D de 0.68V para uma corrente I_D de 10mA. Considere que o experimento foi realizado à temperatura ambiente de 25°C ($V_T=25\text{mV}$) e utilizado um diodo discreto ($n=2$). Usando o modelo exponencial do diodo, determine:

- A corrente no diodo para uma queda de tensão no diodo de 0.80V:
- A queda de tensão no diodo para uma corrente de 1A.

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}}$$

$$I_S = \frac{I_{D1}}{e^{\frac{V_{D1}}{n \cdot V_T}}} = \frac{10 \text{ m}}{e^{\frac{0.68}{2 \cdot 25 \text{ m}}}} \Rightarrow I_S = 12,4 \text{ nA}$$

$$I_{D2} = I_S \cdot e^{\frac{V_{D2}}{n \cdot V_T}} = 12,4 \text{ n} \cdot e^{\frac{0,8}{2 \cdot 25 \text{ m}}} = 110,23 \text{ mA}$$

$$v = n \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{i}{I_S}\right) \Rightarrow V_{D2} = n \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_S}\right) = 2 \cdot 25 \text{ m} \cdot \ln\left(\frac{1}{12,4 \text{ n}}\right) = 0,91 \text{ V}$$

Exemplo 02: Solução Analítica

Determinar os valores da corrente I_D e da tensão V_D para o circuito abaixo:

Considere que a corrente do diodo é de 1mA para uma queda de tensão de 0,7V.

$$V_1 = 0,7V$$

$$I_1 = 1mA$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0,7}{1000} = 4,3mA = I_2$$

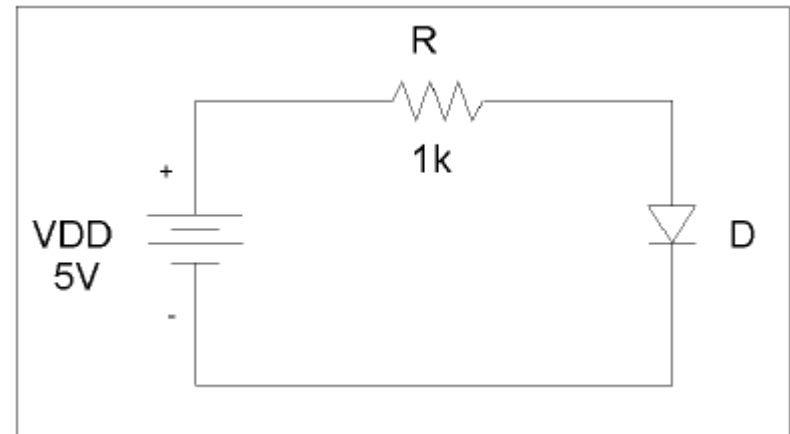
$$V_2 - V_1 = 2,3 \cdot n \cdot V_T \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

$$n = 2$$

$$V_T = 25mV$$

$$V_2 = V_1 + 0,115 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

$$V_2 = 0,7 + 0,115 \cdot \log\left(\frac{4,3}{1}\right) = 0,773V$$



$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0,773}{1000} = 4,227mA = I_2$$

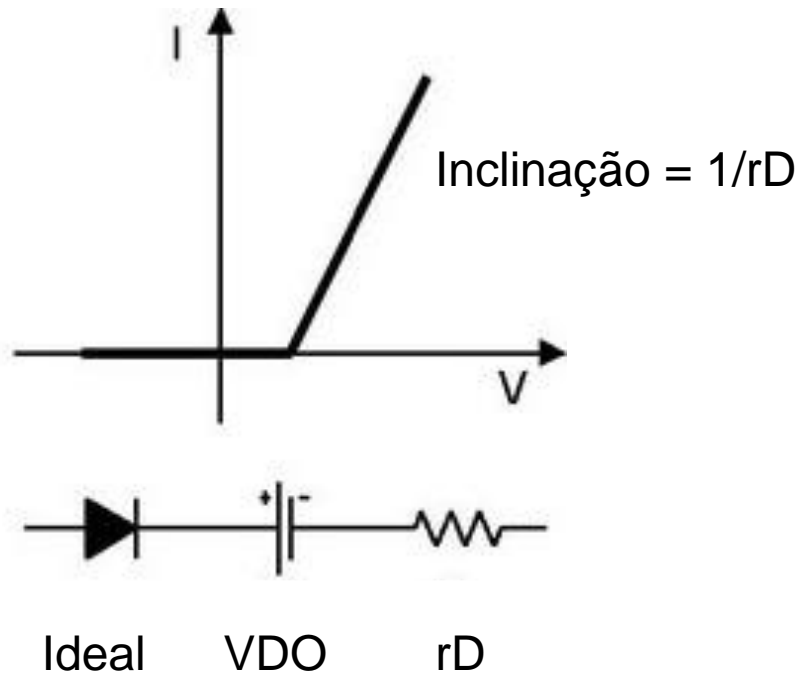
$$V_2 = 0,773 + 0,115 \cdot \log\left(\frac{4,227}{4,3}\right) = 0,772V$$

$$V_D = 0,772V$$

$$I_D = 4,227mA$$

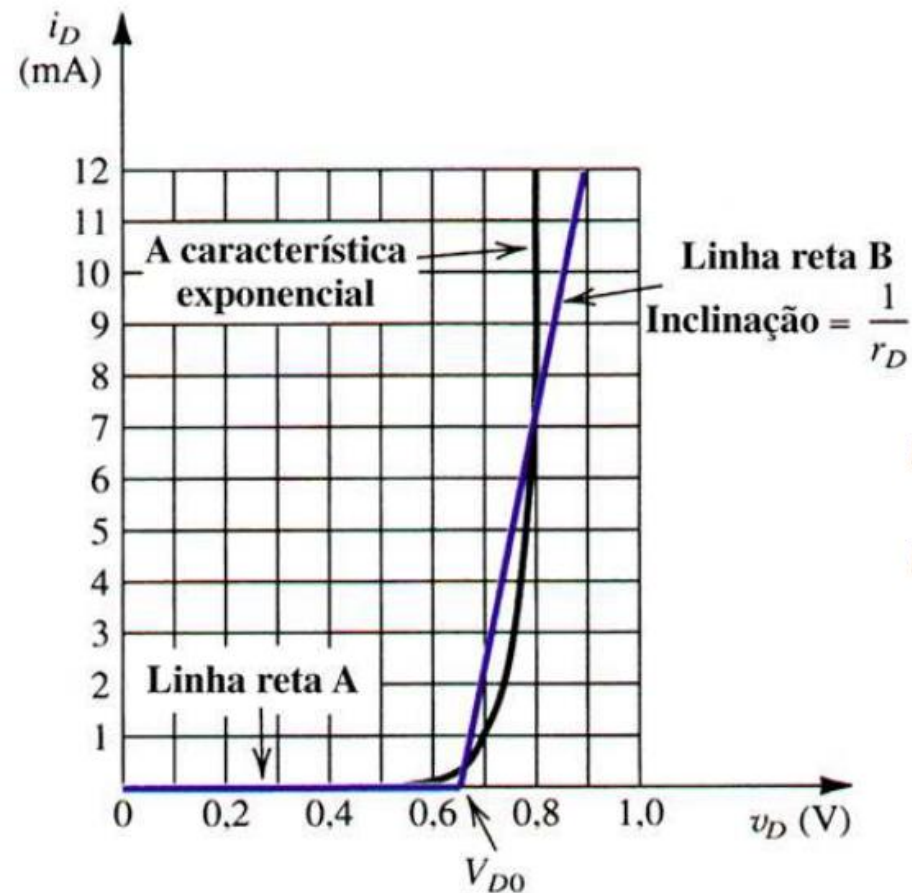
Modelo Segmento de Reta

(bateria mais resistência)



Modelo Segmento de Reta

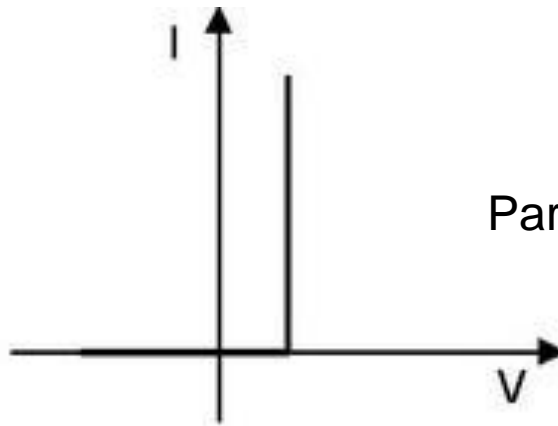
(bateria mais resistência)



$$i_D = 0, \quad v_D \leq V_{D0}$$

$$i_D = (v_D - V_{D0})/r_D, \quad v_D \geq V_{D0}$$

Modelo Queda de Tensão Constante (bateria de 0,7V)

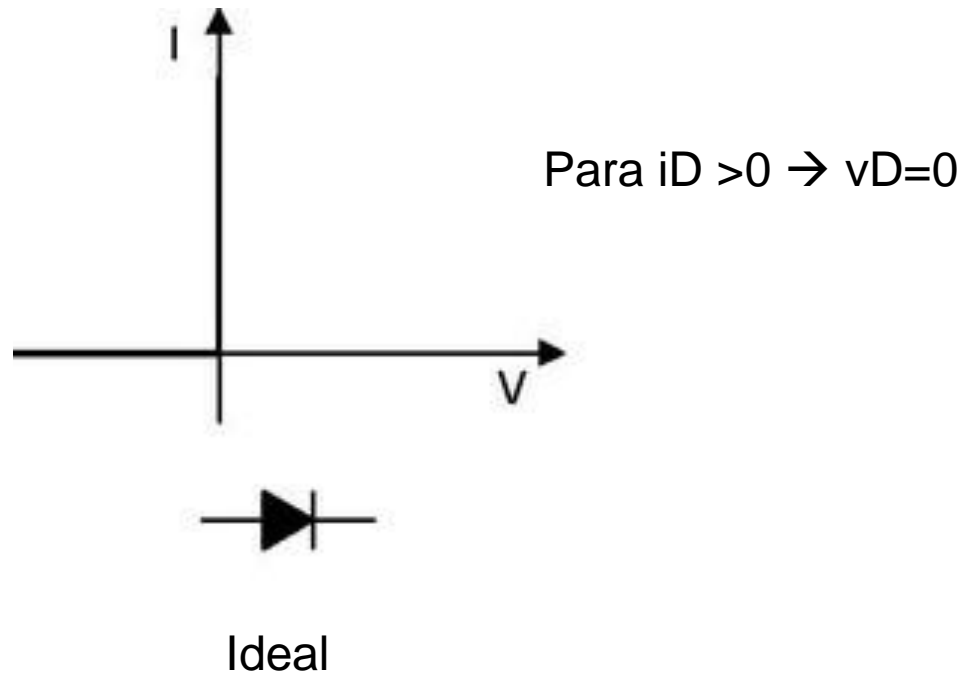


Para $i_D > 0 \rightarrow v_D = 0.7V$



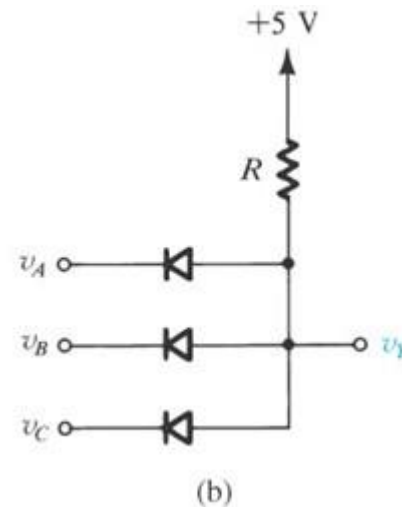
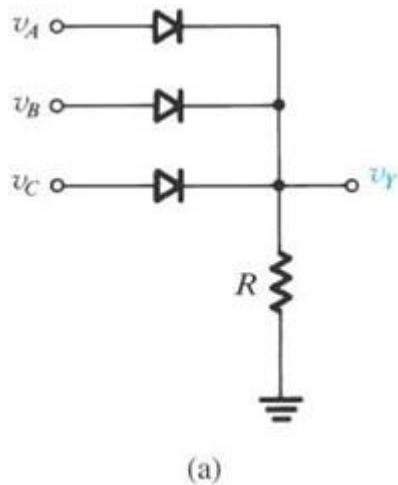
Ideal $V_D = 0.7V$

Modelo Diodo Ideal

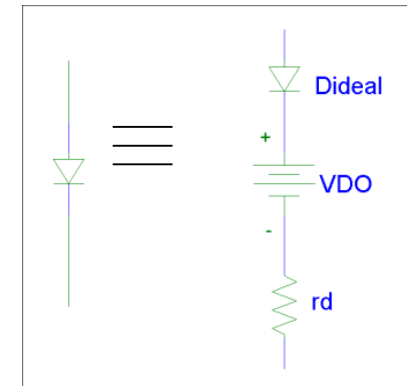
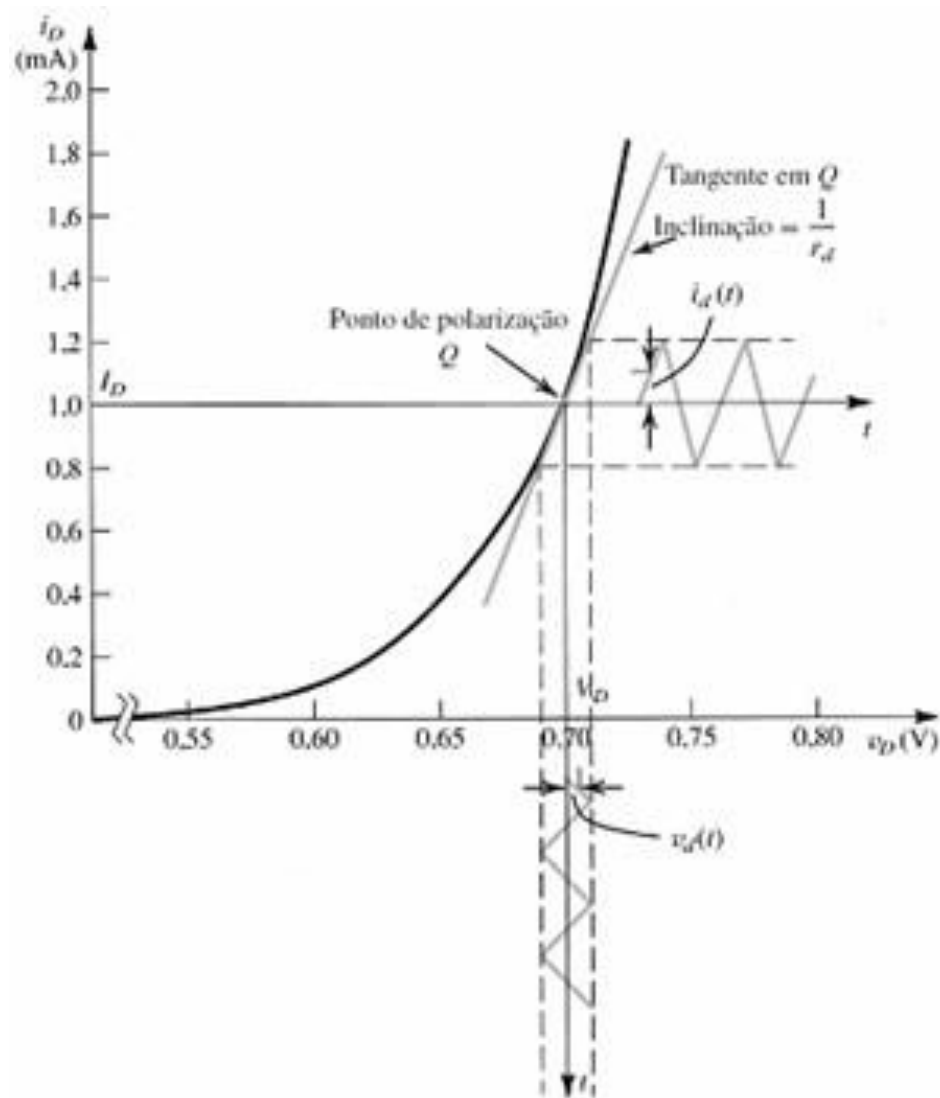


Modelo Diodo Ideal

Exemplo: Considerando o modelo de diodo ideal, analise os circuitos abaixo e identifique que função lógica eles realizam. Considere: 0V \rightarrow Lógica “0” e 5V \rightarrow Lógica “1”.



Modelo Pequenos Sinais



Modelo de pequenos sinais:

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}}$$

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

$$i_D(t) = I_S \cdot e^{\frac{v_D}{n \cdot V_T}}$$

$$i_D(t) = I_S \cdot e^{\frac{V_D + v_d}{n \cdot V_T}}$$

$$i_D(t) = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T}} \cdot e^{\frac{v_d}{n \cdot V_T}}$$

$$i_D(t) = I_D \cdot e^{\frac{v_d}{n \cdot V_T}}$$

$v_d(t)$ muito pequeno

$$\frac{v_d}{n \cdot V_T} \ll 1$$

Expandindo pela série de MacLaurin e truncando no segundo termo, tem-se:

$$i_D(t) \cong I_D \left(1 + \frac{v_d}{n \cdot V_T} \right)$$

Valida para sinais com amplitude menores que 10mV

Modelo de pequenos sinais:

$$i_D(t) \cong I_D \left(1 + \frac{v_d}{n \cdot V_T} \right)$$

$$i_D(t) = I_D + I_D \cdot \frac{v_d}{n \cdot V_T}$$

$$i_D(t) = I_D + i_d$$

Condutância do diodo em pequeno sinal

$$i_d = \frac{I_D}{n \cdot V_T} \cdot v_d$$

$$r_d = \frac{n \cdot V_T}{I_D}$$

Resistência do diodo em pequeno sinal.

Resistência dinâmica.

Exemplo Modelo de pequenos sinais:

O circuito abaixo possui uma fonte CC de 10V com uma ondulação de pico de 1V/60Hz senoidal. Inicialmente foi medido uma tensão sobre o diodo $V_D = 0,7V$. Considerando o modelo de pequenos sinais do diodo calcule a variação da tensão sobre o diodo provocada pela variação de $\pm 1V$ da tensão de entrada.

$$I_D = \frac{V_1 - V_D}{R} = \frac{10 - 0,7}{1000} = 9,3mA$$

$$r_d = \frac{n \cdot V_T}{I_D} = \frac{2 \cdot 0,025}{0,0093} = 5,37 \Omega$$

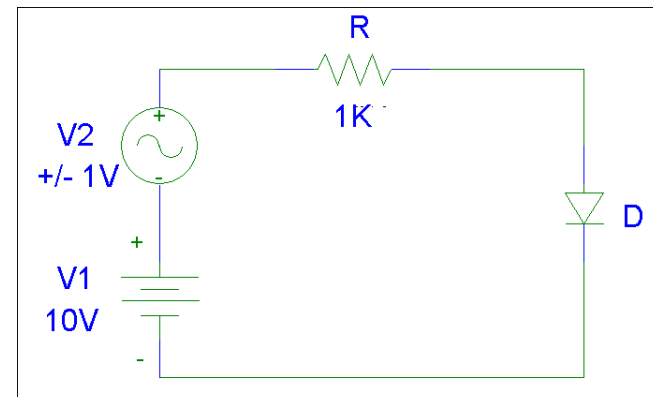
$$V_D = V_{DO} + I_D \cdot r_d$$

$$V_{DO} = V_D - I_D \cdot r_d = 0,7 - 0,0093 \cdot 5,37 = 0,65V$$

$$i_d = \frac{V_2}{R + r_d} = \frac{1}{1000 + 5,37} = 994,6 \mu A$$

$$v_d = \pm i_d \cdot r_d = \pm 5,34 mV$$

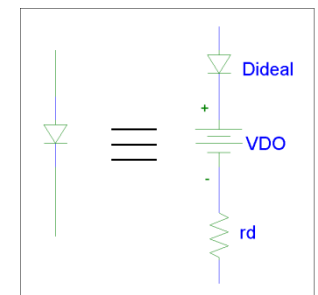
$$V_D = 0,69466 V \rightarrow 0,70534 V$$



$$v_D = V_{DO} + r_d \cdot (I_D + i_d)$$

$$V_D = V_{DO} + I_D \cdot r_d$$

$$v_d = i_d \cdot r_d$$

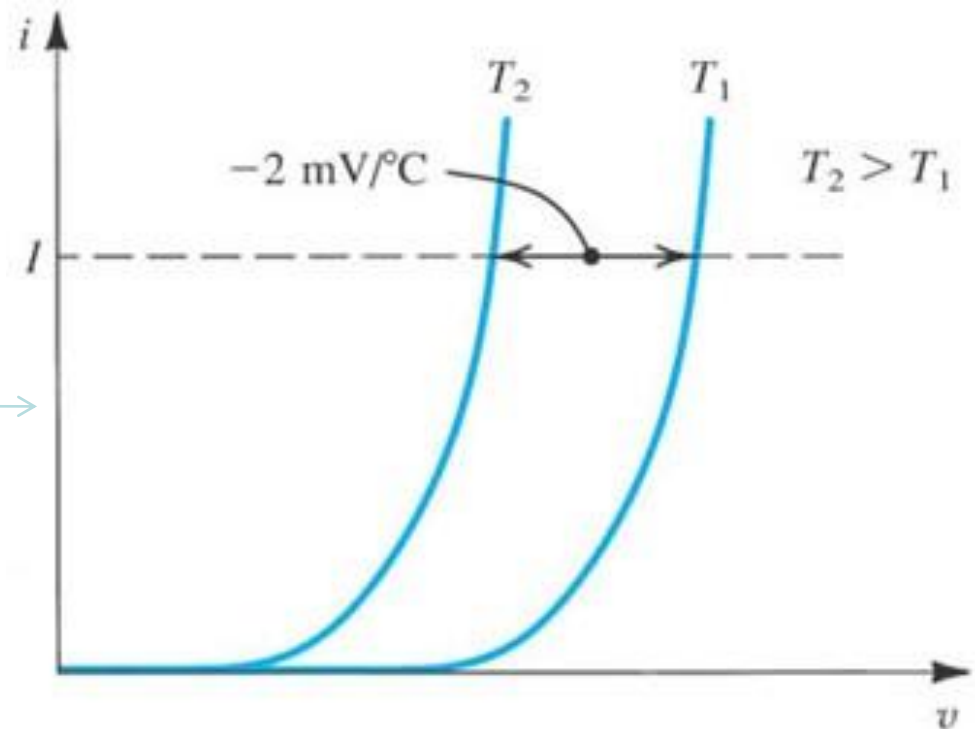


Característica i-v com a temperatura:

Para uma corrente constante no diodo → a queda de tensão em seus terminais decresce de aproximadamente 2mV para cada aumento de 1°C na temperatura.

$$i = I_S \cdot \left(e^{\frac{v}{n \cdot V_T}} - 1 \right)$$

O valor de I_S e V_T dependem da Temperatura.



Bibliografia:

- [1] MALVINO, Albert Paul, ***Eletrônica***. v. 1. Ed. McGraw Hill: São Paulo, 2001.
- [2] BOYLESTAD, R. L. e NASHELSKY, L., ***Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos***. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- [3] SEDRA, A. S. e Smith, K. C., ***Microeletrônica***. 5. ed. São Paula: Pearson Prentice Hall, 2007.