



1	
2	
3	
4	
5	

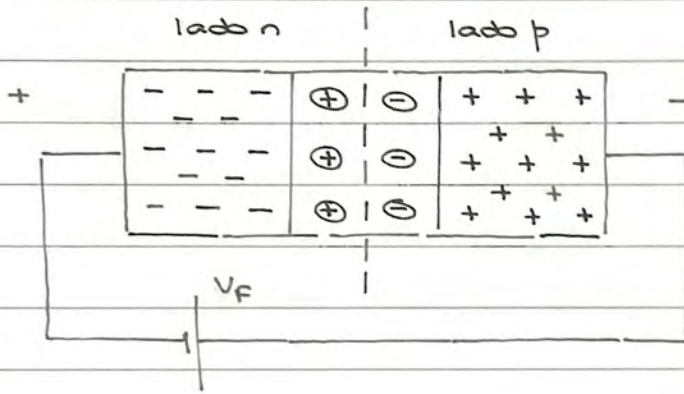
Aluno(a): Aula Teórica #3

Disciplina: EEL315 — Eletrônica I

Turma:

Professor(a): José Gabriel

1.2.3 Junção pn em Polarização Direta



$$V_0 = V_T \ln \left( \frac{p_p / p_n}{1} \right) \quad (V_T = 26 \text{ mV @ } T = 300 \text{ K})$$

$$p_{n,e} = \frac{p_{p,e}}{\exp(V_0 / V_T)}$$

(equilíbrio)

Se  $V_F \neq 0$ , então a barreira de potencial é reduzida de  $V_0$  para  $V_0 - V_F$ :

$$p_{n,f} = \frac{p_{p,f}}{\exp \left( \frac{V_0 - V_F}{V_T} \right)}$$

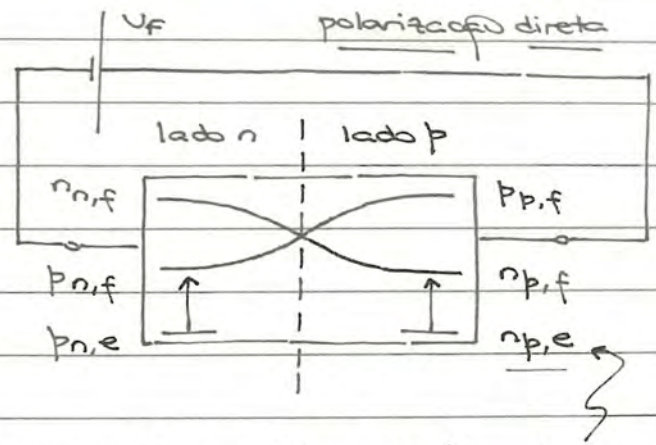
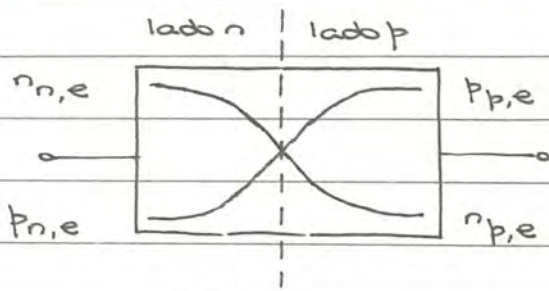
(forward)

A concentração de portadores majoritários fica praticamente constante ( $p_{p,f} \approx p_{p,e} \approx N_A$ ) (isso não é provado aqui). A concentração de portadores minoritários aumenta muito (aumenta exponencialmente) com  $V_F$ .

Então:  $p_{n,f} \gg p_{n,e}$

(Obs.: esses comentários também valem para os portadores tipo n (elétrons):  
 $n_{n,f} \approx n_{n,e} \approx N_D$  e  $n_{p,f} \gg n_{p,e}$ )

equilíbrio



Por causa de  $V_f$ , as concentrações  $n_p$  e  $p_n$

(Obs.: no livro, está escrito " $n_{p,f}$ " aqui. O correto é " $n_{p,e}$ " mesmo.)

aumentam muito. No caso de  $p_n$

(lacunas no lado n), temos:

$$\Delta p_n \triangleq p_{n,f} - p_{n,e} \Rightarrow \Delta p_n \approx \frac{N_A}{\exp(V_0/V_T)} \left( \exp\left(\frac{V_f}{V_T}\right) - 1 \right)$$

E no caso dos elétrons no lado p:  $\Delta n_p \approx \frac{N_D}{\exp(V_0/V_T)} \left( \exp\left(\frac{V_f}{V_T}\right) - 1 \right)$

Os aumentos nas concentrações de portadores minoritários indicam que as correntes de difusão devem aumentar, proporcionalmente, muito:

$$I_{total} \propto (\Delta p_n + \Delta n_p)$$

Pode-se mostrar que:

$$I_{total} = I_S \left( \exp\left(\frac{V_f}{V_T}\right) - 1 \right) \quad \text{onde}$$

$$I_S = A q n_i^2 \left( \frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right) \quad \text{se chama "corrente de saturação reversa".}$$

As constantes  $L_n$  e  $L_p$  (dezenas de  $\mu m$ ) se chamam "comprimentos de difusão" de elétrons e lacunas.

Exemplo:  $N_A = 2 \times 10^{16} / cm^3$  e  $N_D = 4 \times 10^{16} / cm^3$ ;  $T = 300 K$ ;

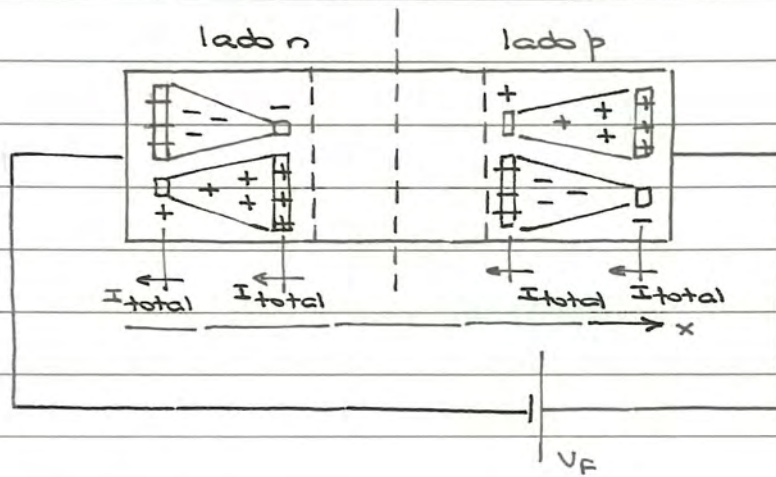
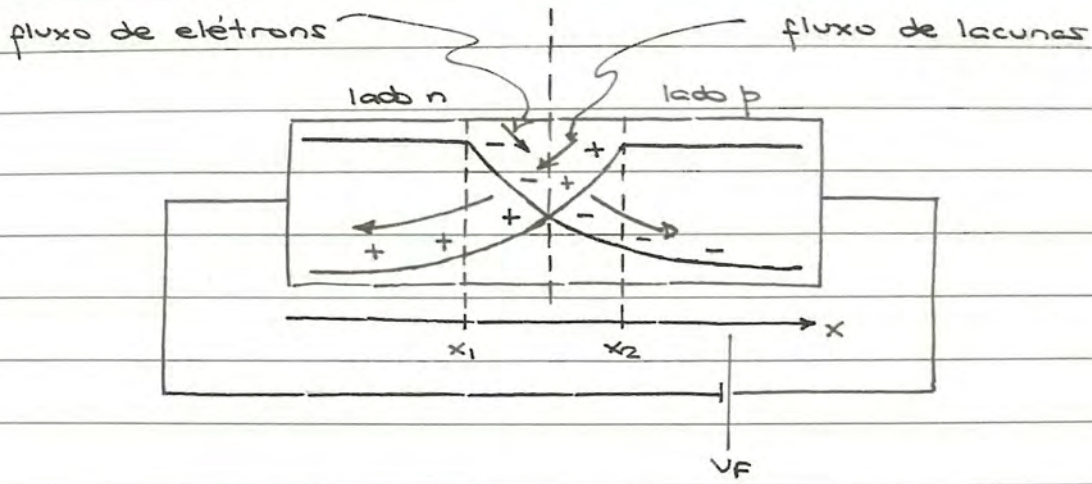
$A = 100 \mu m^2$ ;  $L_n = 20 \mu m$  e  $L_p = 30 \mu m$

(e valores de  $q$ ,  $n_i$ ,  $D_n$  e  $D_p$  dados anteriormente)

Então:  $I_S = 1.77 \times 10^{-17} A$

Concentrações de portadores minoritários ao longo do eixo x: essas concentrações variam, conforme é mostrado na figura a seguir, de modo que as correntes de difusão possam ocorrer fora da região de depleção:

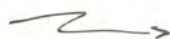




- Se a concentração de portadores minoritários varia ao longo do eixo  $x$  (por causa da recombinação) e a corrente  $I_{total}$  é constante, então nas vizinhanças imediatas da região de depleção a corrente é composta por portadores minoritários.
- Perto dos contatos, a corrente é composta por portadores majoritários.

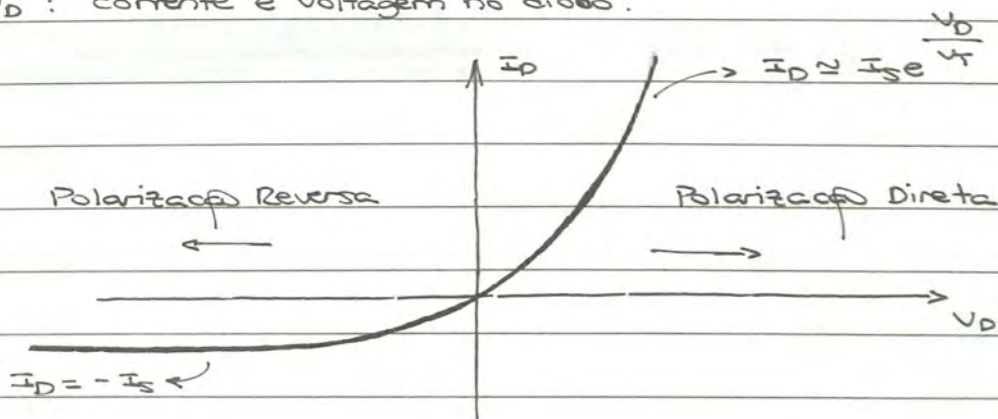
#### 1.2.4 Características $I/V$ : ("corrente versus tensão")

$$I_{total} = I_s \left( \exp\left(\frac{V_F}{V_T}\right) - 1 \right)$$



$$I_D = I_s \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$I_D$  e  $V_D$ : corrente e voltagem no diodo.



Exemplo: considere dois diodos conectados em paralelo, com  $I_S = 1.77 \times 10^{-17} \text{ A}$ , e  $T = 300 \text{ K}$ .

Se  $V_D = 300 \text{ mV}$ , então  $I_D = 2 I_S \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) = 3.63 \text{ pA}$

E se  $V_D = 800 \text{ mV}$ , então  $I_D = 82 \text{ } \mu\text{A}$

Exemplo: se  $I_D \approx I_S \exp(V_D/V_T)$ , então são necessários cerca de 60 mV para multiplicar por 10 a corrente:  $V_D = V_T \ln(I_D/I_S)$

$V_{D1} = V_T \ln(10 I_D/I_S) = V_D + \underbrace{V_T \ln 10}_{60 \text{ mV @ } 300 \text{ K}}$

É costume falar "60 mV/década de variação em  $I_D$ ".

Exemplo: se a área do diodo (isto é, de sua seção transversal) for aumentada por um fator 10, então a mesma corrente (do diodo de área menor) é obtida com um  $V_D$  60 mV mais baixo:

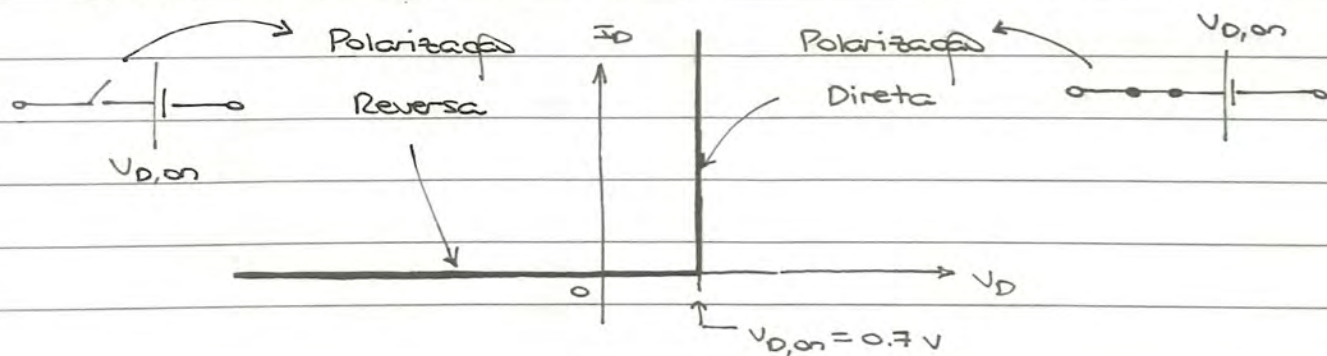
$V_{D1} = V_T \ln\left(\frac{I_D}{10 I_S}\right) = V_D - V_T \ln 10$

Modelo simplificado: voltagem constante:

$(V_D)$

Com níveis típicos de corrente  $I_D$ , temos  $600 \text{ mV} < V_D < 800 \text{ mV}$ . A voltagem do diodo é uma função fraca da corrente e da área. A corrente de saturação reversa ("corrente de vazamento") é desprezada.

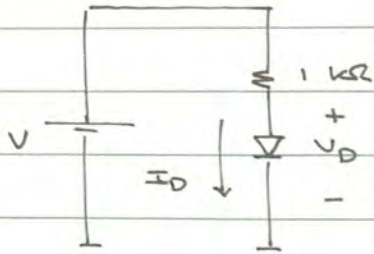
Então:



Estudo da física do dispositivo  $\rightarrow$  Modelo baseado na física  $\rightarrow$  Modelo simplificado  $\rightarrow$  Análise rápida e intuitiva.



Exemplo:



Dois equações:  $V = RI_D + V_D$

$$V_D = V_T \ln(I_D / I_S)$$

(use  $I_S = 10^{-16} \text{ A}$ )

• Se  $V = 3 \text{ V}$ , então  $I_D = ?$

Solução (método "iterativo", isto é, repetitivo):

$V_D = 750 \text{ mV}$  ("chute inicial"):

$$I_D = \frac{V - V_D}{R} = \frac{3 - 0.75}{1000} = 2.25 \text{ mA}$$

$$V_D = V_T \ln(I_D / I_S) = 799 \text{ mV} //$$

$$I_D = \frac{3 - 0.799}{1000} = 2.201 \text{ mA} //$$

• Se  $V = 1 \text{ V}$ , então  $I_D = ?$

Usando o método iterativo de novo:

$$I_D = \frac{V - V_D}{R} = \frac{1 - 0.75}{1000} = 0.25 \text{ mA}$$

$$V_D = V_T \ln(I_D / I_S) = 0.742 \text{ V} //$$

$$I_D = \frac{1 - 0.742}{1000} = 0.258 \text{ mA} //$$

• Se usássemos o modelo de voltagem constante ( $0.8 \text{ V} (*)$ ), obteríamos:

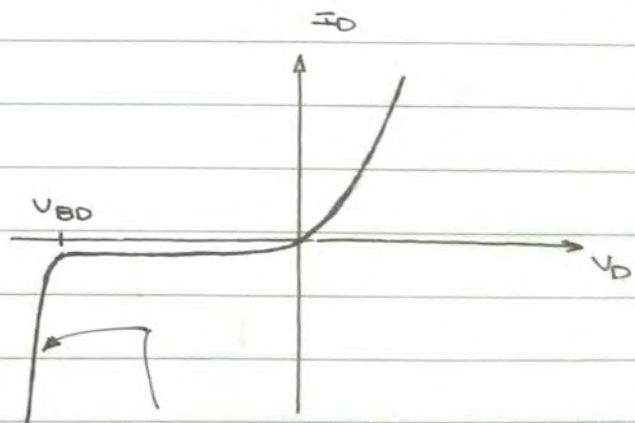
$$I_D = 2.2 \text{ mA}, \text{ se } V = 3 \text{ V.}$$

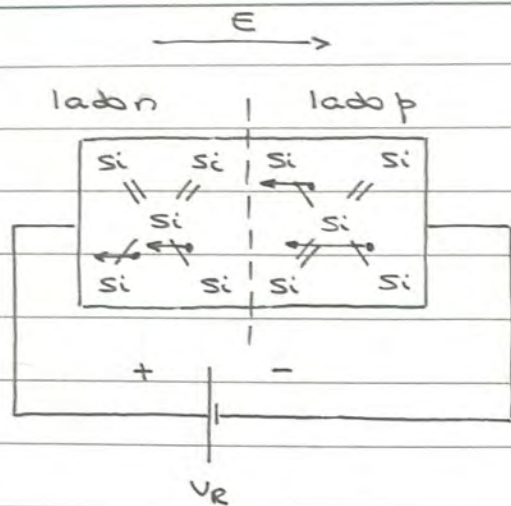
$$I_D = 0.2 \text{ mA}, \text{ se } V = 1 \text{ V.}$$

(\*) Obs.: neste exemplo, o modelo de voltagem constante com  $V_{D,0.8} = 0.8 \text{ V}$  (e não  $0.7 \text{ V}$ ) é adequado, especialmente porque o valor de  $I_S$  é extremamente baixo.

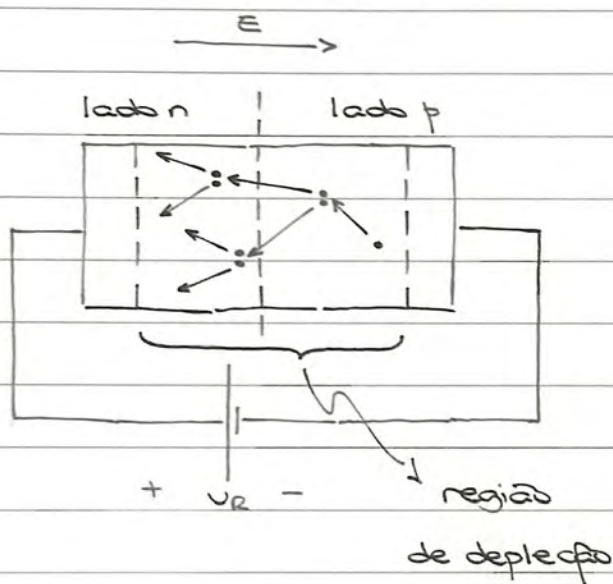
### 1.3 Voltagem de "Breakdown"

Se a corrente reversa for mantida em níveis adequados, o "breakdown" não danifica o diodo.





Breakdown reverso por efeito Zener. Campo elétrico em torno de  $10^6$  V/cm. Região de depleção mais estreita. Níveis mais altos de dopagem, nos dois lados da junção. Voltagem reversa na faixa de 3 V a 8 V. Coeficiente de temperatura (TC) negativo.



Breakdown reverso por efeito avalanche. Níveis de dopagem moderados ou baixos (inferiores a  $10^{15}$ /cm<sup>3</sup>). "Ionização de impacto", dentro da região de depleção. O TC é positivo.

Os TCs (Zener e avalanche) se cancelam para voltagem de breakdown aproximadamente igual a 3.5 V.