

# Semicondutores



# Semicondutores

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

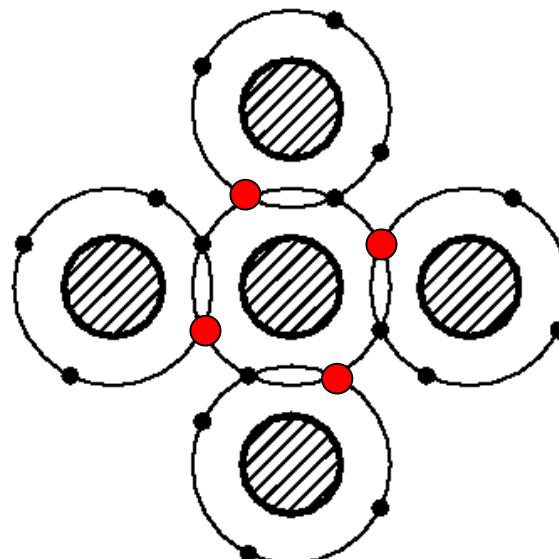
Ex.: Silício e Germânio.

(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**.

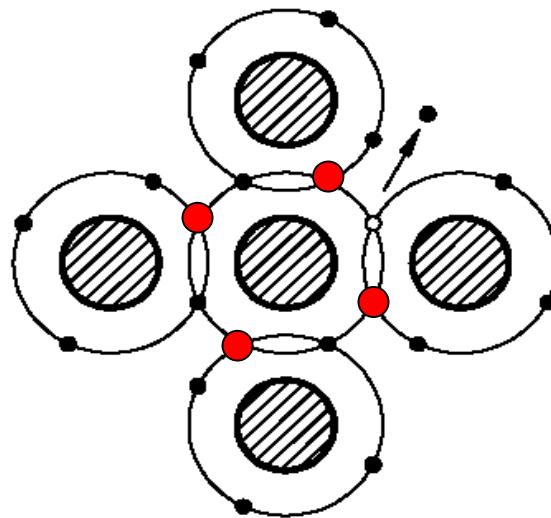
Cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, através de ligações covalentes, e cada um dos quatro **elétrons de valência** de um átomo é **compartilhado com um átomo vizinho**. Dois átomos adjacentes compartilham dois elétrons.

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 consequênciase 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.

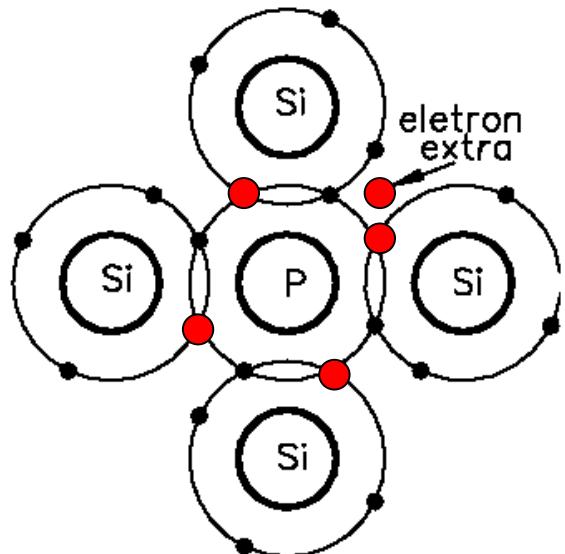
# Dopagem:

## Impurezas doadoras:

Átomos pentavalentes

(5 elétrons na camada de valência).

Ex.: Fósforo e Antimônio.



**Semicondutor tipo N**

Elétrons portadores majoritários

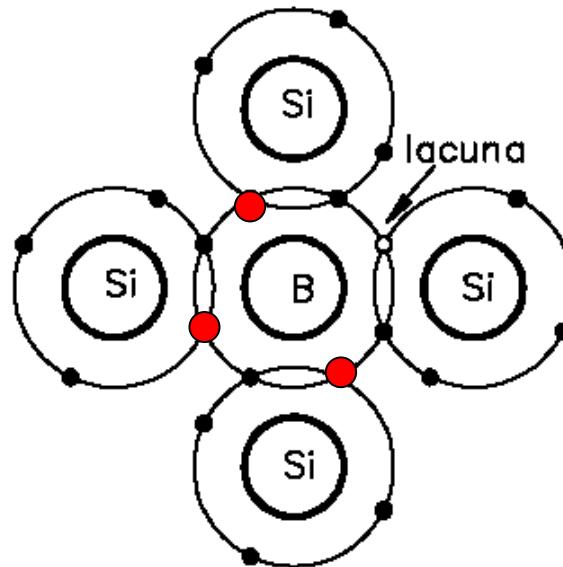
Lacunas portadores minoritários

## Impurezas aceitadoras:

Átomos trivalentes

(3 elétrons na camada de valência).

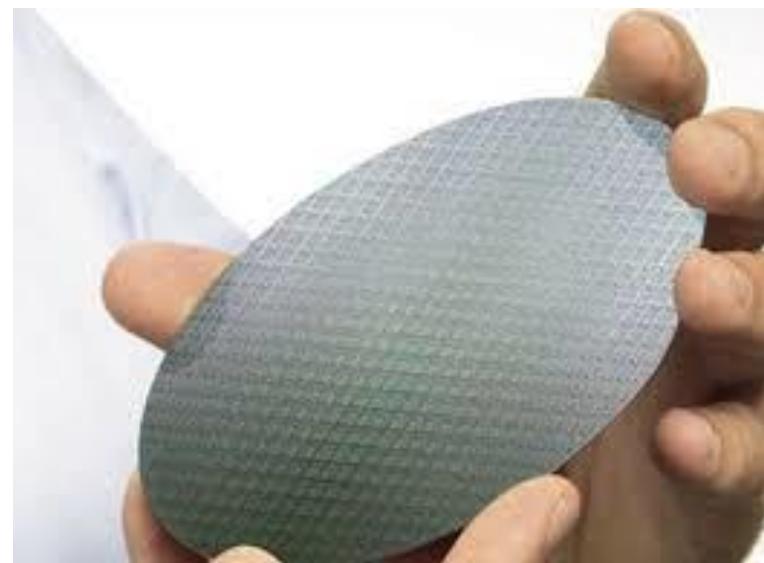
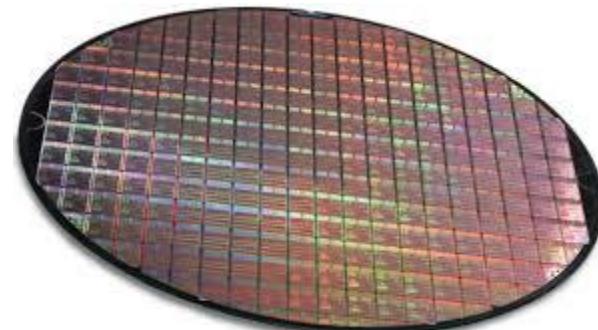
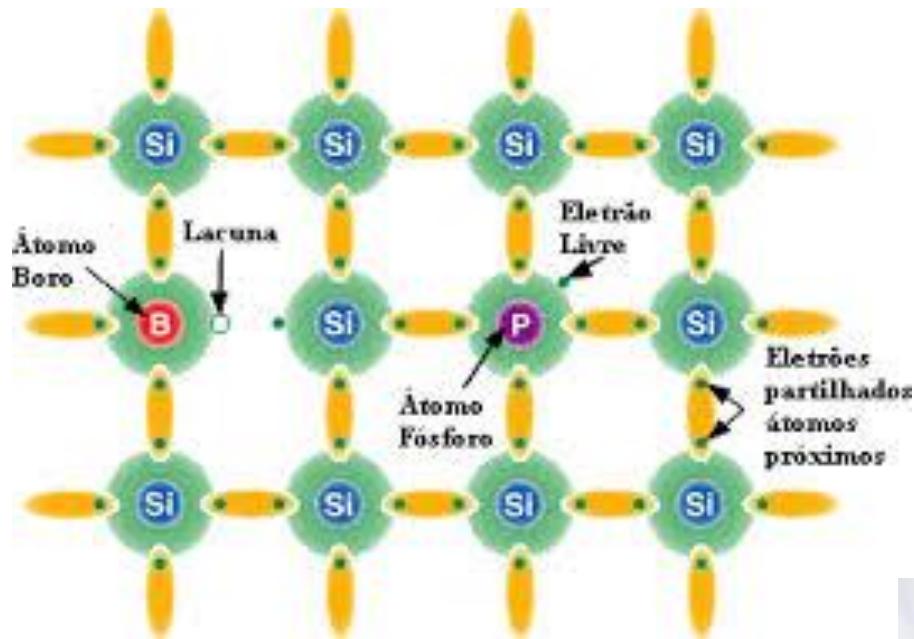
Ex.: Boro, Alumínio e Gálio.

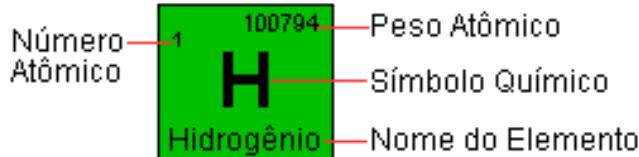


**Semicondutor tipo P**

Lacunas portadores majoritários

Elétrons portadores minoritários





1A  
(1)

8A  
(18)

1 100794 H Hidrogênio  
2A  
(2)

3 6,941 Li Lítio  
4 9,012182 Be Berílio

11 22,989770 Na Sódio  
12 24,3050 Mg Magnésio

19 39,0983 K Potássio  
20 40,078 Ca Cálcio

37 85,4678 Rb Rubídio  
38 87,82 Sr Estrônio

55 132,90545 Cs Césio  
56 137,327 Ba Bário

87 223,0197 Fr Frâncio  
88 226,02 Ra Rádio

103 261,11 Rf Rutherfordio  
104 262,11 Db Dúrbnio

105 263,11 Sg Seaborgio  
106 262,12 Bh Bóhrio

107 269 Hs Hássio  
108 268 Mt Meitenéno

109 269 Uun Unúnio  
110 269 Uuu Unúmbo

111 272 Uub Anúmbo

112 277 Uub Anúmbo

113 277 Uub Anúmbo

114 277 Uub Anúmbo

115 277 Uub Anúmbo

116 277 Uub Anúmbo

117 277 Uub Anúmbo

118 277 Uub Anúmbo

119 277 Uub Anúmbo

120 277 Uub Anúmbo

121 277 Uub Anúmbo

122 277 Uub Anúmbo

123 277 Uub Anúmbo

124 277 Uub Anúmbo

125 277 Uub Anúmbo

126 277 Uub Anúmbo

127 277 Uub Anúmbo

128 277 Uub Anúmbo

129 277 Uub Anúmbo

130 277 Uub Anúmbo

131 277 Uub Anúmbo

132 277 Uub Anúmbo

133 277 Uub Anúmbo

134 277 Uub Anúmbo

135 277 Uub Anúmbo

136 277 Uub Anúmbo

137 277 Uub Anúmbo

138 277 Uub Anúmbo

139 277 Uub Anúmbo

140 277 Uub Anúmbo

141 277 Uub Anúmbo

142 277 Uub Anúmbo

143 277 Uub Anúmbo

144 277 Uub Anúmbo

145 277 Uub Anúmbo

146 277 Uub Anúmbo

147 277 Uub Anúmbo

148 277 Uub Anúmbo

149 277 Uub Anúmbo

150 277 Uub Anúmbo

151 277 Uub Anúmbo

152 277 Uub Anúmbo

153 277 Uub Anúmbo

154 277 Uub Anúmbo

155 277 Uub Anúmbo

156 277 Uub Anúmbo

157 277 Uub Anúmbo

158 277 Uub Anúmbo

159 277 Uub Anúmbo

160 277 Uub Anúmbo

161 277 Uub Anúmbo

162 277 Uub Anúmbo

163 277 Uub Anúmbo

164 277 Uub Anúmbo

165 277 Uub Anúmbo

166 277 Uub Anúmbo

167 277 Uub Anúmbo

168 277 Uub Anúmbo

169 277 Uub Anúmbo

170 277 Uub Anúmbo

171 277 Uub Anúmbo

172 277 Uub Anúmbo

173 277 Uub Anúmbo

174 277 Uub Anúmbo

175 277 Uub Anúmbo

176 277 Uub Anúmbo

177 277 Uub Anúmbo

178 277 Uub Anúmbo

179 277 Uub Anúmbo

180 277 Uub Anúmbo

181 277 Uub Anúmbo

182 277 Uub Anúmbo

183 277 Uub Anúmbo

184 277 Uub Anúmbo

185 277 Uub Anúmbo

186 277 Uub Anúmbo

187 277 Uub Anúmbo

188 277 Uub Anúmbo

189 277 Uub Anúmbo

190 277 Uub Anúmbo

191 277 Uub Anúmbo

192 277 Uub Anúmbo

193 277 Uub Anúmbo

194 277 Uub Anúmbo

195 277 Uub Anúmbo

196 277 Uub Anúmbo

197 277 Uub Anúmbo

198 277 Uub Anúmbo

199 277 Uub Anúmbo

200 277 Uub Anúmbo

201 277 Uub Anúmbo

202 277 Uub Anúmbo

203 277 Uub Anúmbo

204 277 Uub Anúmbo

205 277 Uub Anúmbo

206 277 Uub Anúmbo

207 277 Uub Anúmbo

208 277 Uub Anúmbo

209 277 Uub Anúmbo

210 277 Uub Anúmbo

211 277 Uub Anúmbo

212 277 Uub Anúmbo

213 277 Uub Anúmbo

214 277 Uub Anúmbo

215 277 Uub Anúmbo

216 277 Uub Anúmbo

217 277 Uub Anúmbo

218 277 Uub Anúmbo

219 277 Uub Anúmbo

220 277 Uub Anúmbo

221 277 Uub Anúmbo

222 277 Uub Anúmbo

223 277 Uub Anúmbo

224 277 Uub Anúmbo

225 277 Uub Anúmbo

226 277 Uub Anúmbo

227 277 Uub Anúmbo

228 277 Uub Anúmbo

229 277 Uub Anúmbo

230 277 Uub Anúmbo

231 277 Uub Anúmbo

232 277 Uub Anúmbo

233 277 Uub Anúmbo

234 277 Uub Anúmbo

235 277 Uub Anúmbo

236 277 Uub Anúmbo

237 277 Uub Anúmbo

238 277 Uub Anúmbo

239 277 Uub Anúmbo

240 277 Uub Anúmbo

241 277 Uub Anúmbo

242 277 Uub Anúmbo

243 277 Uub Anúmbo

244 277 Uub Anúmbo

245 277 Uub Anúmbo

246 277 Uub Anúmbo

247 277 Uub Anúmbo

248 277 Uub Anúmbo

249 277 Uub Anúmbo

250 277 Uub Anúmbo

251 277 Uub Anúmbo

252 277 Uub Anúmbo

253 277 Uub Anúmbo

254 277 Uub Anúmbo

255 277 Uub Anúmbo

256 277 Uub Anúmbo

257 277 Uub Anúmbo

258 277 Uub Anúmbo

259 277 Uub Anúmbo

260 277 Uub Anúmbo

261 277 Uub Anúmbo

262 277 Uub Anúmbo

263 277 Uub Anúmbo

264 277 Uub Anúmbo

265 277 Uub Anúmbo

266 277 Uub Anúmbo

267 277 Uub Anúmbo

268 277 Uub Anúmbo

269 277 Uub Anúmbo

270 277 Uub Anúmbo

271 277 Uub Anúmbo

272 277 Uub Anúmbo

273 277 Uub Anúmbo

274 277 Uub Anúmbo

275 277 Uub Anúmbo

276 277 Uub Anúmbo

277 277 Uub Anúmbo

278 277 Uub Anúmbo

279 277 Uub Anúmbo

280 277 Uub Anúmbo

281 277 Uub Anúmbo

282 277 Uub Anúmbo

283 277 Uub Anúmbo

284 277 Uub Anúmbo

285 277 Uub Anúmbo

286 277 Uub Anúmbo

287 277 Uub Anúmbo

288 277 Uub Anúmbo

289 277 Uub Anúmbo

290 277 Uub Anúmbo

291 277 Uub Anúmbo

292 277 Uub Anúmbo

293 277 Uub Anúmbo

294 277 Uub Anúmbo

295 277 Uub Anúmbo

296 277 Uub Anúmbo

297 277 Uub Anúmbo

298 277 Uub Anúmbo

299 277 Uub Anúmbo

300 277 Uub Anúmbo

301 277 Uub Anúmbo

302 277 Uub Anúmbo

303 277 Uub Anúmbo

304 277 Uub Anúmbo

305 277 Uub Anúmbo

306 277 Uub Anúmbo

307 277 Uub Anúmbo

308 277 Uub Anúmbo

309 277 Uub Anúmbo

310 277 Uub Anúmbo

311 277 Uub Anúmbo

312 277 Uub Anúmbo

313 277 Uub Anúmbo

314 277 Uub Anúmbo

315 277 Uub Anúmbo

316 277 Uub Anúmbo

317 277 Uub Anúmbo

318 277 Uub Anúmbo

319 277 Uub Anúmbo

320 277 Uub Anúmbo

321 277 Uub Anúmbo

322 277 Uub Anúmbo

323 277 Uub Anúmbo

324 277 Uub Anúmbo

325 277 Uub Anúmbo

326 277 Uub Anúmbo

327 277 Uub Anúmbo

328 277 Uub Anúmbo

329 277 Uub Anúmbo

330 277 Uub Anúmbo

331 277 Uub Anúmbo

332 277 Uub Anúmbo

333 277 Uub Anúmbo

334 277 Uub Anúmbo

335 277 Uub Anúmbo

336 277 Uub Anúmbo

337 277 Uub Anúmbo

338 277 Uub Anúmbo

339 277 Uub Anúmbo

340 277 Uub Anúmbo

341 277 Uub Anúmbo

342 277 Uub Anúmbo

343 277 Uub Anúmbo

344 277 Uub Anúmbo

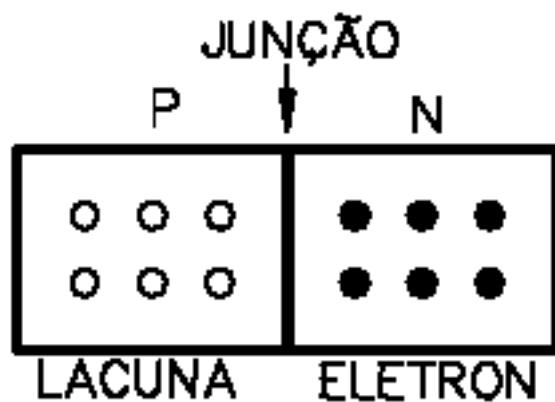
345 277 Uub Anúmbo

346 277 Uub Anúmbo

# Díodo Semicondutor de Junção:

União do cristal tipo P com tipo N → Junção PN

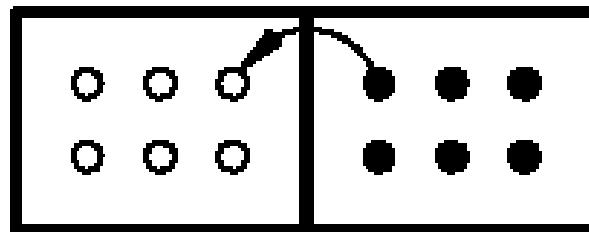
Dispositivo de estado sólido → **Díodo de junção**



## Díodo 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.

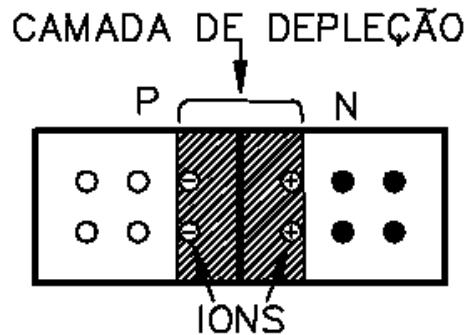
Quando isto ocorre, a lacuna desaparece e o átomo associado torna-se carregado negativamente (um íon negativo).



# Díodo 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.

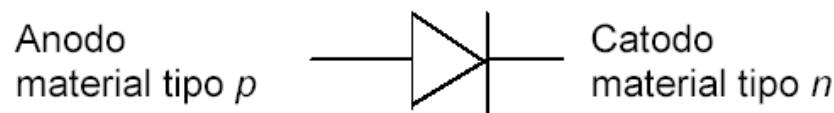
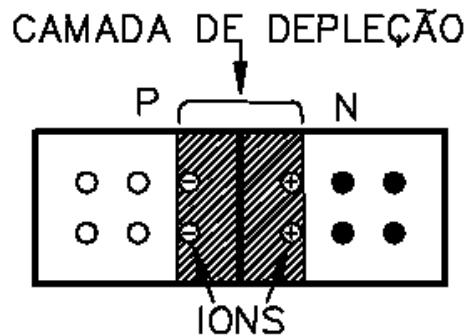


**Camada de depleção:** barreira que impede a difusão de elétrons livres.  
Ela aumenta até atingir o equilíbrio.

# Díodo Semicondutor de Junção:

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

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



# Polarização do Díodo

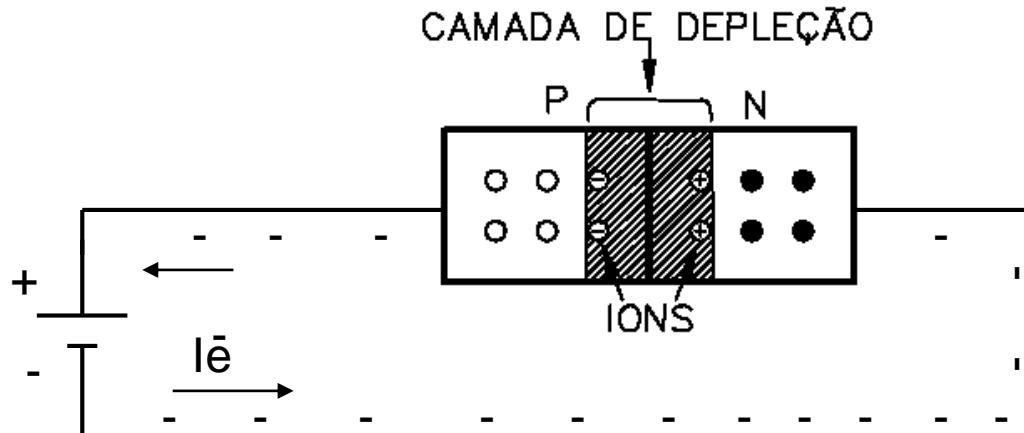
## Polarização Direta:

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

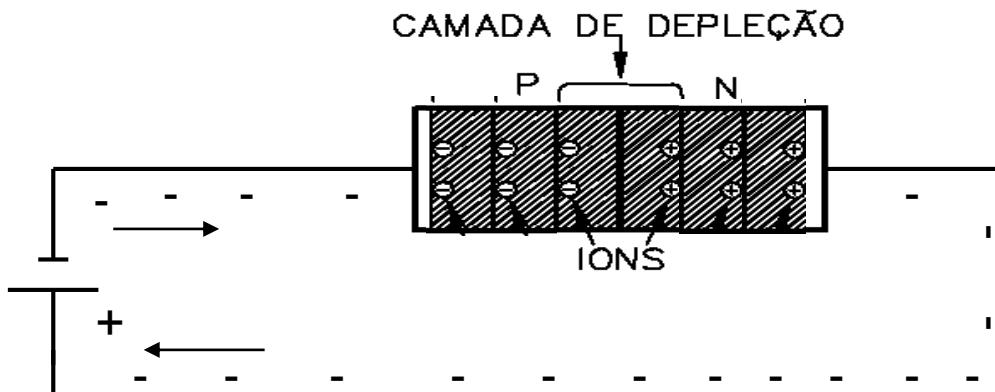
## Polarização Reversa:

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.

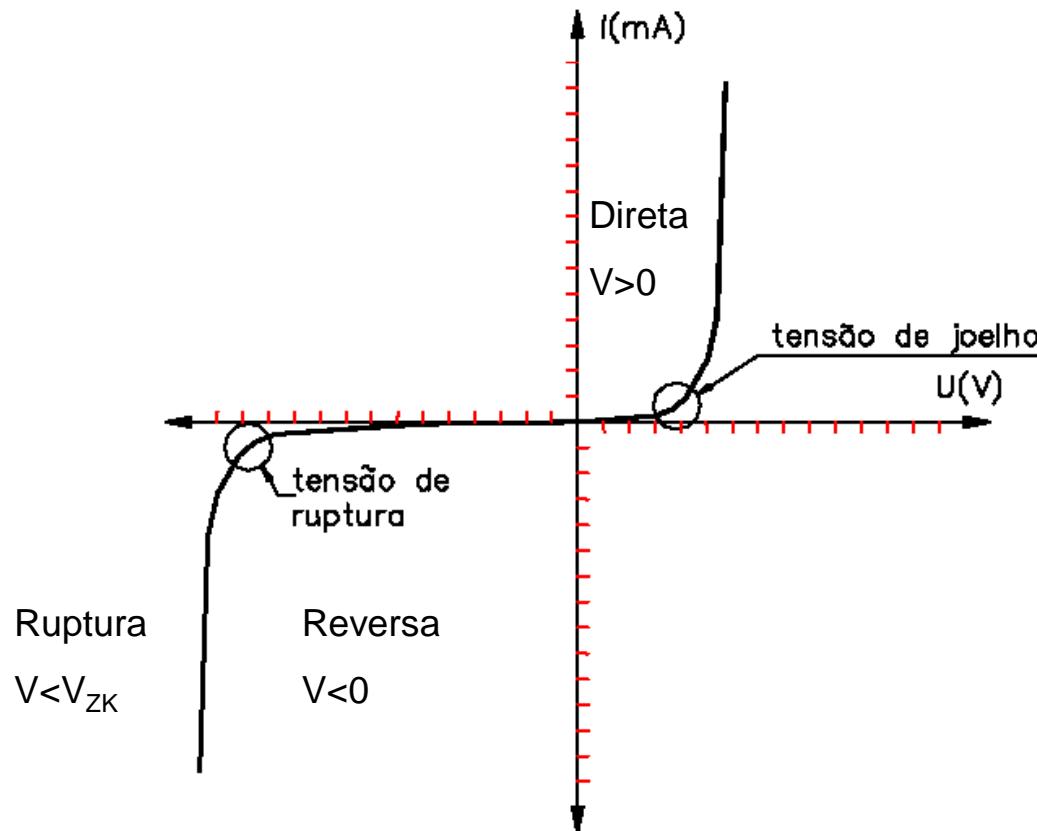
## Efeito Avalanche:

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

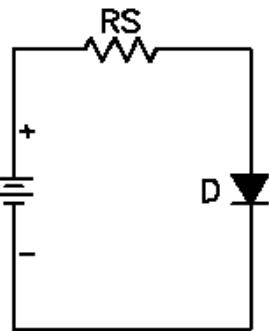
Aumentando-se a tensão reversa existe um aceleramento dos portadores minoritários que colidem com os átomos de cristais liberando elétrons de valência (elétrons livres). Este processo é geométrico (efeito avalanche) aumentando muito o número de portadores minoritários e o diodo conduz intensamente.

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

# Curva característica de um diodo:



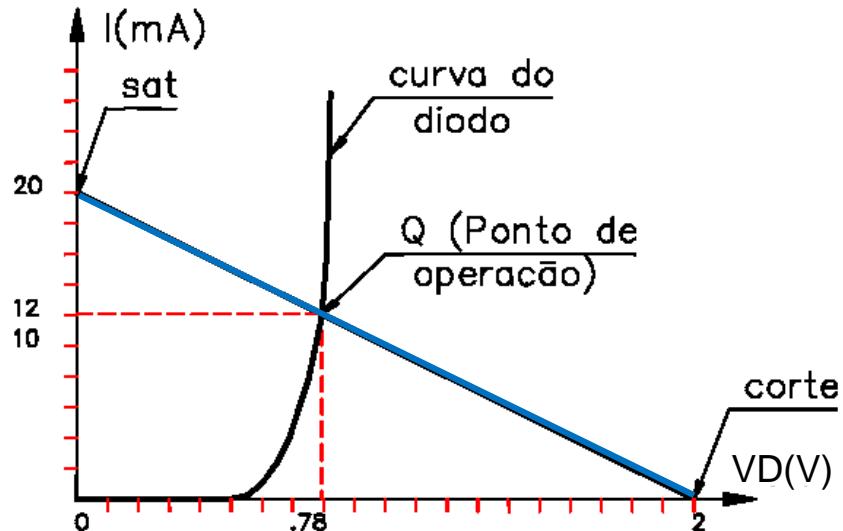
# Reta de carga:



$$I = \frac{V_{RS}}{R_s} = \frac{V_1 - VD}{R_s}$$

Considerando-se:  
 $V_1 = 2V$  e  $R_s = 100\Omega$

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



Análise Gráfica

Obtenção dos pontos da reta de carga:

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

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

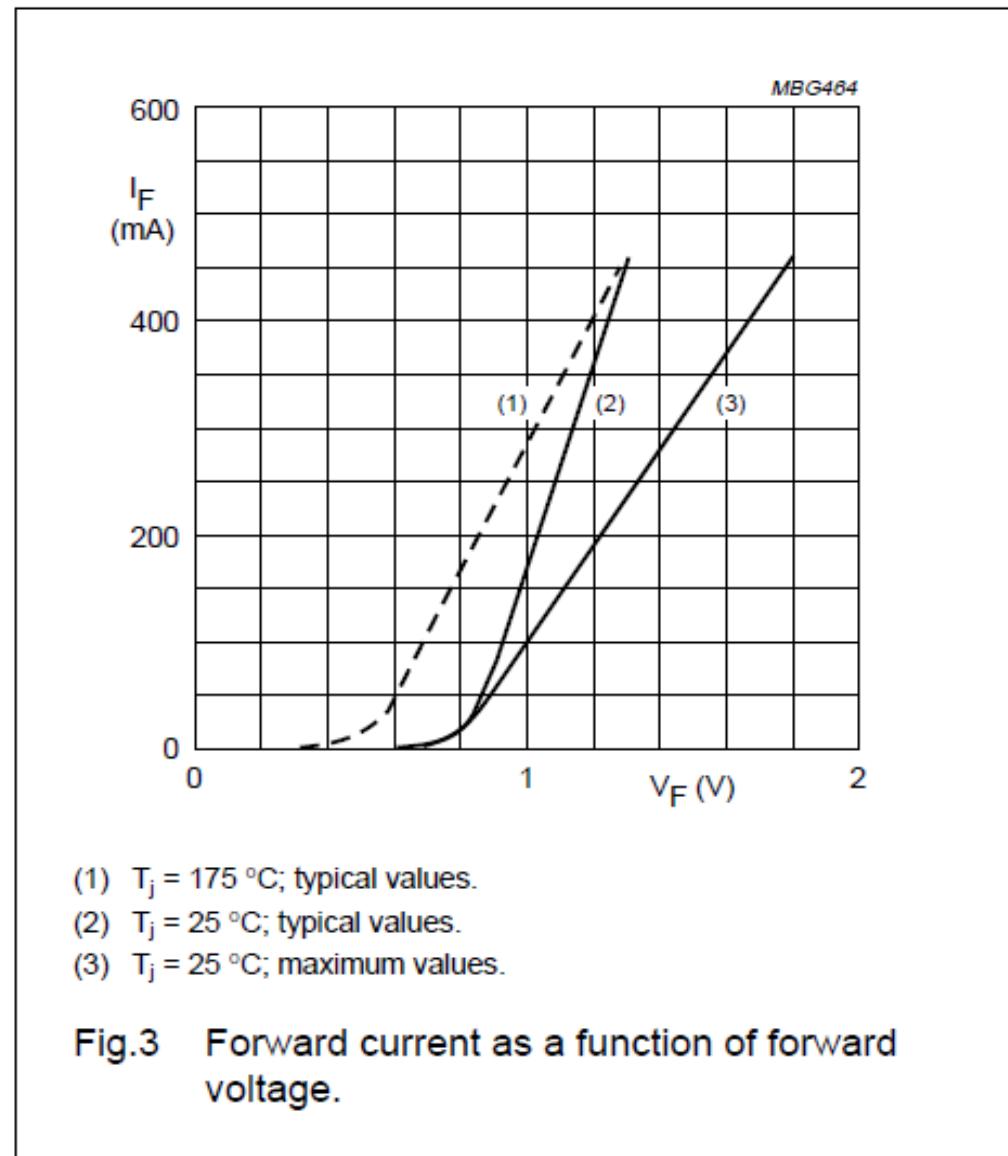
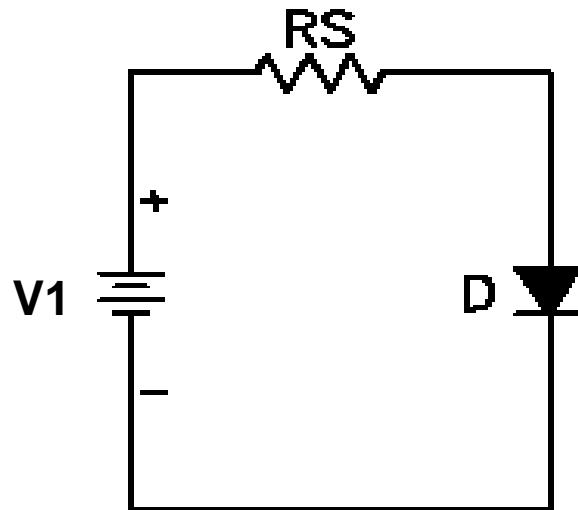
$(I=0A, V=2V)$  - Ponto de corte  $\Rightarrow$  Corrente mínima do circuito

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

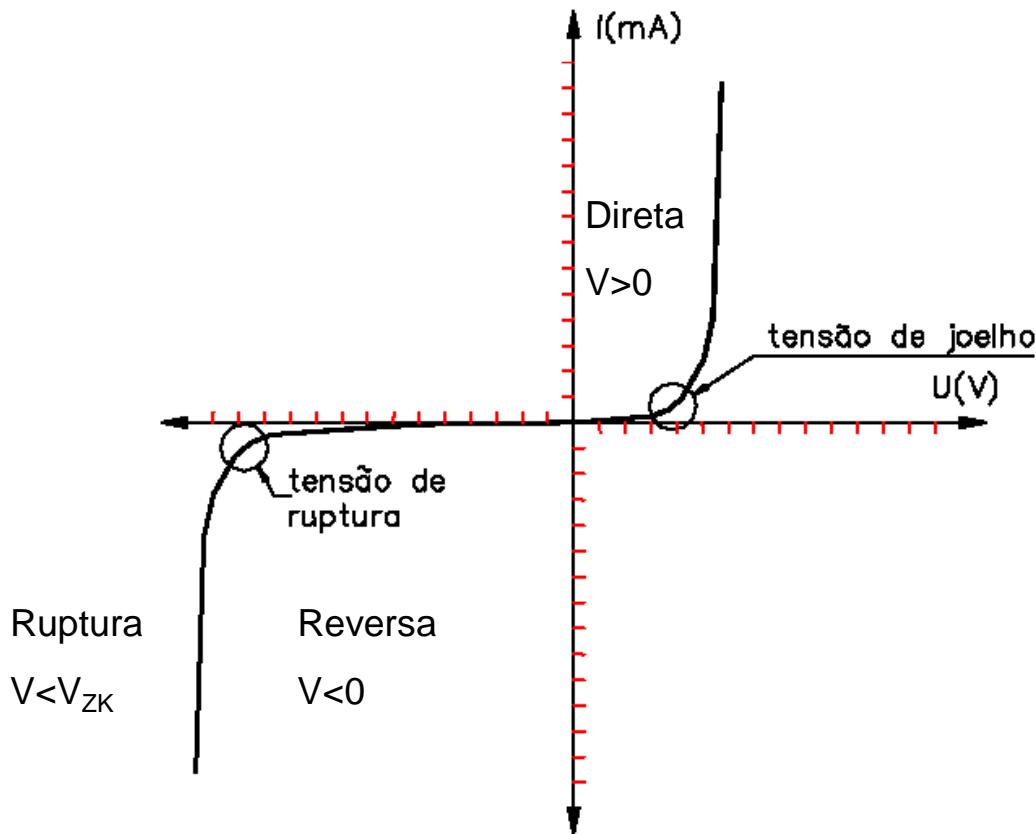
$(I=12mA, V=0,78V)$  - Ponto de operação ou quiescente  $\Rightarrow$  Representa a corrente através do diodo e do resistor. Sobre o diodo existe uma tensão de  $0,78V$ .

# 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  $T_j=25^{\circ}\text{C}$  máximo valor (curva 3).



# Características Terminais dos Diodos de Junção.



# Região de Polarização Direta

Relação i-v aproximada (solução analítica):

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

Modelo Exponencial

$Is$

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

# Região de Polarização Direta

Relação i-v aproximada:

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

$V_T$

- 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 =  $273 + T_C$ ;

$Q \rightarrow$  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  $i >> I_s$  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 V1 e I1 tem-se:

$$I1 = Is \cdot e^{\frac{V1}{n \cdot V_T}}$$

Considerando V2 e I2 tem-se:

$$I2 = Is \cdot e^{\frac{V2}{n \cdot V_T}}$$

Portanto:

$$\frac{I2}{I1} = e^{\frac{V2 - V1}{n \cdot V_T}}$$

# 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  $2,3 \cdot n \cdot V_T$ ;

→  $\approx 60\text{mV}$  para  $n=1$

→  $\approx 120\text{mV}$  para  $n = 2$

# Região de Polarização Reversa

$$i \cong -Is$$

# Exemplo 01:

## Solução Analítica

Em um experimento com diodo, foi medido uma tensão VD de 0.68V para uma corrente ID 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.

$$ID = I_s \cdot e^{\frac{VD}{n \cdot V_T}}$$

$$I_s = \frac{ID_1}{e^{\frac{VD_1}{n \cdot V_T}}} = \frac{10 \text{ m}}{e^{\frac{0,68}{2 \cdot 25 \text{ m}}}} \Rightarrow I_s = 12,4 \text{ nA}$$

$$ID_2 = I_s \cdot e^{\frac{VD_2}{n \cdot V_T}} = 12,4 \text{ n} \cdot e^{\frac{0,8}{2 \cdot 25 \text{ m}}} = 110,23 \text{ mA}$$

$$v = n \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{i}{I_s}\right) \Rightarrow VD_2 = n \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I_2}{I_s}\right) = 2 \cdot 25 \text{ m} \cdot \ln\left(\frac{1}{12,4 \text{ n}}\right) = 0,91 \text{ V}$$

## 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.

$$V_1 = 0,7V$$

$$I_1 = 1mA$$

$$I_D = \frac{VDD - VD}{R} = \frac{5 - 0,7}{1000} = 4,3mA = I_2$$

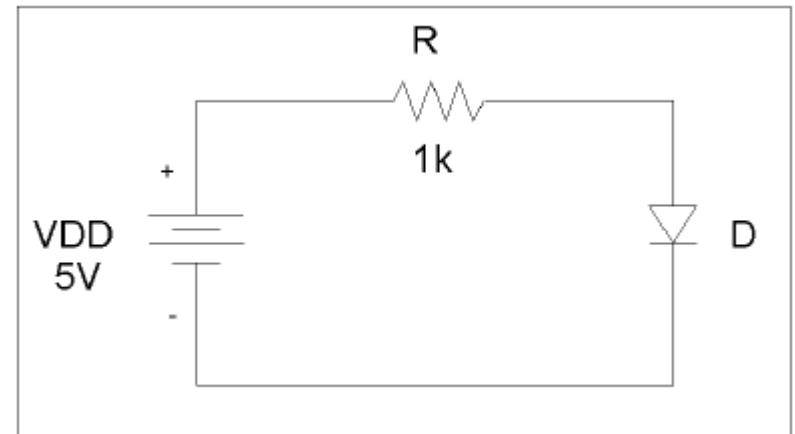
$$V_2 - V_1 = 2,3 \cdot n \cdot V_T \cdot \log \left( \frac{I_2}{I_1} \right)$$

$$n = 2$$

$$V_T = 25 mV$$

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

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



$$I_D = \frac{VDD - VD}{R} = \frac{5 - 0,773}{1000} = 4,227 mA = I_2$$

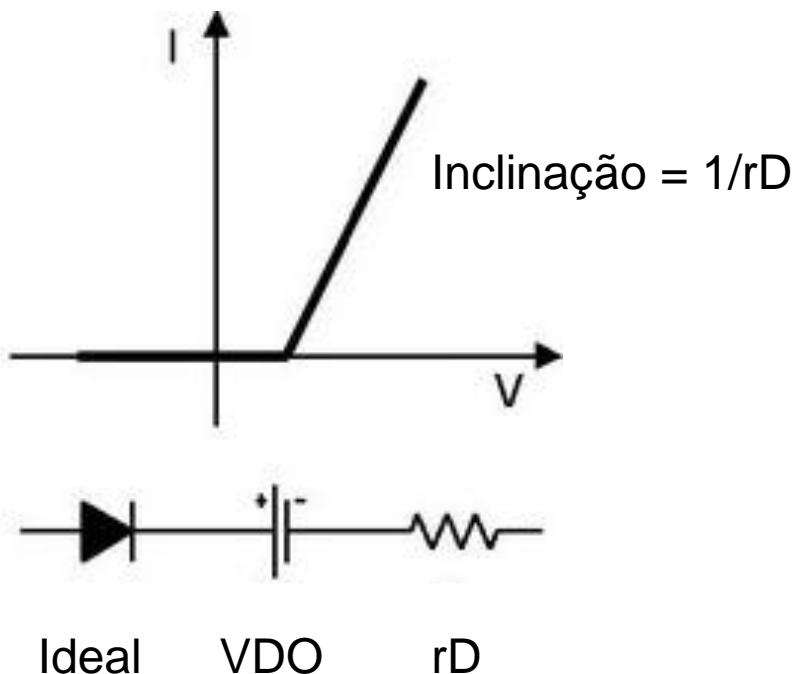
$$V_2 = 0,773 + 0,115 \cdot \log \left( \frac{4,227}{4,3} \right) = 0,772 V$$

$$V_D = 0,772 V$$

$$I_D = 4,227 mA$$

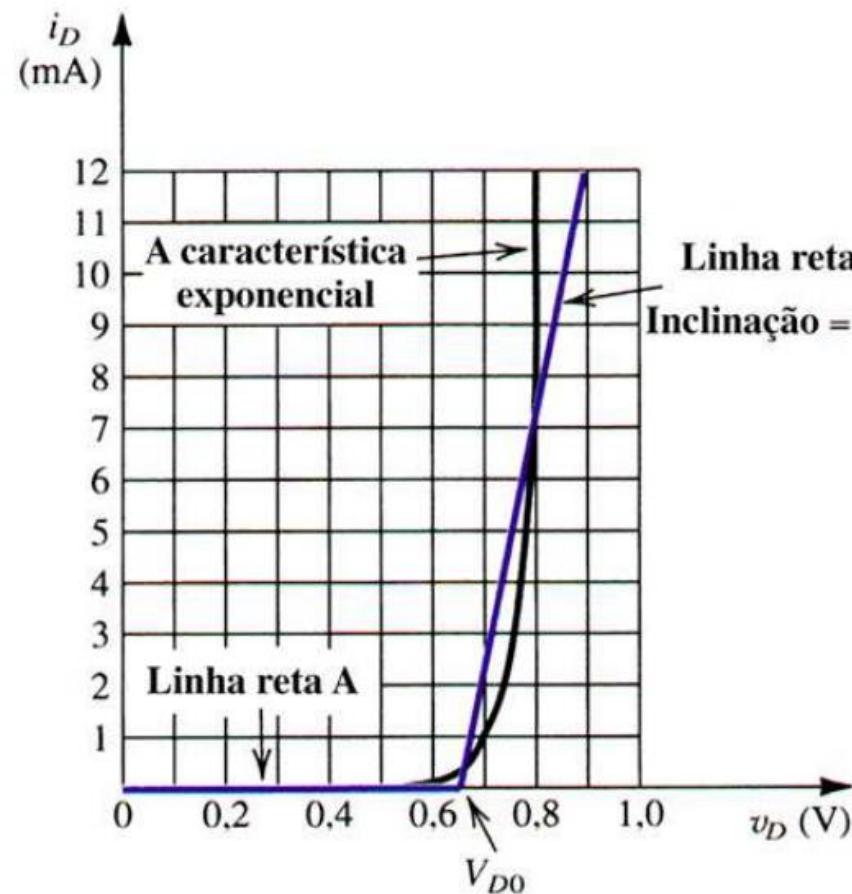
# Modelo Segmento de Reta

## (bateria mais resistência)



# Modelo Segmento de Reta

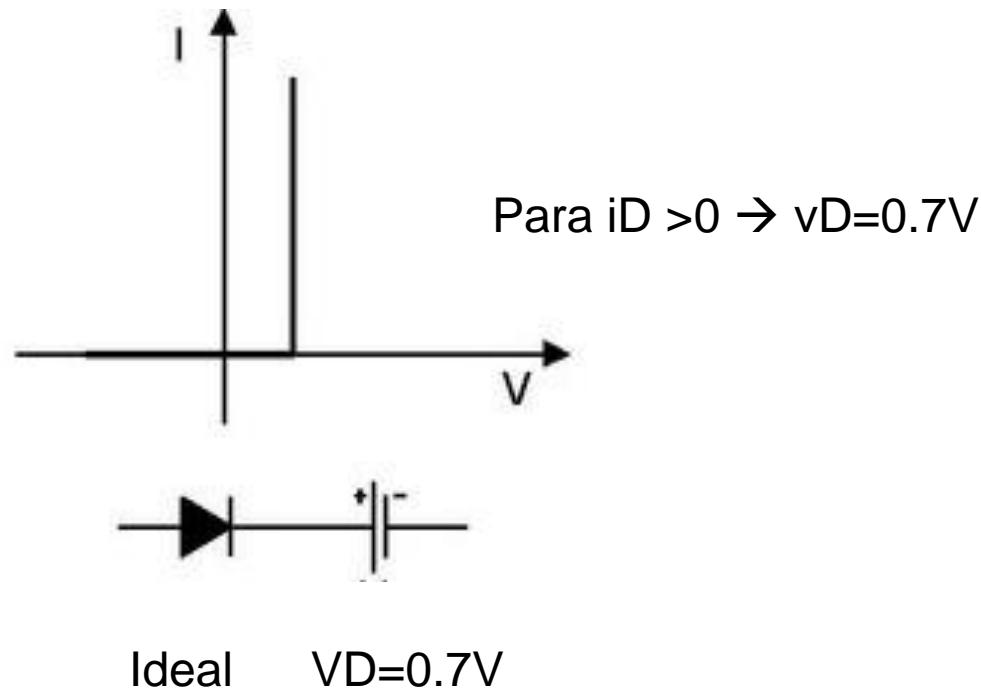
## (bateria mais resistência)



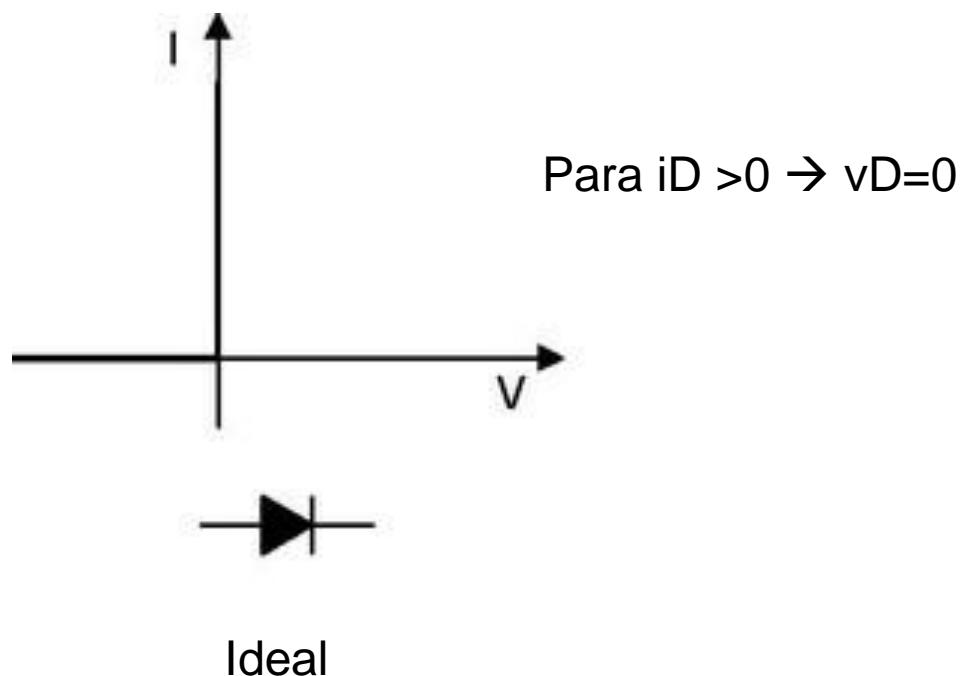
$$i_D = 0, \quad v_D \leq V_{D0}$$

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

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

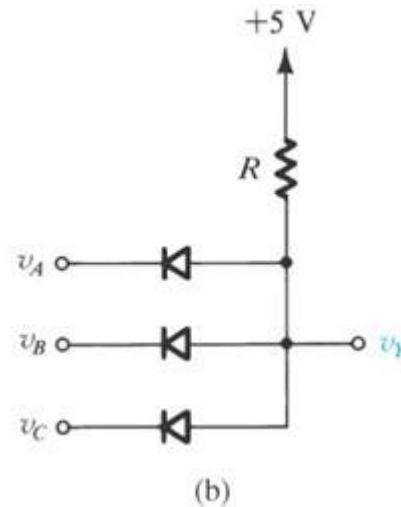
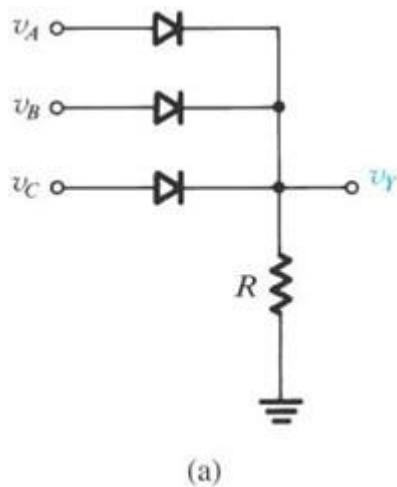


# Modelo Díodo Ideal

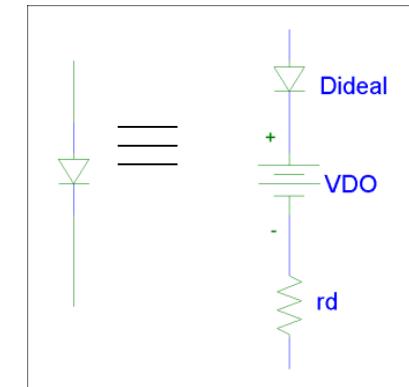
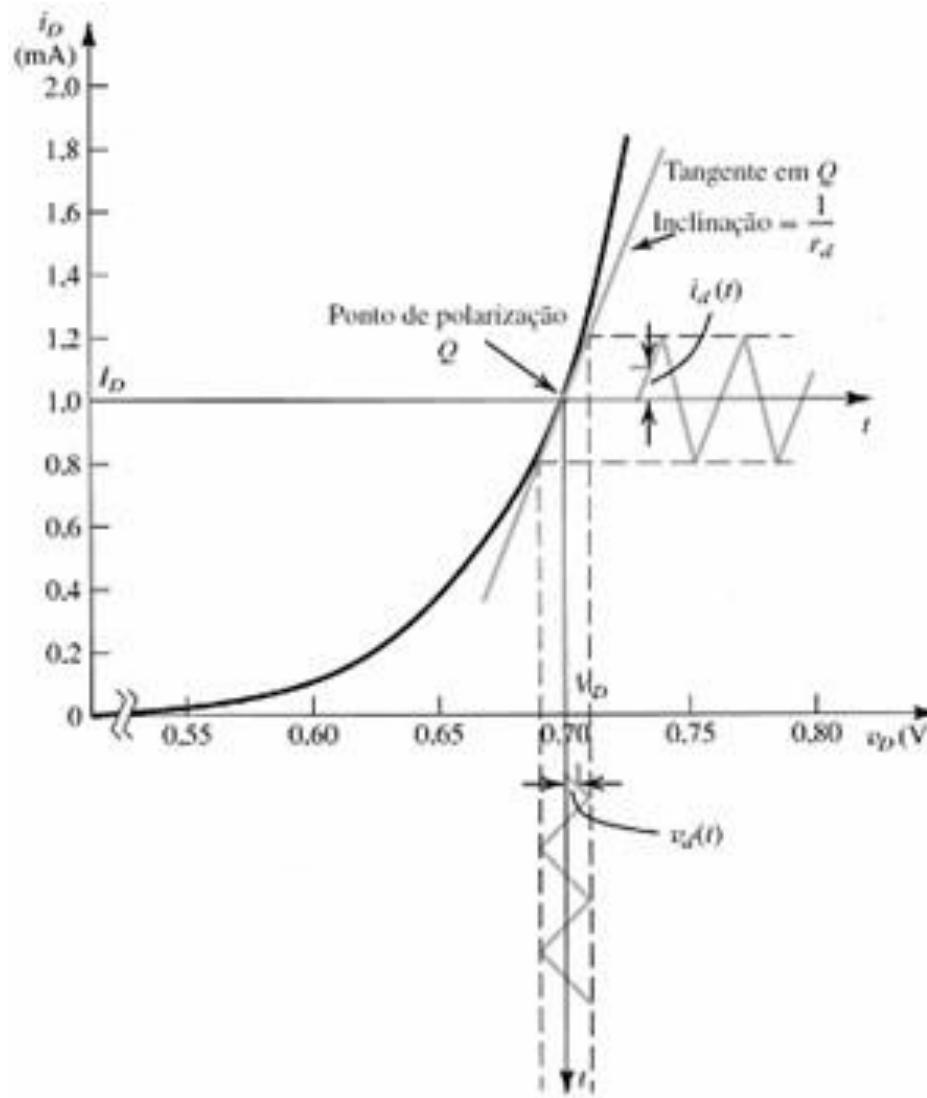


# Modelo Diodo Ideal

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



# Modelo Pequenos Sinais



# Modelo de pequenos sinais:

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

$v_d(t)$  muito pequeno

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

Condutância do diodo em pequeno sinal

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

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.

$$ID = \frac{V1 - VD}{R} = \frac{10 - 0,7}{1000} = 9,3mA$$

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

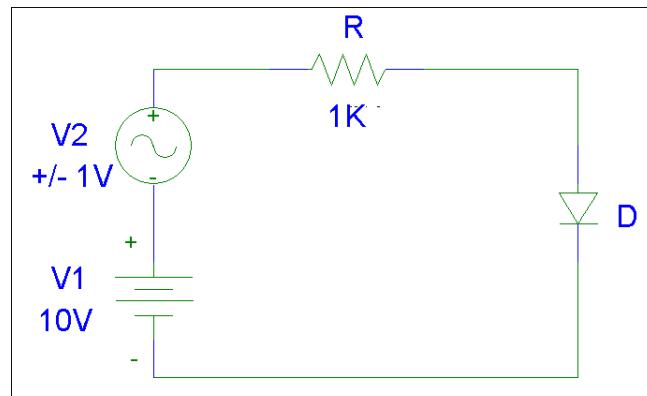
$$VD = VDO + ID \cdot rd$$

$$VDO = VD - ID \cdot rd = 0,7 - 0,0093 \cdot 5,37 = 0,65V$$

$$id = \frac{V2}{R + rd} = \frac{1}{1000 + 5,37} = 994,6\mu A$$

$$vd = \pm id \cdot rd = \pm 5,34 mV$$

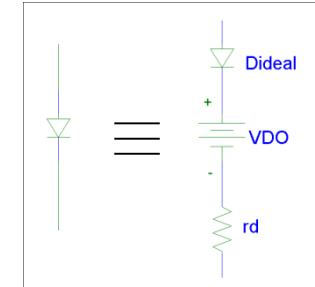
$$VD = 0,69466 V \rightarrow 0,70534 V$$



$$v_d = VDO + rd \cdot (ID + id)$$

$$VD = VDO + ID \cdot rd$$

$$vd = id \cdot rd$$

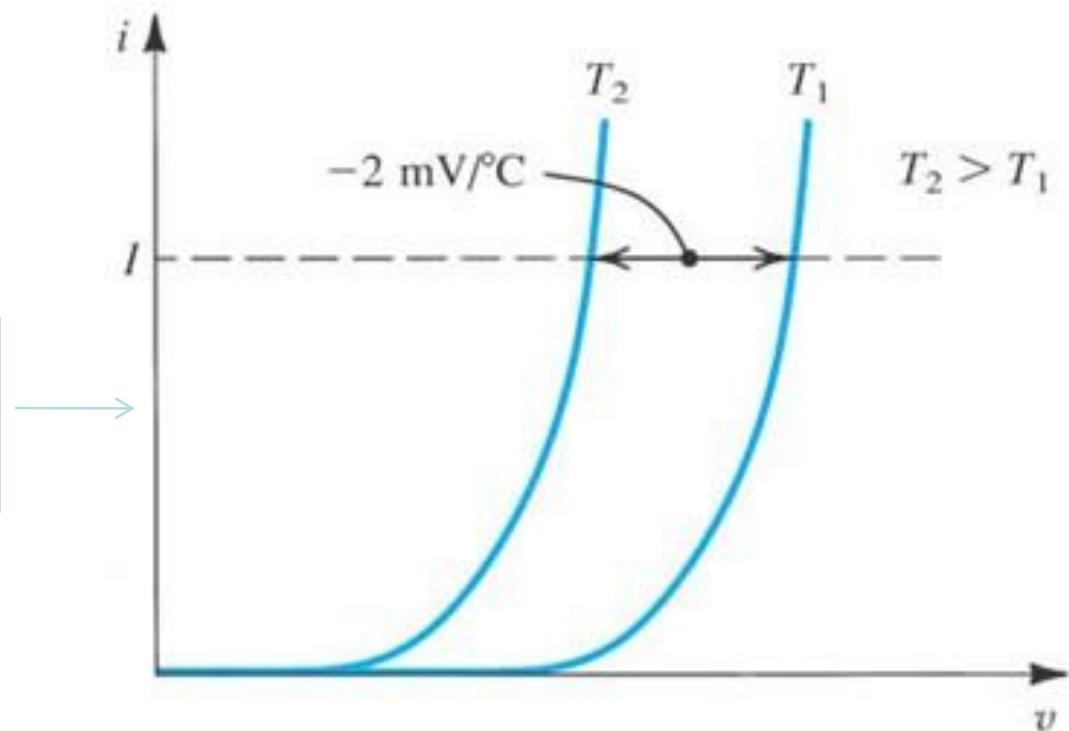


# Característica i-v com a temperatura:

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, ***Eletônica.*** 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 Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.