

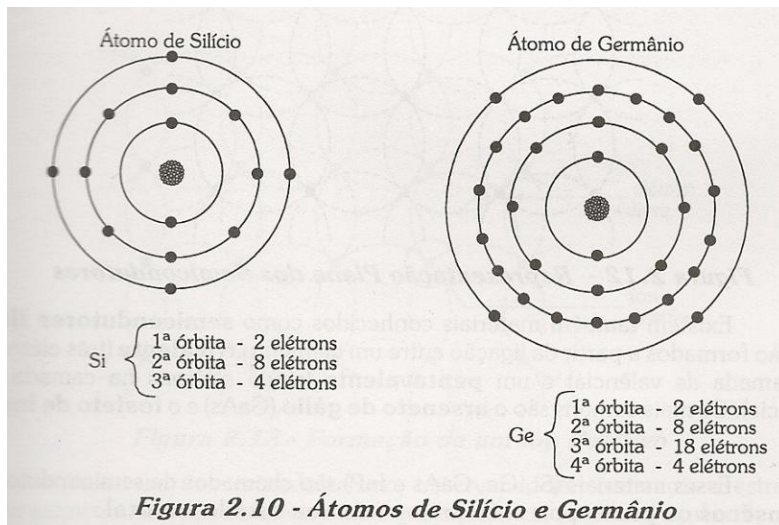
**Notas de Aula:**

# **Eletrônica Analógica e Digital**

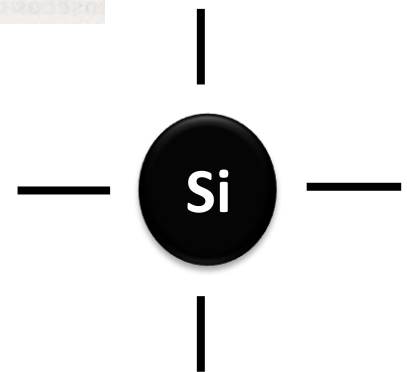
- Materiais Semicondutores;
- Diodo Semicondutor.

# Materiais Semicondutores Intrínsecos

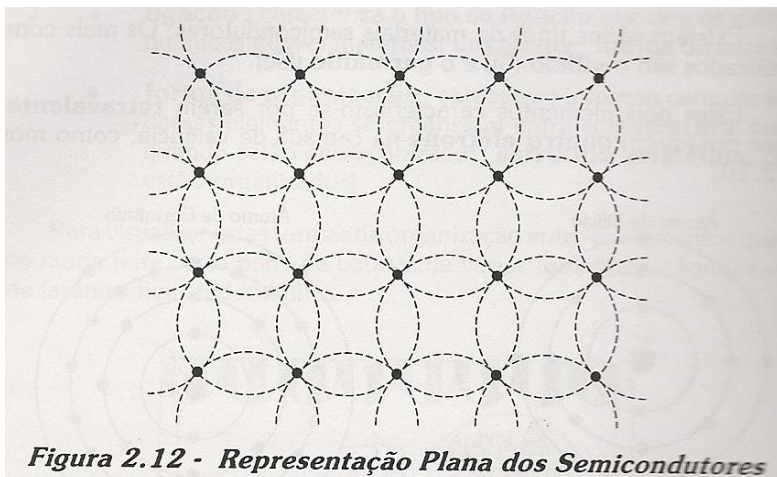
- Existem vários tipos de materiais semicondutores. Os mais comuns e mais utilizados são o **silício (Si)** e o **germânio (Ge)**.
- Este dois elementos caracterizam-se por serem **tetravalentes**, ou seja, por possuírem **quatro elétrons** na camada de valência, como mostra a Fig. abaixo.



- Por serem tetravalentes, cada um de seus átomos pode realizar quatro ligações covalentes com outros quatro átomos, como mostra a Fig. ao lado.



- Por uma questão de simplicidade e para que se possa compreender melhor as figuras, esses materiais serão representados como se tivessem ligações planas, como mostra a Fig. ao lado.



- Existem também materiais conhecidos como **semicondutores III – V** que são formados a partir de ligação entre um elemento **trivalente** (3 elétrons na camada de valência) e um **pentavalente** (5 elétrons na camada de valência). Os mais comuns são o **arseneto de gálio** (GaAs) e o **fosfeto de índio** (InP).

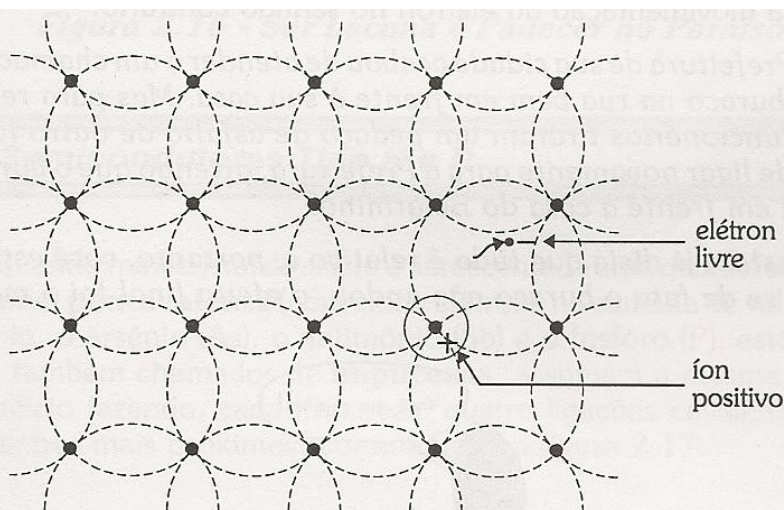
5 <b>B</b> Boro 10,811	6 <b>C</b> Carbono 12,0107	7 <b>N</b> Nitrogênio 14,0067	8 <b>O</b> Oxigênio 15,9994
13 <b>Al</b> Alumínio 26,9815386	14 <b>Si</b> Silício 28,0855	15 <b>P</b> Fósforo 30,973762	16 <b>S</b> Enxofre 32,065
31 <b>Ga</b> Gálio 69,723	32 <b>Ge</b> Germânio 72,84	33 <b>As</b> Arsênio 74,92160	34 <b>Se</b> Selênio 78,96
49 <b>In</b> Índio 114,818	50 <b>Sn</b> Estanho 118,710	51 <b>Sb</b> Antimônio 121,760	52 <b>Te</b> Telúrio 127,80
81 <b>Tl</b> Tálio 204,3833	82 <b>Pb</b> Chumbo 207,2	83 <b>Bi</b> Bismuto 208,98040	84 <b>Po</b> Polônio (209)
113 <b>Uut</b> Ununtrio (284)	114 <b>Uuq</b> Ununquádro (289)	115 <b>Uup</b> Ununpentio (288)	116 <b>Uuh</b> Ununhécio (293)

- Esses materiais (Si, Ge, GaAs e InP) são chamados de **semicondutores intrínsecos** ou **puros** pois encontram-se em seu **estado natural**.
- Hoje em dia, o **silício** é o material mais utilizado já que é bastante abundante na natureza (areia da praia, terra, etc.) e, portanto, é mais barato.

## Condução Elétrica nos Semicondutores

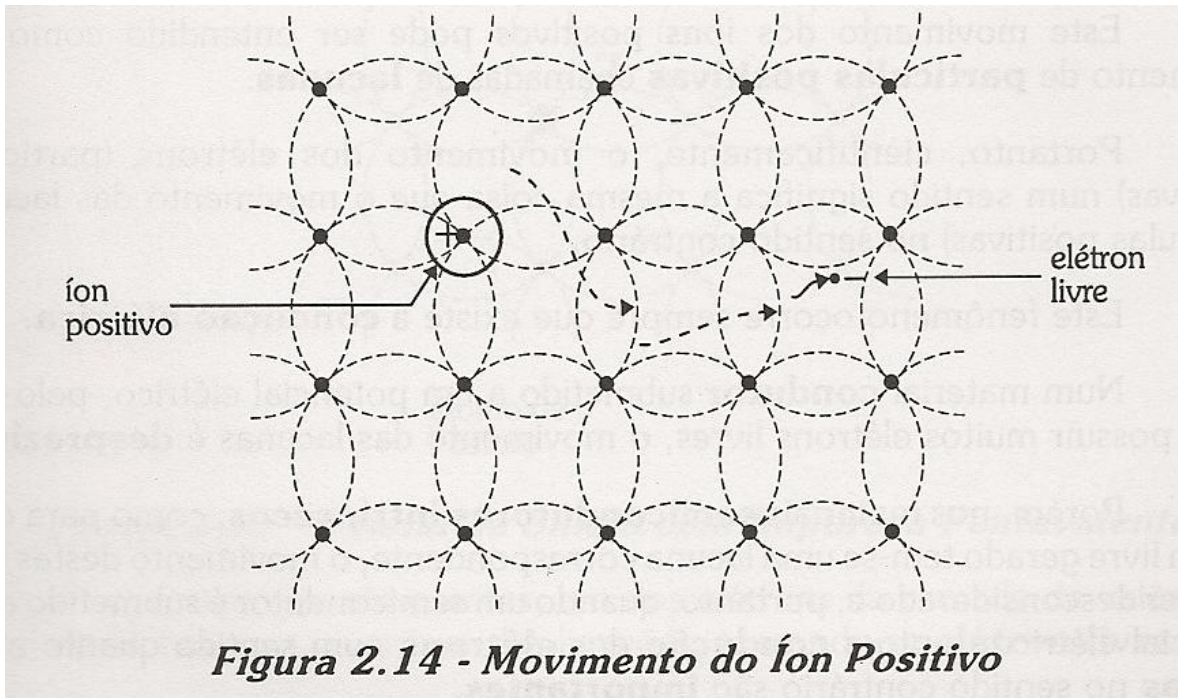
- Uma tarefa importante é a compreensão de como é possível a **condução elétrica** nos semicondutores.

A Fig. ao lado mostra um elétron que se libertou do átomo por ter recebido energia suficiente, tornando-se **livre**. O átomo fica, então, com uma ligação incompleta e, como ele perdeu um elétron, está ionizado positivamente.



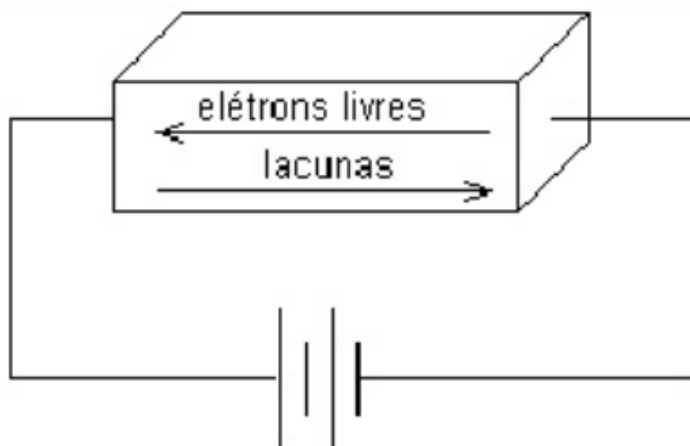
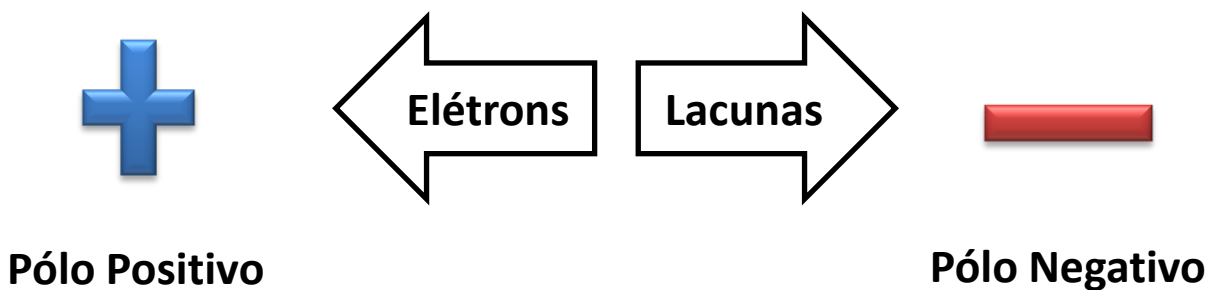
*Figura 2.13 - Formação de um Íon Positivo*

- Após um determinado tempo, observando-se novamente a estrutura deste semiconductor, pode-se constatar que aquele íon positivo “**andou**”, com mostra a Fig. abaixo.



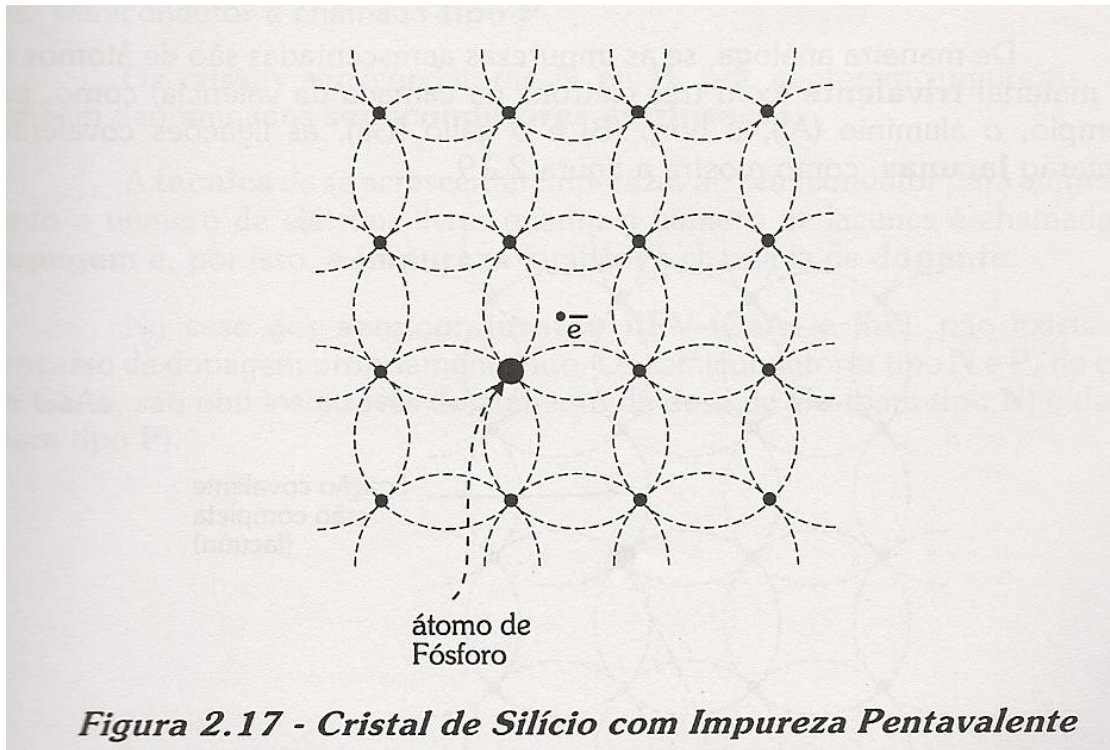
- Como o íon pode ter mudado de posição se os átomos estão **presos** à estrutura do material semiconductor?
- Na verdade, não foi o íon que mudou de posição, mas um outro elétron que saiu do átomo de origem e ocupou a lacuna deixada pelo elétron anterior, completando aquela ligação, deixando, porém, outra ligação incompleta, ou seja, criando outro íon positivo.
- Portanto, a movimentação do íon positivo num sentido corresponde, na verdade, à movimentação do elétron no sentido contrário.
- Este movimento dos íons positivos pode ser entendido como um movimento de **partículas positivas** chamadas **LACUNAS (Buraco)**.

- Portanto, cientificamente, o movimento dos elétrons (-) num sentido significa a mesma coisa que o movimento das lacunas (+) no sentido contrário.
- Este fenômeno ocorre sempre que existe a **condução elétrica**.
- Num material condutor submetido a um potencial elétrico, pelo fato dele possuir muitos elétrons livres, o movimento das lacunas é desprezível.
- Já, nos materiais **semicondutores intrínsecos**, como para cada elétron livre gerado tem-se uma lacuna correspondente, o movimento destas não pode ser desconsiderado e, portanto, quando um semicondutor é submetido a um potencial elétrico, tanto na **condução dos elétrons** num sentido quanto a das **lacunas** no sentido contrário são **importantes**.

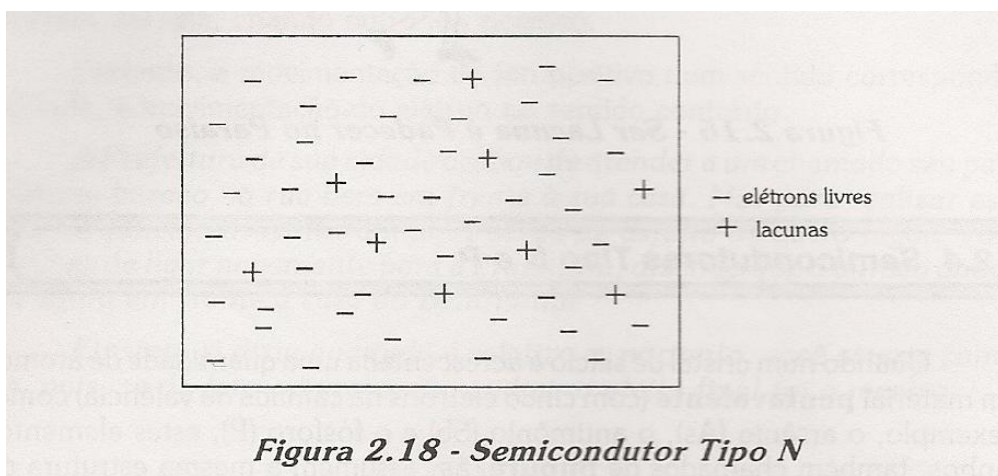


## Semicondutores Tipo N e P

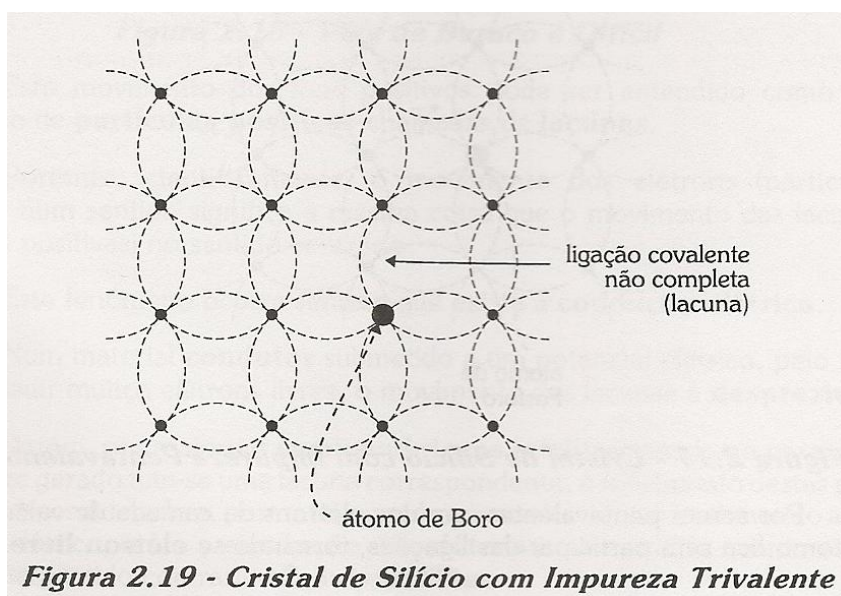
- Quando num cristal de Si é acrescentada uma quantidade de átomos de um material **pentavalente** (**5 elétrons** na camada de valência) como, por exemplo, o arsênio (As), o antimônio (Sb) e o fósforo (P), estes elementos estranhos, também chamados de **impurezas** (dopantes).



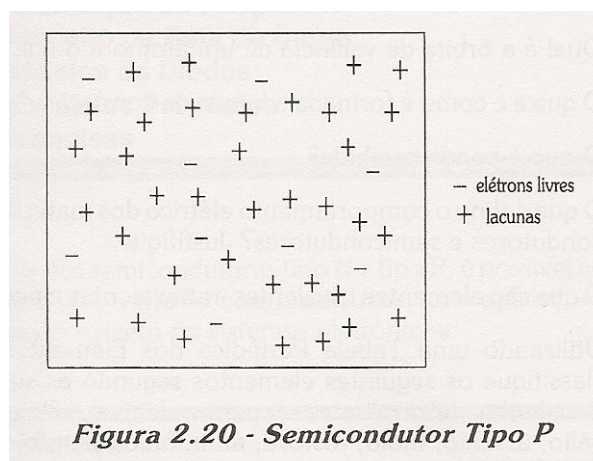
- Por serem pentavalentes, um dos elétrons da camada de valência de cada átomo fica sem participar das ligações. Tornando-se **elétron livre**.
- Por isso, as impurezas pentavalentes são chamadas de **impurezas TIPO N**.
- Desta forma, o **número de elétrons livres é maior** que o número de lacunas, ou seja, neste semiconductor os **elétrons livres são portadores majoritários** e as **lacunas são portadores minoritários**.



- Como os elétrons livres são cargas elétricas negativas, este semicondutor é chamado de **tipo N**.
- De maneira análoga, se as impurezas acrescentadas são de átomos de um material **trivalente** (**3 elétrons** na camada de valência) como, por exemplo, o alumínio (Al), o boro (B) e o gálio (Ga), as ligações covalentes formarão **lacunas**.



- Por isso, as impurezas trivalentes são chamadas de impurezas **tipo P**.
- Desta forma, o **número de lacunas é maior** que o número de elétrons livres, ou seja, neste semicondutor as **lacunas são portadores majoritários** e os **elétrons livres são portadores minoritários**.



- Como as lacunas podem ser consideradas cargas elétricas positivas, este semicondutor é chamado de **tipo P**.
- Os cristais semicondutores N ou P, por conterem impurezas, são também denominados **semicondutores extrínsecos**.
- A **técnica** de se acrescentar impurezas ao semicondutor para aumentar tanto o número de elétrons livres quanto o número de lacunas é chamada de **dopagem** e, por isso, a **impureza** também é chamada de **dopante**.
- No caso dos **semicondutores III – V** (GaAs e InP), não existe um processo de dopagem propriamente dito. Os **semicondutores tipo N e P**, no caso do GaAs, são obtidos através do aumento da dose de **Ga** (para **tipo N**) e de **As** (para **tipo P**).

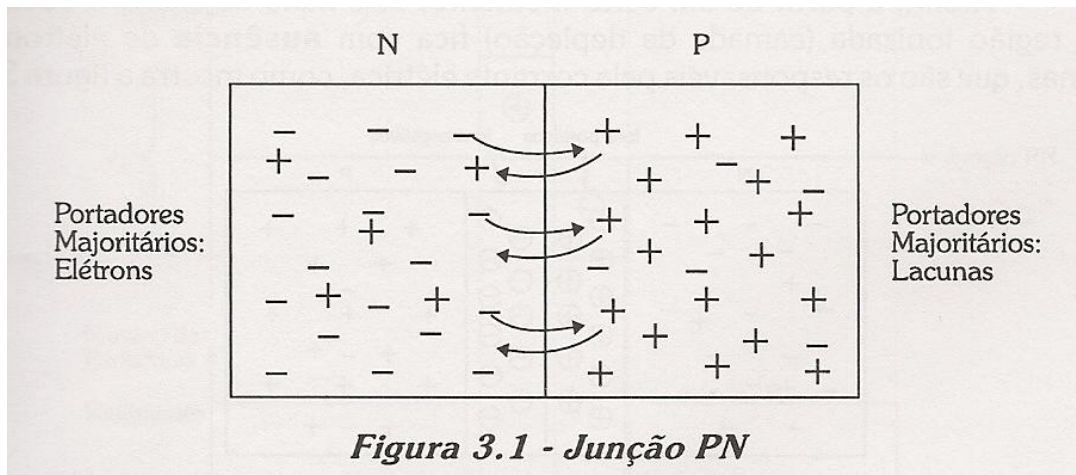


# Diodo Semicondutor

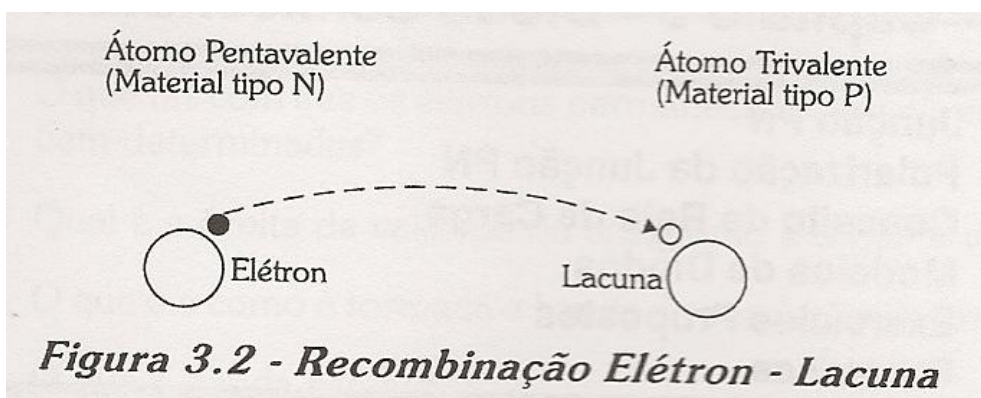
- A partir dos semicondutores tipo N e tipo P, é possível construir diversos dispositivos, entre eles o **diodo semicondutor**, com aplicações extremamente importantes para o projeto de sistemas eletrônicos.

## Junção PN

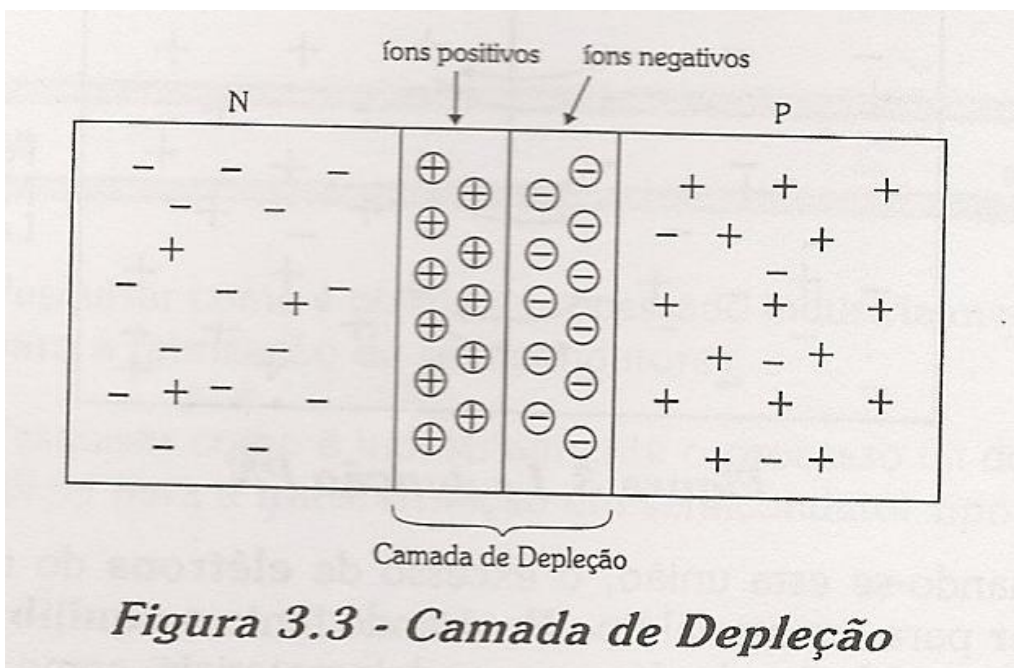
- O diodo semicondutor é constituído basicamente por uma **junção PN**, ou seja, pela união física de um material tipo P (portadores majoritários são lacunas) com um tipo N (portadores majoritários são elétrons).



- Com essa união, o **excesso de elétrons** do material **tipo N** tende a **migrar** para o material **tipo P**, visando tanto o **equilíbrio eletrônico** – equilíbrio das densidades de elétrons nos dois materiais – como a **estabilidade química**.
- Este fenômeno da ocupação de uma lacuna por um elétron é chamado de **recombinação**.

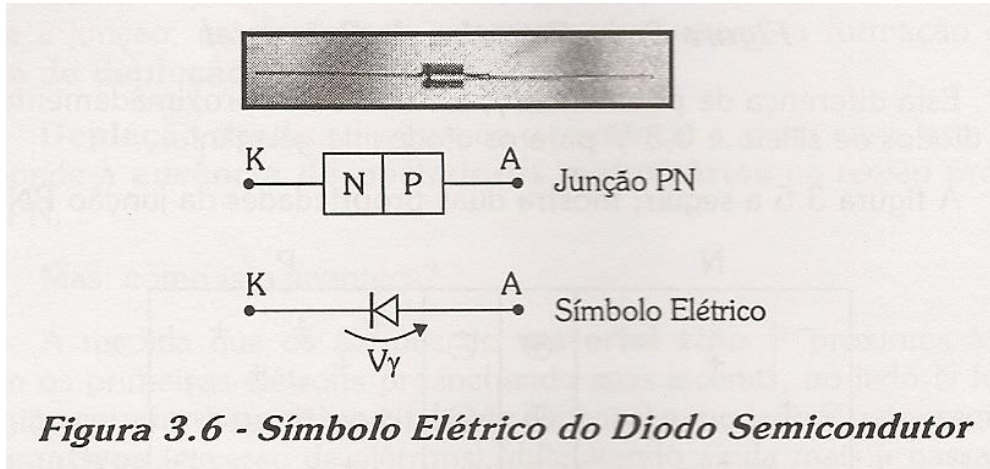


- Como o processo de recombinação ocorre inicialmente na região próxima a junção (interface), um fenômeno interessante acontece: a formação de uma **camada de depleção**.
- Depleção: significa **ausência de portadores majoritários** na região próxima à junção PN.
- Mas como isso acontece?
- À medida que os átomos do **material tipo P** próximos a junção recebem os primeiros elétrons preenchendo suas lacunas, no **lado N** forma-se uma região de **íons positivos** (falta de elétrons) e, no **lado P**, uma região com **íons negativos** (excesso de elétrons), dificultando ainda mais a passagem de elétrons do material tipo N para o tipo P.
- Assim, a partir de um certo momento, este fluxo de elétrons **cessa** e esta região ionizada (camada de depleção) fica com **ausência** de elétrons e lacunas, que são os responsáveis pela corrente elétrica.





- Cada lado do diodo semicondutor recebe um nome: o **lado P** chama-se **anodo (A)** e o **lado N** chama-se **catodo (K)**.

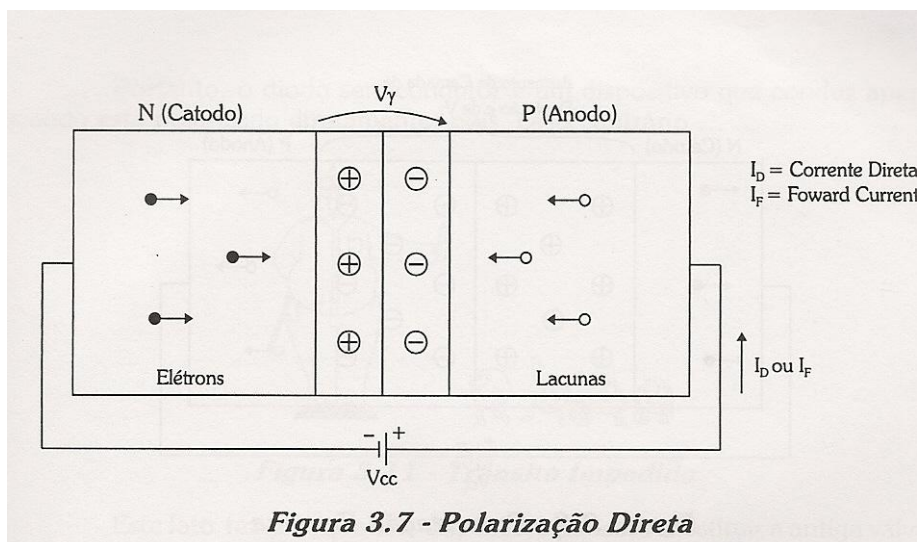


## Polarização da Junção PN

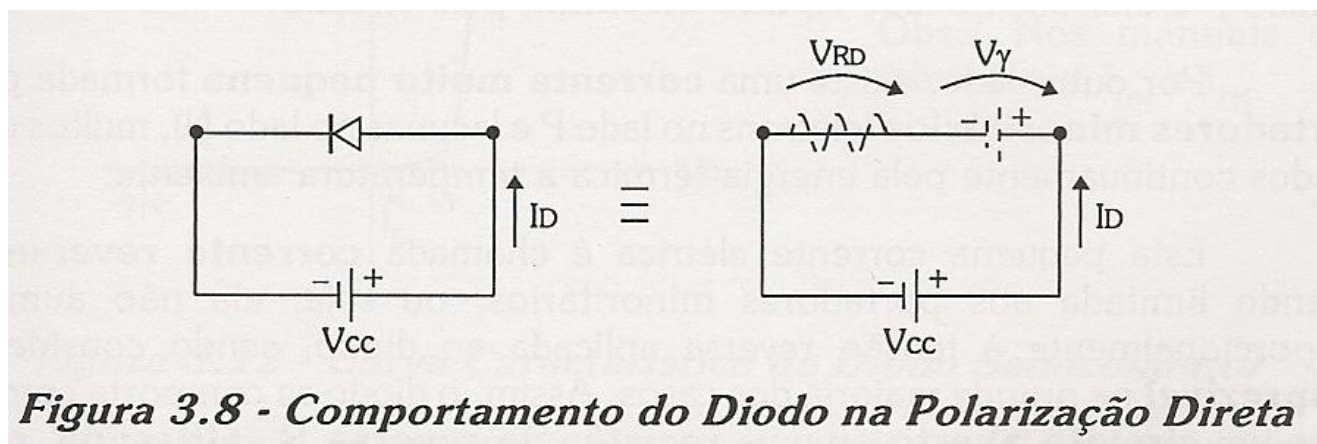
- Aplicando-se uma **tensão nos terminais do diodo**, a camada de depleção se modifica, alterando também as características da barreira de potencial. Estas modificações dependem do sentido da polarização do diodo.

### POLARIZAÇÃO DIRETA:

- A **polarização direta** ocorre quando o potencial **positivo** da fonte encontra-se ligado no **lado P** e o potencial **negativo** no **lado N**.

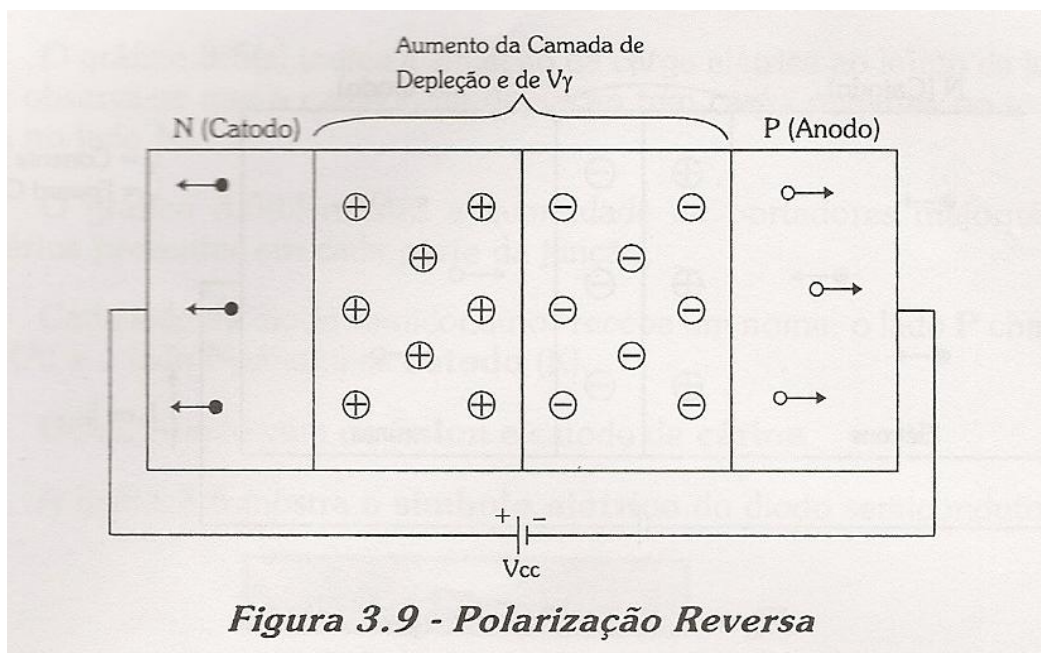


- Com  $V_{cc} > V_{\gamma}$ , os elétrons do lado N ganham mais energia por que são repelidos pelo terminal negativo da fonte, rompem a barreira de potencial  $V_{\gamma}$  e são atraídos para o lado P, atravessando assim, a junção.
- No lado P, eles recombina-se com as lacunas, tornando-se elétrons de valência, mas continuam deslocando-se de lacuna em lacuna, pois são atraídos pelo terminal positivo da fonte, formando-se uma **corrente elétrica de alta intensidade ( $I_D$  ou  $I_F$ )**, fazendo com que o diodo semiconductor se comporte como um **condutor** ou uma **resistência direta  $R_D$  muitíssimo pequena**.

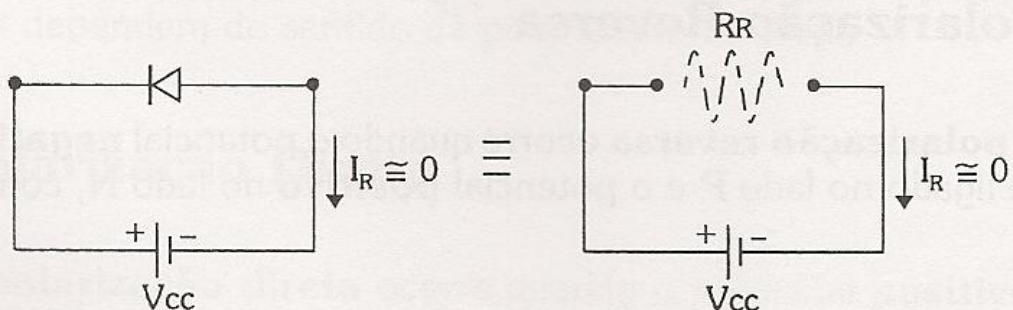


### POLARIZAÇÃO REVERSA:

- A **polarização reversa** ocorre quando o potencial **negativo** da fonte encontra-se ligado no **lado P** e o potencial **positivo** no lado **N**.

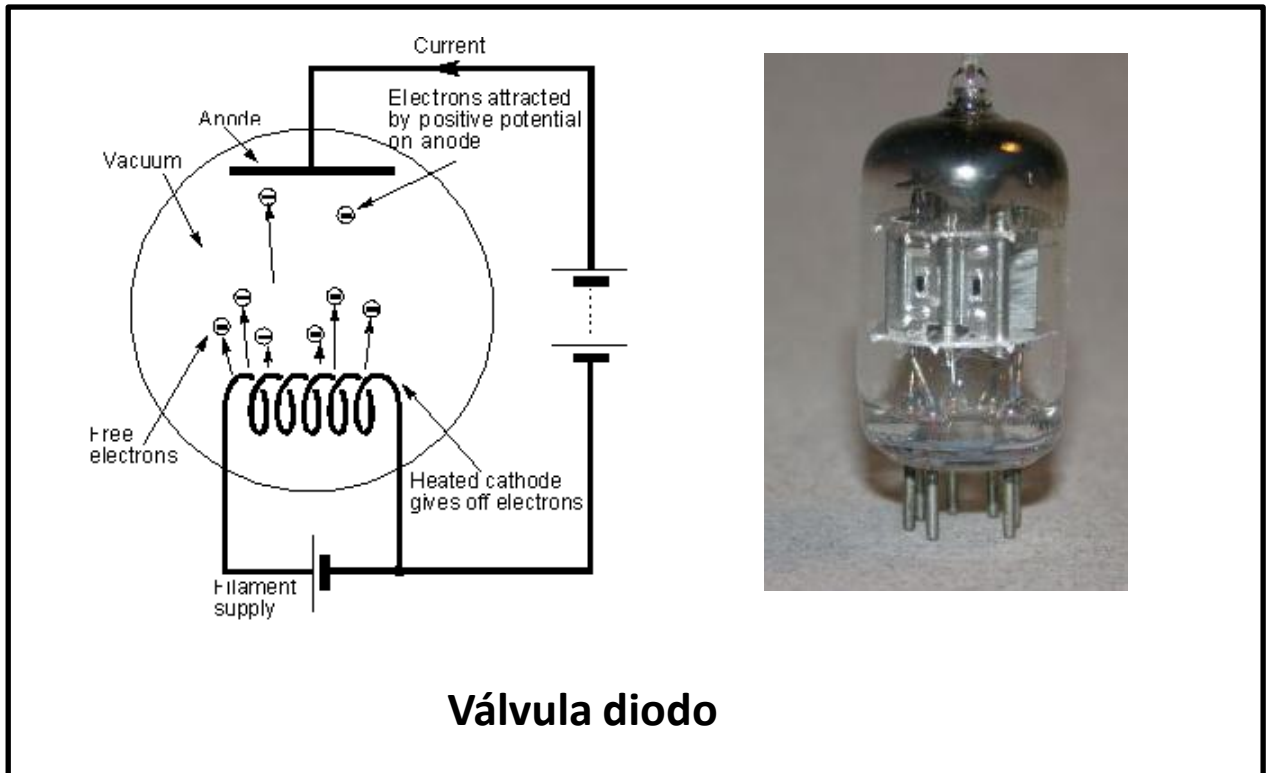


- Neste caso, os elétrons do lado N são atraídos para o terminal positivo e as lacunas para o terminal negativo da fonte. Com isso, forma-se mais íons positivos do lado N e íons negativos do lado P, aumentando, assim, a camada de depleção e, conseqüentemente, a barreira de potencial.
- A barreira de potencial aumenta até sua diferença de potencial se igualar à tensão da fonte de alimentação. Portanto, quanto maior a tensão da fonte, maior a barreira de potencial.
- Desta forma, os **portadores majoritários** de cada lado do diodo (lacunas no lado P e elétrons no lado N) **não circulam pelo circuito**.
- Por outro lado, existe uma **corrente muito pequena** formada pelos **portadores minoritários** (elétrons no lado P e lacunas no lado N), muitos deles criados continuamente pela energia térmica a temperatura ambiente.
- Esta pequena corrente elétrica é chamada de **corrente reversa ( $I_R$ )** estando limitada aos portadores minoritários, ou seja, ela não aumenta proporcionalmente à tensão reversa aplicada ao diodo, sendo considerada **desprezível** na grande maioria dos casos. Assim, o diodo se comporta como se fosse um **circuito aberto** ou uma **resistência reversa  $R_R$  altíssima**.



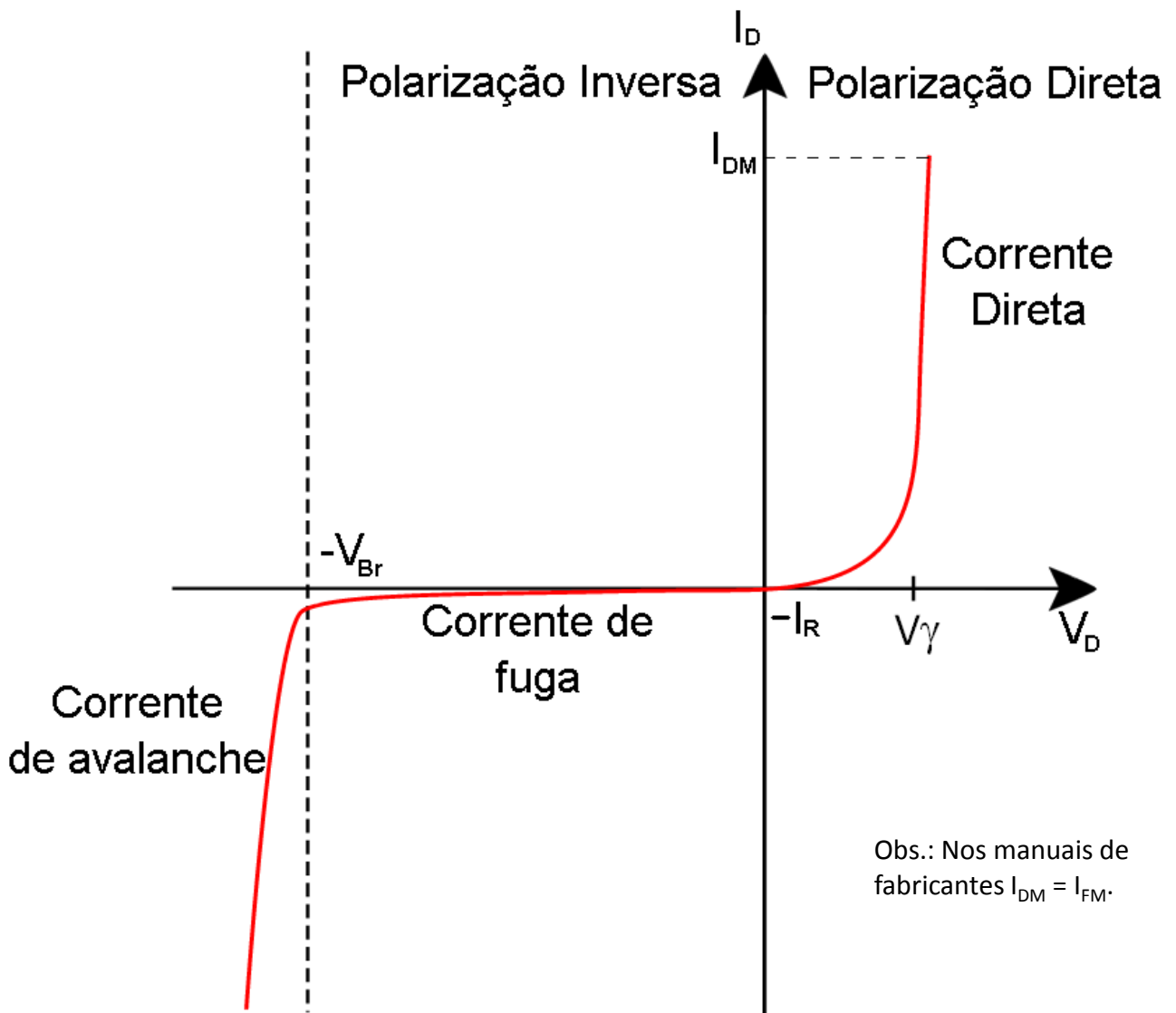
*Figura 3.10 - Comportamento do Diodo na Polarização Reversa*

- Portanto, o diodo semiconductor é um dispositivo que **conduz apenas quando está polarizado diretamente**, pois, caso contrário, o trânsito de portadores estará impedido.
- Este fato fez com que este dispositivo pudesse substituir a antiga válvula diodo, com a vantagem de dissipar menos potência e ter dimensões muito menores.



- Portanto, o diodo semiconductor é um dispositivo que **conduz apenas quando está polarizado diretamente**, pois, caso contrário, o trânsito de portadores estará impedido.
- Este fato fez com que este dispositivo pudesse substituir a antiga válvula diodo, com a vantagem de dissipar menos potência e ter dimensões muito menores.

- Para facilitar a compreensão do funcionamento do diodo semicondutor, pode-se descrever graficamente o seu comportamento elétrico através da **curva característica** que mostra a corrente em função da tensão aplicada.



**Figura:** Curva Característica do Diodo Semicondutor.

- Este gráfico mostra que para tensões negativas (polarização reversa) a corrente é **praticamente nula**, caracterizando uma resistência elétrica muito alta, sendo esta tensão limitada por  $V_{Br}$  (Tensão de ruptura ou *breakdown voltage*).



- Para tensões positivas (polarização direta), até  $V_\gamma$  a corrente é baixa, mas acima de  $V_\gamma$ , ela passa a ser bastante alta, caracterizando uma resistência elétrica muito baixa sendo esta corrente elétrica limitada por  $I_{DM}$  ou  $I_{FM}$ .
- Esta curva também mostra que, como todo dispositivo elétrico e eletrônico, o diodo semicondutor tem determinadas características e limitações que são especificações dadas pelos fabricantes.

### ***Principais Especificações do Diodo Semicondutor***

- 1) Como a junção PN possui uma barreira de potencial natural ( $V_\gamma$ ), na polarização direta só existe corrente elétrica se a tensão aplicada ao diodo:

$$V_D \geq V_\gamma$$

- 2) Na polarização direta, existe uma **corrente máxima** que o diodo pode conduzir ( $I_{DM}$  ou  $I_{FM}$ ) e uma **potência máxima** de dissipação ( $P_{DM}$  ou  $P_{FM}$ ), cuja relação é:

$$P_{DM} = V_D \cdot I_{DM}$$

- 3) Na polarização reversa, existe uma **tensão reversa máxima** que pode ser aplicada ao diodo chamada de **tensão de ruptura** ou **breakdown voltage** ( $V_{Br}$ ).
- 4) Na polarização reversa, existe uma **corrente muito pequena** denominada **corrente reversa** ( $I_R$ ).

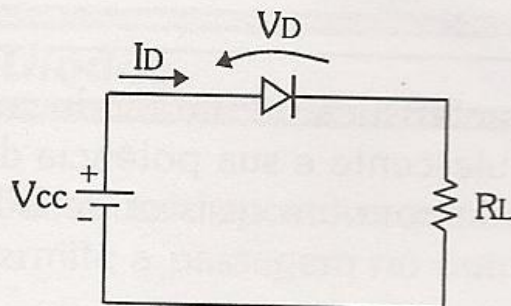
## Exemplo:

O diodo de código 1N4001 tem as seguintes especificações dadas pelo fabricante:

Corrente Direta Máxima	$I_{DM}$	1 A
Corrente de Fuga	$I_R$	10 $\mu$ A
Tensão de Ruptura	$V_{Br}$	50 V
Potência Máxima	$P_{DM}$	1 W

## Conceito de Reta de Carga

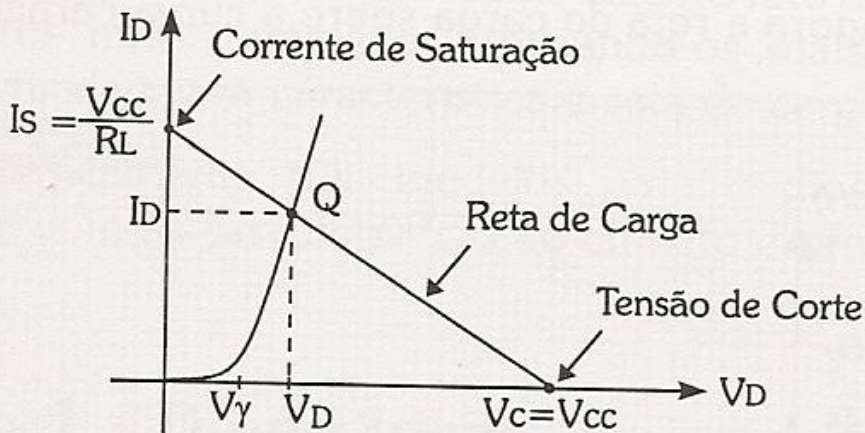
- A ligação de um diodo a uma fonte de alimentação deve ser feita sempre utilizando-se um resistor limitador em série, para protegê-lo contra a corrente máxima, no qual o resistor limitador é o próprio resistor de carga  $R_L$ .



*Figura 3.13 - Diodo Alimentado com Resistor de Carga*

- Denomina-se **ponto de trabalho** ou **ponto quiescente (Q)** do diodo os valores de tensão  $V_D$  e corrente  $I_D$  aos quais ele está submetido num circuito.

- O ponto Q pode ser obtido através da curva característica do diodo, na qual traça-se uma **reta de carga**.



**Figura 3.14 - Reta de Carga e Ponto Quiescente do Diodo**

- Para traçar a reta de carga, procede-se da seguinte forma:
  - 1) Determina-se a tensão de corte  $V_c$  (tensão no diodo quando ele está aberto);

$$V_c = V_{cc}$$

- 2) Determina-se a corrente de saturação  $I_s$  (corrente no diodo quando ele está em curto);

$$I_s = V_{cc}/R_L$$

- 3) Traça-se a reta de carga sobre a curva característica do diodo;
- 4) O ponto de quiescente ( $V_D$  e  $I_D$ ) corresponde exatamente às coordenadas do ponto Q onde a reta de carga intercepta a curva característica do diodo.
- 5) Pode-se, também, calcular a potência de dissipação do diodo pela equação:

$$P_D = V_D \cdot I_D$$

Exemplo:

- Dada a curva característica de um diodo, mostrada na Fig. 3.15, determinar o seu ponto quiescente e sua potência de dissipação, sabendo-se que ele está ligado em série com um resistor de  $50 \Omega$  e alimentado por uma fonte de  $2,2 \text{ V}$ .

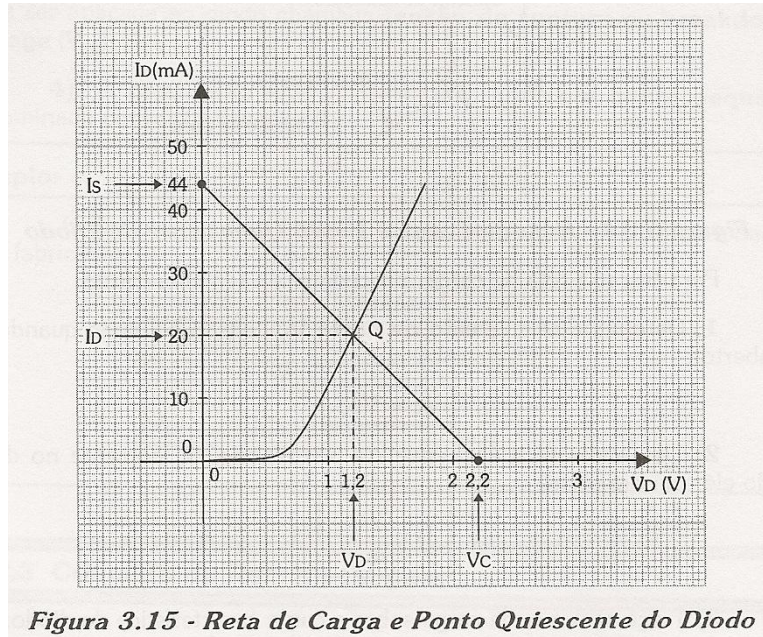


Figura 3.15 - Retas de Carga e Ponto Quiescente do Diodo

- **Resolução:**

Primeiramente, deve-se determinar a reta de carga:

$$V_c = V_{cc} \rightarrow V_c = 2,2 \text{ V}$$

$$I_s = \frac{V_{cc}}{R_L} \rightarrow I_s = \frac{2,2}{50} \rightarrow I_s = 44 \text{ mA}$$

Traça-se agora a reta de carga sobre a curva característica do diodo, Fig. acima.

Assim, o ponto quiescente resultante é:

$$V_D = 1,2 \text{ V} \quad \text{e} \quad I_D = 20 \text{ mA}$$

Finalmente, a potência dissipada pelo diodo vale:

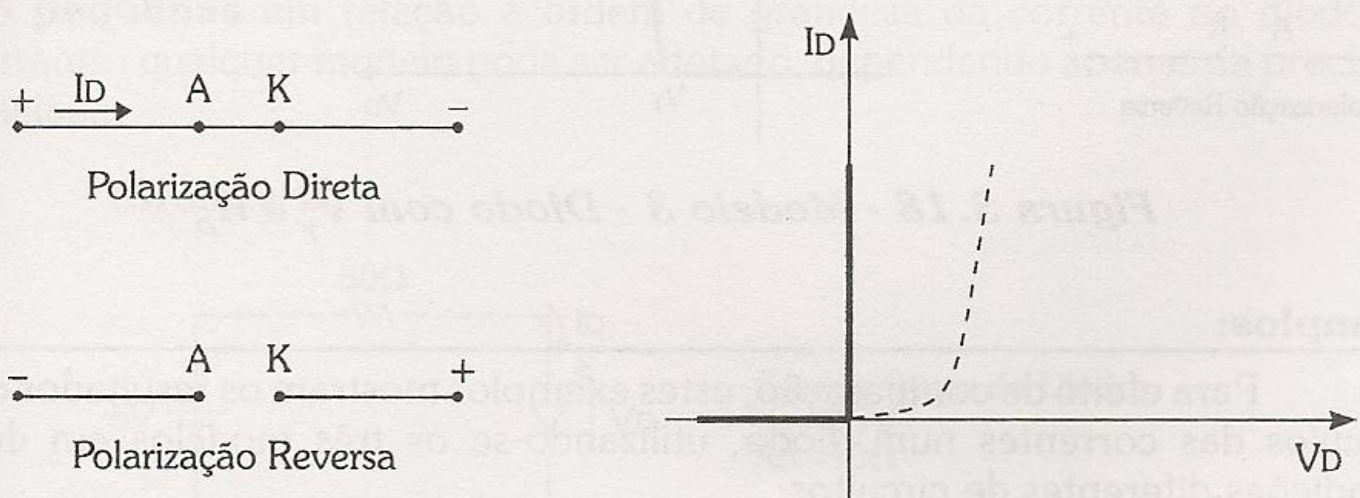
$$P_D = V_D \cdot I_D \rightarrow P_D = 1,20 \times 20 \times 10^{-3} \rightarrow P_D = 24 \text{ mW}$$

# Modelos de Diodos

- Idealmente, o diodo é um dispositivo que bloqueia toda a passagem de corrente num sentido e permite a passagem no outro.
- Sempre que os valores de tensão presentes no circuito forem muito maiores que  $V_\gamma$ , pode-se considerar o diodo como um elemento ideal.
- Porém, quando o valor de  $V_\gamma$  não for desprezível, é necessária a utilização de um modelo para o diodo, ou seja, a sua substituição por um circuito equivalente para que os cálculos relativos àquele circuito possam ser realizados com maior precisão.

## MODELO 1 – DIODO IDEAL

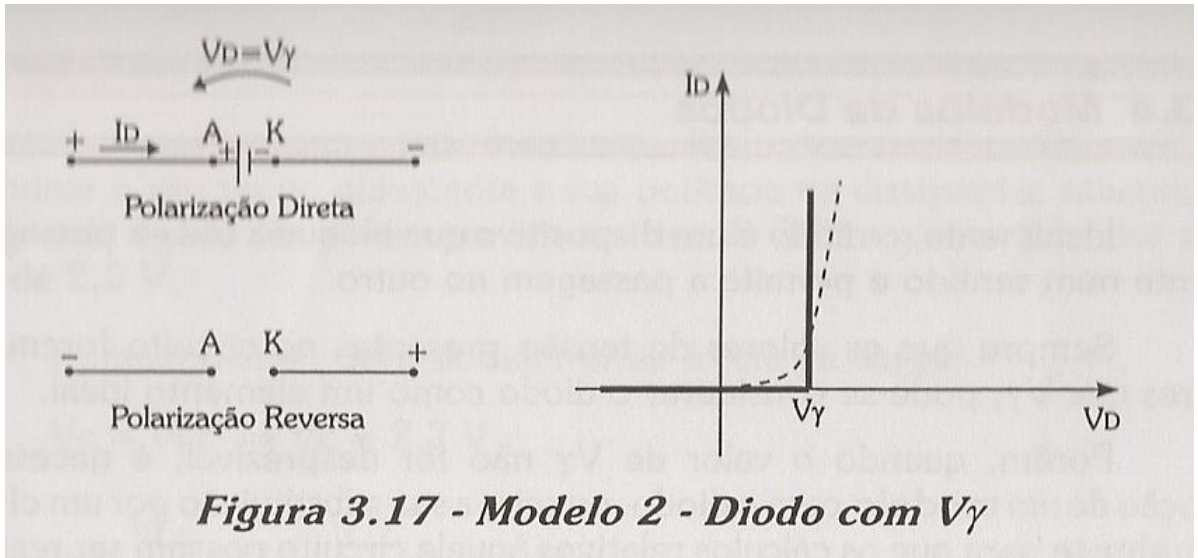
- Este modelo considera o diodo comportando-se como um condutor na polarização direta e como um circuito aberto na polarização reversa.



*Figura 3.16 - Modelo 1 - Diodo Ideal*

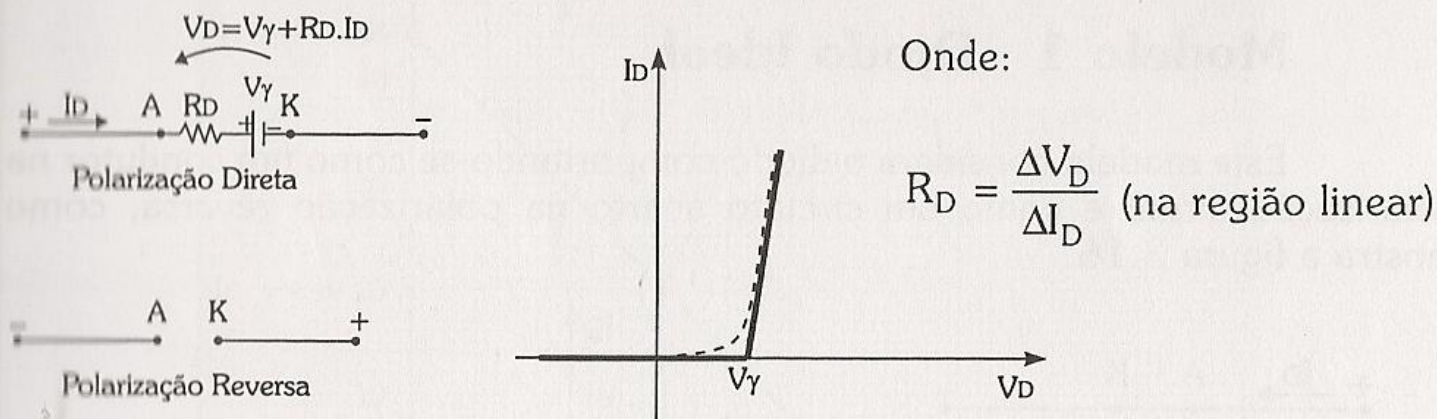
## MODELO 2 – DIODO COM $V_\gamma$

- Este modelo considera o diodo comportando-se como um condutor em série com uma bateria de valor  $V_\gamma$  na polarização direta, e como um circuito aberto na polarização reversa.



## MODELO 3 – DIODO COM $V_\gamma$ e $R_D$ (MODELO LINEAR)

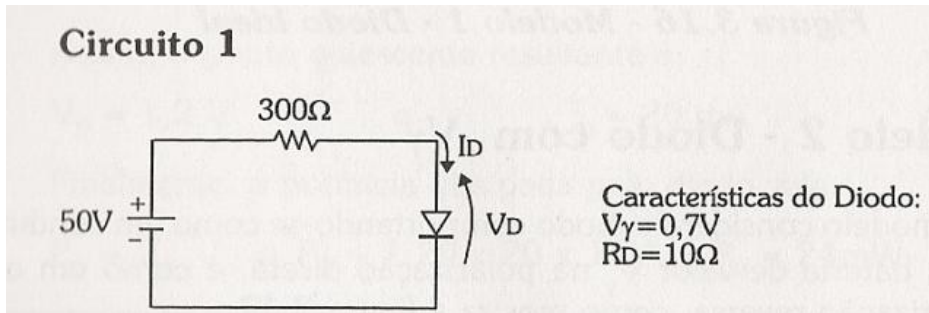
- Este modelo é mais próximo do real e considera o diodo comportando-se como um condutor em série com uma bateria de valor  $V_\gamma$  e uma resistência  $R_D$  correspondente à **inclinação de sua curva característica** na polarização direta, e como circuito aberto na polarização reversa.



*Figura 3.18 - Modelo 3 - Diodo com  $V_\gamma$  e  $R_D$*

- Exemplos:**

Para efeito de comparação, estes exemplos mostram os resultados dos cálculos das correntes num diodo, utilizando-se os três modelos em duas condições diferentes de circuitos:



**Modelo 1 - Diodo Ideal**

$$I_D = \frac{50}{300} = 167mA$$

**Modelo 2 - Diodo com  $V_{\gamma}$**

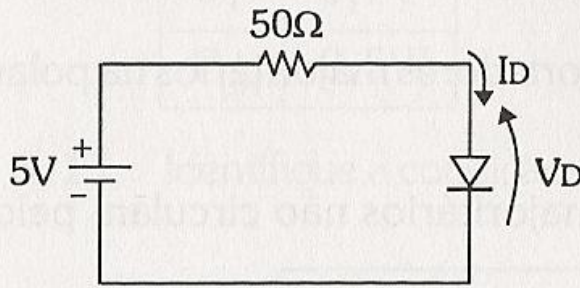
$$I_D = \frac{50 - 0,7}{300} = 164mA$$

**Modelo 3 - Diodo com  $V_{\gamma}$  e  $R_D$**

$$I_D = \frac{50 - 0,7}{300 + 10} = 159mA$$

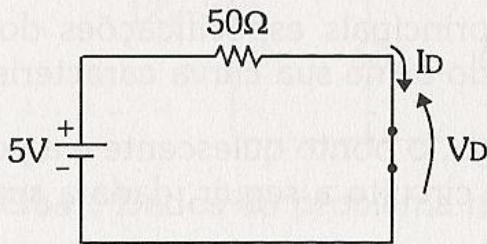
Neste caso, percebe-se que as **diferenças** entre os resultados obtidos são **pequenas** em relação à ordem de grandeza da corrente no diodo e, portanto, qualquer modelo pode ser adotado, dependendo apenas da precisão desejada.

## Circuito 2



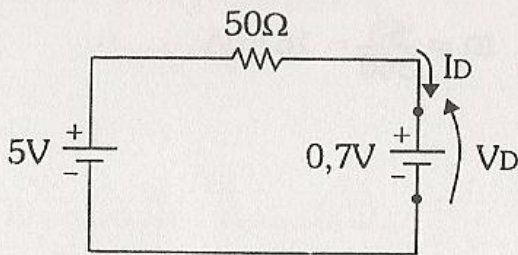
Características do Diodo:  
 $V_{\gamma} = 0,7V$   
 $R_D = 10\Omega$

### Modelo 1 - Diodo Ideal



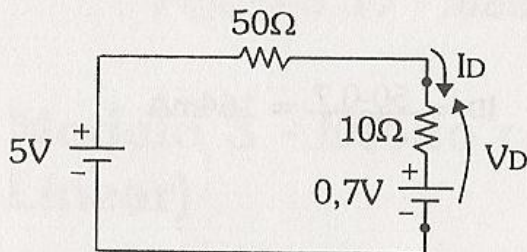
$$I_D = \frac{5}{50} = 100\text{mA}$$

### Modelo 2 - Diodo com $V_{\gamma}$



$$I_D = \frac{5 - 0,7}{50} = 86\text{mA}$$

### Modelo 3 - Diodo com $V_{\gamma}$ e $R_D$



$$I_D = \frac{5 - 0,7}{50 + 10} = 71,7\text{mA}$$

- Neste caso, percebe-se que as **diferenças** entre os resultados obtidos são quase da **mesma ordem de grandeza** da corrente no diodo e, portanto, o modelo 3 deve ser o preferido, pois a corrente resultante certamente é muito próxima do valor real.



# Referências Bibliográficas

- MARQUES, A. E. B., et al. Dispositivos semicondutores: diodos e transistores – 4 ed. São Paulo: Érica, 1998.
- BOYLESTAD, R. L., Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos – 8 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.