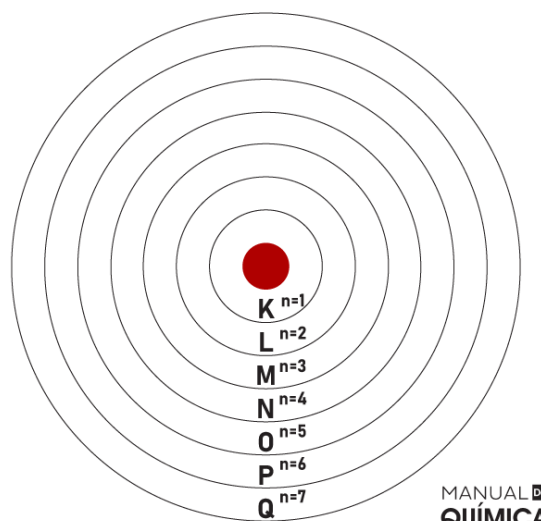


# Diodo Semicondutor

Fonte: Livro Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos. Cipelli, Markus & Sandrini

- Estrutura da Matéria.
  - Um corpo pode ser dividido em várias partes até chegar à menor delas, chamada molécula, que ainda apresenta as mesmas propriedades desse corpo. Dividindo a molécula, chega-se em átomos, que uma vez separados alteram as propriedades do corpo (a separação ocorre em reações químicas)
  - Átomo: integrantes da molécula, menor elemento químico existente. O átomo é composto por partículas denominadas subatômicas: prótons, elétrons e nêutrons.
  - Prótons e nêutrons integram o núcleo do átomo, sendo o primeiro de carga positiva e o segundo de carga nula. Elétrons têm carga negativa e realizam movimentos ao redor do núcleo. Sobre esses movimentos dos elétrons, podem ser separados em níveis, há elétrons mais distantes do núcleo e outros mais próximos, decorrente da quantidade de energia que cada elétron tem.

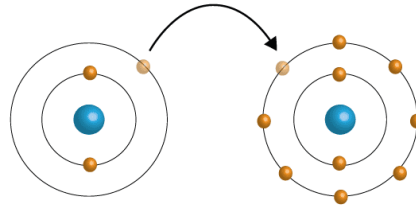


- Cada camada tem seu limite de quantidade de elétrons:

Nível (n)	Camada	Nº máximo de elétrons
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32
5	O	32
6	P	18
7	Q	8

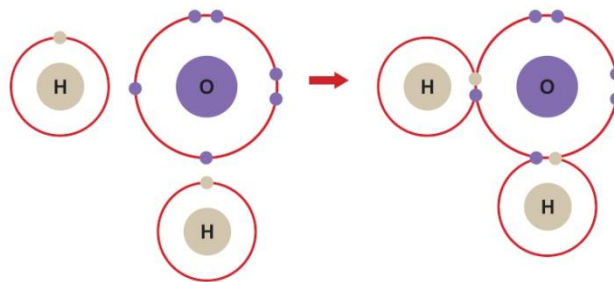
- Cada elemento se difere pela sua quantidade de elétrons/prótons que naturalmente estão em quantidades iguais no átomo.
- Átomos estáveis apresentam 8 elétrons em sua camada de valência (última camada com elétrons presentes), este é o caso dos gases nobres.
- Os fenômenos químicos e elétricos ocorrem apenas com os elétrons da camada de valência.
- Valência
  - Condição natural de estabilidade de um átomo, é o que ocorre com os gases nobres, sua camada de valência sempre apresenta 8 elétrons.
- Eletrovalência
  - Condição de estabilidade entre átomos quando eles se ligam: dois átomos se aproximam e quantidades de 1 a 3 elétrons de um átomo passam a se aproximar do outro, de modo que um átomo apresente uma lacuna e o outro apresente um excesso de elétrons.

- Geralmente ocorre com átomos da seguinte situação: um átomo tem 1 elétron na cama de valência e o outro 7. Ou no caso das quantidade 2 e 6, 3 e 5.



- Covalência

- Condição de estabilidade entre átomos quando eles se ligam: um elétron passa a pertencer a duas camadas de valência diferentes.



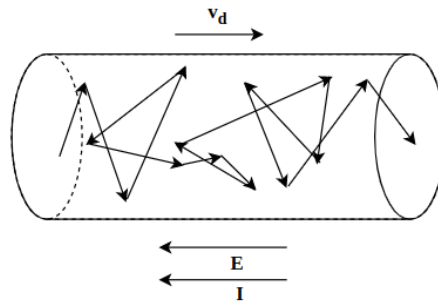
- Condutores

- Materiais que apresentam uma quantidade grande de elétrons livres, fracamente ligados ao núcleo, que se movimentam de maneira ordenada (não caótica como o movimento térmico) quando submetidos a uma tensão. A quantidade de elétrons livres reflete em maior intensidade de corrente que se traduz por alta condutividade:

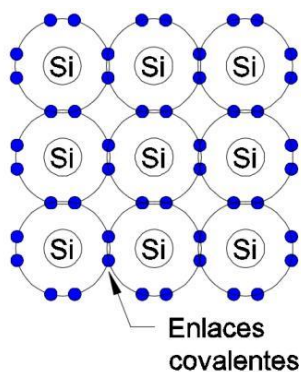
$$n_e \propto I \propto \sigma$$

- Elétrons são atraídos pelo pólo positivo da bateria que fornece a tensão, conforme elétrons se movem, surgem

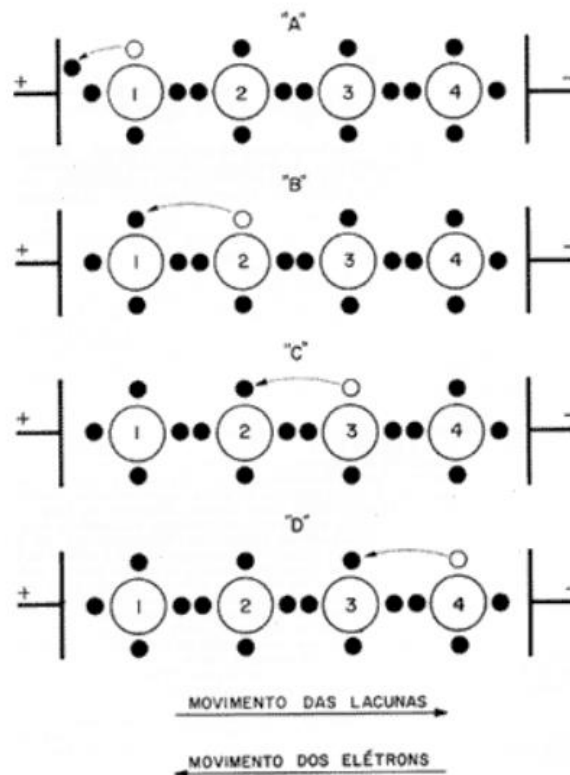
lacunas nos lugares em que não estão mais, fazendo com que os elétrons de qualquer lugar do condutor se movam.



- O efeito do aumento de temperatura em condutores reduz sua eficácia: aumento no movimento térmico desordenado dos elétrons, mais colisões com os íons positivos, maior agitação dos íons positivos.
- Isolantes
  - Materiais que apresentam elétrons fortemente ligados ao núcleo.
  - O aumento de temperatura reduz seu caráter isolante, porém não o suficiente para gerar uma corrente efetiva.
- Semicondutores
  - Conhecidos especialmente pelo silício e germânio, disposto de maneira cristalina, orientação rígida.
  - Esses materiais são tetravalentes (possuem 4 elétrons na camada de valência. Portanto, suas ligações covalentes constituem uma rede desta maneira:

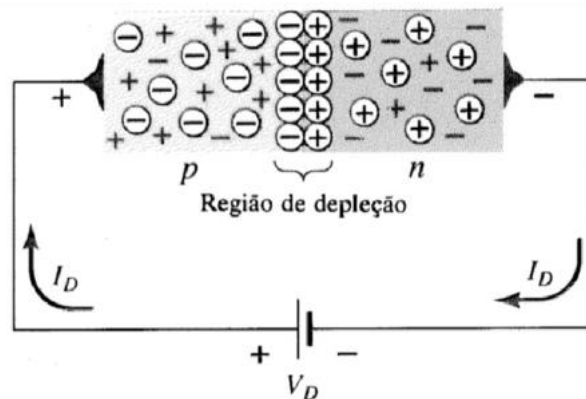


- Nesse estado, o material semiconductor funciona como isolante. Sendo necessário fornecer energia ao material para os elétrons terem sua ligação com o núcleo enfraquecida.
- 
- Corrente e Portadores de Carga
  - No caso de um elétron se tornar livre na estrutura de um semiconductor, o local que representa a ausência do elétron é denominada lacuna e consiste numa carga positiva. O movimento dos elétrons representa também o movimento da lacuna que sempre será oposta a orientação do movimento dos elétrons:



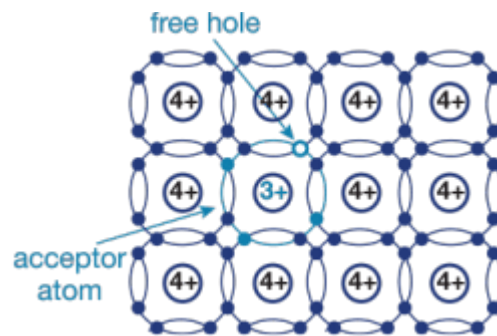
- Quando um material com elétrons e lacunas é conectado a uma fonte de tensão, os elétrons são atraídos pelo pólo positivo da fonte. O elétron ter abandonado sua posição pra ocupar gradativamente várias posições de lacunas até chegar ao pólo positivo da fonte, indica um movimento contrário das lacunas, como demonstrado acima. Por outro lado, é possível interpretar que as lacunas são atraídas

pelo pólo negativo da fonte, realizando um movimento até ela.

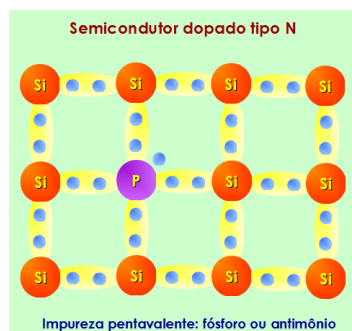


- Aqui, interpreta-se  $I_D$  como movimento das lacunas, portanto,  $-I_D$  seria o movimento de elétrons
- O elétron atraído pelo pólo positivo da bateria cria uma lacuna, que será ocupada por outro elétron, que cria sua respectiva lacuna. Por meio desse mecanismo, nota-se a corrente de elétrons rumo ao pólo positivo e a corrente de lacunas rumo ao pólo negativo, assim, os materiais semicondutores apresentam duas correntes dentro de si (isso também casa com a definição de corrente elétrica).
- Recombinação: Processo no qual um material, que apresentaria inicialmente elétrons livres e lacunas, tem seus portadores de carga se movendo pelo material de modo que não apresente mais portadores de cargas, mas sim íons positivos e negativos.
- Dopagem: Processo de adição de impurezas (elementos diferentes de Si e Ge) no cristal semicondutor. Esse processo se dá pelo aquecimento do cristal semicondutor, em altas temperaturas as ligações covalentes são desfeitas e o material passa a estar no estado líquido. Nesse estado líquido é possível bombardear o material com impurezas, que quando resfriadas, o material em estado sólido apresenta lacunas ou elétrons livres.

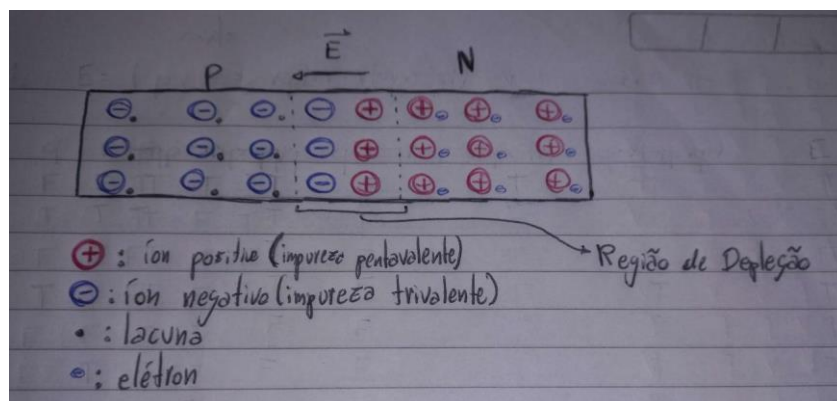
- Formação do Semicondutor tipo P:
  - Utilizam-se elementos trivalentes como impurezas (Alumínio, Índio, Boro e Gálio)
  - Durante a formação de ligações, essas impurezas trivalentes ligarão ao elemento semicondutor, porém decorrente de sua trivalência, a cada elemento impuro, faltará uma ligação de elétron, portanto, forma-se uma lacuna:



- O cristal semicondutor impuro, com portador de carga positiva (lacuna) é chamado de material P.
- Formação do Semicondutor tipo N:
  - Utilizam-se elementos pentavalentes como impurezas (Antimônio, Fósforo e Arsênico).
  - Durante a formação de ligações, essas impurezas pentavalentes ligarão ao elemento semicondutor, porém decorrente de sua pentavalência, a cada elemento impuro, um elétron a mais será adicionado à estrutura do material semicondutor pela limitação de oito elétrons em cada camada de valência de átomo, portanto, forma-se um elétron livre:



- O cristal semiconductor impuro, com portador de carga negativo (elétron) é chamado de material N.
- Impureza Doadora: impurezas pentavalentes, que doam um elétron ao material semiconductor
- Impureza Receptora: impurezas trivalentes, que doam uma lacuna ao material semiconductor.
- Diodo de Junção: É a junção dos materiais P e N, também chamado de Junção PN.
  - No material P existem portadores de carga:
    - Majoritários: os positivos, lacunas.
    - Minoritários: os negativos, elétrons.
  - No material N existem portadores de carga:
    - Majoritários: os negativos, elétrons.
    - Minoritários: os positivos, lacunas.
  - Difusão de cargas: movimento de cargas da região de maior densidade para menor densidade, ou seja, no material N, existem bastantes elétrons enquanto no material P existem poucos, portanto, ocorre o movimento dos elétrons do material N para o material P.
- Junção PN não polarizada:

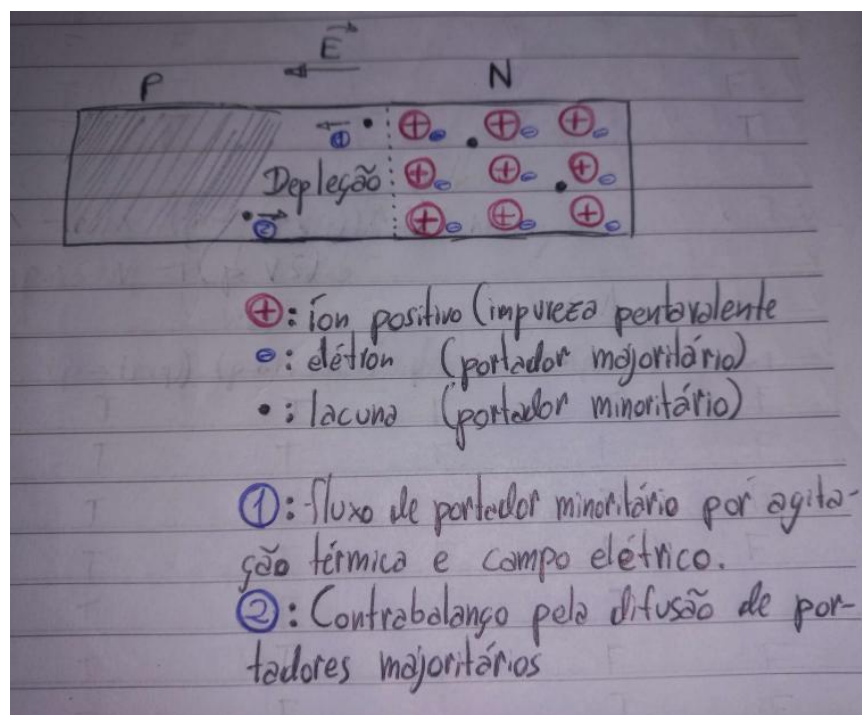


- No local chamado de Região de Depleção, ocorre o processo de difusão descrito acima, tanto entre lacunas e



elétrons. Assim, essa região não apresenta cargas livres, decorrente da recombinação elétron-lacuna, apenas íons positivos e negativos.

- Destacando que os elétrons do material N ou as lacunas do material P não são capazes de cruzar o material devido à barreira que os íons criam: elétrons do material N são repelidos pelos íons do material P, enquanto as lacunas do material P são repelidas pelos íons do material N. Assim garantindo a manutenção do equilíbrio da junção.
- Entre os íons surge um campo elétrico chamado de barreira de potencial, que impede a circulação de corrente elétrica, decorrente de sua orientação em relação à tendência de movimento de cargas positivas e negativas no campo. O valor da tensão entre os íons é de 0,6V para semicondutores de Silício e 0,3V para de Germânio (Valor para temperatura ambiente).

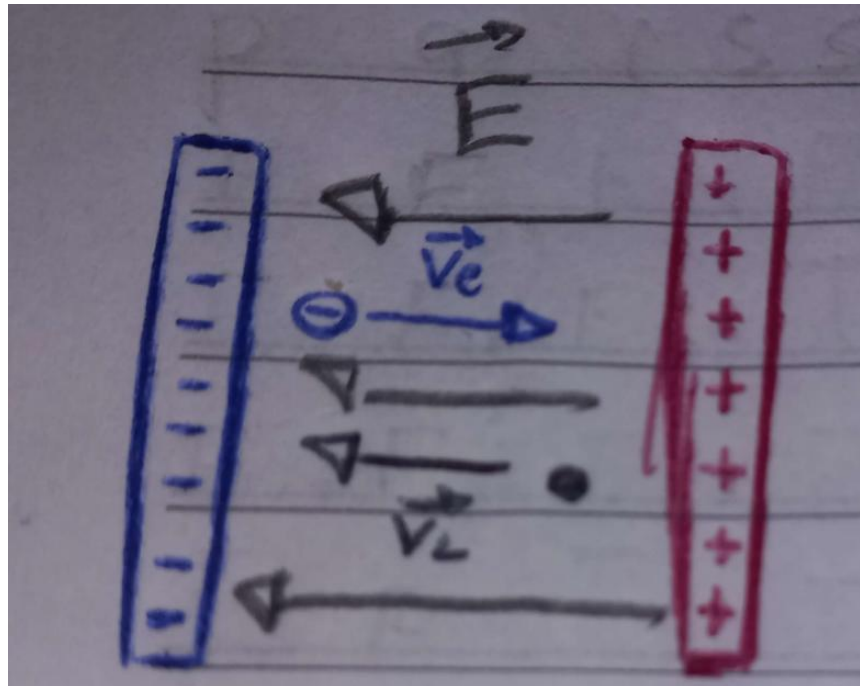


- Em caso do material semiconductor estiver sob efeito de aumento de temperatura, a agitação molecular faz com que os portadores minoritários dos materiais P e N cruzem a região de depleção (facilitada pela orientação do campo). A este processo é chamado fluxo de portadores minoritários (acontece com lacunas e elétrons simultaneamente).
- Em resposta a esse processo, ocorre o fluxo dos portadores majoritários por difusão, a consequência é o aumento da região de depleção ( $\Delta x$ ), tal como da barreira de potencial (A seguinte relação é válida para o caso do campo elétrico uniforme):

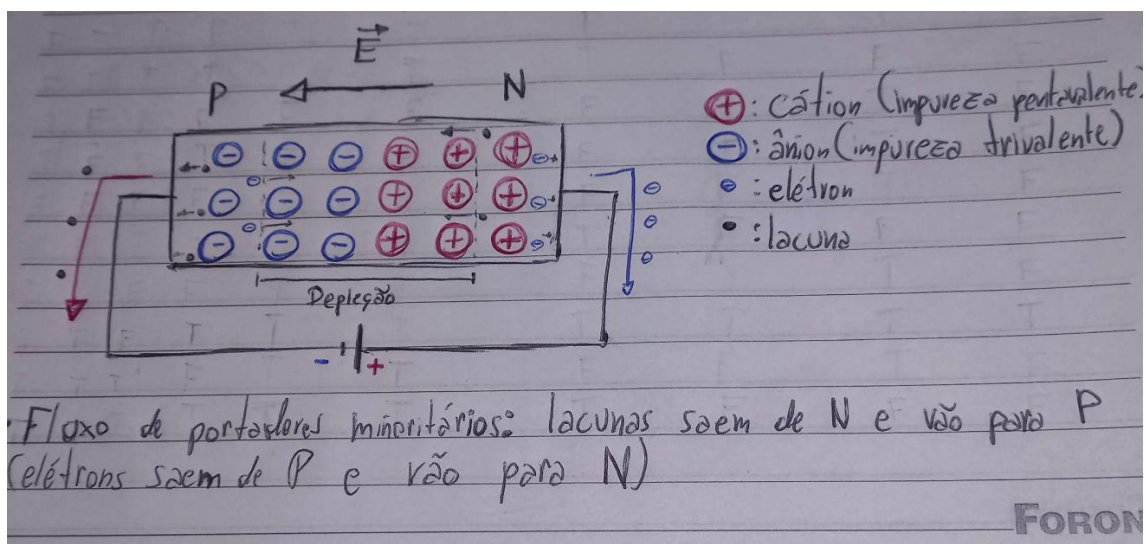
$$E \cdot (\uparrow \Delta x) = \uparrow V$$

- Junção PN polarizada reversamente:
  - A polarização reversa na junção PN consiste em conectar o terminal positivo da fonte de tensão no terminal de N, enquanto o positivo da fonte no terminal de P.
  - De modo simplificado, os portadores de carga de P (lacunas) são atraídos pelo terminal negativo da fonte. O mesmo ocorre com os elétrons de N.
  - A região de depleção aumenta, pois os íons sem os portadores de carga, que foram atraídos pela fonte, é o que constitui tal camada.
  - É importante destacar que a expressão do campo elétrico uniforme é válida: há aumento no valor da barreira de potencial, tanto pelo alargamento da região de depleção ( $\Delta x$ ) como a contribuição positiva do campo elétrico ( $E$ ) gerado pela fonte na barreira de potencial.
  - O aumento da barreira de potencial impede ainda mais a circulação dos portadores majoritários, porém o fluxo dos minoritários é facilitado, semelhante ao caso do aumento de temperatura, no entanto, é um caso puramente de orientação conforme a bateria e seu campo:

- Tendência de movimento dos portadores minoritários na barreira de potencial:

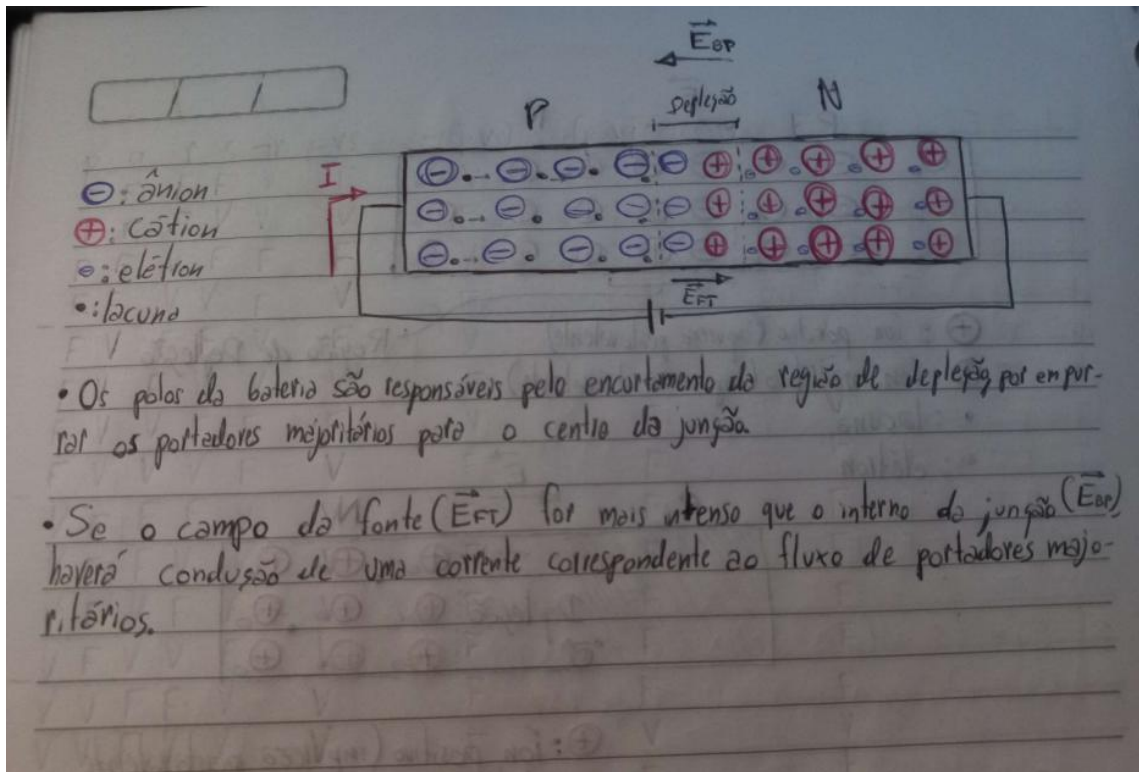


- Esquema da polarização reversa com aumento da região de depleção e fluxo dos portadores minoritários:

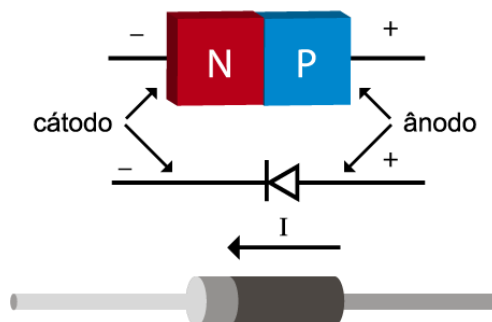


- Em geral a corrente (movimento de lacunas) que flui de P para N é de portadores minoritários, enquanto a de N para P é de portadores majoritários.

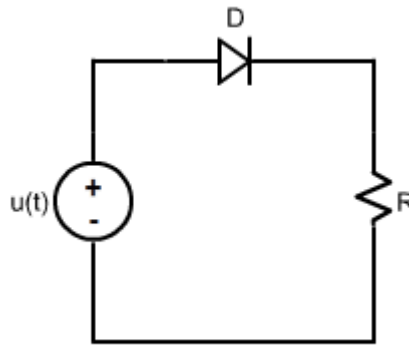
- Um mnemômico que representa essa ideia é: o material P gera lacunas, portanto de lá que as lacunas devem sair. Caso ocorra o contrário, se trata dos portadores de carga em menor quantidade (minoritário) no material P que é cheio de elétrons livres.
- A região de depleção tem seu valor limite, nesse caso, a corrente inversa recebe um nome especial: **corrente de saturação inversa**. A junção polarizada inversamente apresenta resistência na ordem de  $M\Omega$ , enquanto a corrente de saturação  $nA$ .
- Junção PN polarizada diretamente
  - A polarização direta na junção PN consiste em conectar o terminal positivo da fonte de tensão no terminal de P, enquanto o positivo da fonte no terminal de N.
  - A junção PN quando polarizada diretamente, tem campo elétrico oposto à orientação do campo elétrico da fonte.
  - O efeito do campo elétrico sobre a junção PN é o encurtamento da região de depleção (repulsão entre os terminais da bateria com o portadores majoritários), isso resulta na queda da resistência elétrica do material.
  - Se ocorre o caso do campo gerado pela fonte ser mais intenso que a interna do material, ocorre a condução de corrente elétrica e o material comporta como curto. No caso contrário, a junção se comportará em aberto.



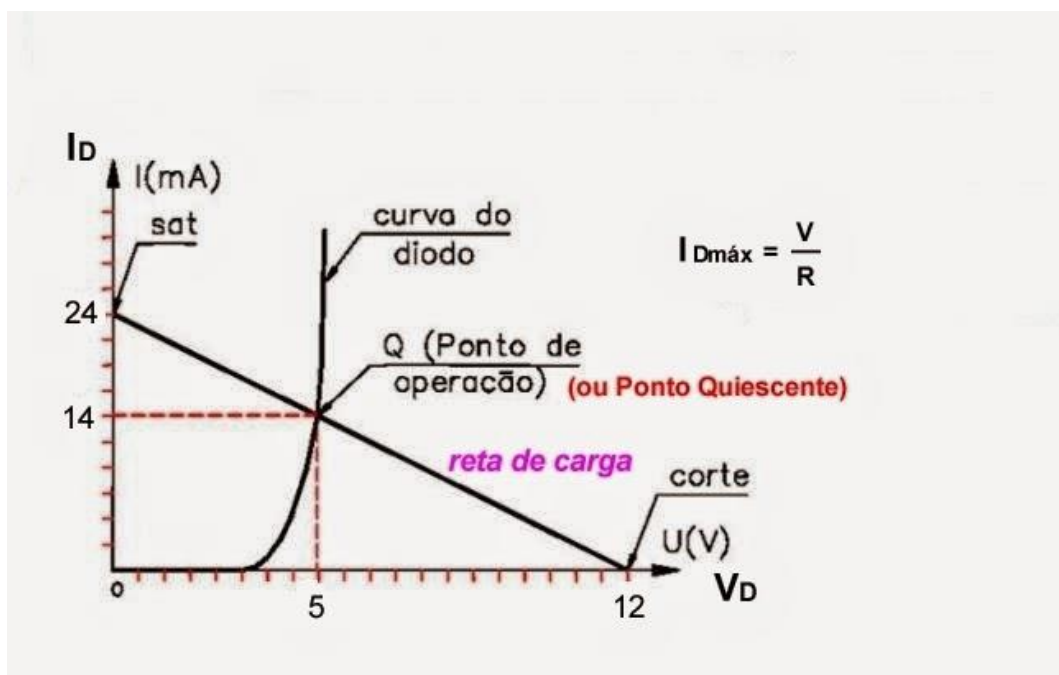
- Observações sobre a junção é que ela corresponde a um receptor (fonte de polaridade oposta e resistência interna), portanto, a corrente entra pelo seu terminal positivo.
- Quando polarizado diretamente, a junção apresenta uma resistência elétrica na ordem de  $10\Omega$ , enquanto polarizado indiretamente sua resistência elétrica fica na ordem de  $10^6\Omega$  ( $M\Omega$ ).
- Quando essa junção é utilizado em retificação de sinais, é chamado de Diodo de Junção, com a material P chamado de Ânodo (cheio de Ânions e lacunas) e o material N chamado de Cátodo (cheio de Cátions e elétrons).



- Curva característica do Diodo Semicondutor
  - Polarização Direta: Com baixos valores de tensão, não há corrente elétrica, só após fornecer um valor maior que a barreira de potencial (0,3V para germânio e 0,7V para silício). Seu comportamento é exponencial:  $I = f(V)$ .
  - Polarização Reversa: Pequenos valores de tensão geram quase o mesmo valor de corrente em nanoampères. A única variação abrupta de corrente é quando atinge-se a tensão de ruptura (tensão máxima reversa), a consequência é um surto de corrente, o efeito avalanche:
  - Aplicação de tensão reversa gera corrente de portador minoritário acelerada ainda pelo campo interno do diodo. Quanto mais tensão, mais corrente, até o ponto de ruptura dielétrica do material semicondutor, tal como a própria ruptura do material.
  - Obs.: Nos Diodos de tensão de referência (Zener) a polarização reversa tem efeito semelhante ao direto, no entanto, com diferentes valores de tensão e sem ocorrer a ruptura do material.
  
- Traçado de Reta de Carga no Diodo
  - Todo diodo tem suas especificações de fábrica informando quais são seus valores de operação, portanto, um estudo de um circuito eletrônico resistivo é aplicável para determinar como deve ser construído o circuito de modo a operar o diodo adequadamente.
  - Considere um circuito de uma fonte, um diodo e um resistor em série, com Anodo no positivo da fonte e o Catodo no resistor.



- O diodo é polarizado diretamente, assim, faz-se análise do circuito sem o resistor (considera-o como curto) e outro com o resistor, numa relação de função:  $I = f(V)$ .
- Na consideração do resistor como um curto, a corrente do diodo é exponencial em função da tensão.
- Considerando o circuito de resistência  $R$  válida, existe uma relação linear de coeficiente  $R$ . O ponto em que  $I$  tem seu valor máximo se trata do diodo funcionando como curto (interruptor fechado), o ponto em que  $V$  tem maior valor se trata do diodo em aberto (interruptor aberto). No momento em que há condução do diodo, ele já está fechado. O ponto ideal do diodo corresponde ao ponto de intersecção entre reta e curva exponencial:



- Efeito da Temperatura no Diodo

- Os limites de temperatura do diodo são 150°C (Ge) ou 100°C (Si).
- Para aumentos de 1°C, ocorre a queda de potencial em 2,5mV. Portanto, o efeito da variação de temperatura resulta em -2,5mV/°C.
- Exemplificação: O diodo de silício, que apresenta 0,6V em seus terminais a 25°C, permite a passagem de uma certa quantidade de corrente elétrica. Quando está sob 50°C, sua tensão é 0,5375V, para a condução da mesma quantidade de corrente elétrica
- Conta executada:
- Para  $V = f(T)$ ,  $\Delta T$  sendo 1°C,  $\Delta V = -2,5\text{mV}$
- Portanto:  $\frac{\Delta V}{\Delta T} = -2,5\text{mV}/^\circ\text{C}$  ou  $\Delta V = -2,5 \cdot \Delta T$
- $V_i = 0,6\text{V}$  e  $T_i = 25^\circ\text{C}$ . Desejando saber em  $T_o = 50^\circ\text{C}$ .
- $\Delta T = 50 - 25 \therefore \Delta T = 25^\circ\text{C}$
- $\Delta V = -2,5 \cdot 25 \therefore \Delta V = -0,0625\text{V}$
- $V_o = V_i + \Delta V \therefore V_o = 0,6 - 0,0625\text{V} \therefore V_o = 0,5375\text{V}$
- Explicação: a temperatura é responsável por criar mais portadores livres de carga, influenciando diretamente na corrente:
- $\uparrow I = (\uparrow n) \cdot e \cdot A \cdot v_d$

### Cálculo da Densidade de Corrente

- $J$  = Densidade de Corrente ( $\text{A}/\text{m}^2$ )
- $i$  = Corrente Elétrica (A)
- $A$  = Área ( $\text{m}^2$ )

$$J = \frac{i}{A}$$

- Outra forma de calcular a densidade de corrente é:

$$J = n_v \cdot e \cdot v_d$$

- $n_v$  é o numero de elétrons livres por metro cúbico
- $e$  é a carga do elétron,
- $v_d$  é a velocidade de deriva das cargas.



- Assim, com menos tensão, é possível fazer a mesma corrente passar pelo diodo:

## VARIAÇÃO DA TENSÃO COM A TEMPERATURA

