

# Circuitos Eletr nicos

## Aula 02 - Conceitos de Semicondutores

# Apresentação

---

Nesta aula, iremos estudar os materiais com os quais alguns importantes componentes da eletrônica, como transistores e diodos, são fabricados, os semicondutores. Conheceremos suas principais características e, também, o processo de dopagem para criação dos materiais tipos N e P, que estudaremos a seguir. Posteriormente, aprofundaremos nosso estudo quanto ao dispositivo semicondutor diodo de junção.

## Objetivos

Ao final desta aula, você será capaz de:

- Conhecer a origem da eletrônica através das diversas descobertas e criações realizadas nesta área.
- Conhecer conceitos básicos do processo de dopagem e os materiais do tipo N e P;
- Identificar o funcionamento do diodo de junção;
- Caracterizar os modos de operação de um diodo de junção.

# Os semicondutores

---

Você consegue se lembrar da última aula e dizer a diferença entre os elementos condutores e isolantes?

O **condutor** é o termo aplicado a qualquer material que sustenta um grande fluxo de carga ao se aplicar, através de seus terminais, uma fonte de tensão de amplitude limitada (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2004). Em outras palavras, são aqueles materiais que favorecem a passagem de corrente elétrica.

Já os materiais **isolantes** são aqueles que, ao contrário dos condutores, oferecem um nível muito baixo de condutividade quando submetidos a uma fonte de tensão, ou seja, são aqueles materiais que dificultam a passagem de corrente elétrica.

Sendo assim, como o próprio nome já explicita, os materiais chamados **semicondutores** são aqueles que têm um nível de condutividade entre os isolantes e os condutores. Quando puros e em estruturas cristalinas, e em temperaturas muito baixas, os semicondutores atuam como isolantes. Com o aumento da temperatura eles passam a ter mais elétrons livres e atuam como condutores.

Os semicondutores são chamados **intrínsecos** quando são cristalinos puros, sem qualquer impureza. Por isso, encontramos os átomos de silício, por exemplo, ligado a apenas outros átomos de silício. Neste caso, os átomos de silício se ligam entre si através de uma ligação química denominada covalente.

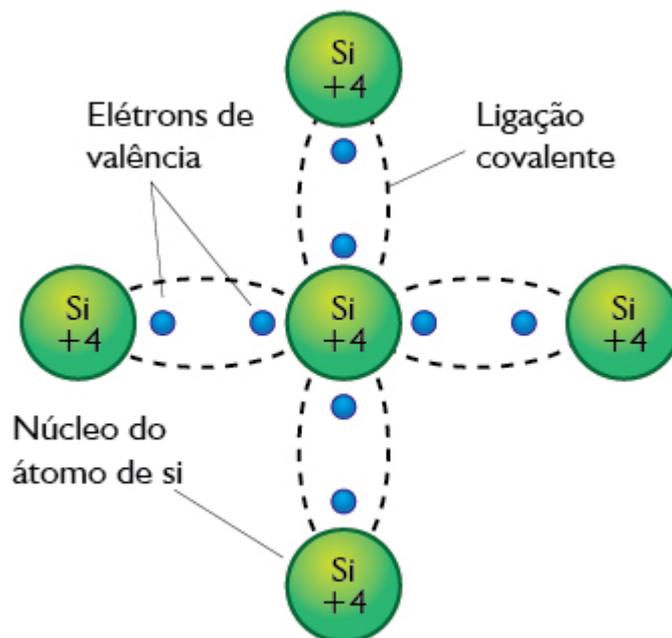
## Atenção!

A ligação covalente é um tipo de ligação química caracterizada pelo compartilhamento de um ou mais pares de elétrons entre átomos, causando uma atração mútua entre eles, os quais mantêm a molécula resultante unida e estável.

Fonte: <http://www.brasilecola.com/quimica/teoria-octeto.htm>. Acesso em: 22 dez. 2015.

No exemplo a seguir, na figura 1, vemos as ligações covalentes que o silício realiza. Esse elemento químico possui quatro elétrons na última camada. Numa estrutura cristalina pura, cada átomo de silício compartilha um de seus elétrons com outro átomo de silício. Atingindo, assim, a estabilidade.

**Figura 01** - Ligações covalentes realizadas entre os átomos de silício.



**Fonte:** Adaptado de Ferreira (1987).

Repare que a figura 1 mostra apenas átomos de silício. Entretanto, os semicondutores utilizados para a confecção de dispositivos eletrônicos não são puros. Inserem-se, propositalmente, impurezas determinadas que têm como

objetivo mudar radicalmente as características daquele material. Em especial, a condutividade. Esse processo é chamado de **dopagem**.

## Atenção!

Dopagem é o procedimento de adição de impurezas – elementos químicos específicos – em semicondutores com a finalidade de dotá-los de propriedades de condução controlada específica.

Isso ocorre porque átomos que têm oito elétrons em sua última camada da eletrosfera são mais estáveis do que aqueles que não apresentam essa característica. Você pode encontrar mais detalhes sobre esse assunto pesquisando sobre o teorema do octeto.

Fonte: adaptado de [http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem\\_eletr%C3%B4nica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem_eletr%C3%B4nica). Acesso em: 16 jul. 2013.

Os semicondutores dopados são denominados **extrínsecos**. Eles podem ser de dois tipos: tipo N e tipo P.

## Semicondutor do tipo N

---

Nos semicondutores do tipo N, átomos de antimônio, por exemplo, são inseridos como impurezas. Esse elemento químico tem em sua camada de valência, ou seja, na última camada da eletrosfera, cinco elétrons.

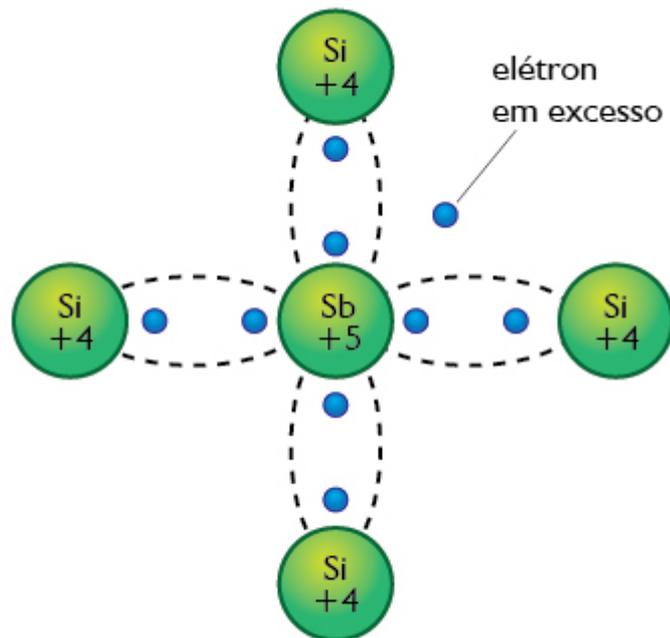
Quando misturado ao silício, quatro desses cinco elétrons são compartilhados entre os dois elementos, com o objetivo de ambos se tornarem estáveis, como será mostrado a seguir, na figura 2. Nesse processo, um dos elétrons não estará fortemente ligado a nenhum dos dois átomos e com isso ficará “sobrando”.

Sendo assim, havendo esses elétrons relativamente livres no material, aumentamos a sua condutividade pela presença de elementos portadores de carga. Além disso, um detalhe importante é que ambos os átomos estariam

eletronicamente estáveis.

Tais semicondutores são então denominados de tipo **N**, pois, pelo excesso de **elétrons**, comportam-se como um material negativo. E os elétrons são chamados **portadores majoritários** nesse tipo de material.

**Figura 02** - As ligações covalentes entre quatro átomos de silício e um de antimônio.



**Fonte:** Adaptado de Ferreira (1987).

Na Figura 2, podemos observar uma representação do silício dopado com antimônio. Repare no elétron que "sobrou", ele estará livre para deixar o átomo de antimônio agora.

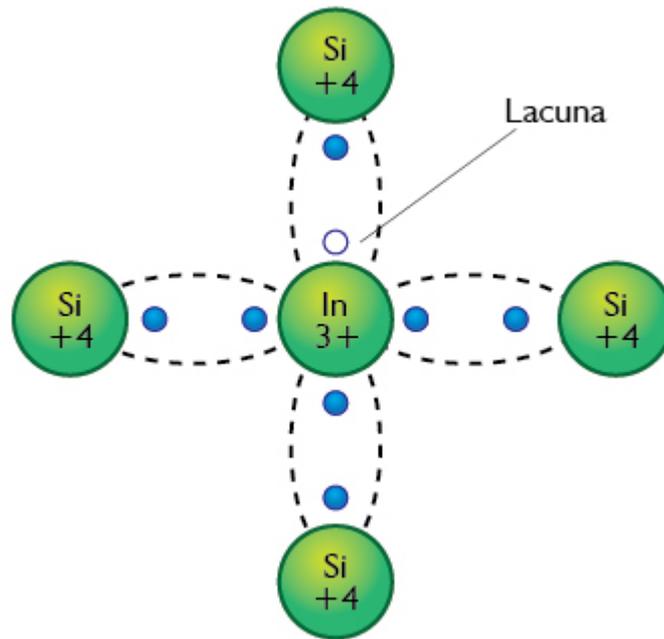
## Semicondutor do tipo P

---

Os semicondutores do tipo P, por sua vez, são dopados com átomos que contêm três elétrons em sua última camada, como o elemento índio (In) ou o boro (B).

Os três elétrons que estão nas últimas camadas vão ser compartilhados com o elemento químico semicondutor. Como as impurezas têm apenas três elétrons na última camada, faltará ainda um elétron para que o composto atinja a estabilidade. Cria-se como uma lacuna, um "buraco"! Observe isso na figura 3.

**Figura 03** - Ligação covalente entre quatro átomos de silício feita com um átomo de índio.



**Fonte:** Adaptado de Ferreira (1987).

Estes tipos de materiais (tipo P) são caracterizados pela grande falta de elétrons, ou seja, pelo número excessivo de lacunas. Neste caso, as **lacunas** são chamadas de **portadores majoritários** e os **elétrons** de **portadores minoritários**.

## O diodo de Junção

O primeiro dispositivo eletrônico que vamos estudar é o chamado diodo de junção ou simplesmente **diodo**. Trata-se da união física de um semicondutor tipo P com um semicondutor tipo N. Quando fazemos essa ligação, criamos um dispositivo com características muito interessantes e muito úteis na eletrônica.

O que você acha que acontece com o excesso de elétrons do semicondutor tipo N, quando estão em contato com o semicondutor do tipo P, que possui várias lacunas? Fica a reflexão. Analisaremos essa situação posteriormente.

Bom, para formar um **Diodo de junção NP**, é necessário “unir” fisicamente o material tipo N com o material tipo P. Formamos, assim, um dispositivo com dois terminais: um deles ligado ao material tipo P e outro ligado ao material tipo N. Conforme ilustrado na figura 4.

**Figura 04** - Simbologia que mostra a união entre um semiconductor tipo N e um semiconductor tipo P para formar um diodo de junção.



**Fonte:** Adaptado de Ferreira (1987).

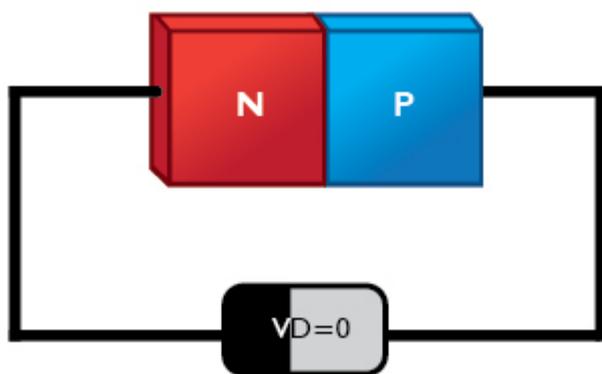
Sendo um dispositivo de dois terminais, temos três possibilidades que devem ser analisadas para o completo entendimento do diodo:

1. Polarização direta – diferença de potencial  $V_D > 0$  aplicada aos terminais PN do diodo;
2. Polarização reversa – diferença de potencial  $V_D < 0$  aplicada aos terminais PN do diodo;
3. Sem polarização – diferença de potencial  $V_D = 0$  aplicada aos terminais PN do diodo.

Vamos começar nossa análise com o diodo submetido a uma diferença de potencial nula ( $V_D = 0$ ), ou seja, sem polarização.

## Diodo sem polarização ( $V_D = 0$ )

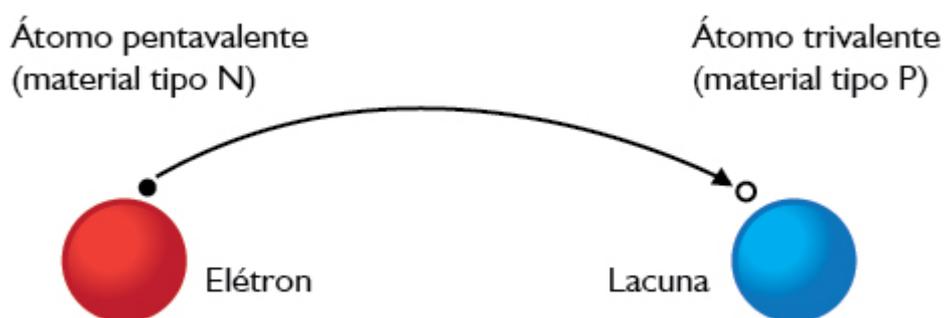
**Figura 05** - Diodo sem polarização.



**Fonte:** Adaptado de Ferreira (1987).

Como o material tipo N possui um excesso de elétrons e o material tipo P um excesso de lacunas, cria-se um fluxo de elétrons do material tipo N para o material tipo P. As lacunas próximas à junção do material tipo P são ocupadas pelos elétrons que estavam em excesso no material tipo N. Esse esquema está representado na figura 6.

**Figura 06** - Esquema que mostra a ocupação de uma lacuna por um elétron livre.



**Fonte:** Marques, Choureri Junior e Cruz (2012).

Na região da junção entre os dois tipos de semicondutores, os portadores de cargas vão se extinguindo, já que o excesso de elétrons do material tipo N vai ser atraído pelas lacunas do material tipo P. Essa região é chamada **região de depleção**.

## Atenção!

A região de depleção em um diodo é aquela onde os portadores de cargas, ou seja, os elétrons livres ou as lacunas já não existem mais nessa região.

Em vez de elétrons livres e lacunas, encontramos íons positivos e negativos. Você deve estar se perguntando: - De onde vieram esses íons?

## Região de Depleção

Para o entendimento do funcionamento do diodo, devemos lembrar e deixar bem claro duas coisas muito importantes:

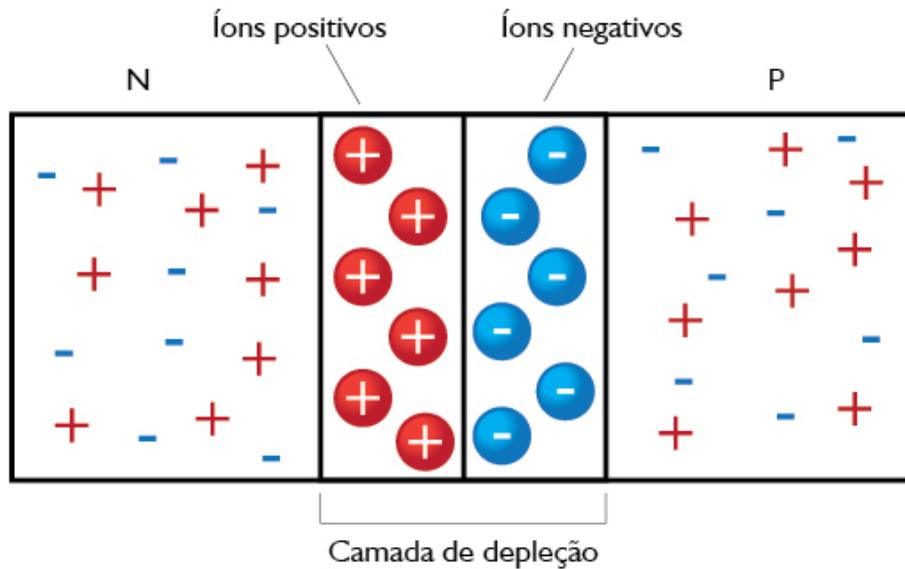
1. Um átomo é considerado eletricamente neutro quando o número de elétrons em sua eletrosfera (cargas elétricas negativas) é igual ao número de prótons em seu núcleo (cargas elétricas positivas);
2. A estabilidade química, entretanto, é atingida somente quando os átomos alcançam oito elétrons na sua última camada. Por isso que eles ligam-se uns aos outros, ou compartilhando elétrons (ligação covalente) ou até cedendo e recebendo elétrons (ligação iônica).

Vamos analisar mais profundamente o que acontece na junção de semicondutores de tipos diferentes, caso nenhuma diferença de potencial seja aplicada. Quando, na região da junção, os elétrons passam do semicondutor tipo N para o semicondutor tipo P, os átomos que perderam os elétrons alcançam a estabilidade química, ou seja, ficam com 8 elétrons na última camada. Entretanto, tornam-se íons positivos já que, como perderam elétrons, agora o número de prótons no núcleo está em maior número do que os elétrons que estão orbitando na eletrosfera.

Da mesma forma, do outro lado da junção, na região pertencente ao semicondutor tipo P, os átomos que recebem os elétrons vindos do semicondutor tipo N se estabilizam quimicamente, mas tornam-se íons negativos. Isso porque, como receberam elétrons, o número deles na eletrosfera vai ser superior à quantidade de prótons no núcleo.

Então, na região de depleção do lado do semicondutor tipo **P**, temos um acúmulo de **íons negativos**. Já na região de depleção do lado do semicondutor tipo **N**, temos um acúmulo de **íons positivos**. Na medida em que mais elétrons “cruzam a fronteira” da junção, mais íons são formados. Entretanto, esses íons acabam dificultando o ato de “cruzar a fronteira” da junção. Você percebeu a razão disso? Não? Então observe bem a figura 7.

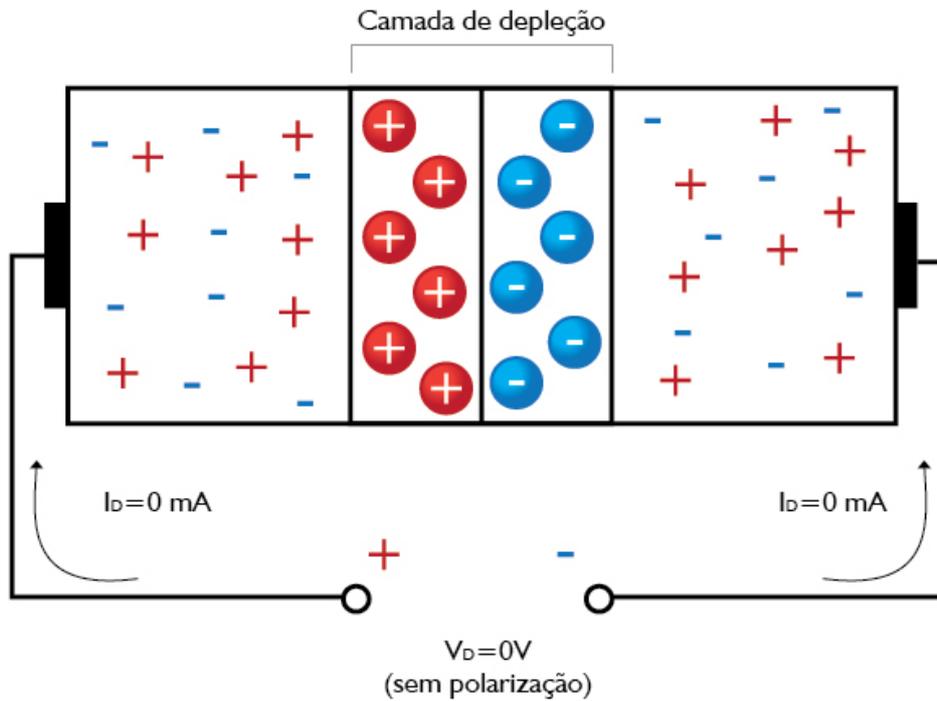
**Figura 07** - Barreira de potencial formada pelos íons positivos e negativos na região de junção.



Ora, isso acontece porque o semiconductor tipo N tem um excesso de elétrons. Esses elétrons livres tendem a ir para o semiconductor tipo P. Mas, veja que curioso: o elétron tem uma carga elétrica negativa e para que ele consiga chegar até uma lacuna disponível, terá que atravessar um obstáculo. Esse obstáculo é nada mais do que os íons negativos formados do lado da junção do semiconductor tipo P, que já receberam os elétrons vindos do lado do semiconductor tipo N.

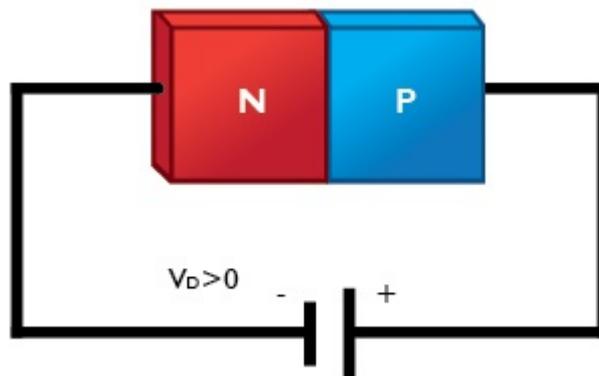
Assim, surge uma força elétrica de repulsão entre os elétrons livres do lado do semiconductor tipo N e a "muralha" de íons negativos do lado do semiconductor tipo P da junção. A figura a seguir sintetiza esse processo:

**Figura 08** - Diodo submetido à diferença de potencial 0, sem polarização.



## Polarização Direta ( $V_D > 0$ )

**Figura 09** - Diodo polarizado positivamente.

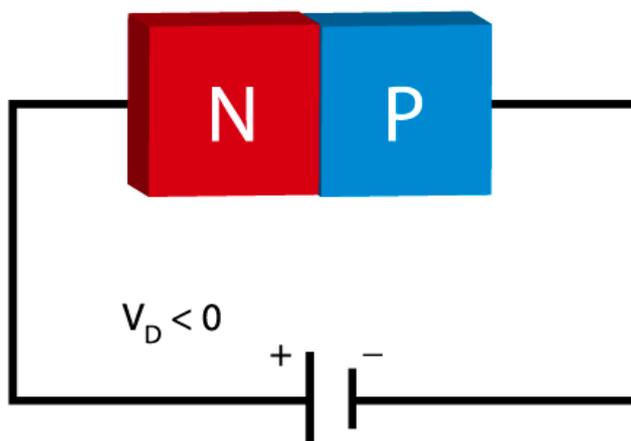


O semiconductor tipo N tem excesso de elétrons. Tais elétrons não conseguem ultrapassar a barreira criada pelos íons da região de depleção porque a força elétrica criada pelos íons negativos do lado do semiconductor tipo P da junção é maior que a força elétrica criada pela lacuna, logo atrás dela.

Se conectarmos o terminal negativo de uma fonte de tensão ao semicondutor tipo N, teremos os elétrons livres desse lado sendo repelidos pelo polo negativo da fonte. Esse é o “empurrão extra” necessário para levar os elétrons ao outro lado do diodo.

## Polarização Reversa ( $V_D < 0$ )

**Figura 10** - Diodo polarizado negativamente.



O semicondutor tipo N tem excesso de elétrons. Eles vão ser atraídos pelo polo positivo da fonte de tensão. Como os átomos dessa região vão perder elétrons, mais íons positivos são formados.

Da mesma forma, o lado do semicondutor tipo P possui um excesso de lacunas, ou seja, uma falta de elétrons que vai ser preenchida pelos elétrons provindos do polo negativo da bateria. Sendo assim, por receberem mais elétrons, íons negativos são formados.

Os íons positivos e negativos vão se agrupando na junção e, com isso, eles vão ampliando a região de depleção. Essa barreira dificulta ainda mais a passagem de elétrons da região P para a N. Ou seja, não haverá circulação dos portadores majoritários pelo circuito, não haverá corrente elétrica! E isso não mudará com a tensão aplicada. Quanto maior essa tensão entre os terminais do diodo, maior a barreira de potencial.

# Resumo

---

Nesta aula, vimos que dependendo das impurezas que são colocadas junto aos semicondutores, podemos criar um semicondutor tipo N ou um semicondutor tipo P. No semicondutor tipo N temos, pela inserção de impurezas com 5 elétrons na última camada, elétrons sobrando ("livres"), que possibilitam a condução de eletricidade nos semicondutores. Você compreendeu que os elétrons livres que aparecem podem ser doados a outros materiais, sendo assim, atuam como uma carga negativa. Já no semicondutor tipo P, pela inserção de impurezas com apenas três elétrons na última camada, ao se ligarem quimicamente ao semicondutor fazem aparecer lacunas. E, por fim, você viu que tais lacunas atraem elétrons, funcionando como uma carga positiva.

Vimos também que os diodos são formados pela união de um semicondutor tipo P com um semicondutor tipo N. Então, um diodo é um dispositivo com dois terminais e, por isso, podemos ligá-lo ao circuito de duas formas distintas: polarizado positivamente ou polarizado negativamente. Quando polarizamos negativamente, temos um comportamento de uma chave aberta. Já quando polarizamos positivamente, funciona como uma chave fechada.

## Autoavaliação

---

1. O que significa dizer que um determinado material é um semicondutor? Quais características ele possui?
2. Os semicondutores formam ligações covalentes. Como funciona esse tipo de ligação química?
3. O que é a dopagem de semicondutores?
4. Como é formado um semicondutor tipo N? Quais as suas características?
5. Como é formado um semicondutor tipo P? Quais as suas características?
6. Qual o portador majoritário do semicondutor tipo P? E o do tipo N? Justifique.

7. O que é um diodo?
8. Quantos terminais possui um diodo, como ele pode ser polarizado?
9. Descreva o comportamento do diodo quando polarizado positivamente.
10. Descreva o comportamento do diodo quando polarizado negativamente.

## Referências

---

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. [s.l.]: Pearson, 2012.

FERREIRA, Aitan Póvoas. **Curso Básico de Eletrônica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Biblioteca técnica Freitas Bastos, 1987.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. 2. ed. [s.l.]: McGraw-Hill, 1997.

MARQUES, Angelo Eduardo B.; CHOURERI JUNIOR, Salomao; CRUZ, Eduarod Cesar Alves. **Dispositivos semicondutores: Diodos e Transistores**. 13. ed. rev. São Paulo: editora Érica, 2012.