



# **Materiais elétricos e semicondutores**



# **Materiais elétricos e semicondutores**

Fernando Cesar Batistel

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

**Presidente**

Rodrigo Galindo

**Vice-Presidente Acadêmico de Graduação**

Mário Ghio Júnior

**Conselho Acadêmico**

Alberto S. Santana  
Ana Lucia Jankovic Barduchi  
Camila Cardoso Rotella  
Cristiane Lisandra Danna  
Danielly Nunes Andrade Noé  
Emanuel Santana  
Grasiele Aparecida Lourenço  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo  
Paulo Heraldo Costa do Valle  
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

**Revisão Técnica**

Ruy Flávio de Oliveira  
Sandro Fonseca Quirino

**Editoração**

Adilson Braga Fontes  
André Augusto de Andrade Ramos  
Cristiane Lisandra Danna  
Diogo Ribeiro Garcia  
Emanuel Santana  
Erick Silva Griep  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Batistel, Fernando Cesar  
B333m      Materiais elétricos e semicondutores / Fernando Cesar  
Batistel. – Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A.,  
2017.  
160 p.

ISBN 978-85-8482-851-7

1. Semicondutores. 2. Condutores elétricos. 3. Aparelhos  
e materiais elétricos. I. Título.

CDD 621.31042

---

2017

Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza  
CEP: 86041-100 – Londrina – PR  
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br  
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

# Sumário

<b>Unidade 1   Estruturas atômicas e cristalinas e os fundamentos de física do estado sólido de bandas de energia</b>	<b>7</b>
Seção 1.1 - Aplicações das bandas de energia, condução elétrica nos semicondutores e materiais intrínsecos	9
Seção 1.2 - Aplicações, características dos condutores e polarização	19
Seção 1.3 - Materiais semicondutores	31
<b>Unidade 2   Classificação dos materiais: isolantes e condutores, dielétricos e piezoelétricos</b>	<b>45</b>
Seção 2.1 - Materiais semicondutores: metaloides de germânio, policristais e monocristais, arseneto de gálio, silício-carbono, silício-germânio e grafeno	47
Seção 2.2 - MOS, CMOS e CMOSFET	57
Seção 2.3 - Doping e tipos de doping	67
<b>Unidade 3   Circuitos integrados</b>	<b>81</b>
Seção 3.1 - Circuitos integrados	83
Seção 3.2 - SOC, 3D-IC	93
Seção 3.3 - Famílias de CIs	105
<b>Unidade 4   Tópicos avançados em semicondutores</b>	<b>119</b>
Seção 4.1 - Supercondutores	121
Seção 4.2 - Outros materiais: computação por DNA, cálculos com cristais e dispositivos biomórficos	131
Seção 4.3 - Computação quântica	143



# Palavras do autor

Olá, caro engenheiro! É com muita satisfação que apresentamos um tema de grande relevância para a Engenharia e que o profissional desta área não pode deixar de conhecer: Materiais Elétricos e Semicondutores.

Na busca por tecnologias inovadoras e com materiais mais eficientes, é necessário ter o conhecimento adequado para apresentar soluções que sejam economicamente viáveis e que tragam bem-estar para as pessoas.

Neste livro, abordaremos alguns conceitos básicos que esclarecerão, de forma concreta, dúvidas que os engenheiros têm sobre semicondutores e qual o melhor modo de usá-los em nosso benefício. Como alguns materiais elétricos têm capacidade de conduzir energia elétrica em determinados momentos e em outros não conduzem? Esse conhecimento fez que computadores ficassem cada vez menores e eficientes, por exemplo, celulares mais modernos e outros equipamentos que transformam a vida das pessoas.

Nosso livro está estruturado em quatro partes. Na primeira unidade, estudaremos as bandas de energia e suas aplicações em semicondutores e quais são os materiais utilizados para fazer um chip. Partindo destes princípios chegaremos à segunda unidade, na qual estudaremos as classificações dos materiais utilizando suas características; os efeitos que estes condutores produzem quando utilizamos determinados materiais; componentes, como transistores e diodos, quando feitos com determinados materiais, possuem características diferentes em algumas situações e polarizações diferentes também. Na terceira unidade, teremos como estudo as propriedades desses materiais, sejam mecânicas, elétricas, térmicas e outras. Cada material tem sua propriedade, estudaremos quais delas podemos utilizar na fabricação de componentes semicondutores, ou seja, em circuitos integrados. Para finalizar, na quarta unidade, vamos estudar os supercondutores, que já é uma realidade. Ao final dos estudos, você, caro aluno, terá condições de aplicar, quando necessário, os conhecimentos adquiridos, e de utilizar os diversos materiais de acordo com suas características e utilização.

Seja bem-vindo, caro aluno, aos estudos de diversos assuntos relacionados aos Materiais Elétricos e Semicondutores, desejamos que adquira os conhecimentos necessários que te levarão a um futuro cada vez melhor como engenheiro, trazendo também o bem-estar para muitas pessoas. É muito importante que você

compreenda os assuntos tratados neste caderno, eles te levarão sempre mais à frente na formação de sua profissão.

Bons estudos e sucesso!

## Estruturas atômicas e cristalinas e os fundamentos de física do estado sólido de bandas de energia

### Convite ao estudo

Olá, engenheiro. Bem-vindo à unidade curricular “Materiais Elétricos e Semicondutores”.

Nesta primeira unidade, apresentaremos a você, caro aluno, os conceitos gerais da teoria dos semicondutores e a importância destes conceitos numa aplicação prática no dia a dia. Você verá que uma simples teoria pode resolver muitos dos problemas que se apresentam, e como isso influencia nossas vidas. A partir desta teoria, toda a cadeia de Eletrônica foi desenvolvida a passos largos; hoje, as soluções dadas são imperceptíveis, mas tudo começou em uma simples teoria que foi colocada em prática.

Ao iniciarmos nosso estudo, surge a pergunta: você sabe que os semicondutores conduzem energia elétrica em determinados momentos? Que estes materiais semicondutores ora conduzem energia elétrica, ora não conduzem energia elétrica? Ao descobrirem que materiais semicondutores, como silício, por exemplo, possuem características interessantes de condução elétrica, apurou-se que este material poderia ser utilizado na fabricação de chips, transistores, microprocessadores e na eletrônica de modo geral.

Ao finalizar esta unidade, você saberá identificar e aplicar os materiais elétricos e os semicondutores de acordo com suas características com relação à sua estrutura atômica e também aos fundamentos da Teoria das Bandas de Energia.

Para desenvolver sua competência e atingir os objetivos apresentamos a você uma situação em que a empresa Triac foi contratada por um investidor para a fabricação de diversos tipos de equipamentos e dispositivos eletrônicos, tais como placas fotovoltaicas, que produzem energia elétrica a partir da luz do sol. Na empresa Triac, você é o engenheiro responsável e tem o conhecimento necessário para a produção destes dispositivos e equipamentos, então ajude o investidor a fabricá-los.

Gostou desta situação? Então, vamos lá. Aplique os conhecimentos adquiridos e coloque-os em prática. Embarque nessa!

# Seção 1.1

## Aplicações das bandas de energia, condução elétrica nos semicondutores e materiais intrínsecos

### Diálogo aberto

Olá, seja bem-vindo, engenheiro!

Daremos início aos estudos desta primeira seção, conhecendo um pouco mais sobre aplicações das bandas de energia, condução elétrica nos semicondutores e materiais intrínsecos, assuntos básicos para o desenvolvimento dos materiais elétricos e semicondutores.

A fabricação de componentes semicondutores, como diodos, transistores, capacitores e SCRs, é baseada na teoria dos semicondutores e condução elétrica (MALVINO, 1986). Com essas informações em mãos é que são fabricados os componentes e também os painéis fotovoltaicos para a produção de energia elétrica como fonte de energia renovável (NASCIMENTO, 2004). Essa nova fonte de produção de energia, através da luz do sol, está sendo desenvolvida com materiais cada vez mais eficientes e com baixo custo de fabricação. Um investidor quer fabricar estes painéis fotovoltaicos e procurou você para ajudá-lo a entrar no negócio. Ele tem capital para investir e, como é uma área em expansão, quer entrar neste ramo, e sua empresa foi contratada para conduzi-lo nesta jornada.

Nos dias de hoje, todos buscam novas fontes de energia que sejam renováveis, e o engenheiro tem uma participação fundamental nesse processo de busca. Assim, sua empresa, a Triac, que tem o conhecimento de semicondutores, foi contratada pelo referido investidor, que quer fabricar painéis fotovoltaicos para a produção de energia elétrica. Contudo, esse investidor não entende de semicondutores. Sabendo-se que as placas fotovoltaicas têm o mesmo princípio de funcionamento dos componentes semicondutores (MALVINO, 1986), você explicará ao investidor o funcionamento do painel e também dará as instruções técnicas para a fabricação dele.

Caro aluno, ao final desta seção, você entenderá como a teoria dos semicondutores foi fundamental para o avanço tecnológico que temos atualmente e como você poderá ajudar o investidor a fabricar os painéis fotovoltaicos.

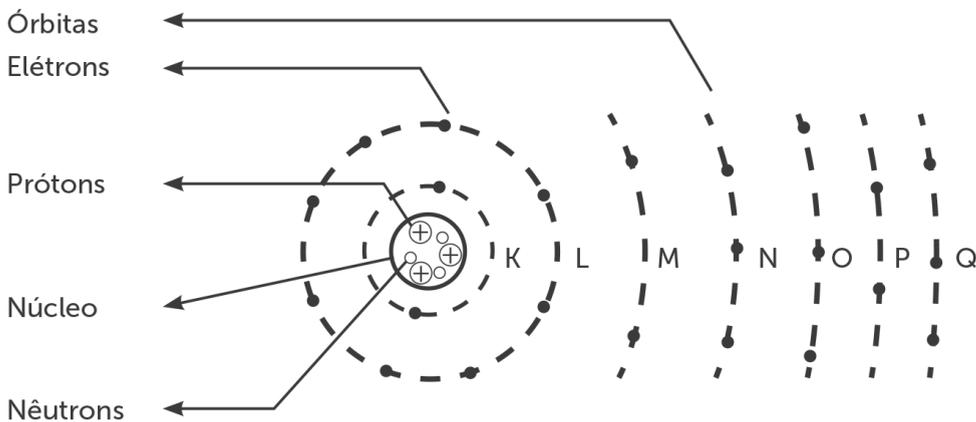
Então, vamos seguir em frente?

## Não pode faltar

A formação de uma substância é composta por elétrons que giram em torno do núcleo que, por sua vez, é composto por nêutrons e prótons. O número de prótons, elétrons e nêutrons são diferentes em cada elemento químico; elemento químico é um conjunto de átomos com mesmo número atômico, mas a menor parte é apenas um átomo.

Um modelo mais simples utilizado na teoria atômica é o Modelo Atômico de Bohr. Neste modelo, os elétrons giram no entorno do núcleo do átomo. Sua trajetória forma órbitas bem definidas chamadas de orbitais atômicos, e que todos conhecem como K, L, M, N, O, P e Q. A figura a seguir ilustra o Modelo Atômico de Bohr.

Figura 1.1 | Modelo Atômico de Bohr



Fonte: Marques, Cruz e Junior (2009).

Quanto maior for a energia do elétron, maior será o raio de sua órbita. Assim, o elétron da órbita Q vai ter mais energia do que o elétron da órbita P, este por sua vez terá maior energia do que o elétron da órbita O, e assim por diante, até chegarmos ao elétron da órbita K. A energia do elétron é a energia que ele tem na respectiva órbita. Ela varia com o inverso do quadrado da distância entre ele e o centro do núcleo. Basicamente, essa distância é o "raio atômico" daquela órbita.

Em um cristal, a órbita de cada um dos elétrons é controlada na sua totalidade, esse controle acontece por todas as cargas do cristal. As cargas dos elétrons (o elétron possui apenas uma carga, a carga negativa) têm posições diferentes no cristal, por isso, a energia de cada elétron será diferente (MARQUES; CRUZ; JUNIOR, 2009).



### Assimile

É necessário lembrarmos que um átomo é composto pelo núcleo, o qual é formado por prótons e nêutrons e a eletrosfera, formada por elétrons.

Os prótons são partículas carregadas com cargas positivas. Os nêutrons são partículas neutras, que não têm cargas elétricas, e os elétrons são partículas carregadas negativamente.

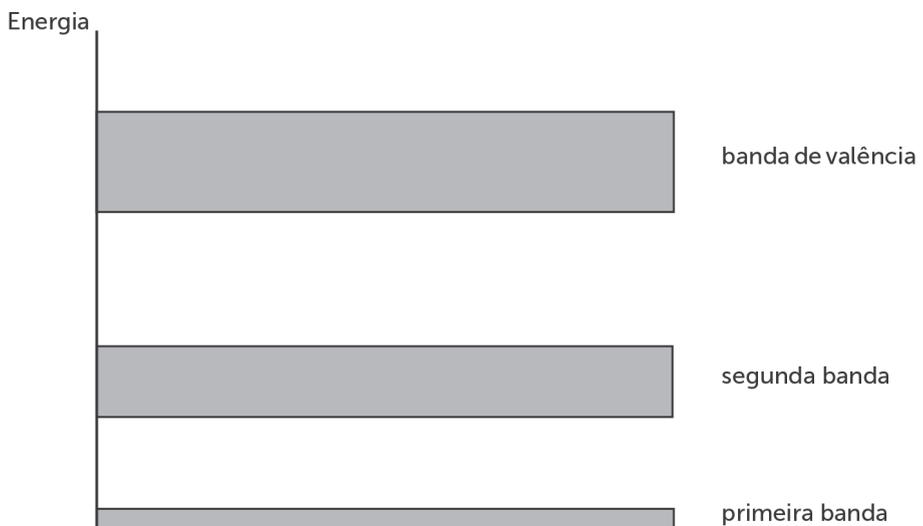
Muitos elétrons viajando na primeira órbita vão ter pequenas diferenças em seus níveis de energia. Como há bilhões de elétrons na primeira órbita do cristal de silício, formará uma faixa, que chamamos de banda de energia. Igualmente, teremos uma segunda e terceira faixa e, no caso do silício, haverá uma quarta faixa. Para construir um bom texto sobre teoria de bandas de energia em sólidos semicondutores, são recomendáveis as seguintes referências:

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física quântica**. São Paulo: Elsevier, 1979. Cap. 13, seção 4.6.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2012. v. 4. Cap. 41.

TIPLER, P.; MOSCA, G. **Física**. 6. ed. São Paulo: LTC, 2012. v. 3. Cap. 38.

Figura 1.2 | Modelo Atômico de Bohr



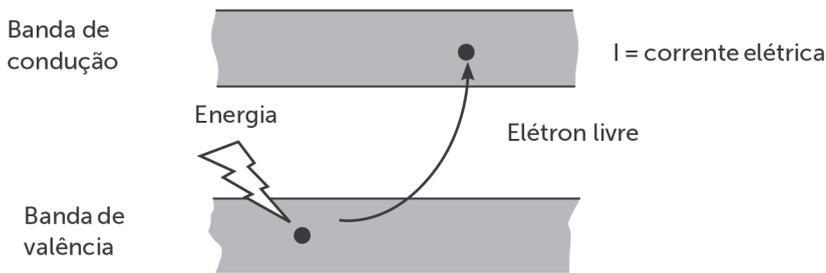
Fonte: elaborada pelo autor

Para o estudo dos materiais semicondutores, é necessário entender que um elétron tem que estar a uma certa distância do núcleo e a uma determinada velocidade, para que a força sobre ele, que é a força centrífuga, se equilibre com a força eletrostática, o que o torna mais estável (BOYLESTAD, 2004).

Exemplificando: os elétrons que estão na banda de valência são os que têm maior chance para sair do átomo, o qual está livre na banda de valência; esses elétrons têm maior energia por causa da distância entre eles e o núcleo. A região entre bandas permitidas é chamada de banda proibida, nesse espaço não é possível existir elétrons, desse modo, a banda proibida na última camada é que vai definir como o material elétrico vai se comportar (MALVINO, 1986).

Como esses elétrons na última camada têm maior facilidade de sair do átomo, quando recebe uma pequena quantidade de energia, eles se tornam elétrons livres, formando assim o que se chama de banda de condução nos semicondutores. Esses elétrons livres são capazes de se movimentar pelo material, portanto, podemos dizer que, se um campo elétrico está agindo nesse material, houve a criação de uma corrente elétrica, como mostra a figura a seguir.

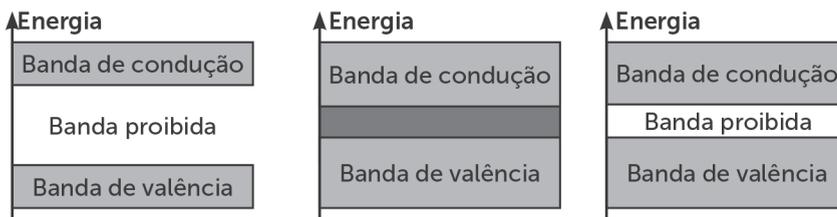
Figura 1.3 | Elétrons livres e banda de condução



Fonte: elaborada pelo autor

Como vimos anteriormente, o tamanho da banda proibida determina o comportamento do material. Como seria esse comportamento? Vejamos na figura a seguir.

Figura 1.4 | Isolantes condutores e semicondutores



Fonte: adaptado de Marques, Cruz e Junior (2009).

Analisando a Figura 1.4, vemos que, no primeiro caso, o elétron, para se livrar do átomo, precisa de uma energia enorme, conseqüentemente, o salto será muito grande, logo, poucos elétrons terão energia suficiente para sair desta banda de valência e ir para a banda de condução. Neste caso, a corrente elétrica é sempre muito pequena. Como não existem isolantes perfeitos, sempre haverá um mínimo de corrente elétrica circulando por eles, porém, a corrente elétrica não é suficiente para causar algum dano, assim nos referimos aos isolantes como bons isolantes.

No segundo caso, sem necessitar de muita energia, um elétron pode passar da banda de valência para a banda de condução com mais facilidade. Em materiais metálicos, é mais facilmente observado, nos quais a temperatura ambiente já é suficiente para fazer surgir uma grande quantidade de elétrons. Esses são chamados condutores.

E no terceiro caso, o elétron também precisa dar um salto para sair da banda de valência e ir para a banda de condução, mas é um salto muito pequeno. Esses materiais têm propriedades que estão entre o primeiro e o segundo caso, e assim são chamados de semicondutores.

Na temperatura de zero absoluto, os elétrons ficam fortemente ligados aos átomos nas camadas mais próximas ao núcleo, eles não se movem dentro do material, porém, se subir a temperatura um pouco acima do zero absoluto, as coisas mudam. A energia térmica, quando incide sobre o material, faz com que haja uma quebra das ligações covalentes, deslocando alguns átomos da banda de valência para a banda de condução.

Podemos pensar que, quanto mais alta a temperatura, maior é a quantidade de elétrons que se deslocarão para a banda de condução, criando assim a corrente elétrica. Afirmamos, então, que a temperatura tem um papel fundamental na produção de energia elétrica, fazendo com que, nesses materiais semicondutores, ocorra a corrente elétrica. A temperatura eleva o número de portadores de carga na banda de condução, porém ela não favorece a geração de corrente elétrica, que é gerada por campo elétrico. A temperatura tem papel negativo com relação à corrente elétrica, uma vez que seu papel é de gerar movimento aleatório e não ordenado, como se necessita para formação de corrente elétrica (BOYLESTAD, 2004).



### Refleta

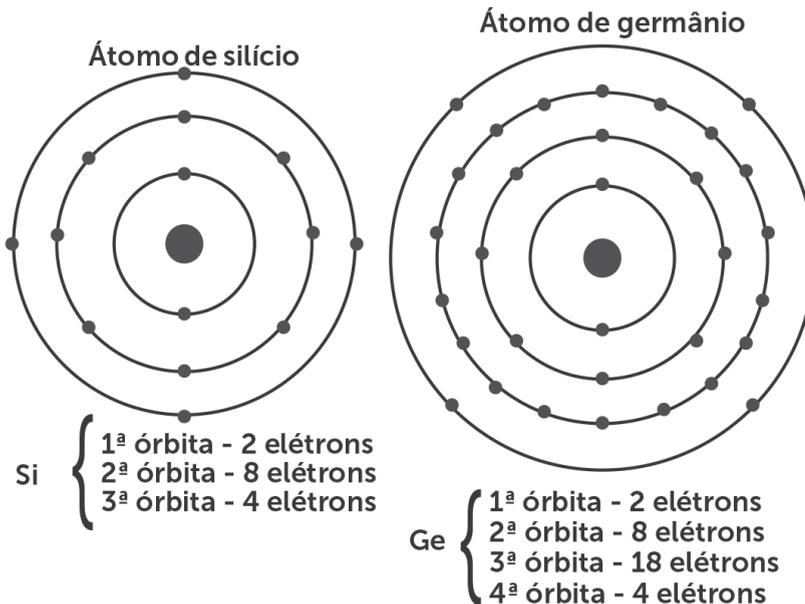
De acordo com o que foi exposto até aqui sobre as bandas de energia e condução elétrica, você, engenheiro, já tem uma ideia de como explicaria ao investidor o funcionamento de uma placa fotovoltaica, bem como as instruções?

Há alguns fatores que podem explicar as diferenças entre os diversos materiais, como composição química, ligação e formas de organização, os quais vão determinar o número de órbitas e qual a intensidade das forças de atração e repulsão dessas cargas elétricas que estão presentes no átomo. Isso vai influenciar no tamanho das bandas de energia e nas posições do átomo.

Existem vários tipos de materiais semicondutores, dentre eles, os mais utilizados são o silício (Si) e o germânio (Ge). Há também materiais chamados de semicondutores III-V, que são materiais formados a partir de uma ligação trivalente, ou seja, possui três elétrons na banda de valência, e uma pentavalente, que possui cinco elétrons na banda de valência. Como exemplo, citamos os mais conhecidos, que são o arseneto de gálio (GaAs) e o fosfeto de índio (InP) (SCHMIDT, 2010).

As características semicondutoras desses materiais, como do silício e do germânio, por serem tetravalentes, são elementos que precisam de quatro elétrons para completar os oito da camada de valência, quatro elétrons na camada de valência, cada um de seus átomos tem a capacidade de fazer quatro ligações covalentes com outros quatro átomos. A figura a seguir mostra os átomos de silício e germânio.

Figura 1.5 | Átomos de silício e germânio

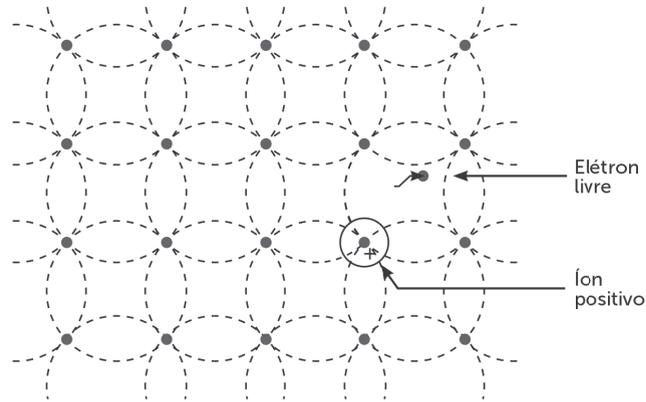


Fonte: Marques, Cruz e Junior (2009).

### Semicondutores intrínsecos

Semicondutores intrínsecos são materiais puros encontrados em seu estado natural, porém, o silício é o material mais utilizado, porque é encontrado em abundância na natureza. Obtém-se o silício a partir do quartzo, que está na areia da praia.

Figura 1.6 | Formação de um íon positivo

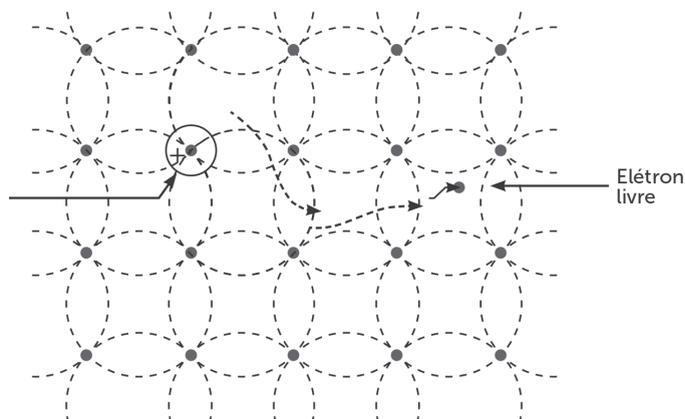


Fonte: Marques, Cruz e Junior (2009).

Na Figura 1.6, podemos ver que um elétron se tornou livre por receber energia suficiente para isso. Nesse caso, o átomo ficou com uma ligação incompleta, assim falamos que o átomo ficou ionizado positivamente.

Passado algum tempo, verificamos que, na estrutura desse semiconductor, o íon positivo andou.

Figura 1.7 | Movimento do íon positivo



Fonte: Marques, Cruz e Junior (2009).

Você deve estar perguntando: como é possível o íon mudar de posição se os átomos estão presos à estrutura do material?

Na verdade, foi outro elétron que deixou seu átomo e ocupou aquela lacuna deixada pelo elétron anterior, completou a ligação, mas deixou outra incompleta para este movimento. A este fenômeno damos o nome de movimentos de lacunas, que sempre ocorrerá quando existir a condução elétrica (MALVINO, 1986).



### Pesquise mais

Você pode ter mais informações sobre a teoria dos semicondutores, bandas de energia, condução elétrica e materiais intrínsecos. Disponível em: <[www.ime.eb.br/~aecc/FundEngEle/Semicondutores](http://www.ime.eb.br/~aecc/FundEngEle/Semicondutores)>. e <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/1---semicondutores.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

Nos materiais semicondutores intrínsecos, os elétrons livres se movimentam e geram também uma lacuna em seu lugar de origem, e o movimento dessa lacuna não pode ser desconsiderado, portanto, um semicondutor que é submetido a um potencial elétrico, a sua condução elétrica e as lacunas são importantes e não podem ser desconsideradas (MALVINO, 1986).



### Exemplificando

A parte mais importante em um painel solar são as células fotovoltaicas de silício. O silício é composto de átomos minúsculos que são carregados com elétrons e uma placa solar funciona como material semicondutor, o silício se torna condutor de elétrons, os quais são desprendidos com a luz do sol e se acumulam em uma corrente elétrica. Um inversor converte a energia gerada pela placa (corrente contínua) em energia elétrica, que pode ser usada (corrente alternada) e vai para o quadro de luz.

### Sem medo de errar

Caro engenheiro, você percebeu que todos esses conceitos são básicos e, a partir da formulação teórica, foi colocado em prática todo o contexto, trazendo benefício e bem-estar às pessoas.

Partindo desse princípio, voltamos a sua empresa, em que você é o engenheiro responsável pela tecnologia de dispositivos e equipamentos eletrônicos na Triac, envolvido neste momento na fabricação de painéis fotovoltaicos. Você poderá explicar ao investidor que o contratou que o funcionamento dessas placas é baseado na teoria dos semicondutores, a qual você estudou, então, você tem condições de também dar as orientações técnicas para esta fabricação, descrevendo as bandas de energia nos materiais semicondutores.

Os elétrons se tornam livres de acordo com a quantidade de energia recebida, por exemplo, a térmica, e eles saltam uma barreira passando para a banda de condução de acordo com a luminosidade do sol. Isso faz com que nas placas fotovoltaicas o

material de silício, que é o mais utilizado, rompa facilmente a barreira por causa de suas características, criando a corrente elétrica que será utilizada por nós, consumidores.

Você percebeu que a teoria dos semicondutores, entendendo o funcionamento dos materiais, pode produzir energia elétrica que será consumida por milhões de pessoas, isso não é maravilhoso? Com o conhecimento de Materiais Elétricos e Semicondutores, você, engenheiro, irá melhorar a vida de muitas pessoas, se não fosse isso, imagine como seria viver sem energia elétrica!



### Atenção

Você deve se lembrar que esse conhecimento é básico e fundamental para toda a disciplina. Se ocorrer algum problema que você tenha que resolver, parta desse princípio que você conseguirá apresentar soluções bem simples para sua profissão.

## Avançando na prática

### Aplicação prática dos conceitos estudados

#### Descrição da situação-problema

Como engenheiro responsável pela fabricação das placas fotovoltaicas, você detectou que em uma das placas não estava ocorrendo a condução elétrica, devido ao silício estar em seu estado natural, ou seja, ele é intrínseco e assim a placa não estava produzindo energia elétrica, por isso é necessário fazer uma "dopagem" do silício. Pensando na teoria dos semicondutores, como você resolveria este problema?

#### Resolução da situação-problema

Os elétrons não estavam saltando da banda de valência para a banda de condução, então você foi verificar qual é o tipo de material semiconductor que estava sendo utilizado. Você viu que o material utilizado é o silício, mas que ele está em seu estado natural, ou seja, intrínseco. Um cristal de silício puro é chamado de semiconductor intrínseco, não há elétrons livres suficientes para produzir uma corrente elétrica, é necessário introduzir átomo de impurezas (dopagem) num cristal de silício de modo a aumentar tanto o número de elétrons quanto o número de lacunas para que ele consiga conduzir eletricidade. Nesse caso, foi necessário processar novamente esse material para que ele conseguisse obter uma característica em que os elétrons saltassem da banda de valência para a banda de condução apenas com uma pouca quantidade de energia aplicada, que é a luz solar.

Assim, você, como engenheiro responsável, resolveu rapidamente o problema de condução elétrica que estava ocorrendo na placa, sem que para isso fosse necessário

parar a fabricação das outras placas, já que o problema era somente em uma delas, mas poderia ocorrer em outras também.

### Faça valer a pena

**1.** Nas bandas de energia, os elétrons recebem uma quantidade de energia para saírem de seu átomo e irem para outro lugar, gerando uma lacuna onde estava, assim esse elétron se torna livre, o que chamamos de elétrons livres.

Quando o elétron sai de seu átomo, tornando-se livre, qual é o caminho que ele percorre?

- a) Banda de condução para a banda de valência.
- b) Banda de valência para a banda de condução.
- c) Salto de energia.
- d) Primeira banda, segunda banda.
- e) Banda de valência para a banda proibida.

**2.** Não é somente o silício e germânio que são materiais semicondutores, há outros materiais que são conhecidos, como III – V, mas o silício e o germânio são os mais utilizados.

O que são materiais semicondutores trivalentes e pentavalentes?

- a) Possuem elétrons livres na banda de valência.
- b) Possuem quatro elétrons na banda de valência.
- c) Possuem três elétrons na banda de valência e cinco elétrons na banda de valência.
- d) Não possuem elétrons na banda de valência.
- e) Possuem quatro elétrons na banda de valência e três elétrons na banda de valência.

**3.** Alguns materiais semicondutores são encontrados na natureza, bastando apenas processar este material para que se torne um semicondutor e serem utilizados para várias aplicações.

O que vem a ser semicondutores intrínsecos?

- a) São materiais puros encontrados em seu estado natural.
- b) São materiais que são encontrados já com as propriedades semicondutoras.
- c) Materiais que são feitos sinteticamente para fins de condução elétrica.
- d) São aqueles que têm propriedades físicas de conduzir energia elétrica a baixas temperaturas.
- e) São materiais que necessitam de um tratamento químico para funcionarem como isolantes.

## Seção 1.2

### Aplicações, características dos condutores e polarização

#### Diálogo aberto

Seja bem-vindo, futuro engenheiro! Você, caro aluno, pode perceber que apenas com os conceitos trabalhados na primeira seção já foi capaz de solucionar o problema da placa fotovoltaica que não estava conduzindo energia de acordo com o previsto. Você também já percebeu que os computadores, os celulares, as televisões e, de modo geral, a eletrônica, estão presentes em nosso dia melhorando nossas vidas como facilitadores. Imagine tudo o que temos hoje, se não fosse estudada e desenvolvida essa teoria dos semicondutores, como seria a vida nos dias de hoje?

Na seção anterior, vimos os conceitos iniciais sobre a teoria dos semicondutores; como os elétrons livres passam para a banda de condução na qual ocorre a corrente elétrica; observamos o fenômeno da condução elétrica nos semicondutores e alguns materiais intrínsecos. Muito bom esses conceitos, não é?

Nesta segunda seção, observaremos as características dos materiais, identificar se são condutores ou isolantes, e determinar sua condutividade ou a sua resistividade, para usarmos o material correto para as aplicações que queremos.

Veremos também os efeitos desses materiais sob certas condições de trabalho, como por exemplo, o efeito corona, mais facilmente visto em linhas de transmissão de energia elétrica. Tomaremos conhecimento do que é um dielétrico, como se polariza o dielétrico e por que se rompe, enfim, você terá condições de avançar mais um pouco na aplicação desses conceitos.

Como a empresa Triac é fabricante de componentes semicondutores, ela fabrica também capacitores para equipamentos eletrônicos. Você, sendo o engenheiro responsável, deverá escolher qual dielétrico será usado na fabricação dos capacitores que serão empregados para montar placas, as quais serão utilizadas para montagem de notebooks. A empresa fechou um contrato para fabricação desses componentes e você tem que decidir qual o melhor dielétrico que deve ser usado nesses capacitores, a partir dos conhecimentos necessários adquiridos.

Convido você a fazer uma viagem no mundo maravilhoso do conhecimento dos materiais elétricos e semicondutores. Vamos em frente!

## Não pode faltar

Materiais condutores possuem várias características, destacando-se a condutividade ou resistividade elétrica, a condutividade térmica, o coeficiente de temperatura etc. Na escolha do material adequado, é necessário levarmos em conta essas características, pois dependerão delas para saber se serão capazes de desempenhar as funções para as quais serão designados.

Como saber se um material é condutor de eletricidade? O que o caracteriza como material condutor é a banda de valência do átomo desses materiais. A banda de valência, como já vimos anteriormente, é a camada mais distante do átomo, assim, os elétrons que estão nessa última camada estão fracamente ligados ao átomo, e com uma pequena quantidade de energia esses elétrons abandonam facilmente esse átomo, tornando-se elétrons livres.

Essa escolha nem sempre recairá sobre as características elétricas mais vantajosas, pois como sabemos não podemos levar em conta apenas um parâmetro para tomarmos a decisão de qual material será utilizado, mas sim outro material (metal) ou liga, que aparentemente pode ser menos vantajoso, mas que satisfaz as outras condições.

Um material é bom condutor quando os elétrons na banda de valência estão fracamente ligados ao átomo e podem se deslocar facilmente do átomo com uma pequena quantidade de energia. O cobre possui um número muito alto de átomos de cobre, assim, quando aplicamos uma diferença de potencial, esses elétrons que ficam na banda de valência se deslocarão facilmente, o que irá produzir uma corrente elétrica (MALVINO, 1986). Há outros tipos de materiais que são bons condutores e possuem características semelhantes ao cobre, são o ouro e a prata, mas como sabemos, devido ao alto custo, não podemos utilizar o ouro com frequência.

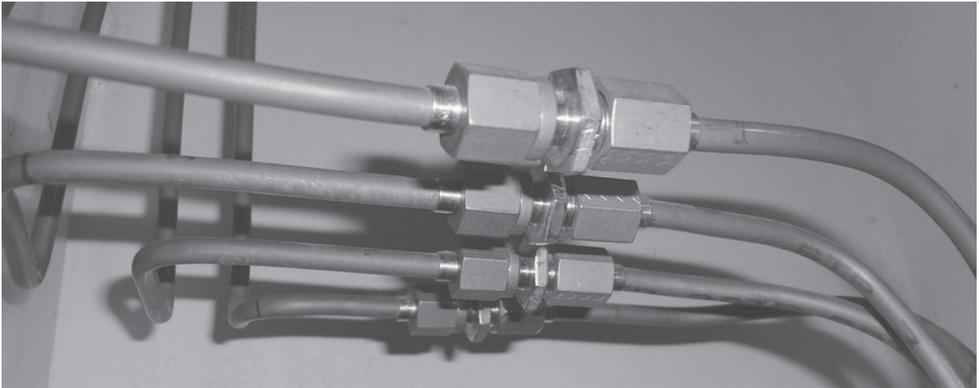
De acordo com Schmidt (2010), os principais materiais com elevada condutividade são os metais nobres, como ligas, que são acrescidos de alguns outros grupos de materiais. Esses materiais podem ser classificados em condutores, isolantes e semicondutores, como visto anteriormente. Os metais, por sua vez, são elementos químicos que formam os sólidos opacos, são bons condutores de eletricidade e de calor também, mas o cobre possui uma posição de destaque entre os materiais condutores:

- Tem uma pequena resistividade e somente a prata tem valor inferior ao do cobre, mas o custo deste material é muito alto e inviabiliza sua utilização em grande escala.

- As características mecânicas são muito favoráveis.
- Tem baixa oxidação na maioria das aplicações, até na umidade sua oxidação é mais lenta do que outros materiais. Ele só vai oxidar mais rapidamente quando a temperatura se elevar rapidamente.
- Sua deformação a frio e quente é muito fácil.

De acordo com essas características, podemos perceber que o cobre é: um material de fácil aplicação; o mais utilizado; encontrado facilmente em cabos elétricos e tubulações; na indústria automobilística o encontramos em freios, radiadores e rolamentos, por exemplo. A seguir, veremos o cobre sendo utilizado em tubulações.

Figura 1.8 | Material: cobre



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/industrial-cobre-tubula%C3%A7%C3%A3o-1515744/>>. Acesso em: 18 out. 2016.

Schmidt (2010) cita alguns materiais elétricos, os quais estão relacionados a seguir:

**Chumbo (Pb)** => sua coloração é cinzenta, com um brilho metálico, e sua oxidação é elevada.

**Estanho (Sn)** => branco prateado, mole, mais duro que o chumbo.

**Prata (Ag)** => é o metal mais nobre e de maior uso industrial nas peças de contato.

**Ouro (Au)** => apresenta uma ótima condutividade elétrica. Apesar de seu elevado preço, ele é utilizado em várias aplicações elétricas devido às suas características mecânicas; em peças de contar, como peças de telecomunicações e eletrônicas; e em sua forma pura.

**Platina (Pt)** => bastante estável quimicamente e usado em peças de contato elétrico.

**Mercúrio** (Hg) => único metal líquido a temperatura ambiente. Usado em termômetros, retificadores e lâmpadas (vapor de mercúrio), sendo este último considerado venenoso.

Com a evolução do silício nos retificadores, seu uso caiu acentuadamente.

**Cádmio** (Cd) => seu uso é condicionado para a fabricação de baterias de Ni-Cd, e é bastante venenoso.

**Zinco** (Zn) => metal branco-azulado, possui o maior coeficiente de dilatação entre os materiais.

**Níquel** (Ni) => metal cinzento claro e tem propriedade ferromagnética. Em seu estado puro, é usado em forma gasosa em revestimentos de metais de fácil oxidação. Também pode ser usado para fios de eletrodos, anodos, grades, parafusos e outros.

**Cromo** (Cr) => tem um brilho prateado-azulado, extremamente duro e é muito usado para proteger outros metais que têm oxidação fácil.

**Tungstênio** (W) => quimicamente, o processo para obtenção é muito complexo, na obtenção de produtos elétricos é de custo elevado e muito difícil.

**Ferro** (Fe) => é o material mais utilizado e tem aplicações diversas.



### Pesquise mais

Saiba mais sobre os tipos de materiais elétricos! Há muitos materiais, cada um com sua função e com uma característica em particular, segundo a qual determinaremos qual aplicação é mais adequada para o material. Pesquise em: <[http://www.feg.unesp.br/~jmarcelo/restrito/arquivos\\_downloads/apostilas/eb2/](http://www.feg.unesp.br/~jmarcelo/restrito/arquivos_downloads/apostilas/eb2/)>. Acesso em: 24 jul. 2016.

Materiais de elevada resistividade são, basicamente, usados com três finalidades:

- Para fins de regulação, fabricação de reostatos, resistência de aquecimento para fornos, aquecedores etc.

- Para medição, essas ligas, geralmente, têm deformação a frio, que podem acarretar em um envelhecimento sensível após o uso, assim, é muito comum serem aplicadas um processo de envelhecimento artificial, que, através de um tratamento térmico e controlado, estabiliza o material.

- Térmicos ou de aquecimento, que necessitam de uma elevada estabilidade térmica. Em contato com o ar, tem uma temperatura máxima de serviço, a qual não poderá ser ultrapassada, e podem se romper com aquecimentos e resfriamentos frequentes e com ligações e desligamentos da rede elétrica (ROLIM, 2002).

O material elétrico que se considera condutor de eletricidade, quando percorrido por corrente elétrica, cria em seu entorno um fenômeno que chamamos de campo elétrico. Quando o campo elétrico nesse material condutor ultrapassar o limite de isolamento do ar, ocorrerá uma descarga elétrica na superfície dele, e a esse fenômeno chamamos de efeito corona.

O efeito corona ocorre devido às partículas de ar, poeiras e à alta umidade encontrada em volta dos condutores, que neste caso, quando são submetidos a um campo elétrico muito alto e muito intenso, tornar-se-ão ionizados, conseqüentemente, emitirão luz, que é mais visível.

As conseqüências desse efeito corona, como visto, são: a emissão de luz, podendo observar a luminosidade em volta desse condutor; o ruído, que é muito intenso e bem perceptível, esse efeito trará uma interferência em circuitos de comunicação; haverá uma vibração do condutor e liberação de ozônio e, conseqüentemente, o aumento de perdas de potência, podendo variar de alguns quilowatts até centenas de quilowatts por quilômetro, principalmente em condições adversas, quando essas linhas de transmissão estão sob condições de chuva (WEDY, 2009).

Para evitarmos as perdas que interferem significativamente nos resultados da empresa, é necessário fazermos a escolha correta do material que será utilizado para transmitir energia elétrica. Observe a figura a seguir.

Figura 1.9 | Cristal fotônico unidimensional (a), bidimensional (b) e tridimensional (c)



Fonte: Assis (2009)



### Assimile

É sempre bom lembrar, caro aluno, que quando um condutor é percorrido por corrente elétrica, nele é formado um campo elétrico em sua volta devido a essa corrente. O ar tem um limite de isolamento, quando esse campo elétrico aumenta e rompe essa isolamento, aparece o efeito corona descrito.

Os elétrons livres que estão próximos ao condutor começam a ganhar muita energia do campo elétrico que está envolto no condutor, o que é suficiente para

acelerar ainda mais estes elétrons livres. Os elétrons livres que estão com energia cinética começam se chocar com outros gases que estão presentes, como o oxigênio e o nitrogênio, fazendo com que os átomos mudem para um estado mais elevado.

Esses átomos, para voltarem à condição anterior (original), cedem energia em forma de calor, radiações eletromagnéticas, luz e energia acústica, formando o fenômeno que se chama efeito corona.

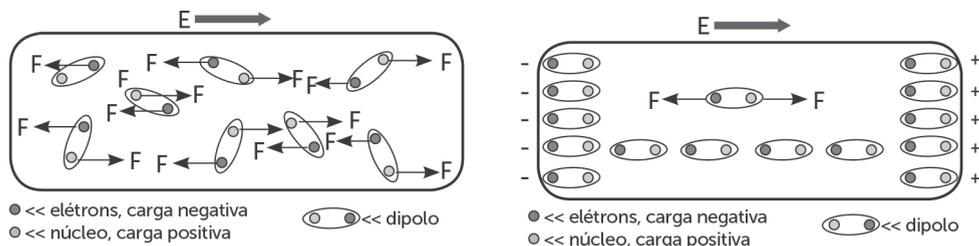
Dentro do estudo dos materiais elétricos temos alguns materiais que possuem características peculiares, como os dielétricos, também conhecidos por isolantes. São chamados dielétricos os materiais que impedem a passagem de corrente elétrica, como exemplo, a borracha, a madeira e o papel, os quais são muito usados em capacitores. Uma das propriedades elementares dos dielétricos é a polarização de suas partículas elementares sob ação de um campo elétrico.

A polarização é um deslocamento reversível das cargas positivas e negativas em direção ao campo elétrico externo, por isso essa orientação tende a acompanhar a orientação do próprio campo elétrico.

Caro aluno, para você entender melhor, é necessário saber o que é dipolo. Dipolo elétrico nada mais é do que um conjunto de duas cargas elétricas de sinais contrários e mesmo valor (SCHMIDT, 2010).

Na Figura 1.10, veremos como ocorre a polarização do dielétrico. A polarização do dielétrico acontece quando ele é colocado em um campo elétrico uniforme, assim, os dipolos vão girar até encontrar uma posição de equilíbrio. Quando isso ocorre, todos os dipolos que estão na face esquerda terminarão com cargas negativas e os da direita com cargas positivas, assim está feita a polarização do dielétrico.

Figura 1.10 | Polarização do dielétrico



Fonte: adaptado de <a href="http://www.alfaconnection.pro.br/images/ELE110207a.gif">http://www.alfaconnection.pro.br/images/ELE110207a.gif</a>. Acesso em: 18 out. 2016.

Nos materiais dielétricos, não existem elétrons livres, e como vimos anteriormente, ao aplicarmos um campo elétrico nesse material isolante, haverá uma força que tentará tirar os elétrons dele, já que no dielétrico os elétrons estão fortemente ligados ao núcleo.

Caso a intensidade do campo não seja forte o suficiente para tirar esses elétrons, acontecerá apenas a polarização do dielétrico. Se continuarmos aumentando o campo elétrico, chegará um momento em que a força elétrica conseguirá arrancar os elétrons dos átomos, e a partir disso, os elétrons que estavam fortemente ligados ao núcleo se tornarão livres e, em consequência, o material passou a ser condutor agora.

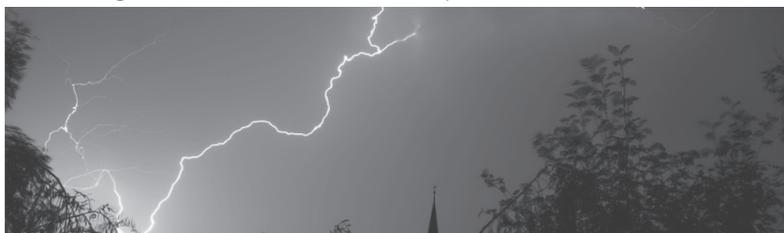
Assim, quando aumentamos a intensidade do campo elétrico aplicado nesse material dielétrico, a intensidade da força aplicada sobre seus elétrons também aumenta. Nesse caso, chegará um momento, que o campo elétrico aplicado será tão grande que essa força conseguirá arrancar os elétrons dos seus átomos, e os elétrons que antes estavam presos ficarão livres; em consequência disso, o material que antes era isolante passou a ser condutor, o que é chamado de rigidez dielétrica. Isso pode acontecer com qualquer material isolante, necessitamos apenas controlar a intensidade do campo elétrico que é aplicado sobre o material isolante. Essa rigidez varia de material para material, porém alguns dielétricos se mostram isolantes com uma determinada intensidade de campo elétrico, enquanto que outros, com essa mesma intensidade, se tornam condutores (SCHMIDT, 2010).

Um exemplo de dielétrico é o ar atmosférico – é um ótimo isolante –, mas quando ocorre uma tempestade, o ar vai se ionizando, o campo elétrico entre as nuvens e o chão vai aumentando e, quando essa intensidade for alta o suficiente para romper o ar, que é isolante, ocorre a descarga atmosférica, o que chamamos de raio.

No processo de ionização, um átomo perde um elétron e, ocasionalmente, outro elétron livre pode ocupar esse lugar deixado vago. Esse processo é responsável pela emissão de luz, como em faíscas. Assim, esse dielétrico se rompeu pela ação da força elétrica, o ar tornou-se condutor, o relâmpago surgiu e o ar, nesse caso, voltou a ser um isolante até que o campo elétrico seja suficientemente forte para rompê-lo (SCHMIDT, 2010).

Em regiões mais pontiagudas, o campo elétrico é mais forte, por isso a existência de para-raios. Em sua ponta, o campo elétrico tem uma densidade maior; a ionização em volta da ponta é maior, o raio romperá o dielétrico naquele lugar, fazendo com que o raio desça para a terra sem danificar nada à sua volta. Nesse caso específico de rompimento do dielétrico ar, a descarga atmosférica pode produzir uma energia tão alta cujos parâmetros possam chegar a uma tensão de 125 milhões de volts, 200 mil ampères de corrente elétrica e a uma temperatura de 20 mil graus centígrados. Observe que o campo elétrico para romper o ar em caso de descarga elétrica é de uma intensidade muito grande, assim, podemos concluir que o ar é um ótimo dielétrico.

Figura 1.11 | Descarga atmosférica: dielétrico rompido



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/rel%C3%A2mpago-tempestade-199651/>>. Acesso em: 18 out. 2016.



### Exemplificando

Agora, vamos pensar um pouco. Você está andando pela rua e começa a chover, e sente que a chuva está ficando cada vez mais forte e com raios e trovões. Estão ocorrendo muitos raios, cada vez mais perto de você. De acordo com os conhecimentos adquiridos nesta seção, você sabe que o ar é um dielétrico e que está ionizando, isso favorece a descarga atmosférica, como são chamados os raios. O que você faz nesse momento? Lembre-se, você já aprendeu sobre dielétricos, polarização, rigidez e ruptura do dielétrico.

É muito simples. Você sabe que o ar é um dielétrico e está se ionizando, ou seja, o campo elétrico está ficando mais forte e ele vai se romper, então você procura se proteger entrando em um prédio, assim você não será atingido pela descarga quando o dielétrico se romper.

Quando isso acontece, falamos que houve uma ruptura do dielétrico, fazendo com que o isolante passasse a ser um condutor de eletricidade.

Outro exemplo é o capacitor. Entre suas placas está inserido um material isolante (dielétrico). Quando o capacitor é ligado, surge um campo elétrico entre suas placas que vai polarizando o dielétrico até que o capacitor fique carregado. Se esse campo elétrico aumentar, a força elétrica aumentará até que ela seja suficiente para romper o meio isolante do capacitor, assim haverá a ruptura do dielétrico e, nesse caso, o capacitor ficou totalmente sem função.

Figura 1.12 | Capacitor



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/eletr%C3%B4nica-capacitor-componente-1001827/>>. Acesso em: 18 out. 2016.



### Refleta

Qual é a necessidade de polarizar o dielétrico e por que há, na polarização do dielétrico, a necessidade de aplicar um campo elétrico?

### Sem medo de errar

Em nossos estudos, aprendemos mais um pouco sobre materiais elétricos, conhecimentos que ajudarão você, engenheiro, a solucionar problemas que surgirão em seu dia a dia na empresa.

A empresa Triac fechou um contrato para a fabricação de componentes que serão usados para montar placas para notebooks, e você terá que decidir qual dielétrico será usado nos capacitores para esses aparelhos, lembrando que você tem os conhecimentos necessários para tomar essa decisão.

Você sabe que os condutores têm suas características e que elas terão que ser levadas em conta para o bom funcionamento do componente. Há também materiais de alta condutividade e alta resistividade e que será necessário polarizar esses materiais, dosando a quantidade de energia aplicada sobre eles para que o componente não tenha seu dielétrico rompido, inutilizando por completo o componente.

Sabemos que há capacitores de tântalo que são superiores aos de alumínio, e também de papel, que é um dos tipos mais antigos. Você também tem o conhecimento dos capacitores de filme de poliestireno, de filme de polipropileno, de mica e dos supercapacitores os quais possuem altos valores de capacitância e dimensões reduzidas.

Você tem todas as informações e os conhecimentos necessários para decidir qual tipo de capacitor será utilizado para a montagem dos notebooks, trazendo mais qualidade ao equipamento, como foi exigido pelo cliente que o contratou.



### Atenção

Não se esqueça de que nem sempre podemos optar pelo material de características elétricas mais vantajosas para tomarmos uma decisão, e sim outro material que, aparentemente, nem sempre satisfaz às outras condições.

### Avançando na prática

#### Material do cabo de linhas de transmissão de energia elétrica

#### Descrição da situação-problema

Em um projeto de linha de transmissão a, escolha do condutor é de extrema importância e bastante complexa, isso envolve critérios, os econômicos, de perdas, efeito corona, entre outros. Por isso, a escolha do cabo condutor tem um impacto direto na escolha do tipo de torre, na isolação que será empregada e nos esforços mecânicos. Todas essas variáveis, entre outras, como a temperatura, pressão e velocidade do vento, estão envolvidas no projeto de uma linha de transmissão.

De acordo com os conhecimentos adquiridos nesta seção, sabemos que o condutor não deve ser escolhido apenas por sua condutibilidade, mas levando-se em conta outros parâmetros, como ligas que aparentemente podem ser menos vantajosas, mas que satisfazem outras condições, e qual material do cabo deverá ser utilizado para transportar energia elétrica.

### Resolução da situação-problema

A princípio, podemos pensar que a escolha do cabo seria o cobre, porém, como visto anteriormente, não podemos definir o cobre somente por ser um ótimo condutor. A principal razão da escolha é, sem dúvida, o preço, e nesse quesito entra o alumínio, por ter o custo mais barato que o cobre. Nos sistemas subterrâneos, o cobre é de uso comum, mas em cabos aéreos, devido aos esforços mecânicos, é necessário um cuidado extra com relação ao quesito carga mecânica. Logo, a escolha recai sobre o cabo de alumínio com alma de aço, em que o objetivo é dar maior resistência mecânica ao cabo.

### Faça valer a pena

**1.** Os materiais elétricos condutores possuem várias características, como a condutividade ou resistividade elétrica, condutividade térmica, coeficiente de temperatura, entre outras. Logo, percebemos que, para escolher um determinado material, devemos levar em consideração alguns parâmetros, o que significa escolher o material correto para cada aplicação.

O que devemos levar em consideração na escolha de determinado material elétrico, já que há várias características nos materiais condutores?

- A escolha é sobre o material de melhor condutividade elétrica.
- A escolha nem sempre recairá sobre as características mais vantajosas, mas sim sobre outro material ou liga.
- Deve ser escolhido o material que se comporta melhor em condições de temperatura ambiente.
- Se o material é condutor, deve ser o material escolhido sempre.
- O material deve ter a menor resistividade elétrica.

**2.** Sabemos que um material é bom condutor devido aos elétrons livres na banda de valência estarem fracamente ligados ao átomo e, assim,

se deslocam facilmente deste átomo com uma pequena quantidade de energia. Nesse caso, o cobre é um material que possui um número muito alto de átomos e, como estão fracamente ligados ao átomo, com uma pequena quantidade de energia, eles se tornam elétrons livres.

De acordo com o estudo dos materiais elétricos, há outros tipos de materiais que também possuem características semelhantes ao cobre. Assinale a alternativa que apresenta esse(s) material(is).

- a) O bronze, mas o custo é muito elevado.
- b) O ferro possui essas características, por isso é bastante utilizado.
- c) O silício é bastante semelhante ao cobre.
- d) O ouro e a prata, mas não são usados com frequência devido ao alto custo.
- e) O germânio também é bastante utilizado.

**3.** Quando um material elétrico é percorrido por corrente elétrica, cria em seu entorno um campo elétrico e, quando este, ultrapassa o limite de isolamento do ar, ocorre uma descarga elétrica na superfície deste condutor, que se chama efeito corona. Esse efeito é devido às partículas de ar, à poeira e à alta umidade encontrada em volta dos condutores.

Quando o condutor é submetido a um campo elétrico muito alto com partículas de ar, poeiras e umidade em volta do condutor, ocorre o efeito corona. Qual(is) é(são) a(s) característica(s) desse efeito?

- a) Emissão de luz e ruído muito intenso.
- b) A quebra dos isoladores que suportam o condutor.
- c) Vibração do condutor devido ao efeito mecânico.
- d) A ruptura do condutor devido ao campo elétrico.
- e) A ionização do ar pelo campo elétrico.



## Seção 1.3

### Materiais semicondutores

#### Diálogo aberto

Prezado aluno, seja bem-vindo a esta nova seção, na qual estudaremos os materiais com propriedades piezoelétricas, os quais têm a característica de produzir energia elétrica quando submetidos a uma pressão mecânica e produzir energia mecânica quando submetidos a um campo elétrico. Veremos as propriedades destes materiais, os quais são considerados como fonte de energia limpa e renovável, o que é um tema bastante interessante e de grande aplicação em nossas vidas, pois usamos equipamentos dos mais variados tipos que contêm materiais piezoelétricos, como o relógio de quartzo e microfones, e não nos damos conta de que o estudo e desenvolvimento desses materiais possibilitou melhorar a vida das pessoas.

Como engenheiro da Triac, e nesse contexto dos materiais piezoelétricos, você foi chamado por um hospital para dar uma consultoria num dos equipamentos de ultrassom, que não está funcionando muito bem, apresentando uma imagem muito distorcida em sua saída. Como você tem um bom conhecimento de materiais piezoelétricos, tem totais condições de solucionar o problema para que o ultrassom volte a funcionar perfeitamente.

Esta é uma situação que necessita ser resolvida o mais rápido possível, pois o hospital não pode ficar com o equipamento parado, pois muitas pessoas precisam realizar exames para que o diagnóstico ocorra corretamente.

Quer saber como resolver essa situação?

Então, vamos ao estudo dos materiais piezoelétricos e você verá como pode resolver o problema apresentado.

#### Não pode faltar

Olá, engenheiro. A tecnologia vem avançando muito rapidamente, isso traz um desenvolvimento de vários materiais úteis para o uso no dia a dia. Os materiais piezoelétricos são muito utilizados, como a balança eletrônica, aquela do mercado

em que compramos os mantimentos de nossa casa, e na qual pesamos as frutas, os frios, entre outros.

Para que possamos entender melhor os materiais piezoelétricos, é necessário saber como foi que eles surgiram.

Em 1880, o físico francês Pierre Curie foi o primeiro a estudar o efeito da piezoelectricidade e radioatividade, juntamente com seu irmão Jaques. Demonstrou que, comprimindo cristais era, possível gerar um potencial elétrico. Já em 1881, os irmãos Paul-Jaques e Pierre Curie conseguiram demonstrar o efeito inverso, em que os cristais poderiam ser deformados quando submetidos a um campo elétrico. Essa descoberta foi muito importante, já que quase todos os circuitos eletrônicos digitais atuais recorrem a esse fenômeno.

A palavra Piezo vem do grego "*piezein*", que significa pressionar, portanto, piezoelectricidade (que significa eletricidade de pressão) tem por definição a capacidade de certos materiais, quando sujeitos a algum tipo de estresse, tornarem-se polarizados.

O efeito piezoelétrico é reversível, os cristais, quando submetidos a uma tensão externa, podem sofrer variações de forma. Como exemplos, citamos os cristais de quartzo, óxido de zinco e titanato zirconato de chumbo (PZT).

Figura 1.13 | Cristais de quartzo



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/quartzo-minerais-cristais-de-quartzo-1206671/>>. Acesso em: 19 out. 2016.

Muito provavelmente, você já usou a piezoelectricidade e nem percebeu, por exemplo, se você tiver um relógio de quartzo, o funcionamento é baseado no efeito piezoelétrico. Hoje, nós temos no próprio celular aplicativos que reconhecem nossa voz e imediatamente é feita a pesquisa na internet do que pedimos, o efeito piezoelétrico está presente neste circuito de reconhecimento de voz.

Quando falamos em cristais, não estamos falando de pedaços de rochas brilhantes que encontramos nas lojas. Os cientistas chamam de cristal um sólido no qual as moléculas estão arranjadas de tal maneira que fiquem ordenadas com repetições consecutivas no mesmo bloco de átomos, logo, por definição, um pedaço de ferro é tão cristal quanto um pedaço de quartzo.

Nos metais, as células unitárias são simétricas nos materiais piezoelétricos são, normalmente, neutras. Os átomos dentro destes cristais podem não estar arranjados simetricamente, mas suas cargas elétricas estão balanceadas perfeitamente, ou seja, uma carga positiva em um local cancela outra carga negativa em outro local. Se houver atrito em um cristal piezoelétrico, a estrutura se deformará e isso colocará alguns átomos juntos e outros ficarão separados, o que desequilibrará, fazendo com que apareçam algumas redes de cargas, assim aparecerão algumas cargas positivas e negativas em faces opostas do cristal piezoelétrico.

Aplicando uma corrente elétrica em um material piezoelétrico, o efeito é o oposto, estaremos submetendo seus átomos a uma pressão elétrica. Para que seja rebalanceado, os átomos têm que se mover e isso faz com que se produza uma tensão mecânica.

Várias são as aplicações em que se usa o efeito da piezoeletricidade e normalmente se faz isso usando um transdutor, que simplesmente converte pequenas quantidades de energia em outro tipo de energia.

Em um microfone, por exemplo, é necessário converter energia sonora em energia elétrica, nesse caso, é só esfregar a parte inferior do microfone - Figura 1.14 - com as ondas de sua voz que o cristal irá gerar energia elétrica correspondente. Agora, você já viu um gramofone? Pois bem, na ponta da agulha há um cristal piezoelétrico que vibra, produzindo sinais elétricos que são convertidos em som. Não é interessante? E você nem imaginava isso, não é mesmo?

Figura 1.14 | Microfone



Fonte: <<https://pixabay.com/pt/microfone-misturador-cabo-626618/>>. Acesso em: 19 out. 2016.

Outro exemplo de aplicação do efeito piezoelétrico é o relógio de quartzo, em que o efeito reverso é usado para manter o tempo com precisão. A bateria do relógio produz a energia elétrica, que alimenta um cristal, o qual, por sua vez, faz milhares de oscilações por segundo. No relógio, há um circuito eletrônico que transforma toda essa oscilação em batidas, o barulho do tic tac que ouvimos do relógio, com frequência menor, uma vez por segundo, e assim o ponteiro dos segundos ocasiona o movimento dos outros ponteiros.

Hoje, os engenheiros procuram novas fontes de alternativas de geração de energia. Esta fonte – a piezoeletricidade – ainda é relativamente nova e economicamente

inviável para a maioria das aplicações. Quando falamos em geração de energia, estamos falando de baterias com tamanhos menores, por exemplo.

Os materiais piezoelétricos, apesar de conhecidos desde o século 19, somente vieram a ganhar mais notoriedade a partir de 2008, quando boates inglesas começaram a usar materiais piezoelétricos no piso. Enquanto as pessoas dançavam e pulavam, exerciam uma pressão sobre o piso, como os materiais piezoelétricos têm capacidade de produzir energia quando aplicada uma pressão, as luzes de LEDs eram ativadas, iluminando o piso de vidro com várias cores.

Na Primeira Guerra Mundial, o efeito piezoelétrico teve sua primeira aplicação no desenvolvimento de sonares, equipamento eletrônico que localiza objetos e mede distâncias no fundo do mar pela emissão de sinais sônicos e ultrassônicos, em que cristais de quartzo foram utilizados e eram acoplados a massas metálicas, assim gerava-se no ultrassom faixa de dezenas de khertz.

Com a primeira guerra encerrada, ocorreu muita dificuldade de excitar os transdutores que eram feitos a partir de cristais de quartzo, pois demandavam geradores de alta tensão. Iniciou-se, então, o desenvolvimento de materiais sintéticos, como o titanato de bário e o PZT (titanato zirconato de chumbo). Atualmente, esses materiais chamados piezoelétricos são utilizados com muita frequência em sensores e atuadores com aplicações tecnológicas de baixa frequência até altas frequências.



### Pesquise mais

Leia mais sobre os tipos de materiais piezoelétricos em: <[www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendio7.pdf](http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendio7.pdf)>. (Acesso em: 24 de julho de 2016). Aqui, você verá quanta utilidade existe para esses materiais.



### Refleta

Cientistas chineses e americanos desenvolveram um gerador – bateria – capaz de tanto gerar eletricidade quanto armazenar energia usando estruturas piezoelétricas. Uma membrana piezoelétrica conhecida como PVDF (fluoreto de polivinilideno) substituiu o separador de polietileno de uma bateria de lítio convencional. Quando é acionada, a membrana funciona como uma bomba, forçando os íons de lítio a migrarem de um lado para outro da célula que atravessam a membrana devido ao potencial piezoelétrico e são armazenados diretamente como energia química, no anodo, como óxido de lítio-titânio. Com o desenvolvimento de baterias piezoelétricas, é possível movimentar pequenos aparelhos, como, gerar energia a partir do movimento e o andar das pessoas. Pense nisso!

Transdutor é um dispositivo capaz de converter uma forma de energia em outro tipo, uma grandeza física que não seja elétrica, em temperatura, velocidade ou luz. Baseado neste conceito, vamos pensar um pouco. Esse recurso nos permite utilizar instrumentos eletrônicos para medição, melhorando as aplicações industriais e sua tecnologia.

Figura 1.15 | Transdutor para ultrassom



Fonte: <[http://www.online.megos.eu/361-thickbox\\_default/usc20145-transdutor-de-ultrassom-c7-3.jpg](http://www.online.megos.eu/361-thickbox_default/usc20145-transdutor-de-ultrassom-c7-3.jpg)>. Acesso em: 19 out. 2016.

Hoje, já existem transdutores integrados de temperatura que têm uma sensibilidade da ordem de 10 a 200 mV por grau centígrado, ou seja, com muita precisão para leitura de temperatura.

O transdutor tem a função de ser sensível à presença, variação e magnitude de um dado a ser mensurado e com isso proporcionar, em sua saída, um sinal elétrico para que o leitor faça sua leitura. Logo, percebemos que os transdutores que utilizam materiais piezoelétricos convertem energia mecânica em energia elétrica e com isso também se obtém o efeito contrário. Assim, podemos dividir os transdutores piezoelétricos em transdutores passivos, que são os sensores, e transdutores ativos, que são os atuadores. Há também o transdutor que atua nas duas formas, é o transdutor ultrassônico.

Figura 1.16 | Representação da conversão de energia pelo efeito piezoelétrico



Fonte: elaborada pelo autor

No ultrassom, as ondas geradas pelo transdutor são transformadas em energia elétrica ou em energia mecânica, produzindo uma imagem em sua saída.

Em sua forma passiva, os sensores piezoelétricos (transdutor) só recebem sinais. Aqui, é explorada a propriedade piezoelétrica direta do material, de tal forma que se obtém uma tensão a partir de uma tensão externa.

Figura 1.17 | Balança eletrônica fabricada com material piezoelétrico



Fonte: <https://pixabay.com/pt/equil%C3%ADbrio-peso-carga-164776/>. Acesso em: 19 out. 2016.

Em supermercados, encontramos muitas balanças eletrônicas - Figura 1.17 - as quais também são encontradas em laboratórios de pesquisa para medição de pequenas massas. Elas têm seu funcionamento baseado em materiais piezoelétricos, utilização de cristais que, sofrendo deformação, se polarizam.

No modo ativo, o transdutor usa as propriedades piezoelétricas dos materiais de modo reverso, em que recebe um sinal elétrico, transforma suas dimensões e envia um sinal mecânico. Esse princípio é utilizado, por exemplo, para mapear trincas de materiais em ensaios não destrutivos.

Materiais piezoelétricos também são usados em cortes precisos de materiais plásticos ou similares, nos quais são empilhados vários elementos, e no final, é acoplada uma lâmina, a qual é chamada de cortador ultrassônico. O piezo motor é baseado na piezoelectricidade, mudança de forma de um dado material quando aplicado em um campo elétrico. Quando usa o sentido inverso da piezoelectricidade, há produção de vibrações acústicas gerando movimentos rotacionais.

A grande vantagem desse tipo de motor é sua precisão e relativa alta velocidade, isso é possível devido à sua alta taxa de resposta, e como o material piezoelétrico tem uma distorção rápida, permite que os passos sejam realizados em frequência acima de 5 MHz, gerando uma velocidade superior a 800 mm por segundo, mais ou menos 2,0 km por hora.

Caro aluno, você está percebendo quantas utilidades os materiais piezoelétricos têm? Nos dias de hoje, os engenheiros buscam alternativas para a geração de energia limpa e sustentável, e os materiais piezoelétricos têm sido amplamente pesquisados para essa aplicação. O Instituto de Tecnologia da Geórgia relatou, em 2008, que conseguiu produzir um dispositivo que gerava energia elétrica, que, esticando e soltando nanofios de óxido de zinco conseguia entregar corrente alternada. Esse "mini gerador" gera uma tensão que oscila até 45 milivolts, convertendo quase sete por cento da energia mecânica que era aplicada em energia elétrica. Os cientistas usaram fios de 0,2 a 0,3 mm de diâmetros de comprimentos e 3 a 5 micrômetros, mas perceberam que poderiam usar fios com tamanho reduzido.

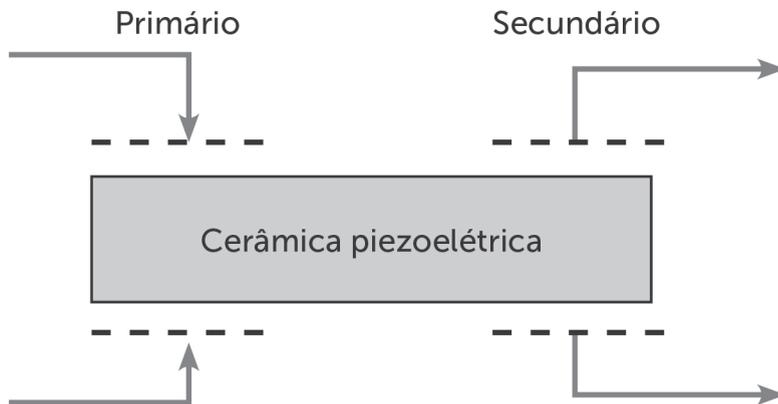
Quando ouvimos uma música, não nos damos conta de como o som é produzido perfeitamente, os violões elétricos e alguns instrumentos musicais usam materiais piezoelétricos, transformando as vibrações mecânicas em sinais elétricos, os quais são ampliados e convertidos pelos amplificadores em som.

Quando falamos em componentes eletrônicos, logo pensamos em diodos, transistores, resistores. Boa parte desses componentes tem um equivalente integrado numa pastilha de silício; transformadores e indutores estiveram fora dessa possibilidade durante muito tempo. Agora, o transformador piezoelétrico aparece com mais frequência nos circuitos práticos.

O transformador piezoelétrico - Figura 1.18 - usa o princípio do magnetismo e tem seu funcionamento baseado na vibração. Nesse caso, há um enrolamento virtual formado por dois eletrodos os quais são colocados em pontos apropriados de uma cerâmica piezoelétrica, ou primário. A outra parte desse transformador, ou secundário, da mesma cerâmica, será formada por dois eletrodos.

Ao aplicarmos uma tensão alternada nos eletrodos que formam o primário do transformador, a cerâmica se deformará, o que produzirá ondas mecânicas que se propagarão através do material cerâmico piezoelétrico. Essas ondas provocarão a deformação do material entre as placas do secundário, aparecendo outra tensão, diferente daquela que foi aplicada no primário do transformador.

Figura 1.18 | Transformador Piezoelétrico



Fonte: elaborada pelo autor

A frequência na barra vibrará na frequência de ressonância, de 100kHz a 1MHz, uma tensão maior é gerada na outra seção da barra. Já foi possível demonstrar que nesses transformadores ocorre um aumento de mais de 1000:1, algo muito significativo na transformação de energia.

Você já ouviu falar na tecnologia da nanorobótica? Os nanogeradores podem gerar energia a partir do movimento do corpo humano, e essa tecnologia teve muitos avanços. Com nanofios de óxido de zinco, um material piezoelétrico, minúsculas baterias poderão ser usadas.

Quando são dobrados e voltam a sua posição original, os nanofios geram energia elétrica simplesmente com um movimento de vai e vem, assim fica aberta a possibilidade de se obter baterias cada vez menores. Pense no impacto ambiental que isso pode ter, pois os materiais que são empregados são biodegradáveis, então, pode-se considerar como sendo uma produção de energia elétrica limpa.



### Assimile

Quando falamos que é possível gerar energia limpa, não estamos falando de gerar energia para uma cidade inteira, e sim para pequenos aparelhos e equipamentos, como relógios, baterias menores do que existem hoje.

O quanto a eletrônica pode avançar mais na tecnologia com os materiais piezoelétricos?

O efeito piezoelétrico que estamos estudando permite criar, por exemplo, um acendedor de fogão. Uma faísca elétrica é gerada pela diferença de potencial e que também foi gerada ao se comprimir o cristal, e essa faísca acenderá o fogão.

Os materiais piezoelétricos têm algumas vantagens e desvantagens, assim, podemos destacar como vantagem a utilização na produção de energia de baixo custo, limpa e também sustentável, que você, engenheiro, tem que pensar nos dias de hoje. Eles têm vastas aplicações, em várias atividades mecânicas de geração de energia, e as pesquisas têm desenvolvido muito essas aplicações.

No entanto, existem as desvantagens: esses materiais apresentam a temperatura como a principal limitação, e a instabilidade do material com o aumento da temperatura é uma barreira muito grande. Com o tempo, os materiais piezoelétricos envelhecem, isso é natural, a polarização que permanece neles também se dissipa, independentemente da ação externa ou do uso do material.

No caso da eletrônica, estamos acostumados a observar algumas mudanças das suas propriedades e dos seus comportamentos, por exemplo, quando a temperatura aumenta, o resistor tem sua resistência aumentada, os semicondutores tem sua condução elétrica acrescentada quando do aumento da temperatura.

Apesar dos materiais piezoelétricos serem pouco conhecidos, percebemos uma

grande aplicabilidade. Eles estão diretamente ligados às inovações tecnológicas, segundo os estudos apresentados. Com os conhecimentos avançando cada vez mais, poderemos ter aplicações nas mais diversas áreas, na indústria automobilística, aeronáutica, naval e outras.



### Exemplificando

Para reforçar o aprendizado sobre materiais piezoelétricos, os pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul conseguiram produzir um piso com material piezoelétrico que pode ser empregado em lugares onde a energia produzida por ele é significativa, ou seja, uma forma de transformação de energia, renovável e sustentável.

O trabalho concluiu que essa tecnologia é eficaz quando utilizada diretamente em sinalização e iluminação, como no caso do restaurante universitário, em que foi estimado que sete placas forneceriam eletricidade para cinco lâmpadas de LED (UFRS, 2014).

### Sem medo de errar

Caro aluno, você viu que a aplicação dos materiais piezoelétricos é muito grande. São vários equipamentos e aparelhos que podemos utilizar tais materiais, isso sem falar que é uma fonte para a produção de energia limpa e sustentável.

Como você tem o conhecimento do funcionamento dos materiais piezoelétricos, o hospital pediu que você os auxilie na resolução do problema com o ultrassom. O equipamento vem tendo problemas em mostrar uma saída mais nítida para que o médico possa fazer o diagnóstico correto, então você foi verificar o que estava ocorrendo. Os técnicos já fizeram algumas tentativas para colocar o equipamento em funcionamento, mas faltava um pouco mais de conhecimento sobre os materiais piezoelétricos. Se a saída não está nítida, é razoável pensar que o transdutor (câmara do ultrassom) não esteja convertendo a tensão aplicada em ondas de som mecânicas. Se for esse o caso, o transdutor não transmitirá para o corpo, nem capturarão os ecos das estruturas corporais para que a saída seja uma imagem perfeita para o médico.

O transdutor, como contém material piezoelétrico, pode estar com sua vida útil comprometida devido à possibilidade de a temperatura ambiente não ser adequada para o equipamento, afetando seu funcionamento. Neste caso, então, você pode propor a substituição desta câmera (transdutor), assim, imediatamente, o ultrassom voltará a funcionar perfeitamente, com imagens nítidas dos exames realizados. Você

percebeu que estudando os materiais piezoelétricos e sabendo como funcionam você pode resolver alguns problemas que se apresentem no seu dia a dia?

Cabe a você, caro aluno, ir em frente em seus estudos dos materiais elétricos e semicondutores. Continue!

## Avançando na prática

### Ensaaios não destrutivos de materiais por ultrassom

#### Descrição da situação-problema

O ultrassom é um equipamento muito utilizado na medicina, o transdutor transforma energia elétrica em energia mecânica, produzindo uma saída, que é uma imagem nítida para o médico fazer o diagnóstico.

O ultrassom não é só usado para a medicina, também é utilizado em ensaios não destrutivos em materiais, inspeções necessárias para saber se há trincas em dutos, tubulações, vasos de pressão, entre outras aplicações.

A empresa Metal S/A fabrica dutos e tubulações para uma petrolífera que necessita transportar óleo em seus terminais marítimos. Nessas tubulações não pode haver trincas. O óleo é bombeado sobre pressão e, se houver trincas, podem ocorrer vazamentos de óleo. Caso isso aconteça, podemos ter consequências gravíssimas no meio ambiente. Assim, ela necessita de uma inspeção detalhada nas tubulações, mas a empresa Metal S/A não pode ter o material destruído em ensaios para essa finalidade. Você, como profissional competente, foi contratado pela empresa para realizar essa inspeção sem destruir o material da tubulação.

#### Resolução da situação-problema

Você estudou os materiais piezoelétricos e suas propriedades e aplicações, e sabe que a análise por ultrassom pode apresentar detalhes da estrutura de um dispositivo – a tubulação em questão, por exemplo – sem provocar danos. Assim, a tubulação será resguardada de qualquer destruição e evitará uma eventual substituição da tubulação em questão.

O ultrassom possui um circuito eletrônico que transmite ao cristal piezoelétrico uma série de sinais elétricos controlados e que são transformados em ondas ultrassônicas. Os sinais que são captados pelo cristal são transmitidos para uma tela em forma de pulsos luminosos e que podem ser regulados em sua amplitude. Esses pulsos luminosos constituem o registro da descontinuidade no interior do material, assim, se a tubulação tiver alguma trinca, aparecerá na tela a descontinuidade, mostrando o local correto da trinca, podendo ser consertada sem que para isso o material seja destruído.

## Faça valer a pena

**1.** Um material piezoelétrico tem a capacidade de produzir energia elétrica quando submetido a uma pressão mecânica. Esse efeito também é reversível, pode-se aplicar uma tensão elétrica nesse cristal e se obter energia mecânica. Os materiais piezoelétricos funcionam nesses dois modos.

Quando um material é piezoelétrico, falamos muito em cristal piezoelétrico, no qual é um termo mais científico. Qual a definição técnica para o que os cientistas chamam de cristal piezoelétrico?

- a) Um sólido em que as moléculas estão arranjasdas de uma maneira ordenada e com repetições consecutivas no mesmo bloco de átomos.
- b) É um sólido no qual os átomos estão muito fortemente ligados ao núcleo.
- c) É um sólido que transforma energia elétrica em térmica, e vice-versa.
- d) Um sólido em que as moléculas não estão ordenadas no mesmo bloco dos átomos.
- e) É um material que apresenta características de um isolante para condução elétrica.

**2.** Em metais, as células unitárias são simétricas, ou seja, são neutras nos materiais piezoelétricos. Os átomos que estão dentro destes cristais, às vezes, podem não estar arranjsados simetricamente, só que suas cargas elétricas estão balanceadas, uma carga negativa em um local cancela uma carga positiva em outro local. Assim, esfregando um cristal piezoelétrico essa estrutura deformará, surgindo várias cargas, com cargas positivas e negativas em faces opostas do cristal.

Se aplicarmos uma corrente elétrica em um cristal piezoelétrico, o que acontecerá com os átomos dentro desse cristal?

- a) Não acontecerá nada, os átomos ficarão onde estão, pois já estão balanceados.
- b) Submeteremos os átomos a uma pressão mecânica, com isso os átomos não se movem.
- c) Estaremos submetendo seus átomos a uma pressão elétrica, para que seja rebalanceado, assim os elétrons têm que se mover.
- d) Os átomos ficarão cada vez mais presos em seu núcleo.
- e) Haverá uma quebra desse cristal.

**3.** Os materiais piezoelétricos possuem várias aplicações em nosso dia a dia e nem nos damos conta de que estamos usando aparelhos ou equipamentos contendo esses materiais. Para isso, normalmente, se faz necessária a utilização de um transdutor, que converte pequenas quantidades de energia em outra energia, assim temos uma aplicação

prática dos materiais com essas características.

Dentro das aplicações em que necessitamos usar o efeito piezoelétrico, em um microfone, por exemplo, como funcionaria esse efeito?

- a) No microfone, o amplificador converterá a voz em energia elétrica na saída.
- b) O amplificador no microfone faz com que a energia elétrica gerada tenha uma saída de outra energia.
- c) Necessitamos falar mais alto no microfone para que o cristal consiga transformar essa energia em outra na saída.
- d) No microfone, há a conversão de energia sonora em energia elétrica, apenas esfregando o próprio microfone com as ondas da voz, o cristal gera a energia correspondente, que é amplificada em sua saída.
- e) O amplificador do microfone irá transformar a energia elétrica em energia térmica na saída.

# Referências

BOYLESTED, R. L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2004.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

DROESCHER, R. E. **Obtenção e caracterização microestrutural e elétrica de cerâmicas PZT-PMN**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e Materiais. 2009. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2009.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física quântica**. São Paulo: Elsevier, 1979. Cap. 13, seção 4.6

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2012. v. 4. Cap. 41.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Metal piezoelétrico**. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160030509>>. Acesso em: 25 out. 2016.

INTRATOR, E.; MELLO, H. A. **Dispositivos semicondutores**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976.

KARTZIR, S., The Discovery of the piezoelectric effect. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 57, n.1, p. 61-91, 2003.

MALVINO, A. P. **Eletrônica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 1.

\_\_\_\_\_. **Eletrônica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 2

MARQUES, Ângelo Eduardo B.; CRUZ, Eduardo C. A.; JÚNIOR, Salomão C. **Dispositivos semicondutores: diodos e transistores**. São Paulo: Érica Ltda., 2009.

NASCIMENTO, Cássio Araújo. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso Pós-Graduação Lato-Sensu em Fontes alternativas de energia - Universidade Federal de Lavras, 2004.

ROLIM, Jaqueline Gisele. **Materiais elétricos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002

SCHMIDT, Walfredo. **Materiais elétricos**. São Paulo: Blucher, 2010. v. 1.

\_\_\_\_\_. **Materiais elétricos**. São Paulo: Blucher, 2010. v. 2.

TIPLER, P.; MOSCA, G. **Física**. 6. ed. São Paulo: LTC, 2012. v. 3. Cap. 38.

WEDY, Germano Ferreira. **Inclusão do Efeito Corona em Modelos de Linhas de Transmissão Bifásica Utilizando a Técnica de Variáveis de Estado**. 2009. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, 2009.

ZUFFO, J. A. **Dispositivos Eletrônicos: Física e modelamento**. São Paulo: McGraw-Hill, 1984.

# Classificação dos materiais: isolantes e condutores, dielétricos e piezoelétricos

### Convite ao estudo

Seja bem-vindo à nova unidade de estudos. Vamos falar um pouco mais sobre os materiais elétricos e suas aplicações. O entendimento desta seção é fundamental para você saber como o mundo de hoje mudou (e para melhor). A tecnologia da indústria eletrônica se desenvolveu muito nos últimos anos, os equipamentos que usamos nas indústrias automotiva, naval e aeronáutica deram um salto enorme nessa tecnologia se compararmos os equipamentos usados por elas antes e agora.

Com os estudos desta seção, você terá uma compreensão maior sobre os materiais que aqui serão apresentados. Você saberá aplicá-los conforme sua necessidade, e utilizar o material certo para determinada aplicação.

Agora, perguntamos: qual é a definição de metaloide de germânio? Você sabe o que são policristais e monocristais? Já ouviu falar em arseneto de gálio? Um material utilizado em alta tecnologia para eletrônica, por exemplo. Também, temos o silício e o carbono, sendo este um material que, hoje, é considerado revolucionário, o qual se chama grafeno. O grafeno é o material substituto do silício em componentes eletrônicos e poderá ser utilizado em vários tipos de indústrias, como a automobilística, aeronáutica, entre outras.

Para começarmos, imagine que você é o projetista de equipamentos eletrônicos e necessita utilizar componentes com alta performance em equipamentos de precisão. São componentes como diodos e transistores, e você sabe que existem materiais mais eficientes e baratos para essa finalidade. Qual material você usaria na fabricação desses componentes?

Gostou do desafio? Então, vamos lá? Embarque nessa viagem maravilhosa no mundo dos materiais elétricos e semicondutores. Venha comigo!



## Seção 2.1

### **Materiais semicondutores: metaloides de germânio, policristais e monocristais, arseneto de gálio, silício-carbono, silício-germânio e grafeno**

#### **Diálogo aberto**

Olá, bem-vindo prezado aluno! Começaremos os estudos desta seção conhecendo mais um pouco dos materiais elétricos que estão em nosso dia a dia, suas estruturas e funcionamento. Conheceremos os metaloides de germânio, os policristais, o carbono, o silício, o arseneto de gálio e também o material que pode mudar por completo toda a tecnologia empregada hoje, o grafeno. Esse material tem potencial para as transmissões de dados, que ficarão mais rápidas; mudará os componentes eletrônicos que conhecemos hoje, como o diodo e o transistor, os quais são utilizados em processadores e ficarão mais rápidos e melhores.

Sabemos que os componentes eletrônicos são feitos com materiais semicondutores, como o silício e o germânio, por exemplo, mas há o arseneto de gálio também, que é composto por esses mesmos elementos os quais os tornam mais eficazes. Você, como projetista de componentes e equipamentos eletrônicos, deverá utilizar esses materiais de acordo com a aplicação desejada. Você necessita projetar um equipamento de transmissão de dados para uma empresa que o contratou para este fim. A empresa quer um equipamento de transmissão mais eficiente e mais rápido, porque ela depende muito da comunicação de dados para seus negócios, fabricação e entrega de notebooks no mundo inteiro e não pode haver atrasos nessa comunicação, pois a concorrência é muito grande. Nesse projeto, você utiliza componentes como diodos, transistores, entre outros, portanto qual o material semicondutor você utilizaria nesse caso? O material é economicamente viável para esse fim?

#### **Não pode faltar**

Nos estudos dos materiais semicondutores, temos a classificação desses

materiais, dentre eles temos os metaloides de germânio. Metaloides são os chamados falsos metais, ou não metais, mas também são conhecidos como semimetais. Na tabela periódica, não são classificados explicitamente por serem utilizados diversos critérios para caracterizá-los (USBERCO; SALVADOR, 2002).

Na tabela periódica, os elementos classificados como semimetais são sete e, em alguns casos, é incluído o Astató, mas podemos classificar assim:

- Metais: Antimônio (Sb), Germânio (Ge) e Polônio (Po).
- Ametais: Telúrio (Te), Boro(B), Silício(Si) e Arsênico(As).
- Astató(At): é derivado de sucessivas desintegrações de núcleos instáveis de urânio e tório; também é radioativo, com radioisótopo bastante instável e com meia-vida máxima de 8 horas e meia-vida mínima de 0,11 microssegundos.

Esses elementos possuem em comum algumas propriedades, que são intermediárias, e que ficam entre os metais e os ametais (ou não metais), por exemplo:

- Conduzem energia elétrica parcialmente, ou seja, são semicondutores.
- Apresentam brilho, mas não tão forte quanto os metais.
- Possuem tendência à fragmentação.

Como propriedades dos materiais, podemos citar que os metais, em sua maioria, se apresentam no estado sólido, com exceção do mercúrio (Hg), que é líquido; possuem cores brilhantes; são bons condutores de eletricidade e calor e são maleáveis, ou seja, são facilmente moldados.

Alguns ametais são líquidos, portanto não são bons condutores de calor e eletricidade, e nem sempre é possível a sua moldagem. Já os metaloides possuem características intermediárias, que ficam entre os metais e os não metais, por exemplo, parcialmente conduzem eletricidade e parcialmente não conduzem eletricidade.

A Figura 2.1 mostra a tabela periódica com as classificações dos metais e ametais.



### Assimile

O uso da tabela periódica, nesse caso, é muito importante. Pegue uma tabela periódica e veja os elementos contidos nela. Todos eles estão bem separados de acordo com sua funcionalidade, tipo e número atômico. A tabela tem todas as explicações dos materiais contidos.

Figura 2.1 | Tabela Periódica

1A												2A												8A
1	H																			2	He			
2	Li																			4	Be	10	Ne	
3	Na																			12	Mg	18	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	Cs	Ba	57-71	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
7	Fr	Ra	89-103	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uuq	Uuq	Uuq	Uuq						
Nº Atômico		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71								
Símbolo		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
Nome		Lantânio	Célio	Praseodímio	Neodímio	Promécio	Samarítio	Europio	Gadolínio	Térbio	Disprósio	Hólmio	Erbólio	Túlio	Ítrio	Lúcio								
		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103								
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mendelevíio	Nobelíio	Laurécio								

Fonte: <<http://www.tabelaperiodicacompleta.com/wp-content/uploads/2011/08/tabela-periodica-imprimir1-1024x556.png>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Quanto à classificação desses elementos como semimetais, vale lembrar que, atualmente, se usa como divisão em metais e não metais, pois a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) não define ou faz qualquer indicação de quais são os elementos que são classificados como semimetais. Há vários critérios que podem ser usados para essa classificação e, dependendo do critério a ser utilizado, pode-se classificar um semimetal como metal ou ametal (não metais).

Os cientistas sempre buscam materiais que contribuam para o desenvolvimento tecnológico, o que é de grande importância para a pesquisa na área de materiais. Os cientistas trabalham com alterações estruturais dos materiais, que são acompanhadas das mudanças das características dos materiais desejados. Com a descoberta das propriedades dos materiais semicondutores e sua aplicação em componentes eletrônicos, a vida moderna continua até hoje e sempre continuará, sendo alvo de inovações para que tenhamos conforto e bem-estar. Com a criação dos transistores, forma mais clássica da aplicação dos semicondutores, foi possível viabilizar a comunicação, o processamento de dados, os diagnósticos mais precisos de doenças, as viagens espaciais, entre outras aplicações.



**Refleta**

Você já pensou que o transistor é feito de silício e veio revolucionar e substituir a válvula? O funcionamento da válvula era muito demorado, precisava esperar ela esquentar para que o aparelho funcionasse normalmente e tinha muitas limitações. Com o transistor, tudo ficou mais

rápido, pois ele é feito de silício, semicondutor, não necessita esquentar, e seu funcionamento é infinitamente mais rápido do que a válvula. Uma revolução a descoberta do silício, não é? E o transistor, então? Pense nisso!

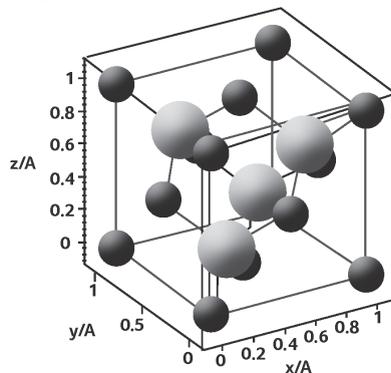
Caro aluno, nos dias de hoje, é necessário, por exemplo, que determinada informação esteja simultaneamente em diversos lugares do mundo, como os diagnósticos por imagem. Os computadores necessitam de processadores mais poderosos e velozes que tenham capacidade de processamento de dados que suplantam os gigabytes. As centrais geradoras de energia elétrica necessitam de componentes eletrônicos de potência e que tenham capacidade de chaveamento de corrente e tensão, além de confiabilidade e baixo custo.

O mundo muda rapidamente, e seu crescimento vai na mesma proporção, com isso vem a necessidade de desenvolver formas eficazes de aplicações de outros materiais semicondutores e que atendam às exigências das aplicações desses equipamentos eletrônicos. O arseneto de gálio é um semicondutor importante e é empregado em circuitos integrados mais rápidos e caros que os circuitos integrados de silício. Esse semicondutor também é utilizado na construção de diodos laser e Diodo Emissor de Luz (LED).

Um material semicondutor é chamado intrínseco quando é encontrado em sua forma natural: nessa condição, o material não possui as características desejadas para as aplicações práticas, porém é necessário que se faça uma dopagem dele. Essa dopagem é a inclusão de impurezas para que os materiais intrínsecos adquiram características semicondutoras desejadas para aplicações práticas, assim eles passam a ser chamados de materiais extrínsecos. O gálio, na forma de arseneto de gálio, é empregado na dopagem de materiais semicondutores e na construção de dispositivos diversos, como transistores.

O gálio é encontrado em minerais, como bauxita, carvão e germanita. Na medicina nuclear, o gálio é usado como elemento traçador, escâner de gálio, para diagnósticos. O arseneto de gálio possui sua estrutura cristalina cúbica de face centrada, como demonstrado na estrutura na Figura 2.2. Os átomos de gálio são representados em preto, e os átomos de arsênio são representados em cinza. O arseneto e o gálio têm uma composição de 14 átomos de gálio e 4 átomos de arsênio (HANAOKA et al., 2007).

Figura 2.2 | Estrutura cristalina do arseneto de gálio



Fonte: <<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAACA0AJ-0.jpg>>. Acesso em: 22 nov. 2016.

Na tabela periódica, nem todos os elementos que são classificados como semicondutores permitem uma fácil verificação de suas propriedades. Para alguns desses elementos, as propriedades de semicondução ainda não são possíveis de determinar com segurança, ou então essas propriedades só são averiguáveis na temperatura ambiente, por não se apresentarem de forma estável. No entanto, existem alguns materiais semicondutores que são de uso industrial. São os materiais de valência IV, sendo que o primeiro deles é o carbono, representado na Figura 2.3. Embora apresente características semicondutoras, o carbono é utilizado em alguns casos como condutor, como material resistivo e também como componente capaz de suportar determinadas condições térmicas ou químicas.

Figura 2.3 | Carbono



Fonte <<http://www.robertopascua.com/2013/05/astrobiologia-otros-factores-de-la-vida-ii-el-carbono/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

O germânio, Figura 2.4, um dos materiais mais antigos, é encontrado em pequenas quantidades em minérios de zinco, pó de carvão e até nas águas do mar. Por isso, sua exportação é muito onerosa e difícil. O germânio é uma substância muito dura, quebradiça, não suporta qualquer tipo de esforço mecânico e tem fácil oxidação na presença do ar; é usado na fabricação de componentes semicondutores.

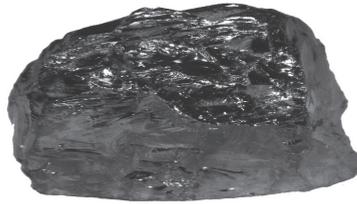
Figura 2.4 | Germânio



Fonte <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/08/Polycrystalline-germanium.jpg/230px-Polycrystalline-germanium.jpg>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Temos também o silício, Figura 2.5, o qual é mais estável termicamente do que o germânio, pode ser usado à temperatura de até 150 °C e é o elemento mais frequentemente encontrado na natureza. Ele permite a redução de corrente inversa, reduzindo as perdas, isso aumenta o rendimento simplificando os métodos de refrigeração.

Figura 2.5 | Silício

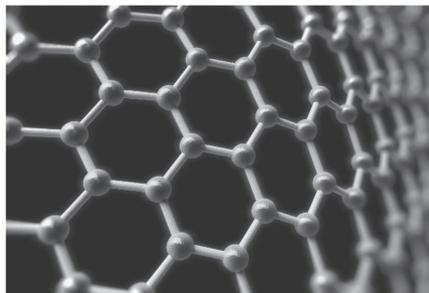


Fonte: <<http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2010/05/silicio.jpg>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Dentre todos os materiais semicondutores, há um que se destaca por ter 1001 utilidades: o grafeno, um material mais revolucionário que o plástico e o silício. O grafeno é um dos elementos que vai revolucionar a indústria tecnológica como um todo, por sua resistência, leveza, flexibilidade e transparência e, além de tudo, é um excelente condutor de eletricidade. Tendo todas essas características e vantagens promissoras, muito em breve estará em nossos computadores, celulares e outros dispositivos que usamos em nosso dia a dia.

O grafeno, Figura 2.6, é constituído por uma camada fina de grafite, aquele mesmo material que você encontra em qualquer lápis de escrever, mas existe uma diferença, ele possui uma estrutura hexagonal, na qual os átomos estão distribuídos, o que faz com que seja gerada uma fina camada de carbono (ELIAS, 2009). Para você ver como esse material é mesmo revolucionário, o grafeno é mais forte que o aço, cerca de 200 vezes mais resistente, mais leve e mais fino que existe, da espessura de um átomo.

Figura 2.6 | Material Grafeno



Fonte: <<http://grafeno.com/wp-content/uploads/2014/04/grafeno-carbono.jpg>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

Caro aluno, veja como o estudo dos materiais elétricos e semicondutores é interessante: 3 milhões de camadas de grafeno, quando empilhadas, formam uma altura de apenas 1 milímetro, além do mais, é um material elástico, transparente e não enferruja quando mergulhado em líquidos e não danifica sua composição, conduz eletricidade e calor melhor do que qualquer outro componente.

É um material que pode ser aplicado em quase todos os setores da indústria, é extremamente barato para ser produzido e tem facilidade de manuseio. Atualmente, é estudada sua aplicação em dispositivos móveis, como tablets e smartphones, em seus componentes eletrônicos.



### Pesquise mais

Este vídeo fala do grafeno, o novo material que revolucionará a indústria de tecnologia no mundo todo. Assista, pois você vai se surpreender.

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=VChujBepNQL>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

O que se pode fazer com este material, chamado grafeno: baterias de celulares, por exemplo. Em 2011, os pesquisadores da Northwestern University EUA, conseguiram criar uma bateria que mantém o celular carregado por mais de uma semana e sua recarga demora apenas 15 minutos, mas, em fevereiro de 2013, Richard Kaner, pesquisador da Universidade da Califórnia, conseguiu desenvolver baterias para celulares e notebooks que recarregavam no tempo de 5 a 10 segundos, respectivamente, usando apenas o grafeno como material para compor essas baterias. São muitas as utilidades desse material, por exemplo, a internet pode ficar ainda mais rápida, já foram desenvolvidos interruptores ópticos feitos com grafeno que aumentaram a velocidade de transmissão de dados em 100 vezes: também, foi produzida por cientistas uma antena de grafeno, a qual é muito fina e permite transmitir 128 GB ou 1 terabit em apenas 1 segundo a 1 metro de distância. Esse material pode também revolucionar as indústrias automotiva, naval e aeronáutica, com a produção de veículos mais leves e econômicos, além de poder ser utilizado em fones de ouvido, painéis solares, entre outros.

Você viu quanta utilidade existe para o grafeno? Quanto mais se aprofundar nos estudos dos materiais elétricos e semicondutores, mais conhecimento terá e verá que existem muitas possibilidades de melhorarmos, cada vez mais, a nossa qualidade de vida. O maior desafio é tornar a produção viável comercialmente e em larga escala, para isso é fundamental o estudo e a pesquisa desse material em questão, já que a maior parte dos testes, hoje, são feitas em laboratórios. É a mesma situação de quando o silício foi descoberto, somente passou a ser utilizado

em transistores sete anos após seu surgimento, e os primeiros circuitos integrados só foram fabricados cerca de 20 anos depois.



### Exemplificando

Os componentes eletrônicos, como o transistor e o diodo, são feitos com silício hoje, porém já se sabe que o grafeno é um material semicondutor mais eficiente que o silício. Em breve, teremos o grafeno em baterias de celulares, tablets, o próprio transistor pode ser feito com grafeno, o que o tornará mais rápido e mais eficiente, levando toda essa eficiência para as aplicações do dia a dia.

### Sem medo de errar

Caro aluno, tudo o que aprendemos nesta seção é utilizado em aplicações práticas, seja na indústria ou em alta tecnologia. Os materiais vêm sendo pesquisados há muitos anos para melhorar e encontrar novos materiais e novas aplicações. Você viu que os conceitos aprendidos podem auxiliá-lo na solução de seu projeto, como utilizar materiais melhores, mais eficientes, mais rápidos e levando-se em conta também a viabilidade econômica de produção e a utilização do material. O projeto de um equipamento de transmissão de dados tem muitos componentes eletrônicos, porém são necessários componentes melhores e que sejam eficientes e mais rápidos que o normal. Você já sabe que o silício é muito utilizado na fabricação desses componentes, como nos transistores, diodos e outros, mas qual será o material que tem mais eficiência que o silício e pode ser usado na fabricação dos componentes?

Pense no arseneto de gálio, o qual, como vimos, também é utilizado na fabricação de transistores; o grafeno também pode ser utilizado na fabricação de transistores e diodos; além do silício e do germânio. Qual material você utilizará como componente para ser utilizado em seu projeto? Com os conhecimentos que você adquiriu nesta seção, você resolveu muitos problemas que pareciam impossíveis até pouco tempo atrás, mas que agora você simplesmente melhorou a vida das pessoas, com equipamentos melhores, mais rápidos e confiáveis.

### Avançando na prática

#### Pesquisas sobre como melhorar a aplicação do semicondutor

##### Descrição da situação-problema

Você está pesquisando como pode melhorar a aplicação de certos materiais

semicondutores na eletrônica, para isso você precisa encontrar um material que transforme o transistor feito de silício em um componente mais rápido e eficiente, pois esse transistor feito com o material escolhido tem que tornar a comunicação e transmissão de dados e voz mais rápida e simultânea em vários países. Essa pesquisa trará um maior desenvolvimento para as empresas de telecomunicações, de rádio e TV ao longo dos anos.

### Resolução da situação-problema

Em suas pesquisas, você observou que o transistor feito com germânio é melhor e também tem uma melhor resposta quando utilizado, se comparado com o silício, porém o custo de obtenção do germânio ainda é alto e isso o torna inviável. No entanto, você também percebeu que com o silício o transistor já está em seu limite máximo de transmissão.

Com o grafeno, o resultado foi melhor ainda, você obteve melhor resposta nas transmissões de dados e voz, mais rápidas e com mais nitidez que o transistor feito de silício.

### Faça valer a pena

**1.** Quando estudamos os materiais semicondutores, temos a classificação dos metaloides, os quais são chamados assim por serem falsos metais, ou não metais, mas também são conhecidos como semimetais e, na tabela periódica, não são classificados explicitamente por serem utilizados diversos critérios para caracterizá-los.

Na tabela periódica, quais são os elementos que são classificados como metais e ametais?

- a) Metais são antimônio, germânio e polônio. Os ametais são telúrio, boro, silício e arsênico.
- b) Metais: hidrogênio, berílio e magnésio. Não metais: hélio e argônio.
- c) Metais são todos os elementos da coluna 1 A. Não metais são todos os elementos da coluna 8 A.
- d) Metais são todos os elementos da coluna 7 A. Não metais são todos os elementos da coluna 4 A.
- e) Os metais são os elementos da coluna 2 A, e os não metais são os elementos da coluna 6 A.

**2.** Os cientistas sempre buscam materiais que contribuam para o desenvolvimento tecnológico, e as pesquisas por materiais melhores continuam. Elas trabalham com alterações estruturais dos materiais, que são acompanhadas dos materiais desejados, e com a descoberta dos materiais semicondutores e sua aplicação na eletrônica.

Os transistores são feitos com o semicondutor silício. Qual das alternativas apresenta uma aplicação do transistor?

- a) Dopar materiais intrínsecos para conduzirem melhor a eletricidade.
- b) Transformar a corrente alternada em corrente contínua.
- c) Viabilizar as comunicações, processamento de dados e viagens espaciais.
- d) Transformar a tensão de entrada numa outra tensão na saída.
- e) Manter a tensão de entrada igual na saída.

**3.** Quando da descoberta dos materiais semicondutores, os cientistas perceberam que esses materiais poderiam ser aplicados em várias situações práticas, principalmente na eletrônica. O silício, por exemplo, que é usado na fabricação do transistor, desenvolveu os componentes eletrônicos, com esse desenvolvimento foi possível tornar os equipamentos eletrônicos melhores do que os equipamentos antigos.

O transistor é feito de silício, um material semicondutor, e por isso foi considerado revolucionário, pois com ele foi possível transformar toda a tecnologia. O transistor substituiu um componente fundamental para o funcionamento dos equipamentos eletrônicos. Qual foi o componente que o transistor substituiu e porquê?

- a) Substituiu o diodo, porque o transistor passou a melhorar a retificação da onda.
- b) Substituiu o capacitor, com isso melhorou a tensão nos equipamentos.
- c) O transistor substituiu os resistores devido ao fato de conduzir corrente elétrica em determinados momentos que o equipamento exige.
- d) A válvula. Com o transistor, o funcionamento dos equipamentos passou a ser mais rápido e melhor.
- e) Substituiu o processador, ficou mais rápido o processamento de dados.

## Seção 2.2

### MOS, CMOS e CMOSFET

#### Diálogo aberto

Olá, caro aluno! Bem-vindo a esta seção na qual estudaremos os circuitos MOS e derivados. Na seção anterior, vimos os metaloides de germânio, a classificação dos metais e não metais na tabela periódica. Estudamos também o arseneto de gálio, um elemento muito utilizado para dopar os materiais semicondutores, assim como o silício e o germânio. É importante sabermos a classificação desses elementos na tabela periódica para que possamos utilizar o material correto nas aplicações da eletrônica. Estudamos o grafeno, um material que irá revolucionar a tecnologia atual, desde a indústria eletrônica até a indústria aeroespacial. Para estudarmos os componentes MOS, é necessário entendermos um pouco da história do transistor, que é um componente muito utilizado em circuitos integrados contidos nos microprocessadores, o cérebro dos computadores.

Você é o engenheiro projetista de computadores e tem que decidir qual componente utilizará na fabricação da placa de circuitos impressos, para isso você estudou os transistores MOS, CMOS e FET MOSFET mas também sabe que os dispositivos CMOS são utilizados em transistores que serão colocados nos microprocessadores para funcionar o computador, e que também existe a tecnologia VLSI, a qual é mais rápida e mais confiável.

Qual componente você usaria na placa de circuitos impressos?

Vamos em frente?

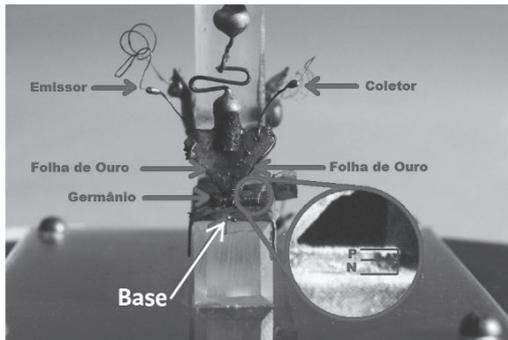
#### Não pode faltar

Olá! Para continuar seus estudos, vamos falar um pouco sobre o transistor. É um componente muito utilizado em circuitos eletrônicos, cujo nome vem do termo *transfer resistor*, que significa resistor de transferência, e tornou-se popular nos anos de 1950. Ele foi o grande responsável pela revolução da eletrônica. Entre várias de suas funções, está a de amplificar e chavear os sinais elétricos. O transistor foi desenvolvido

em 1947, quando cientistas americanos descobriram um cristal semiconductor e apresentaram dois tipos de junções, e nas pesquisas perceberam que esse material tinha as capacidades amplificadoras parecidas com as obtidas com a válvula triodo. Assim, um novo componente foi descoberto. A Figura 2.7 explana os componentes do primeiro transistor, que também é mostrado na Figura 2.8.

A aplicação do transistor é muito mais vantajosa, o custo de fabricação é menor e, além disso, gasta menos energia do que as antigas válvulas. Com a descoberta do transistor, a eletrônica obteve um grande avanço, e o dispositivo passou a ser largamente empregado nos circuitos eletrônicos.

Figura 2.7 | O primeiro transistor



Fonte: <<https://www.embarcados.com.br/wp-content/uploads/2014/12/hpt-16.jpg>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

Figura 2.8 | Uma foto do primeiro transistor

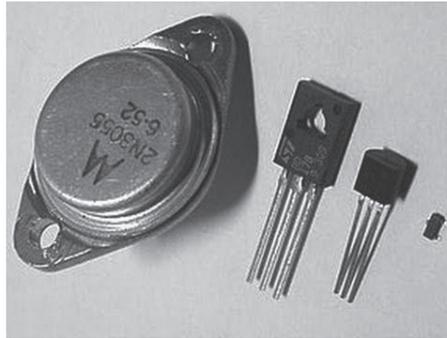


Fonte: <[http://s.glbimg.com/po/tt/f/original/2012/07/12/gpc20120711\\_1\\_primeirotransistor.jpg](http://s.glbimg.com/po/tt/f/original/2012/07/12/gpc20120711_1_primeirotransistor.jpg)>. Acesso em: 15 nov. 2016.

Atualmente, o transistor é feito com silício, mas o silício puro apresenta características semicondutoras pouco interessantes, então acrescentamos impurezas a esse material. Para se produzir um material semicondutor do tipo P, a impureza é o Boro (B) e, para criarmos um semicondutor do tipo N, a impureza utilizada é o fósforo (Ph).

A Figura 2.9 mostra alguns tipos de transistor. Os terminais do transistor têm os nomes de emissor, coletor e base. Se compararmos com o primeiro transistor, vemos que a parte central circular mede menos de 2 cm, os outros medem não mais que alguns milímetros. Essas dimensões se devem quase que exclusivamente, ao invólucro ou ao encapsulamento.

Figura 2.9 | Transistor atual



Fonte: <<https://i.ytimg.com/vi/84YfL1fVBA/hqdefault.jpg>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

Com o transistor foi possível desenvolver circuitos integrados de operação mais rápidos e menores, e os pesquisadores conseguiram melhorar ainda mais o transistor, chegando ao transistor MOS (semicondutor de Óxido de Metal). Somente na década de 1960, o transistor MOS passou a ser tido como um dispositivo viável e adequado aos circuitos integrados complexos devido à sua estrutura simples, porém os problemas com as impurezas e os estados de interface mantiveram restrito seu uso. Com as técnicas sendo desenvolvidas para a redução das interfaces, identificou-se o sódio como a principal impureza, assim, a confiabilidade do transistor MOS e suas aplicações aumentaram.

O transistor do tipo nMOS tem, em sua composição, o substrato de silício do tipo p fracamente dopada, e duas áreas do tipo n fortemente dopadas; a transmissão no silício é feita com a adoção de elementos doadores de elétrons, arsênio e fósforo, logo as cargas majoritárias neste tipo de transistor são os elétrons. O transistor MOS é muito utilizado em circuitos lógicos, os sinais são baseados no sistema binário, 0 e 1. Esse tipo de transistor conduz o sinal "0" lógico forte e sinal "1" lógico fraco.

No transistor do tipo pMOS, o substrato é composto de uma camada de silício do

tipo n-well, fracamente dopada, e com duas camadas do tipo p fortemente dopadas; a transmissão é feita com a adoção de elementos doadores de lacunas, ou seja, falta de elétrons, com os elementos índio e boro.

Agora, as cargas majoritárias são as lacunas, ou buracos, e o transistor conduz o sinal "1" lógico forte e o sinal "0" lógico fraco.



### Assimile

Uma observação importante: as *wafers* são fatias circulares de silício, as quais são cortadas de um cilindro de cristal único. Durante o processo de produção de chips são dopadas levemente com átomos doadores. Os substratos são comuns a todos os dispositivos, já que os transistores de canal p têm necessidade de um substrato do tipo n, então é necessário criar regiões com as impurezas desse tipo. Essa região é chamada de tipo n (ou n-well).

As tecnologias nMOS foram dominantes durante duas décadas. Assim como a velocidade dos circuitos, a densidade e as dimensões aumentaram, houve problemas com o consumo de potência, e esse fato estimulou o desenvolvimento da tecnologia CMOS (Semicondutor de Óxido de Metal Complementar), demonstrada na Figura 2.10, quando passou a existir a possibilidade de transistores com dois canais: N e P. Hoje, os circuitos semicondutores são implementados com a tecnologia CMOS, e suas vantagens são o baixo consumo de potência, alto nível de integração, alta imunidade a ruído, simplicidade do projeto e operação confiável para ampla faixa de valores de tensão.

A tecnologia CMOS é utilizada para a construção de circuitos integrados, esta, por sua vez, é encontrada em microprocessadores, microcontroladores, memórias RAM, entre outros circuitos digitais. O CMOS também é muito utilizado em vários circuitos analógicos, tais como sensores de imagem, conversores de dados e transceptores para muitos tipos de comunicação (KOFUJI; ZUFFO; SOARES, 2004).

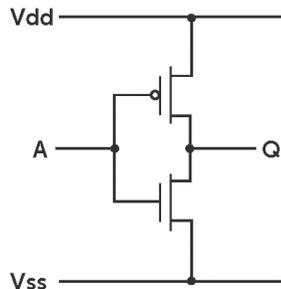
Figura 2.10 | Transistor CMOS



Fonte: <<http://i.stack.imgur.com/QcMsU.jpg>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

O CMOS também é muito conhecido como COS-CMOS (Simetria Complementar – Semicondutor de Óxido de Metal Complementar). Complementar-simetria pelo fato do estilo do design digital do CMOS, que usa pares complementares de transistores de efeito de campo (FET) do tipo p ou do tipo n, MOSFET, para as funções lógicas, como na Figura 2.11.

Figura 2.11 | Design do CMOS



Fonte: <<http://blog.novaeletronica.com.br/circuito-cmos-eletronica-digital/>>. Acesso em: 22 nov. 2016.

Algumas características são muito importantes nos dispositivos CMOS, com baixa imunidade a ruídos estáticos e baixo consumo de energia, um dos transistores do par estará sempre desligado, essa alternância entre os estados ligado e desligado consumirá energia significativa apenas momentaneamente, em consequência, os dispositivos CMOS não têm produção de calor como em outros dispositivos lógicos, por exemplo, a TTL (Lógica Transistor-Transistor), que normalmente consome corrente mesmo em repouso.

O CMOS permite uma alta densidade de funções lógicas em um único chip, principalmente porque o CMOS se tornou a tecnologia mais utilizada para ser aplicada em VLSI (Integração em Escala Muito Grande), processo pelo qual são criados circuitos integrados através da combinação de milhares de transistores em um único chip.



### Refleta

Caro aluno, você sabia que a quarta geração de microprocessadores é marcada pelos chips VLSI?

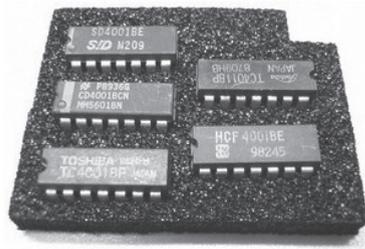
Esses microprocessadores são dispositivos eletrônicos encapsulados em um único chip, possuindo internamente uma unidade de controle. Esta é uma unidade lógico-aritmética e uma memória interna que engloba todas as funcionalidades básicas de um computador.

Pense nisso!

O fato de existir uma fina camada de óxido que isola o gate do substrato, e sendo esta camada extremamente sensível a descargas elétricas, torna os dispositivos que usam transistores MOS muito delicados. A eletricidade estática acumulada em ferramentas, ou mesmo em nosso corpo, por exemplo, quando caminhamos em um tapete num dia seco, ou então quando atritamos algum objeto em nossa roupa, é suficiente para danificar um circuito CMOS. Assim, quando tocamos nos terminais do dispositivo CMOS, a carga de nosso corpo irá escoar pelo dispositivo e facilmente destruirá a fina camada de óxido que separa o gate do substrato, o componente será inutilizado, ou seja, será queimado.

Os dispositivos que utilizam transistores CMOS são extremamente sensíveis a descargas elétricas estáticas. Assim, a preocupação no uso e manuseio é evitar o aparecimento de tensões perigosas capazes de danificar os componentes CMOS. No caso dos transistores MOS, há a possibilidade de se colocar um pequeno anel de metal que curto-circuita seus terminais, o qual será retirado após o componente ser soldado na placa de circuito impresso. Há várias maneiras para transportar ou guardar circuitos integrados CMOS sem que as cargas estáticas o danifiquem. Uma delas consiste em usar uma esponja condutora em que os terminais dos circuitos são colocados e assim mantidos em curto constante. Observe a Figura 2.12.

Figura 2.12 | Esponja condutora para circuitos CMOS



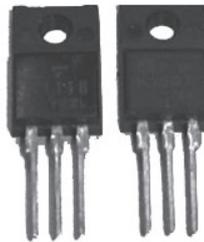
Fonte: <<http://www.eletronicadigital.com/site/user/images/curso-eletronica-digital/4/espuma-anti-estatica.jpg>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

Os circuitos integrados CMOS tem de ser mantidos nessas esponjas até o momento de serem utilizados, caso contrário o dano será irreversível se houver um toque acidental com os dedos eletricamente carregados (estática). Assim, nunca se deve tocar com os dedos nos terminais de componentes CMOS, sejam transistores ou circuitos integrados. Em laboratórios que são efetuados trabalhos com CMOS, é importante a observação de precauções especiais para não ocorrer, em nenhum ponto, acúmulos de cargas estáticas; as bancadas nas quais são trabalhados esses circuitos contêm partes metálicas aterradas; e os técnicos usam recursos que permitem descarregar cargas do seu corpo.

O Transistor a Efeito de Campo (FET) é o dispositivo mais comum em sistemas lógicos modernos. Existem duas classes de FETs, os chamados transistores de junção

JFET e os transistores de contato, os chamados MOSFET (Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor), demonstrado na Figura 2.13. O FET é muito conhecido como transistor unipolar devido à condução da corrente elétrica acontecer por apenas um tipo de portador, sendo ele elétron ou lacuna, isso dependendo do tipo de FET, de canal n ou do tipo canal p. Seu nome, "efeito de campo", é porque o mecanismo de controle do componente se baseia no campo elétrico, que é estabelecido com tensão aplicada no terminal de controle. O JFET tem esse nome por ser um transistor de junção (MARQUES; CRUZ; JÚNIOR, 2009).

Figura 2.13 | Transistor MOSFET



Fonte: <<http://www.electronicrepairguide.com/images/testing%20mosfet.jpg>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

O transistor MOSFET é um componente usado na configuração complementar do CMOS. Quando integrado, ocupa menos área da pastilha que é ocupada pelo transistor; possui capacidade de dissipação de elevadas potências; comuta grandes correntes em alguns nanossegundos; o ruído é menor do que um transistor bipolar, portanto, mais adequado para estágios de entrada de amplificadores de baixo nível (muito usado em receptores de FM de alta fidelidade). Essas são algumas características desse tipo de transistor (MARQUES; CRUZ; JUNIOR, 2009).



### Pesquise mais

Assista ao vídeo do link: <<https://www.youtube.com/watch?v=Te5YYVZiOKs>>. Acesso em: 18 set. 2016.

Nele você verá uma interessante explicação e demonstração de uso dos transistores, componente que você irá ver, ouvir e falar muito. Então, fique por dentro!



### Exemplificando

Os dispositivos CMOS são utilizados nos transistores que serão colocados nos microprocessadores. Você deve ter cuidado para manuseá-los,

pois, se você pegar o componente com os dedos, poderá danificá-lo permanentemente.

Portanto, transporte o CMOS na esponja condutora e somente retire o anel metálico após colocado na placa de circuito impresso, assim você não queimará o componente.

### Sem medo de errar

Você irá projetar um computador e necessita usar um componente na placa de circuitos impressos. Já estudou o transistor e os dispositivos MOS, CMOS, entre outros, e que uma nova tecnologia, VLSI, poderá ser utilizada no CMOS, no transistor que estará no chip (o processador do computador).

Caro engenheiro, você observou que a tecnologia VLSI tem muitas vantagens sobre outras tecnologias utilizadas nos microprocessadores. Seu projeto ficou excelente, agora é partir para a colocação dos componentes na placa de circuitos impressos. Feito isso, você enviará para os testes finais. Pelo seu projeto, tudo sairá conforme o previsto, a placa que projetou vai para o teste e, com o relatório que recebeu, você, como engenheiro, verificou que tudo sai conforme o previsto. Com essa tecnologia, foi montada uma placa de circuitos impressos que fará com que o seu computador tenha um funcionamento melhor que outros, assim, você sairá na frente de outros concorrentes na produção de computadores.

### Avançando na prática

#### Placa de circuitos impressos

##### Descrição da situação-problema

Você tem nas mãos uma placa de circuitos impressos de um notebook que não está funcionando como deveria. Nesse caso, é necessário fazer testes com a placa; fazendo isso, você ainda assim verificou que a placa não está funcionando, logo, terá que partir para outros testes, como os componentes utilizados. Nos testes, foi possível verificar que alguns componentes estavam funcionando parcialmente, outros não funcionavam por completo; você testou capacitores, resistores, diodos transistores e também o processador do computador. Chegou até você que esta placa foi tocada por outra pessoa sem o conhecimento adequado para isso, então, você já percebeu que o problema pode estar em um componente específico da placa de circuitos impressos.

Com os conhecimentos que você adquiriu nesta seção, como resolveria essa questão?

### Resolução da situação-problema

Pelo seu conhecimento desta seção, você foi verificando que em alguns componentes não havia problemas de funcionamento, mas de acordo com a informação que você recebeu, de que uma pessoa abriu o computador e tocou com as mãos a placa de circuitos impressos, você já pôde ter uma ideia do que pode ter acontecido.

Você lembrou que os dispositivos CMOS não podem ser tocados com os dedos, pois pode danificá-los permanentemente, ou seja, queimá-los.

Assim, nos testes que você realizou no microprocessador, verificou que ele não está funcionando porque o dispositivo CMOS utilizado nesse chip foi queimado devido ao contato com os dedos da pessoa que mexeu na placa, assim, você substituiu o chip, porém, somente após colocar na placa de circuitos impressos é que você retirou o anel metálico que estava curto-circuitando os terminais. Fez novos testes e a placa voltou a funcionar normalmente.

### Faça valer a pena

**1.** O transistor surgiu em 1948, quando os cientistas descobriram que um cristal semicondutor apresentava dois tipos de junções e que esse material tinha a capacidade de ampliações parecidas com as obtidas com a válvula triodo, assim foi descoberto o transistor.

A eletrônica passou a utilizar o transistor em grande escala devido às suas características mais vantajosas do que a válvula. Quais são essas características?

- a) Custo de fabricação menor e gasta menos energia do que as válvulas.
- b) Custo de fabricação é maior que as válvulas, porém gasta menos energia.
- c) É um material fácil de ser encontrado e gasta muita energia.
- d) A potência dissipada é maior que a válvula, porém a corrente é pequena.
- e) A corrente é muito grande e a potência dissipada é menor.

**2.** O transistor foi uma das descobertas mais revolucionárias da eletrônica, os equipamentos melhoraram muito em relação aos anteriores e foi possível desenvolver circuitos integrados de operação mais rápida e menores, com isso o transistor sofreu uma nova melhora, dando origem ao MOS (semicondutor Óxido de Metal).

Na década de 1960, o transistor MOS passou a ser tido como um dispositivo viável e adequado aos circuitos integrados, mas seu uso ainda era restrito. Por que?

- a) Com sua estrutura complexa e sem problemas de impurezas, seu uso ainda era restrito.
- b) Devido à sua estrutura simples, mas com problemas com as impurezas, mantiveram seu uso restrito.
- c) O transistor MOS ainda era novidade, e a indústria não tinha confiança em seu uso.
- d) O consumo de energia era muito alto para substituir por completo a válvula.
- e) A perda de potência ainda era muito alta, eram necessárias mais pesquisas até que se tornasse viável seu uso.

**3.** Com as pesquisas se intensificando e as técnicas de redução de interfaces sendo cada vez mais desenvolvidas, o sódio foi identificado como a principal impureza, assim, a confiabilidade do transistor MOS e suas aplicações aumentaram.

O transistor do tipo nMOS tem em sua composição o substrato de silício do tipo p, fracamente dopado, e também duas áreas do tipo n fortemente dopadas. No silício, como é feita a transmissão e quais tipos de carga são majoritários?

- a) A transmissão é feita com a adoção de elementos receptores de elétrons, e as cargas são as lacunas.
- b) A transmissão é feita pelo arseneto de gálio; já as cargas majoritárias são os prótons.
- c) A transmissão é feita com elementos doadores de prótons; as cargas majoritárias são os nêutrons.
- d) A transmissão é feita com a adoção de elementos doadores de elétrons, arsênio e fósforo, e as cargas majoritárias são os elétrons.
- e) A transmissão se dá com elementos portadores de prótons; as cargas majoritárias são os próprios prótons.

## Seção 2.3

### Doping e tipos de doping

#### Diálogo aberto

Seja bem-vindo, prezado aluno! Estudaremos o que é dopagem de um material semicondutor e quais, os tipos de doping. Começaremos explicando o que são materiais intrínsecos e extrínsecos para que possamos continuar os estudos. Os materiais semicondutores são encontrados na natureza em seu estado natural, porém eles não possuem ainda as características semicondutoras, então necessitamos introduzir algumas “impurezas” nesses materiais, isso é o doping. A partir desse momento, podemos obter materiais tipo P e tipo N. Vejamos o que são estes conceitos!

Relembrando que você é o engenheiro projetista de equipamentos eletrônicos e, para obter equipamentos que necessitem de precisão mais apurada, são necessários componentes que façam o equipamento funcionar com mais rapidez e eficiência. Os diodos e transistores, por exemplo, são materiais feitos com silício, e esse material em particular é encontrado na natureza em seu estado natural, mas ainda não possui as características desejadas para as aplicações em componentes semicondutoras. Nesse caso, o silício tem que ser dopado com impurezas, como boro, gálio e índio, para que passe a ter essas características desejadas para aplicações em componentes semicondutores e, aí sim, conduzir eletricidade, quando for necessário, como o diodo que conduz eletricidade a partir da tensão de 0,7 V.

Veremos que a temperatura também tem interferência na condutividade do material, pois ele conduz mais energia quando a temperatura aumenta, porém temos que controlar essa temperatura e não deixar aumentar muito, caso contrário, os componentes poderão ser danificados. Também é necessário o controle da dopagem sobre o material e assim poder utilizar o componente correto para sua aplicação nesses equipamentos.

Então, vamos lá? Venha comigo!

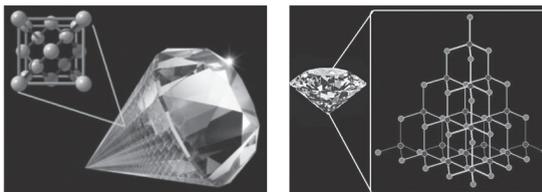
## Não pode faltar

Seja bem-vindo à nova seção. Estudaremos o que é dopagem e quais são os tipos de doping para materiais elétricos e semicondutores, mas antes de começarmos, você sabe o que são materiais intrínsecos e materiais extrínsecos?

Os materiais semicondutores, como silício e germânio, são encontrados na natureza em sua forma mais pura, ou seja, a concentração nesses materiais portadores de cargas positivas são iguais à concentração de portadores de cargas negativas; eles ainda não possuem as características desejadas para que sejam aplicados na fabricação de componentes semicondutores. Nesse caso, é necessário que esses materiais encontrados em sua forma pura passem por um processo de dopagem, ou seja, são semicondutores intrínsecos nos quais introduzimos uma impureza para que possamos controlar as características elétricas do semicondutor, então eles passam a ser chamados de materiais extrínsecos, sendo que agora eles possuem tais características que se desejam e podem ser usados na fabricação de componentes semicondutores. O processo de dopagem em um semicondutor refere-se à adição, ao cristal intrínseco, de uma pequena quantidade de impureza com propriedades adequadas, de tal forma que afete o comportamento elétrico do semicondutor dopado de maneira desejada. Para melhorarmos as características condutoras de um material semicondutor, podemos fornecer ao material cargas elétricas em quantidades necessárias, de tal modo que nesse material fique com cargas elétricas negativas (elétrons). Muitas dessas cargas elétricas podem não formar uma ligação, assim, esses elétrons excedentes estarão livres em torno do átomo e poderão mover-se com maior facilidade, havendo a condução elétrica, que é denominada condução extrínseca (MELCHER, 1997).

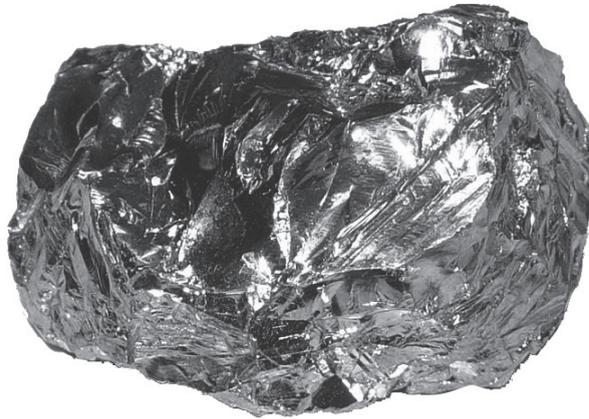
O carbono, o silício e o germânio possuem em comum uma propriedade única em sua estrutura de elétrons, todos esses elementos possuem quatro elétrons na camada mais externa. Essa propriedade permite que esses materiais formem bons cristais. Os quatro elétrons formam ligações covalentes perfeitas com quatro átomos vizinhos, criando um reticulado. A forma mais cristalina no carbono é o diamante (Figura 2.14); já no silício é uma substância metálica prateada (Figura 2.15).

Figura 2.14 | Estrutura cristalina no carbono, diamante



Fonte: <<http://www.lasalutebolleinpentola.com/wp-content/uploads/2016/11/Scienza-estrutura-do-diamante.jpg>> e <<http://1.bp.blogspot.com/-pH2jHir4JR4/VPHHutkgQDI/AAAAAAAABT0/6775sd3nYug/s1600/estrutura-do-diamante.jpg>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

Figura 2.15 | Silício



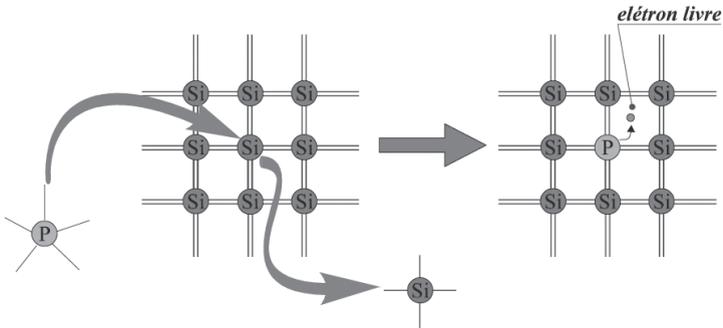
Fonte: <<https://igorantunes.files.wordpress.com/2012/03/800px-siliconcroda.jpg>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

A dopagem, então, é o processo de adição de cargas elétricas, o qual pode ser obtido introduzindo-se elementos com mais elétrons na camada de valência que os elétrons do material semicondutor e que serve de base. Tais impurezas são chamadas de doadoras, e o material obtido é chamado de semicondutor do tipo N. Da mesma maneira, é possível introduzir um excesso de cargas positivas no material semicondutor, que nesse caso é produzido por uma falta de elétrons, ou um excesso de lacunas (ausência de um elétron e do seu átomo, que deixou em seu lugar o espaço vazio). Essas lacunas são interpretadas como uma quase partícula, tendo a mesma massa do elétron se comportando como uma carga positiva frente a um campo elétrico.

Consegue-se o excesso de cargas elétricas positivas introduzindo impurezas, as quais são chamadas de receptoras, e o material obtido é chamado de semicondutor tipo P. No silício, a dopagem positiva é feita com impurezas de boro (B), gálio (Ga) ou índio (In), esses três elementos químicos têm três elétrons de valência, ou seja, um elétron a menos. Geralmente, os semicondutores extrínsecos apresentam uma maior condutividade elétrica do que os semicondutores intrínsecos, por esses motivos é que esses materiais são os mais utilizados na fabricação de dispositivos eletrônicos, silício tipo N e silício tipo P.

Como vimos acima, o silício tem quatro elétrons na camada de valência. Esse material é dopado com cargas elétricas negativas com pequenas quantidades de fósforo (P), arsênio (As) ou antimônio (Sb), que têm cinco elétrons na camada de valência, portanto, um elétron a mais que o silício, como mostra a Figura 2.16, assim os elétrons adicionais estão livres para se movimentarem, formando a corrente elétrica.

Figura 2.16 | Dopagem do silício com fósforo

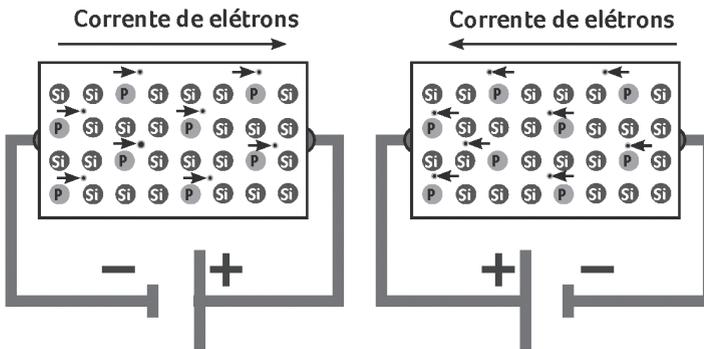


Fonte: <[http://3.bp.blogspot.com/-x0cj2iYLohE/UenYK7\\_UWal/AAAAAAAAACyk/yRjTYCKa2Ho/s1600/06.jpg](http://3.bp.blogspot.com/-x0cj2iYLohE/UenYK7_UWal/AAAAAAAAACyk/yRjTYCKa2Ho/s1600/06.jpg)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

Caro aluno, em outras palavras, o quinto elétron de valência do átomo de fósforo não participa de nenhuma ligação covalente (uma ligação química que é caracterizada pelo compartilhamento de um ou mais pares de elétrons entre os átomos, o que causa uma atração mútua entre eles e que mantém a molécula resultante unida). Esse elétron extra é um elétron livre e pode ser facilmente liberado pelo átomo de fósforo, assim ele passa a transitar livremente através da estrutura do cristal semiconductor (WENDLING, 2009).

O semiconductor dopado com átomos, que contém excesso de um ou mais elétrons na camada de valência, é denominado semiconductor do tipo N. A corrente elétrica nesses materiais é conduzida, principalmente, pelas cargas negativas e essa condução é independente da polaridade da tensão aplicada nos terminais do material semiconductor, como mostra a Figura 2.17.

Figura 2.17 | Corrente de elétron semiconductor tipo N

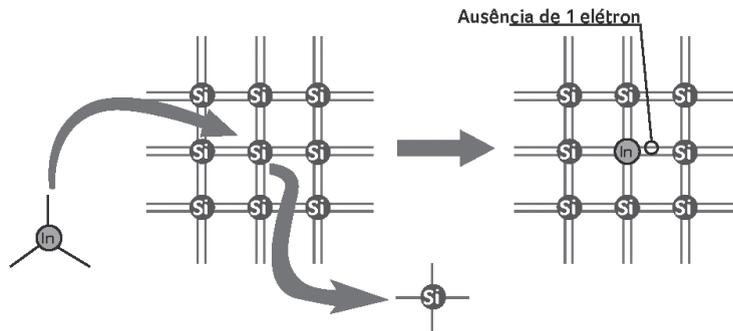


Fonte: adaptada de <[http://h5.ggpht.com/-krubhUmT564/UexCvG9waal/AAAAAAAAAo/VqRrKkgy\\_Uc/clip\\_image018\\_thumb%25255B1%25255D.gif?imgmax=800](http://h5.ggpht.com/-krubhUmT564/UexCvG9waal/AAAAAAAAAo/VqRrKkgy_Uc/clip_image018_thumb%25255B1%25255D.gif?imgmax=800)>. Acesso em: 30 nov. 2016.

Quando os átomos que são introduzidos na estrutura cristalina do material semiconductor tiverem deficiência de elétrons na camada mais externa do átomo em relação ao número de elétrons da camada mais extrema de cada átomo do cristal, é formado o semiconductor do tipo P.

Por exemplo, o átomo de índio tem três elétrons na camada de valência, quando esse material é utilizado no processo de dopagem do silício, temos um material semiconductor do tipo P, conforme mostra a Figura 2.18.

Figura 2.18 | Dopagem do silício com índio

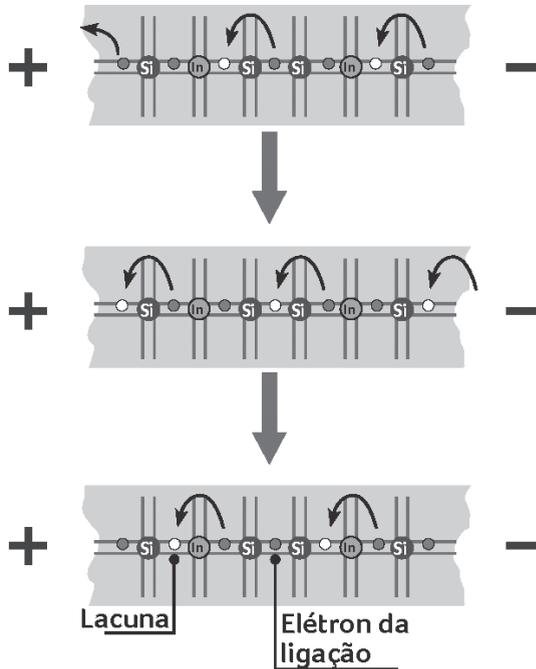


Fonte: adaptada de <<http://1.bp.blogspot.com/-XOntW7SNk0g/UerylEZljlI/AAAAAAACzM/lwXvp763WiM/s1600/09.jpg>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

O átomo de índio se acomodará na estrutura cristalina formando três ligações covalentes com os átomos da vizinhança do silício, nesse caso, verificou-se a ausência do segundo elétron que comporia o par, o qual seria necessário à formação da ligação com o átomo de índio, que é chamada de lacuna. A existência dessas lacunas no semiconductor permitirá o aparecimento de um mecanismo de condução elétrica diferente daquele observado em um semiconductor do tipo N, os elétrons que estão em excesso no processo de dopagem irão transitar livremente no interior do material. Quanto à dopagem que produziu as lacunas no material semiconductor, os elétrons provenientes de uma ligação covalente somente transitarão para uma parte do cristal na qual houver uma lacuna disponível.

A Figura 2.19 mostra a condução em um cristal de silício que foi dopado com átomos de índio e submetido a uma tensão em seus terminais. O movimento de elétrons se dá do polo negativo para o polo positivo, no qual a ocupação das lacunas disponíveis na rede cristalina é feita pelos elétrons de valência, o elétron que ocupou essa lacuna deixou outra lacuna no lugar que estava, e essa outra lacuna será ocupada por outro elétron, e assim sucessivamente. Esse movimento é denominado movimento de lacunas (WENDLING, 2009).

Figura 2.19 | Movimento de lacunas em um semiconductor



Fonte: adaptada de <<http://1.bp.blogspot.com/-Uk4Y4ub3HLM/Ue0Hs5qespl/AAAAAAACzg/99HMRzWkeBU/s1600/10.jpg>>. Acesso em: 30 nov. 2016.



### Refleta

Caro aluno, é importante observar que o movimento dos elétrons no semiconductor do tipo N é feito do polo negativo para o polo positivo, e o movimento das lacunas no semiconductor do tipo P é no sentido contrário, ou seja, do polo positivo para o polo negativo do material.



### Assimile

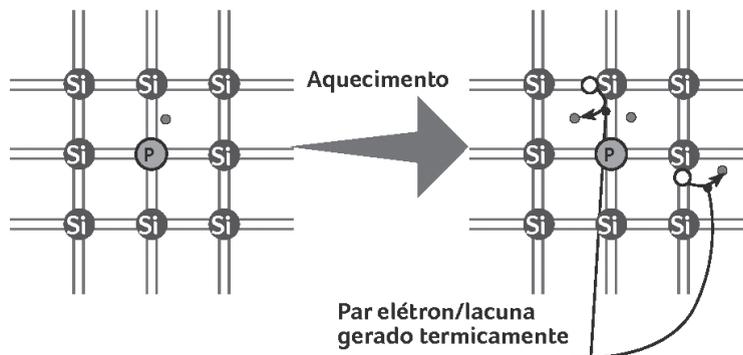
Também é importante não confundir que, em um semiconductor tipo N, os movimentos são os elétrons, e não as lacunas. Falamos que as lacunas se movimentam devido aos elétrons saírem para ocupar outro lugar deixado por outro elétron, e assim podemos fazer uma analogia com o movimento desses elétrons com o movimento das lacunas.

O semicondutor, quando é dopado com átomos que contêm deficiência de um ou mais elétrons na camada de valência, é chamado de semicondutor tipo P, no qual a corrente elétrica é conduzida, principalmente, pelas lacunas que se comportam como portadores das cargas positivas durante todo o processo de condução elétrica.

Caro aluno, se analisarmos bem as propriedades básicas dos semicondutores dopados, veremos que o número de elétrons de um semicondutor do tipo N, ou as lacunas de um semicondutor do tipo P, crescerá com o aumento de átomos de impurezas que são introduzidas no cristal. Assim, podemos afirmar que, com o aumento do número de portadores de carga, a condutividade do material aumentará também na mesma proporção, sendo possível alterar de forma controlada a condutividade elétrica de um semicondutor apenas realizando a dosagem adequada da quantidade de elementos introduzidos no cristal quando de sua dopagem, que acontece durante a fase de fabricação. Essa é uma característica fundamental de controle externo da condutividade elétrica e possibilita que os cristais semicondutores sejam usados como matéria-prima na fabricação de componentes que serão utilizados em equipamentos eletrônicos, como diodos, transistores, circuitos integrados, entre outros. Também é utilizado na construção de dispositivos optoeletrônicos, como fotodetectores, diodos emissor de luz (os LEDs) e lasers semicondutores.

Os semicondutores também possuem uma propriedade térmica muito interessante, a temperatura tem uma influência direta sobre as propriedades elétricas dos materiais semicondutores. Aumentando a temperatura do material semicondutor, aumenta também a energia térmica do elétron de valência, fazendo com que a ligação covalente da qual esteja participando seja desfeita. Cada ligação covalente que é desfeita por esse processo térmico proporciona a geração de um par de elétron/lacuna a mais na estrutura do cristal, como é demonstrado na Figura 2.20.

Figura 2.20 | Par elétron/lacuna gerado termicamente



Fonte: adaptada de <[http://1.bp.blogspot.com/-W-T2reyv68/Ue0H3Os\\_c5I/AAAAAAACzo/u6BXTQzX6DQ/s640/11.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-W-T2reyv68/Ue0H3Os_c5I/AAAAAAACzo/u6BXTQzX6DQ/s640/11.jpg)>. Acesso em: 17 nov. 2016.

Devido ao aquecimento do cristal, a condutividade do material semiconductor aumenta de acordo com o aumento do número de portadores, permitindo que seja obtido um maior fluxo de corrente elétrica no material. Em um semiconductor puro a condutividade cresce com o aumento da temperatura, isso ocorre devido ao incremento de pares elétron/lacuna, que é maior que a diminuição das mobilidades. A faixa de temperatura nos semicondutores extrínsecos varia de 100 a 600 K, a quantidade de portadores majoritários é praticamente constante devido à dopagem, porém a redução da mobilidade ocasiona um decréscimo da condutividade com a temperatura, assim, a dopagem faz com que o semiconductor extrínseco adquira características de temperatura mais próxima dos materiais condutores.



### Pesquise mais

No link a seguir, você verá sobre as técnicas de dopagem dos semicondutores e os métodos de purificação. É muito interessante como é o processo de dopagem dos materiais semicondutores e como é controlado esse processo para utilização na fabricação de componentes eletrônicos. Disponível em: <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialsemicon/pagina\\_4.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialsemicon/pagina_4.asp)>. Acesso em: 27 set. 2016.



### Exemplificando

O diodo é um componente semiconductor muito utilizado na eletrônica, porém ele apenas conduz energia quando chega à tensão de 0,3 V em um diodo de germânio, e de 0,7 V em um diodo de silício. Assim, de acordo com a dopagem do material, podemos controlar com mais eficácia ou não o acendimento de uma lâmpada, por exemplo. Com o diodo de germânio, o tempo de acendimento da lâmpada é mais rápido do que com o diodo de silício.

### Sem medo de errar

Caro aluno, vimos que a dopagem em um material semiconductor é muito importante, pois desse doping depende a condução elétrica do material. Controlando a quantidade de impurezas introduzidas no material, controlamos a sua condutividade.

Estudamos também sobre a influência da temperatura sobre o material semiconductor, quanto maior a temperatura, maior a condução elétrica do material, porém é necessário controlarmos a temperatura, pois se a temperatura aumentar muito, o componente poderá ser inutilizado permanentemente, então teremos que controlar também a temperatura sobre o material.

Para que os equipamentos eletrônicos funcionem com precisão, é necessário, que essa dopagem seja muito bem controlada, pois o componente que utilizará o material semicondutor fará com que a condutividade seja maior ou menor. Consequentemente, o componente poderá conduzir mais energia elétrica ou não e, dependendo do equipamento, essa condutividade é muito importante, o equipamento poderá ficar mais rápido em seu processamento das informações ou poderá ficar mais lento. Nesse caso, você poderá escolher a quantidade de impurezas que será introduzida no material semicondutor e utilizá-lo em seu projeto.

Com esses conhecimentos, avançamos mais um pouco rumo à prática de sua profissão. No dia a dia, o profissional se destacará com os conhecimentos adquiridos e, com mais esta seção, você, caro aluno, já possui um excelente conhecimento dos materiais elétricos e semicondutores, podendo se destacar e resolver situações práticas pertinentes à profissão que escolheu.

## Avançando na prática

### Dopagem de um semicondutor

#### Descrição da situação-problema

Você está pesquisando os materiais semicondutores e quer dopar o silício para obter como resultado um semicondutor do tipo N e outro semicondutor do tipo P. Você tem disponível os elementos: boro, gálio, índio, fósforo e antimônio. Para dopar o silício e obter um semicondutor do tipo N, qual é o elemento que você usará para que o resultado seja o desejado? E para dopar e obter outro semicondutor do tipo P, qual material você usará para esse resultado?

#### Resolução da situação-problema

Para obter um semicondutor do tipo P, você tem que introduzir os elementos boro (B), gálio (Ga) ou índio (In), porque esses elementos possuem três elétrons de valência, ou seja, um elétron a menos que o silício. Para obter um semicondutor do tipo N, você adicionará um dos elementos, fósforo (P), arsênio (As) ou antimônio (Sb), porque estes elementos possuem cinco elétrons na camada de valência, ou seja, um elétron a mais que o Silício.

## Faça valer a pena

1. Os materiais semicondutores, como o silício e o germânio, são materiais semicondutores encontrados na natureza em sua forma

mais pura, não possuindo ainda as características desejadas para a aplicação em componentes semicondutores, portanto são chamados de materiais intrínsecos. Nesse caso, é necessário introduzir impurezas no material semicondutor para que ele passe a ter as características de um semicondutor, passando a se chamar de material extrínseco.

Os materiais intrínsecos não possuem as características semicondutoras, porém, para que esses materiais se tornem extrínsecos, é necessário fazer o processo de dopagem do material semicondutor. O que é esse processo de doping?

- a) É a exclusão das impurezas que o cristal extrínseco contém, deixando o cristal em sua forma mais pura.
- b) Adição ao cristal intrínseco de uma pequena quantidade de impureza com propriedades adequadas, alterando o comportamento elétrico do semicondutor.
- c) É a substituição das impurezas encontradas no material semicondutor, mudando suas características elétricas.
- d) É o processo pelo qual deixamos o cristal com as mesmas quantidades de cargas elétricas positivas e negativas.
- e) É o processo de transformação do semicondutor em um componente eletrônico.

**2.** A condução elétrica, ou a condução extrínseca, são as cargas elétricas negativas em um cristal que formam ligações com outras cargas elétricas positivas. Como há excesso de elétrons, eles se tornam livres em torno do átomo e poderão se mover com mais facilidade.

Se os elétrons estão em excesso em um cristal, se tornam livres para se movimentarem. Como podemos melhorar as características semicondutoras de um material?

- a) Aumentando o campo elétrico sobre o material semicondutor, em determinado momento ele passa a conduzir eletricidade.
- b) Diminuindo a potência que o material semicondutor dissipa, ou seja, perde com a tensão aplicada em seus terminais.
- c) Substituindo o material isolante por um material condutor de eletricidade.
- d) Fornecendo ao material um elemento radioativo, desse modo o material passa a conduzir eletricidade.
- e) Fornecendo ao material cargas elétricas em quantidades necessárias para que esse material fique com cargas elétricas negativas (elétrons).

**3.** O carbono, o silício e o germânio têm propriedades em comum que permitem que eles formem bons condutores de eletricidade, os quatro elétrons que formam as ligações covalentes perfeitas com quatro átomos vizinhos, criando um reticulado, sendo que a forma mais cristalina do carbono é o diamante, e a do silício é uma substância metálica prateada.

Qual é a propriedade na estrutura de elétrons que o carbono, o silício e o germânio possuem em comum?

- a) Todos esses elementos possuem quatro elétrons na camada mais externa.
- b) Esses elementos possuem em comum a facilidade de dissipar a potência elétrica quando aplicada uma tensão em seus terminais.
- c) A capacidade de produzir calor quando percorrido por corrente elétrica.
- d) Possuem em comum a capacidade de impedir que os elétrons se tornem livres.
- e) Possuem seis elétrons na camada mais externa do átomo.



# Referências

ELIAS, Daniel Cunha. **Estudo da propriedade de transporte elétrico de grafeno e de grafeno hidrogenado**. 2009, 90 f. Tese (Doutorado em Física)-Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

HANAOKA, Aduino et al. **Características, obtenção e aplicação do semicondutor arseneto de gálio**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí. Jundiaí, 2007.

KOFUJI, Sérgio Takeo; ZUFFO, João Antônio; SOARES, João Navarro. **Eletrônica experimental, circuitos integrados**. São Paulo: Ed. USP, 2004.

MARQUES, Ângelo Eduardo B.; CRUZ, Eduardo C. A.; JÚNIOR, Salomão C. **Dispositivos semicondutores: diodos e transistores**. São Paulo: Érica Ltda., 2009.

MELCHER, Elmar U. Kurt. **Apostila dispositivos semicondutores**. Campina Grande: UNOPAR, 1997.

USBERCO, João; SALVADOR, Edgard. **Química**. São Paulo: Saraiva, 2002.

WENDLING, Marcelo. **Semicondutores**. Guaratinguetá: UNESP, 2009.



# Circuitos integrados

## Convite ao estudo

Olá, caro aluno. Bem-vindo aos estudos dos *Materiais elétricos e semicondutores*. Vamos estudar, agora, os circuitos integrados, o que são, para que servem e qual sua aplicabilidade na eletrônica.

Com a descoberta do transistor, a eletrônica deu um passo gigantesco para o desenvolvimento dos equipamentos digitais. O transistor substituiu a válvula com vantagens e, assim, os equipamentos ficaram mais rápidos.

Os cientistas continuaram suas pesquisas rumo ao desenvolvimento dos materiais semicondutores, e com isso foi possível desenvolver o circuito integrado, componente eletrônico que contém vários transistores inseridos em uma placa de silício, além de essa placa conter também outros componentes agregados.

Os circuitos integrados transformaram a eletrônica com os microprocessadores, dando maior velocidade no processamento de dados e informações. Os componentes contidos nos computadores de hoje são mais eficientes do que os componentes antigos, pois houve desenvolvimento dos materiais semicondutores.

Como todo componente, os circuitos integrados também funcionam por um determinado período, que chamamos de vida útil, e com temperaturas não muito altas, assim é necessário controlarmos a temperatura para que o circuito integrado funcione bem, caso contrário os Cis, como são conhecidos, começarão a apresentar problemas de funcionamento.

Você recebeu uma placa de circuito impresso que apresenta defeito de funcionamento e tem que identificá-lo e solucionar o caso. Sabemos que os circuitos eletrônicos em funcionamento geram calor e, para você identificar o defeito, é preciso abreviar o tempo que o componente leva para apresentar tal problema. Sendo assim, você não poderá demorar muito na sua identificação, pois a solução tem de ser mais rápida.

Para você abreviar o tempo que o componente leva para dar defeito, deve aumentar ou abaixar a temperatura rapidamente, assim, o circuito apresentará o defeito mais rapidamente. Você usou um spray congelante para resfriar mais rápido o circuito analisado e descobriu que o circuito integrado estava apresentando mau funcionamento com perda de potência.

O que você faz nesse momento? Substitui o circuito integrado, ou apenas refaz a solda em seus contatos?

Vamos ver mais um pouco sobre circuitos integrados? Venha comigo!

# Seção 3.1

## Circuitos integrados

### Diálogo aberto

Seja bem-vindo, caro aluno. Veremos, nesta seção, um pouco sobre circuitos integrados, mais conhecidos como chips, o que são e para que servem.

Com o desenvolvimento dos materiais semicondutores, foi possível chegar aos circuitos integrados, que são dispositivos microeletrônicos com vários transistores e que são colocados em uma mesma pastilha de silício. Esses componentes são todos interligados e possuem a capacidade de efetuar várias funções, o que torna o equipamento eletrônico mais rápido em seu processamento.

Os circuitos integrados funcionam por um determinado período, o qual chamamos de vida útil, e com temperaturas aceitáveis, caso contrário os circuitos integrados começarão a apresentar problemas de funcionamento.

Os problemas que os circuitos eletrônicos apresentam podem ser intermitentes, tanto em altas quanto em baixas temperaturas. Assim, é possível identificar, de forma mais rápida, um defeito em um circuito integrado, por exemplo, apenas abaixando sua temperatura, aplicando um spray congelante, ou aumentando a temperatura sobre o componente, dessa forma você consegue identificar o problema e fazer a sua devida correção.

Caro aluno, quando você terminar os estudos desta seção, saberá identificar os problemas apresentados usando os conceitos que aprendeu aqui. Vamos em frente?

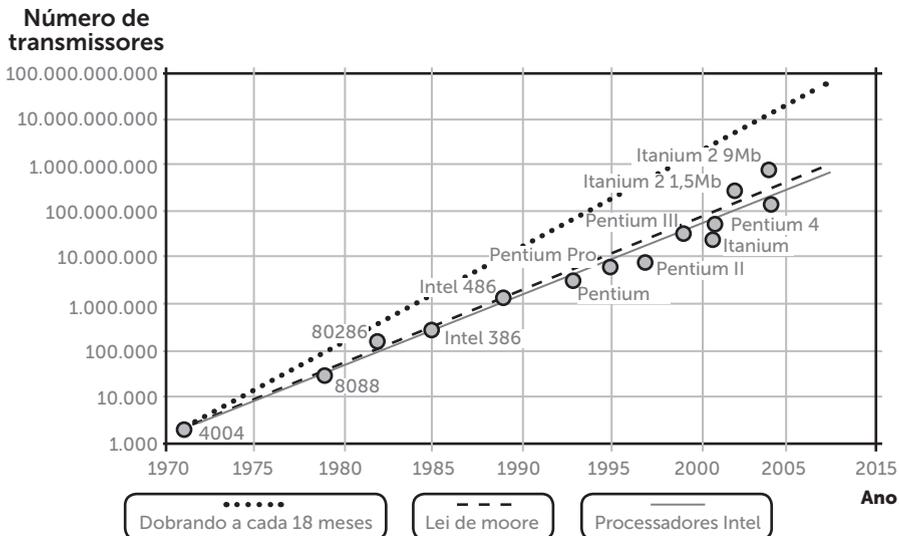
## Não pode faltar

Seja bem-vindo à nova seção. Estudaremos, agora, os circuitos integrados, componentes muito utilizados na eletrônica para o funcionamento de vários equipamentos, assim como o desenvolvimento dos materiais semicondutores, os quais são componentes vitais na microeletrônica. Você sabe o que é um circuito integrado? Como ele funciona e para que serve?

Com o avanço da eletrônica e da microeletrônica nas últimas décadas, houve uma redução drástica dos custos por função lógica implementada em um circuito integrado, ou CI, como é mais conhecido. Devido a essas reduções de custos, ocorreu a viabilização do desenvolvimento de sistemas eletrônicos cada vez mais complexos, como computadores pessoais, e conferiu mais "inteligência" a diversos sistemas em máquinas industriais, aumentando a produtividade que culminou na prosperidade econômica a partir dos anos 1980.

Gordon Moore, fundador da Intel, constatou que a cada 12 meses a capacidade de processamento dos computadores dobraria, mantendo-se os mesmos (ou menores) custos. Essa lei foi revista em 1975, quando Moore redefiniu que a capacidade dos transistores dobraria a cada 18 meses, e tem se mostrado certa até nos dias atuais, o que ficou conhecido como a Lei de Moore, conforme está representada no Gráfico 3.1 (CODÁ, 2015).

Gráfico 3.1| Lei de Moore



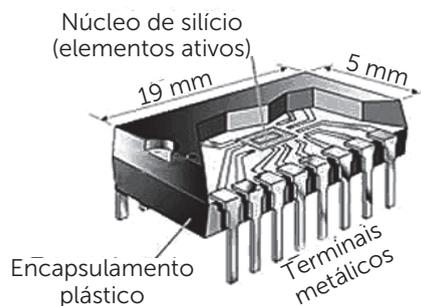
Fonte: adaptado de <<https://goo.gl/o0hJyb>>. Acesso em: 5 jan. 2017.

O desenvolvimento dos materiais semicondutores proporcionou que a tecnologia avançasse a passos largos, por exemplo, na década de 1980, foram desenvolvidas exponencialmente novas tecnologias para a dopagem dos semicondutores e a fabricação seriada em alta velocidade, com componentes de larga escala de integração (LSI), extralarga escala de integração (ELSI). Nos anos 1990, chegaram os microprocessadores de alta velocidade com tecnologia MOS, como veremos na Seção 3.2, e que nada mais são que muitos circuitos integrados em uma mesa epitaxial (camadas finas de filmes superpostos).

A integração é muito importante porque está baseada no baixo custo e no alto desempenho, o tamanho reduzido dos circuitos aliado à alta confiabilidade e estabilidade de funcionamento, isso ocorre porque os componentes eram montados e, hoje, eles são formados. A resistência mecânica desses componentes fez com que fosse possível obter montagens cada vez mais resistentes a choques e impactos mecânicos, possibilitando a portabilidade dos dispositivos eletrônicos que temos nos dias de hoje, como notebooks, celulares e outros (CODÁ, 2015).

O desenvolvimento da tecnologia permitiu a montagem de circuitos integrados, como sendo um dispositivo microeletrônico que possui muitos transistores e outros componentes, os quais são integrados em uma mesma pastilha de silício com capacidade de realizar várias funções. As suas dimensões são muito reduzidas e os componentes são formados por pastilhas de silício semicondutor, conforme a Figura 3.1.

Figura 3.1 | Circuito Integrado internamente



Fonte: <[http://icknowled.esy.es/gallery/162ad9379af3d42994bfbcce4225fbc31\\_600x600.jpg](http://icknowled.esy.es/gallery/162ad9379af3d42994bfbcce4225fbc31_600x600.jpg)>. Acesso em: 5 jan. 2017.

O encapsulamento de um circuito integrado é uma embalagem de cerâmica ou plástico, e dela saem alguns pinos, tornando possível a conexão desse circuito integrado a outros dispositivos, tudo colocado em uma placa de circuito impresso. Existem algumas vantagens para utilizar o circuito integrado em relação aos circuitos discretos, tais como:

- redução de custos;
- peso e tamanho,
- o aumento da confiabilidade;
- maior velocidade de trabalho;
- menor consumo de energia;
- simplificação da produção industrial;
- redução de erro na montagem;
- redução na capacitância parasita.



### Refleta

Você já pensou por que todo circuito integrado é encapsulado? E para que serve o encapsulamento?

O encapsulamento é o invólucro que protege o CI. Os circuitos integrados têm terminais que são de metais ou pinos, os quais têm resistência suficiente para conectar elétrica e mecanicamente em uma placa de circuito impresso. Esse encapsulamento tem a função de fazer a comunicação da matriz de silício com a placa do circuito; possibilita a manipulação; dissipa calor e protege o chip contra a umidade e corrosão.

O encapsulamento de um circuito integrado pode ser de material metálico, cerâmico e poliméricos (plásticos), sendo que os circuitos integrados digitais utilizam encapsulamentos apenas cerâmicos e poliméricos.

O encapsulamento de um circuito integrado varia um do outro, devido a algumas características, como:

- dissipação de calor;
- blindagem contra interferência ou ruídos;
- temperatura de operação;
- número de pinos ou vias;
- nível de integração, quantidade de portas lógicas em cada chip;
- de acordo com as aplicações (EPROMs, Smart Cards etc.).

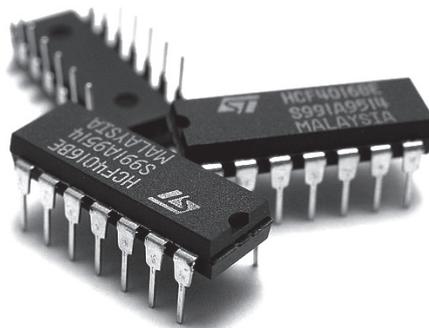
De acordo com o tipo de tecnologia de montagem de circuitos integrados, teremos o tipo de encapsulamento, ou seja, montagem *through-hole* ou montagem superficial (SMT). A montagem *through-hole* é também conhecida como tecnologia *through-hole*, a qual é um processo de montagem de componentes eletrônicos envolvendo o uso de pinos dos componentes que serão inseridos em locais propícios nas placas de circuito impresso. Após essa inserção dos pinos dos CIs, eles são soldados na superfície do lado oposto. Esses componentes são conhecidos por componentes PTH (*pin through-hole*), e também poderão ser colocados na placa de circuitos impressos através de soquetes (CODÁ, 2015).

A tecnologia de montagem superficial (SMT) é um processo de montagem em que os componentes são diretamente montados sobre a superfície da placa de circuito impresso, permitindo o aproveitamento das duas faces. Os dispositivos que são fabricados por esse processo são conhecidos como dispositivos de montagem superficial, ou SMDs. É o processo de montagem mais utilizado na indústria, substituindo o processo de montagem *through-hole*.

Na tecnologia de montagem *through-hole*, os tipos de encapsulamento mais utilizados são:

-Encapsulamento *dual-in-line-Package* (DIP ou DIL): é o encapsulamento mais comum, como mostra a Figura 3.2. Ele é fabricado com material plástico ou cerâmico, e são os mais utilizados até muito recentemente.

Figura 3.2| Encapsulamento *dual-in-line-Package*



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/80/Three\\_IC\\_circuit\\_chips.JPG/600px-Three\\_IC\\_circuit\\_chips.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/80/Three_IC_circuit_chips.JPG/600px-Three_IC_circuit_chips.JPG)>. Acesso em: 5 jan. 2017.

- Encapsulamento *leaded chip carrier* (LCC): nesse tipo de encapsulamento, os terminais saem dos quatro lados do circuito integrado, de acordo com a Figura 3.3. Os terminais precisam de soquete para serem encaixados e são dobrados para baixo.

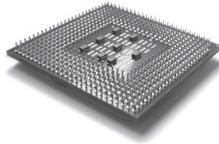
Figura 3.3| Encapsulamento *leaded chipcarrier* (LCC)



Fonte: <<https://octopart.com/ir2133jpbf-international+rectifier-468310>>. Acesso em: 5 jan. 2017.

- Encapsulamento *pin-grid-array* (PGA): são circuitos integrados com maiores quantidades de pinos ( $\geq 100$ ). É quadrado com terminais em sua parte inferior (Figura 3.4), formando uma matriz quadrada. No centro, fica o circuito, que é encaixado em soquete apropriado.

Figura 3.4 | Encapsulamento *pin-grid-array* (PGA)



Fonte: <<https://goo.gl/yjBWjr>>. Acesso em: 5 jan. 2017.

Na tecnologia de montagem superficial (SMT), os tipos mais comuns são:

- Encapsulamento *Small-outline Integrated Circuit* (SOIC): é semelhante a um DIP (Figura 3.5).

Figura 3.5 | Encapsulamento *Small-outline Integrated Circuit*



Fonte: <[http://cache.nxp.com/files/graphic/product\\_freescale/MC33781\\_IMG.jpg](http://cache.nxp.com/files/graphic/product_freescale/MC33781_IMG.jpg)>. Acesso em: 5 jan. 2017.

- Encapsulamento *Quad Flat Package* (QFP): os terminais são soldados diretamente nas placas de circuitos impressos, não necessitando de soquete (Figura 3.6).

Figura 3.6 | Encapsulamento *Quad Flat Package*



Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/18/PIC18F8720.jpg>>. Acesso em: 5 jan. 2017.

Os circuitos integrados podem ser classificados quanto à complexidade de integração e ao componente principal utilizado na integração.

Na complexidade de integração, os circuitos integrados que são comercialmente disponíveis são classificados pela complexidade de seus circuitos (MALVINO; LEACH, 1987), que é medida pelo número de portas lógicas existentes em seu substrato, nesse caso existem cinco tipos:

SSI – Integração em pequena escala, possui menos de cem componentes, ou até doze portas lógicas.

MSI – Integração em média escala, possui de treze até noventa e nove portas lógicas por circuito integrado, ou componentes.

LSI – Integração em larga escala, são frequentemente conhecidos pela sigla. Esses circuitos contêm grande escala de integração, geralmente mais de 10.000 transistores em um encapsulamento.

VLSI – Integração em escala muito grande, contém de mil a 100 mil portas lógicas no circuito integrado. Os primeiros chips continham apenas um transistor, com o avanço da tecnologia de fabricação, foram aumentando a quantidade de transistores em um circuito integrado, assim mais funções foram integradas em um mesmo chip. Hoje em dia, os microprocessadores ordem superior a 10<sup>6</sup> portas lógicas em um mesmo chip.

ULSI – Integração em ultra larga escala, contém de 100 mil a 1.000.000 de transistores por circuito integrado, o que equivale de 10.000 a 100.000 portas lógicas.



### Assimile

A tecnologia de integração se desenvolveu muito nas últimas décadas. Os circuitos integrados acompanharam esse desenvolvimento, ficando melhores e mais rápidos. Vemos vários exemplos disso, desde a integração em pequena escala até a integração em ultra larga escala. Os transistores ficaram melhores e menores, sendo possível integrá-los em escala cada vez maior em pastilhas de silício cada vez menores.

Na classificação do componente principal utilizado na integração, temos dois tipos:

- Circuitos integrados bipolares são circuitos que utilizam o transistor bipolar, ou seja, NPN ou PNP, como o principal elemento do circuito.
- Circuitos unipolares utilizam transistores a efeito de campo, CMOSFET de canal P ou canal N, como sendo o principal elemento do circuito integrado.



### Pesquise mais

Caro aluno, indico este artigo sobre circuitos integrados, o qual fala sobre os 50 anos da invenção do circuito integrado (chip), o que é um CI e suas mudanças ao longo dos anos, vale a pena ler.

Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2009B/O%20CINQUENTENARIO.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2016.



### Exemplificando

Como exemplo de aplicação de um circuito integrado, pode ser usado em uma fonte chaveada, a qual é uma fonte de alimentação eletrônica que possui um regulador de tensão, um transformador e um circuito integrado que controla e comuta a corrente, ligando e desligando rapidamente, mantendo a tensão estabilizada na saída.

## Sem medo de errar

Os conceitos estudados nesta seção são aplicados na realidade da profissão de Engenheiro, materiais semicondutores sendo desenvolvidos são utilizados na fabricação de componentes que atuam com mais eficiência, os quais, cada vez menores, podem ser colocados em pastilhas de silício e formarem um circuito integrado que serão colocados em placas de circuitos impressos.

Os componentes eletrônicos funcionam com temperaturas controladas, para identificar um defeito, podemos apressar seu funcionamento em altas ou baixas temperaturas para que o componente apresente o defeito mais rapidamente, como é o caso da placa que você recebeu e que está apresentando defeito.

Você pode utilizar um spray congelante direto no circuito integrado e verificar se há problemas de solda, ou perda de potência, com isso você poderá substituir o circuito integrado ou reforçar sua solda para que o circuito volte a funcionar por completo.

Assim, de acordo com os conhecimentos adquiridos nesta seção, você consegue determinar um defeito, solucionando o problema mais rapidamente, para que a placa toda volte ao seu funcionamento normal.

## Avançando na prática

### Fontes chaveadas

#### Descrição da situação-problema

Fonte chaveada é uma fonte que regula a tensão de saída de forma a atender as demandas de todo o sistema. Ela possui um circuito integrado com vários componentes, que é responsável pelo chaveamento do transistor da fonte. Uma fonte chaveada está apresentando problemas em seu funcionamento, e você, como engenheiro, é o responsável pela verificação do problema, que aparentemente pode ser simples, mas que afeta o funcionamento da fonte por completo. Como resolver essa questão? Você tem o conhecimento de circuitos integrados, seu funcionamento e pode resolver esse problema.

#### Resolução da situação-problema

Você pode começar a testar o circuito integrado com um multímetro, com o esquema eletrônico do CI, você começa a testar as entradas e saídas do circuito, porém, como a tensão do multímetro é muito pequena, os transistores internos podem ter um funcionamento "mascarado" e funcionar bem, porém, quando você aplica uma tensão e uma corrente "verdadeira" do circuito, o problema aparece e o mau funcionamento da fonte fica mais claro. Nesse caso, você verificou que o circuito integrado não está funcionando, ele apresentou defeito e a fonte chaveada não consegue regular a tensão, assim sendo, basta substituir o circuito integrado que a fonte voltará a funcionar perfeitamente.

## Faça valer a pena

**1.** No avanço da eletrônica e da microeletrônica, nas últimas décadas, houve uma redução drástica dos custos por função implementada em um circuito integrado. Devido a essas reduções de custos, ocorreu a viabilização do desenvolvimento de sistemas eletrônicos cada vez mais complexos, como computadores pessoais, e conferiu a esses equipamentos mais "inteligência" a diversos sistemas, aumentando a produtividade, que culminou na prosperidade econômica nos anos 1990.

Gordon Moore, fundador da Intel, fez uma constatação sobre a capacidade de processamento dos computadores, que ficou conhecida como a Lei de Moore. O que diz essa lei?

a) A capacidade de processamento dos computadores dobraria a cada 18 meses.

- b) O processamento dos transistores triplicaria a cada 12 meses.
- c) O processamento dos transistores continuaria o mesmo por, pelo menos, 12 meses.
- d) A capacidade dos diodos dobraria a cada 18 meses.
- e) A capacidade dos resistores dobraria a cada 18 meses.

**2.** Com as pesquisas desenvolvendo os materiais semicondutores, a tecnologia avançou a passos largos. Na década de 1980, por exemplo, foram desenvolvidas exponencialmente novas tecnologias para dopagem dos semicondutores e para a fabricação seriada em alta velocidade (LSI e ELSI).

Nos anos 1990, vieram integrados os microprocessadores de alta velocidade com a tecnologia MOS, que são muitos circuitos integrados em uma mesa epitaxial. O que é essa mesa epitaxial?

- a) São camadas de filmes que são colocadas lado a lado.
- b) São muitos circuitos integrados montados em uma mesma pastilha de silício.
- c) São camadas finas de filmes superpostos.
- d) São circuitos impressos montados em camadas superpostas.
- e) São circuitos impressos montados em um circuito integrado.

**3.** A integração de circuitos passou a ter uma importância muito grande pelo baixo custo e alto desempenho, pelo tamanho reduzido dos circuitos, aliado à alta confiabilidade, bem como também à estabilidade de funcionamento. Dessa maneira, foi possível obter componentes que antes eram montados e, hoje, são fabricados.

A partir do conhecimento, da confiabilidade, do desempenho e do baixo custo, como podemos definir um circuito integrado?

- a) Dispositivo eletrônico contendo somente transistores integrados em uma pastilha de silício.
- b) Dispositivo elétrico integrado em uma pastilha de silício.
- c) Dispositivo mecânico capaz de desempenhar várias funções.
- d) Dispositivo microeletrônico com muitos transistores, entre outros componentes, integrados em uma mesma pastilha de silício e interligados, com capacidade de realizar várias funções.
- e) Dispositivo térmico integrado em uma pastilha de silício que realiza muitas funções ao mesmo tempo.

## Seção 3.2

### SOC, 3D-IC

#### Diálogo aberto

Prezado aluno, bem-vindo à Seção 3.2 de estudos dos materiais elétricos e semicondutores. Agora, veremos o que é um SOC, sistema em um único chip. Os SOC são todos os componentes de um computador ou qualquer outro sistema eletrônico, em um único circuito integrado (chip), e que pode conter funções digitais, analógicas, mistas e de radiofrequência (RF).

Os circuitos integrados, atualmente, são bidimensionais, como são chamados; os transistores estão em um plano com um sistema de multicamadas de fios, que são utilizados para conectar partes diferentes do circuito integrado.

Hoje, já há o desenvolvimento de circuitos integrados tridimensionais, que são chamados 3D-IC. São circuitos integrados com mais de duas camadas de componentes eletrônicos ativos, com a integração na horizontal ou na vertical em um único circuito.

Voltamos à empresa TRIAC, fabricante de componentes eletrônicos. Um investidor quer aplicar uma determinada quantia para produzir uma placa contendo somente por um processador que realize todas as funções que uma placa de computador normalmente faria, e que será usada em novos notebooks. Você sabe que, hoje, já há circuitos integrados contendo, dentro dele, sistemas capazes de fazer o processamento dos dados dos computadores. Esses sistemas são conhecidos como SOC, sistemas em um único chip.

Como você explicaria para o investidor o funcionamento desse chip?

Vamos ver? Então, venha comigo.

#### Não pode faltar

Você percebeu o quanto já estudamos sobre os materiais elétricos e semicondutores? Com a evolução das técnicas de fabricação de semicondutores, os

componentes eletrônicos se tornaram cada vez menores, agora um único circuito integrado é capaz de conter processador, memória e até placa de vídeo, e recebe uma classificação especial, *System on a chip*, ou SOC, ou seja, sistema em um chip. São todos os componentes eletrônicos contidos em um único circuito integrado (chip), e que pode conter funções digitais, analógicas, mistas e de radiofrequência (RF).

Essa tecnologia era restrita a grandes centros de automação, mas devido ao seu baixo consumo de energia, custo e excelente desempenho, os sistemas em um chip (SOCs) começaram a fazer parte de nosso dia a dia. Com o aumento da venda de smartphones e tablets, atualmente, é possível encontrar até computadores completos do tamanho de um pequeno bloco de notas que são equipados com esse sistema. A Figura 3.7 ilustra um processador contendo a tecnologia SOC (AYALA, 2011).

Figura 3.7 | Processador SOC (*System on a chip*)



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/33/AMD\\_Geode\\_LX\\_800\\_CPU.jpg/220px-AMD\\_Geode\\_LX\\_800\\_CPU.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/33/AMD_Geode_LX_800_CPU.jpg/220px-AMD_Geode_LX_800_CPU.jpg)>. Acesso em: 6 jan. 2017.

Os SOC são excelentes microprocessadores, porém não encontramos muitos computadores equipados com essa tecnologia, pois grande parte dos sistemas operacionais e aplicativos foram escritos para funcionarem com processadores com um conjunto de instruções de 32 bits ou 64 bits. Os SOC utilizam uma arquitetura própria de funcionamento, que é conhecida como RISC (computador com um conjunto reduzido de instruções), como é mostrado na Figura 3.8. Comparando com a arquitetura atual CISC (computador com um conjunto completo de instruções), observamos que as arquiteturas e os conjuntos de instruções são incompatíveis quando da execução de programas. A solução, nesse caso, seria recompilar todos os programas que foram escritos para os computadores pessoais que utilizamos, para que funcionem com a arquitetura RISC, o que do ponto de vista técnico, muitas vezes, torna-se inviável.

Figura 3.8 | Arquitetura RISC x CISC

<b>Arquitetura RISC x CISC</b>	
Arquitetura RISC	Arquitetura CISC
Poucas instruções	Muitas instruções
Instruções executadas pelo hardware	Instruções executadas por microcódigos
Instruções com formato fixo	Instruções com formatos diversos
Instruções utilizam poucos ciclos de máquinas	Instruções utilizam múltiplos ciclos
Instruções com poucos modos de endereçamento	Instruções com diversos modos de endereçamento
Arquitetura com muitos registradores	Arquitetura com poucos registradores
Arquitetura pipeling	Pouco uso da técnica de pipeling

Conceito de hardware e software

Arquitetura de sistemas operacionais - Paulo Fonseca

Ex. SPARC (Sun), RS-6000 (IBM), PA-RISC (HP), Alpha AXP (Compaq) e R4000 (MIPS).

Ex. VAX (DEC), Pentium (Intel) e 68xxx (Motorola).

Fonte: <<http://image.slidesharecdn.com/apostila2-conceitosdehardwareesoftware-140611070927-phpapp02/95/apostila-2-conceitos-de-hardware-e-software-32-638.jpg?cb=1402470643>>. Acesso em: 6 jan. 20117.

Atualmente, os dispositivos portáteis com telas sensíveis ao toque, como tablets e smartphones, estão, aos poucos, substituindo os desktops em grande número de tarefas (por exemplo, enviar e receber e-mails, realizar pesquisas, organizar nossa agenda e muitas outras). Assim, deixamos as tarefas pesadas e os jogos de alta resolução e altos requisitos de processamento para os PCs. É cada vez mais tênue a linha que separa o que é possível fazer em dispositivos móveis e o que ainda depende de um PC.

O nível de integração dos sistemas em um único chip (SOCs) tem algumas vantagens em relação ao nível de integração dos circuitos integrados convencionais, podemos citar:

- o aumento da velocidade de operação do sistema, no qual o fluxo de dados entre o processador e outros componentes pode ser maximizado significativamente;
- há uma significativa redução na potência dissipada pelos SOCs, menor tensão requerida com o alto grau de integração;
- redução do tamanho e da complexidade dos produtos utilizados pelos usuários finais, o número de componentes adicionais cai drasticamente;

- a substituição das trilhas de um placa de circuito impresso pelas conexões internas em um único circuito integrado, o que aumenta a confiabilidade do sistema;

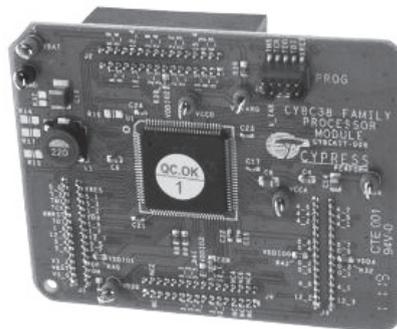
- todas essas vantagens apresentadas permitem que uma delas seja a mais significativa, a possibilidade de obtenção de dispositivos cada vez mais baratos, muito mais eficientes, mais confiáveis, bem menores e com grau maior de inteligência incorporada.

No mercado, estão disponíveis alguns dispositivos SOCs, e como exemplo podemos citar o SOC-PC. A *National Semiconductor Corp.* acondicionou um sistema PC dentro de um único chip, o qual apresenta um desempenho ligeiramente inferior à arquitetura tradicional encontrada em um PC, porém há os benefícios, como a redução de preço, principalmente as dimensões que garantem uma enorme vantagem no mercado.

A *Texas Instruments* desenvolveu um chip SOC para telefones celulares digitais Nokia em que há um microprocessador, um DSP (processador digital de sinais), blocos lógicos e diversos blocos analógicos e memória (CHVOJKA JUNIOR, 2005).

O PSOC (*Programmable System on Chip*) foi desenvolvido pela Cypress Microsystem e consiste em uma nova geração de microcontroladores de 8 bits. É uma nova forma de desenvolvimento e implementação de circuitos eletrônicos que tem circuitos analógicos, digitais e microcontrolador incorporado em um único chip, isso com baixo custo de material e tempo de projeto. A Figura 3.9 mostra um processador PSOC (CHVOJKA JUNIOR, 2005).

Figura 3.9 | Processador PSOC



Fonte: <<http://www.decom.ufop.br/imobilis/wp-content/uploads/2016/05/38-300x300.jpg>>. Acesso em: 6 jan. 2017.

As aplicações para esse microcontrolador são enormes, já que a facilidade de desenvolvimento associada à eficiência é óbvia, por encontrar-se em um mesmo ambiente de desenvolvimento, mas também a economia de espaço e custo que poderá conceber virtualmente um complexo circuito em um único chip.

Caro aluno, é evidente que, se compararmos a implementação de um dado circuito com qualquer microcontrolador que há no mercado e que tenha a necessidade também de amplificadores operacionais e filtros ativos para o tratamento de sinal, teremos uma demanda de componentes e espaço para a montagem. Caso ocorra a implementação utilizando um PSOC, teremos o mesmo circuito em um único chip.

A separação do que é possível fazer em dispositivos móveis e o que ainda depende de um computador está ficando cada vez mais tênue nos dias atuais. Alguns aparelhos celulares, quando conectados a um monitor, teclado e mouse, tornam-se verdadeiros computadores, assim, podemos concluir que o futuro da tecnologia está atrelado ao desenvolvimento dos SOCs e, num futuro bem próximo, teremos um "tudo em um" que iremos carregar no bolso.

No campo da eletrônica, essa é uma tecnologia nova que traz muitos desafios, os quais devem ser superados para que seja utilizada em produtos comerciais. Alguns desses desafios são:

- **Gerenciamento térmico:** os meio-silício-vias em circuitos integrados tridimensionais podem resultar em má distribuição lateral de calor, maior dissipação de calor e reduzido desempenho.
- **Estratégias de teste:** o teste ocorre apenas na matriz inferior. É necessária uma metodologia de projeto para teste que reproduza estímulos de teste que vão de cima para baixo na pilha do circuito integrado, para identificar melhor os pontos problemáticos.



### Refleta

Em que pesem os custos serem menores no caso dos SOCs, os sistemas integrados em placas de circuito impresso permitem a troca de componentes, tornando a manutenção um processo relativamente barato. Qual seria a alternativa no caso dos SOCs em situação de falha? Como ficaríamos os custos nesse caso?

Os circuitos integrados, atualmente, são bidimensionais, ou seja, os transistores estão em um plano e em um sistema de multicamadas de fios que são utilizados para conectar partes diferentes do circuito integrado (AYALA, 2011).

Na eletrônica, um circuito tridimensional, chamado 3D-IC, é um circuito integrado com mais de duas camadas de componentes eletrônicos ativos, com a integração sendo na horizontal ou na vertical em um único circuito. A indústria de semicondutores sempre buscou essa tecnologia de diferentes formas, mas ainda não é amplamente utilizada, por isso essa tecnologia ainda não é definitiva.



### Assimile

Abrir uma terceira dimensão nos circuitos integrados cria novas oportunidades para uma aglomeração dos transistores, assim, os fios que conectam os transistores poderão ser menores. Com isso, aumenta-se a taxa de transferência entre a parte lógica e a memória, facilitando a integração de diferentes materiais, dispositivos ou sinais.

Como exemplo, podemos colocar dispositivos elétricos e óticos em diferentes níveis dentro de um mesmo circuito integrado, além de termos a possibilidade de introdução de mais transistores por área.

Os circuitos integrados tridimensionais são fabricados, primeiro, desenhando o circuito, de modo que possa ser dividido em camadas separadas, todas do mesmo tamanho. Em seguida, essas camadas são fabricadas separadamente, em pastilhas. Depois de ter feito todas as camadas, elas são alinhadas e unidas.

Um dos aspectos mais importantes na fabricação de circuitos integrados tridimensionais (3D-IC) é o método utilizado para a união das várias pastilhas. Existem, atualmente, vários métodos para isso. Um deles é a união por compressão térmica com adesivos especiais, ou colagem por meio de técnicas moleculares. Tanto um como outro método para fazer a ligação afetará a temperatura de tolerância e o alinhamento dos circuitos integrados que são fabricados, bem como os tipos de pastilhas que podem ser ligadas. O método escolhido também determina o número máximo de níveis que podem ser empilhados, sua espessura final e a densidade máxima de interconexões verticais.

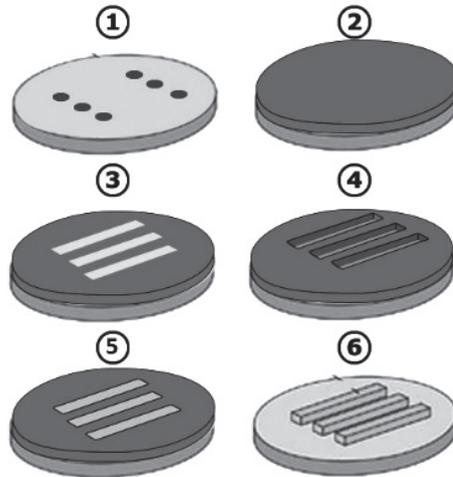


### Exemplificando

Um método de desenvolvimento e construção de circuitos integrados pode fazer com que o processamento desses componentes seja mil vezes mais rápido do que o existente. Essa é a tecnologia chamada de 3D-IC, circuito integrado tridimensional, que pode ser usado em computadores.

Vamos ver como são conectados os pontos de um circuito integrado? Repare na Figura 3.10. Vamos supor que o trecho circular da camada do semiconductor de um CI e os pequenos círculos escuros (imagem nº 1) são terminais de transistores que estão embutidos nesse semiconductor e temos que conectar os três terminais da esquerda aos três terminais da direita. Como faremos a ligação desses círculos se os diâmetros são de meio milímetro?

Figura 3.10 | Conexão dos pontos de um circuito integrado



Fonte: adaptada de <[http://s.glbimg.com/po/tt/f/original/2012/11/08/gpc20121108\\_3\\_waferesq.jpg](http://s.glbimg.com/po/tt/f/original/2012/11/08/gpc20121108_3_waferesq.jpg)>. Acesso em: 6 jan. 2017.

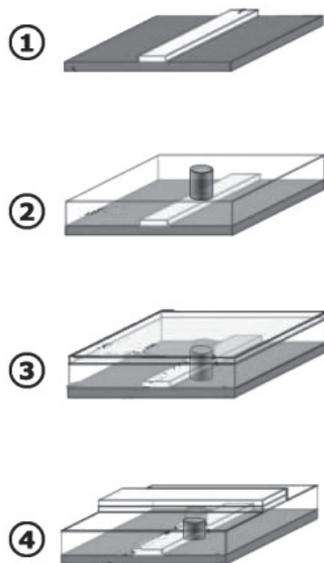
A camada da superfície do CI é coberta com uma fina camada de material fotossensível, cuja natureza possa ser alterada com a aplicação de um feixe de luz. Essa camada está assinalada com o nº 2 (PIROPO, 2012).

Com um conjunto de lentes altamente sofisticadas, usadas em processos fotográficos de manufatura, é aplicado um forte feixe de luz somente nas faixas, (imagem nº 3). Quando a superfície é lavada com uma mistura de produtos químicos apropriados, a camada fotossensível altera sua natureza, esse trecho que recebeu a luz é dissolvido e removido da camada, e o resultado é a imagem nº 4. A camada exibe três sulcos paralelos, vazios, ligando os pequenos círculos escuros abaixo deles (PIROPO, 2012).

Na imagem nº 5, uma pequena quantidade de condutor elétrico fundido (geralmente, cobre ou ouro) é despejada, que preenche os três sulcos da camada mais escura. Após a solidificação dessa camada, removem-se os restos com solventes apropriados e o resultado é visto na imagem nº 6, três linhas metálicas ligando dois a dois os terminais a serem conectados (PIROPO, 2012).

A conexão está resolvida, mas em parte, em alguns casos os circuitos elétricos dos Cis são muito mais complexos, exigindo um número muito grande de conexões que não são tão simples assim. Vamos imaginar que um dos condutores metálicos mostrados na imagem nº 6 necessite ser conectado a um novo condutor, e que este não deve entrar em contato com os outros dois, será impossível fazer essa conexão no mesmo plano dos três condutores. Nesse caso, temos a concepção de fabricação do tipo “wafer”, ou seja, em pastilhas, como mostra a Figura 3.11.

Figura 3.11 | Conexão dos pontos de um circuito integrado



Fonte: <[http://s.glbimg.com/po/tt/f/original/2012/11/08/gpc20121108\\_4\\_waferintecon.jpg](http://s.glbimg.com/po/tt/f/original/2012/11/08/gpc20121108_4_waferintecon.jpg)>. Acesso em: 6 jan. 2017.

Na imagem nº 1, temos o substrato do material semicondutor (base escura), no qual se formam os transistores; e o branco é o condutor unindo os dois terminais e temos que estabelecer a ligação elétrica entre esse condutor e o segundo, que está passando acima dele transversalmente. Espalha-se sobre a superfície do conjunto uma camada de material fotossensível e, no ponto desejável para estabelecer o contato, se cria um orifício cilíndrico que a atravesse, usando a mesma técnica fotográfica que foi descrita acima, e enche esse orifício com material condutor. O resultado está na imagem nº 2. Agora, é aplicada uma segunda camada de material fotossensível acima da primeira, mais fina que esta (imagem nº 3), criando-se nessa camada, o segundo filete condutor (imagem nº 4) e que ficará diretamente em contato com o pequeno cilindro vertical criado anteriormente, sendo assim, poderemos ligar qualquer condutor ou terminal de um circuito integrado a qualquer outro condutor ou terminal.

Essa é uma explicação bem simplificada da fabricação de circuitos integrados tridimensionais, mas não é muito diferente da realidade. Circuitos mais complexos são formados com diversas camadas, que são superpostas e formam um conjunto intrincado de filetes condutores no qual teremos transistores, resistores, capacitores, entre outros componentes.



### Pesquise mais

Indicamos para sua leitura o artigo *Multiprocessor System on a Chip*, o qual dará um esclarecimento maior sobre o sistema em um único chip, sua plataforma e construção. Um texto muito interessante!

Disponível em: <<https://goo.gl/v0oCqz>>. Acesso em: 24 out. 2016.

### Sem medo de errar

Comece explicando as vantagens de ter um chip somente com um sistema único para o processamento das informações: aumento da velocidade de operação do sistema, redução da potência dissipada, menor tensão requerida, redução do tamanho dos circuitos integrados e custos de fabricação dos circuitos integrados cada vez menores. Explique que o sistema em um único chip são todos os componentes eletrônicos, como transistores, resistores, diodos e outros, dentro de um mesmo circuito integrado, ou chip, o qual pode conter funções digitais, analógicas, mistas e de radiofrequência, ou seja, são excelentes microprocessadores. Apenas um chip fazendo todas essas funções tornaria o custo de produção das placas, e do próprio notebook, economicamente viável para uma indústria que procura inovação tecnológica para crescer no mercado de computadores.

### Avançando na prática

#### Holografia em 3D

##### Descrição da situação-problema

Os pequenos sistemas chamados Raspberry Pi são, na verdade, computadores completos:

- Aceitam um sistema operacional.
- Permitem programação.
- Contêm interfaces para vídeo, USB e BlueTooth.
- Permitem a adição de uma microplaca de Wi-Fi via USB.
- Contêm até 1GB de memória.
- Contêm até um processador *quad-core*.

Tudo isso do tamanho de um baralho de cartas, de tamanho padrão (ou de um maço de cigarro).

Como é possível esse nível de miniaturização para o que é, em essência, um computador do tipo PC? Qual é o chip (ou família de chips) que permite a criação de tal dispositivo? Para que ele é usado? Que projetos amadores interessantes podem ser apresentados como exemplo de uso do Raspberry Pi?

### Resolução da situação-problema

Os dispositivos Raspberry Pi são, de fato, computadores completos, miniaturizados.

Para que sejam possíveis, não há alternativa a não ser a utilização de SOCs, no caso, sistemas da Broadcom (empresa fabricante de chips e processadores).

O Raspberry Pi é usado para automatizar processos em que a miniaturização é um fator importante. Em função de seu baixo custo de aquisição e operação, bem como seu baixo consumo de energia, é usado em projetos de automatização de quase qualquer coisa: abertura e fechamento de portas, controle de eletrodomésticos, integração de dispositivos que de outra forma não se “conversam”, e por aí vai.

O site <<https://www.cnet.com/how-to/25-fun-things-to-do-with-a-raspberry-pi/>> mostra 25 projetos interessantes para se realizar com o Raspberry Pi, demonstrando a força e a versatilidade desse tipo de dispositivo.

### Faça valer a pena

**1.** Dispositivos portáteis com telas sensíveis ao toque, como tablets e smartphones, estão, aos poucos, substituindo os desktops em grande número de tarefas que estamos acostumados. Como exemplo, podemos citar o envio e recebimento de e-mails, realização de pesquisas e organização de agenda. Assim, deixamos as tarefas pesadas e os jogos de altíssima resolução para os PCs. É cada vez menor a linha que separa o que é possível fazer em dispositivos móveis e o que ainda depende de um PC.

O nível de integração dos sistemas em um único chip (SOCs) tem algumas vantagens em relação ao nível de integração dos circuitos integrados convencionais, podemos citar:

- a) Aumento da velocidade de operação do sistema e significativa redução na potência dissipada.
- b) Menor velocidade de operação do sistema e aumento da potência dissipada.

- c) Menor velocidade de operação do sistema reduz também a potência dissipada.
- d) Com o aumento da velocidade de operação, aumenta a potência dissipada.
- e) A potência diminui com a tensão aplicada.

**2.** Os SOCs são excelentes microprocessadores, mas muitos computadores equipados com essa tecnologia ainda não são encontrados. Isso porque grande parte dos sistemas operacionais e dos aplicativos foram escritos para funcionarem com processadores com um conjunto de instruções de 32 bits ou 64 bits. Já os SOCs utilizam uma arquitetura própria de funcionamento, que é conhecida como RISC. Comparando com a arquitetura atual CISC (computador com um conjunto completo de instruções), gerando um problema de compatibilidade quando da execução desses programas.

Como os aplicativos foram escritos em uma arquitetura CISC (computador com um conjunto completo de instruções) e os SOCs necessitam de uma arquitetura própria para seu funcionamento, o que significa a arquitetura RISC?

- a) Computador com um conjunto completo de instruções.
- b) Computador com um conjunto reduzido de instruções.
- c) Sistema de controle e aquisição de dados.
- d) Controle lógico programável.
- e) Sistema digital de controle distribuído.

**3.** Um circuito tridimensional (3D-IC) é um circuito integrado que contém mais de duas camadas de componentes eletrônicos ativos, com isso há a possibilidade de que sua integração seja na horizontal ou na vertical em um único circuito. Essa tecnologia ainda não é definitiva, pois há ainda a necessidade de maior desenvolvimento desses circuitos integrados.

Ao abrir uma terceira dimensão nos circuitos integrados, criaram-se novas oportunidades para uma maior aglomeração dos transistores, e para a conexão desses transistores os fios poderão ser menores. Devido a essas características, o que pode acontecer com a taxa de transferência entre a parte lógica e a memória?

- a) Diminui, facilitando a integração de diferentes materiais, dispositivos ou sinais.
- b) Aumenta, dificultando a integração de diferentes materiais, dispositivos ou sinais.

- c) Aumenta, facilitando a integração de diferentes materiais, dispositivos ou sinais.
- d) Permanece a mesma taxa de transferência, a integração será a mesma que um CI bidimensional.
- e) Não haverá taxa de transferência, a integração não muda com a colocação de uma terceira camada.

## Seção 3.3

### Famílias de CIs

#### Diálogo aberto

Prezado aluno, seja bem-vindo à nova seção de estudos de Materiais Elétricos e Semicondutores. Os circuitos lógicos com dispositivos discretos dominaram a eletrônica até os anos 1960. Era comum comprar os componentes separadamente e, depois, montá-los em placas. Esses circuitos foram se tornando menos comuns, sendo substituídos pela lógica com circuitos integrados, que podemos chamar de chips ou pastilhas de silício, nos quais há um número muito grande de componentes interligados por um processo único de montagem, ou seja, os componentes são fabricados e interconectados de uma só vez.

Com o surgimento do transistor, procurou-se padronizar os sinais elétricos correspondentes aos níveis lógicos, ocasionando o surgimento das famílias de componentes digitais, com características bastante distintas.

Caro aluno, você precisa projetar um display de matriz de ponto para escrever informações referentes ao trânsito nas estradas. Esse display será colocado em pontos estratégicos de algumas estradas para dar informações aos motoristas sobre o trânsito, problemas de congestionamento, reformas nas estradas e outras que se mostrarem necessárias. Ele é um dispositivo que tem a finalidade de apresentar as informações de forma que possa ser lida por todos os motoristas que passarem pela estrada. Que componentes você usaria para que esse display fizesse a função descrita acima?

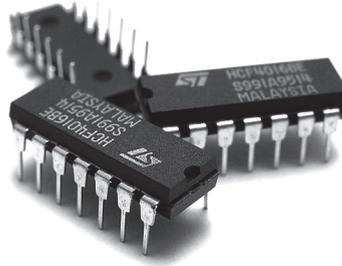
Vamos estudar algumas famílias de circuitos integrados para que você possa resolver o problema apresentado.

#### Não pode faltar

Antigamente, antes da popularização dos chips, era comum comprar os componentes separadamente e, depois, montá-los.

Hoje, esse processo tornou-se obsoleto e foi, imediatamente, substituído pela lógica com circuitos integrados, que podemos chamar de chips ou pastilhas de silício, nos quais há um número muito grande de componentes interligados por um processo único de montagem, ou seja, os componentes são fabricados e interconectados de uma só vez.

Figura 3.12 | Circuito Integrado (CI)

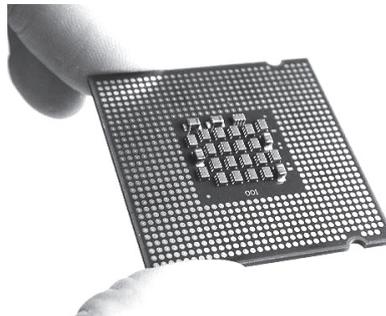


Fonte: <[http://www.dreaminc.com.br/sala\\_de\\_aula/wp-content/uploads/CI-Circuito-Integrado-.jpg](http://www.dreaminc.com.br/sala_de_aula/wp-content/uploads/CI-Circuito-Integrado-.jpg)>. Acesso em: 9 jan. 2017.

Os computadores utilizam as características dos circuitos integrados (Figura 3.12), de fazer funções lógicas e aritméticas, para seu funcionamento, e podem ser processadas por um único chip chamado de microprocessador, o qual pode ser visto na Figura 3.13.

Os circuitos integrados são os dispositivos mais importantes na eletrônica; se não tivéssemos os CIs, não teríamos a tecnologia que possuímos atualmente. O tamanho desses circuitos integrados é a razão pela qual são usados em larga escala, podem conter milhares de transistores e também outros componentes, como resistores, diodos, capacitores, e medem apenas alguns centímetros (BOYLESTEAD; NASHELSKY, 2004).

Figura 3.13 | Microprocessador



Fonte: <[https://paulorenato17.files.wordpress.com/2009/02/ruiserranorte\\_processador.jpg](https://paulorenato17.files.wordpress.com/2009/02/ruiserranorte_processador.jpg)>. Acesso em: 9 jan. 2017.

Vimos que os circuitos integrados podem ser classificados quanto à complexidade de integração e ao componente principal utilizado na integração, assim, Boylestead e Nashelsky (2004) citam:

- **SSI** – Integração em pequena escala, possui menos de cem componentes, ou até doze portas lógicas.
- **MSI** – Integração em média escala, possui de treze até noventa e nove portas lógicas por circuito integrado, ou componentes.
- **LSI** – Integração em larga escala, são frequentemente conhecidos pela sigla, estes circuitos contêm grande escala de integração, geralmente mais de 10.000 transistores em um encapsulamento.
- **VLSI** – Integração em escala muito grande, contém de mil a 100 mil portas lógicas no circuito integrado. Os primeiros chips continham apenas um transistor, com o avanço da tecnologia de fabricação, foram aumentando a quantidade de transistores em um circuito integrado, assim, mais funções foram integradas em um mesmo chip. Hoje em dia os microprocessadores possuem vários milhões de portas lógicas em um mesmo chip.
- **ULSI** – Integração em ultra larga escala, contém de 100 mil a 1.000.000 de transistores por circuito integrado, o que equivale de 10.000 a 100.000 portas lógicas.

Os circuitos construídos a partir da Álgebra booleana foram, durante muito tempo, implementados utilizando-se dispositivos eletromecânicos, como os relês. O nível de tensão correspondente a um nível lógico poderia assumir qualquer valor, dependendo das características do projeto (BOYLESTEAD; NASHELSKY, 2004).

Com o surgimento do transistor, procurou-se padronizar os sinais elétricos correspondentes aos níveis lógicos, ocasionando o surgimento das famílias de componentes digitais e com características bastante distintas. As famílias de CIs se distinguem umas das outras pelo dispositivo semicondutor que é incorporado e como os dispositivos semicondutores são interligados para formar a porta lógica, de acordo com a tecnologia empregada em sua fabricação (CODÁ, 2015).

Temos, então, a família RTL (Lógica Resistor-Transistor): essa lógica utiliza apenas resistores e transistores em seus circuitos; foi uma das primeiras famílias transpostas para os circuitos integrados; ela está obsoleta hoje.

DTL (Lógica Diodo Transistor): utiliza diodos e transistores em seus circuitos e funciona em dois estados: saturado e cortado; também está obsoleta hoje em dia.

ECL (Lógica Acoplada pelo Emissor): utiliza vários transistores por porta; nessa lógica, é a corrente elétrica que carrega a informação, e não a tensão, e é mais difícil medir a corrente, sendo esse o inconveniente. Essa lógica possui alta velocidade de

comutação e é usada em integração pequena e média escala; possui, também, alta velocidade e alto consumo de potência.

TTL (Lógica Transistor-Transistor): utiliza o transistor bipolar como o principal componente, e trabalha com tensão de 5 V. Essa lógica foi uma evolução da família DDL, substituindo os diodos por transistores, e é usada em circuitos de pequena e média integração, apresentando boa imunidade ao ruído. Em 1963, a família TTL foi o primeiro ramo da família lógica bipolar a surgir e foi desenvolvida pelo fabricante americano Silvania. Foi a primeira a ser fornecida sob a forma de um circuito integrado; atualmente, tem a mais extensa opção em tipos de circuito básico, isso se deve ao fabricante Texas Instruments. Essa família apresenta um vasto repertório de módulos funcionais e são catalogados em famílias com prefixos 74 e 54 (BOYLESTEAD, NASHELSKY, 2004).

A tabela lógica, ou tabela verdade TTL, é mostrada na Figura 3.14. É uma tabela muito utilizada em lógica, mostrando componentes da família TTL especificamente criados para realizar funções booleanas, ou seja, calcular as expressões em cada combinação dos valores tomados por suas variáveis lógicas (CASTRO, 2011).



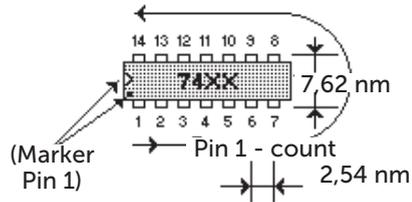
**Refleta**

Um circuito digital opera com dois níveis de tensão diferentes, alto e baixo, e geralmente o nível baixo corresponde ao valor lógico 0 e o nível alto ao nível lógico 1. O que são as portas lógicas?

Figura 3.14 | Tabela lógica

	Inversor	AND	NAND	OR	NOR	EX - OR	EX - NOR					
Europeu												
Americano												
IBM ALD's												
Booleana	$Y = \bar{A}$	$Y = A \cdot B$	$Y = \overline{A \cdot B}$	$Y = A + B$	$Y = \overline{A + B}$	$Y = A \oplus B$	$Y = \overline{A \oplus B}$					
Tabela verdade	A	Y	A B	Y	A B	Y	A B	Y	A B	Y	A B	Y
	L	H	L L	L	L L	L	L L	H	L L	L	L L	H
	H	L	H L	L	H L	H	H L	L	H L	L	H L	L
			L H	L	L H	H	L H	L	L H	H	L H	L
		H H	H	H H	H	H H	L	H H	L	H H	H	

## IC - TOP - Visão do exemplo 14-pin DIL



Fonte: <<http://blog.novaeletronica.com.br/img/tabela-logica.gif>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

Baseado na tabela lógica, vamos explicar a teoria das portas lógicas TTL, como visto na Figura 3.14.

A porta AND realiza uma operação de multiplicação lógica em um circuito eletrônico que gera um sinal de saída 1, se todos os sinais de entrada forem 1.

Na porta OR, a realização da operação lógica é a adição. Em um circuito eletrônico, gera um sinal de saída 1 se um dos sinais de entrada for 1.

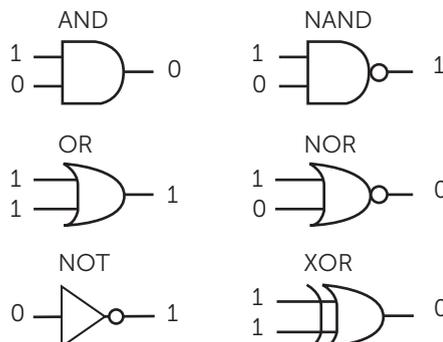
A porta NOT realiza a operação lógica de complementação em um circuito eletrônico que gera um sinal de saída inverso do sinal de entrada. Essa porta lógica é conhecida como inversor, porque ela inverte o sinal de entrada.

A porta NAND é uma porta AND complementada, a saída NAND será 0 se todos os sinais de entrada forem 1, de modo inverso, a saída será 1 se todas as entradas forem 0.

Já a porta NOR é complementar da porta OR, a saída será 1 se todas as entradas forem 0 e será 0 se qualquer um dos sinais forem 1.

A porta XOR é semelhante à porta OR, mas exclui a combinação das duas, ou seja, os sinais de entrada A e B são 1. É uma função que um sinal de saída é 0 quando os dois sinais de entrada forem iguais a 0 ou 1.

Figura 3.15 | Portas Lógicas TTL



Fonte: <<http://blog.novaeletronica.com.br/img/Portas-logicas.png>>. Acesso em: 9 jan. 2017.



### Pesquise mais

O artigo a seguir é muito interessante e acrescentará mais conhecimentos sobre as famílias de circuitos integrados. Nele é comentado sobre o funcionamento de um dispositivo TTL, as classes dos dispositivos, a velocidade de chaveamento e potência, assim como os parâmetros para sua configuração. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Rodrigo&Samuel.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2016.

Há também outros tipos de famílias lógicas, dentre elas podemos citar:

- MOS (Lógica Metal-Óxido Semicondutor): nessa família, utiliza-se o MOSFET sem necessitar de uso dos resistores, por esse motivo ocupam pouco espaço, logo, são apropriados para uma integração em média escala. Essa família possui alta densidade de integração e baixo consumo de potência, mas tem baixa velocidade de operação. O MOS ocupa muito menos espaço no chip do que os transistores bipolares, aproximadamente, 50 vezes menos espaço. Outro ponto importante no MOS é o fato de seus circuitos integrados não usarem resistores na sua construção, os quais tomam parte na área do chip ocupada pelos circuitos integrados bipolares. A família MOS tem sua principal desvantagem na velocidade de operação relativamente baixa de seus componentes, quando comparada com a apresentada por componentes das famílias bipolares.

Prezado aluno, aqui há uma observação a ser feita sobre a família MOS, ela é extremamente susceptível a danos causados por eletricidade estática, enquanto que as famílias bipolares não são afetadas. A descarga eletrostática é responsável pela perda de milhões de dólares, devido a danos causados por ela em equipamentos eletrônicos, por isso alguns procedimentos são adotados para evitar que esse problema ocorra, dentre eles, deve-se conectar todos os instrumentos à terra, o chassi de todos os instrumentos de testes; outro ponto importante: o operador deve se conectar à terra através de uma pulseira especial e não deixar desconectada nenhuma entrada de qualquer circuito integrado que não esteja sendo utilizada.

- CMOS (Lógica com MOS de Simetria Complementar): essa família utiliza o MOSFET tanto de canal N como canal P. A família CMOS é mais complexa do que a família MOS e também possui menor densidade, mas tem alta velocidade de operação e consumo extremamente baixo de potência. Permite uma larga escala de integração, porém mais baixa que a família MOS.

- BICMOS é uma combinação de circuitos bipolares e CMOS, tudo no mesmo circuito integrado. Essa família apresenta algumas vantagens das duas

tecnologias: baixas potências, alta impedância de entrada e ampla margem de ruídos do CMOS aliadas à alta velocidade de operação dos transistores bipolares. Procura combinar o melhor das duas tecnologias, a CMOS e a bipolar, obtendo uma classe de circuitos muito útil quando se necessita de capacidades de fornecimento de correntes superiores às disponíveis na tecnologia CMOS.

A tecnologia BICMOS possibilita também as realizações de funções analógicas e digitais no mesmo chip, o que torna possível o sistema em um chip ou *System on a chip* (SOC), como é conhecido. Nesse caso, essa tecnologia permite o desenvolvimento de circuitos VLSI com alta densidade, velocidade e potência, porém é mais cara e mais complexa que a tecnologia CMOS (BOYLESTEAD; NASHELSKY, 2004).

As famílias bipolares que são utilizadas no momento são a TTL e ECL, respectivamente, para circuitos genéricos e de muita alta velocidade. Na atualidade, as famílias TTL e CMOS são as mais usadas e são empregadas em uma quantidade grande de equipamentos digitais, como computadores e periféricos, mas a tecnologia dominante é a CMOS, pelo seu baixo custo e pela grande quantidade de portas lógicas que podem integrar por unidade de área.



### Assimile

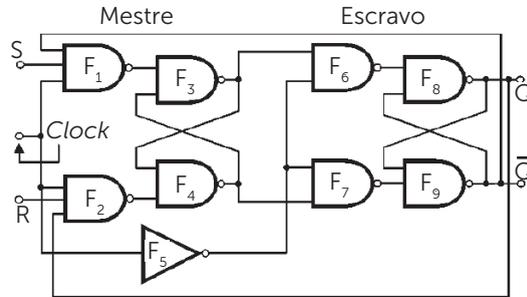
Prezado aluno, a tecnologia bipolar foi a precursora dos circuitos digitais. Em termos de velocidade comparada às tecnologias baseadas em dispositivos unipolares MOS, pode ser muito vantajosa, mas é uma solução muito ruim em termos de consumo de potência, não possibilitando a implementação de circuitos em larga escala devido à área que uma porta lógica ocupa.



### Exemplificando

Como exemplo, temos um flip-flop, que podemos resumir como sendo uma espécie de memória de estado ou bit, ou seja, você insere um dado nele e ele retém até que seja mudado ou apagado. Conhecemos um flip-flop como um botão liga-desliga, que, ao desligar, ele gravou em sua memória que o equipamento tem que ser desligado e assim permanecerá até que seu estado seja mudado, quando apertarmos o botão novamente para ligar, permanecendo com o estado ligado até que se mude novamente. Esse flip-flop pode ser feito com um circuito integrado TTL.

Figura 3.16 | Flip-Flop R-S

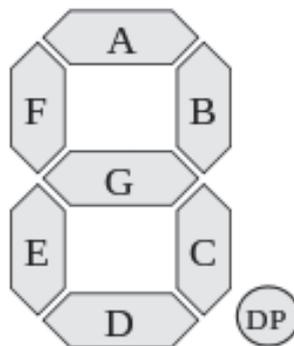


Fonte: adaptada de <<http://sabereletrico.com/digital6/fig8.GIF>>. Acesso em: 7 fev. 2017.

### Sem medo de errar

Existem displays simples que operam na forma digital como sequências de LEDs, displays numéricos e displays com símbolos gráficos, denominados alfanuméricos. Alguns são mais sofisticados e podem apresentar imagens de objetos ou formas. No caso do projeto apresentado, você poderá utilizar qualquer um dos circuitos TTL 7447 ou 74150. Com esses circuitos integrados, você poderá fazer um programa para que sejam escritas as informações necessárias aos motoristas que trafegam nas estradas. Trata-se de decodificadores que transformam os códigos binários (letras e números, por exemplo) em símbolos de sete segmentos, como no caso dos números das calculadoras eletrônicas. Os códigos das letras e dos números são alimentados nas entradas (sinais A, B, C e D) e o equivalente em código de sete segmentos aparece nos sinais de saída (a, b, c, d, e, f, e g), como mostrado na Figura 3.17.

Figura 3.17 | Display de sete segmentos



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/02/7\\_segment\\_display\\_labeled.svg/220px-7\\_segment\\_display\\_labeled.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/02/7_segment_display_labeled.svg/220px-7_segment_display_labeled.svg.png)>. Acesso em: 9 jan. 2017.

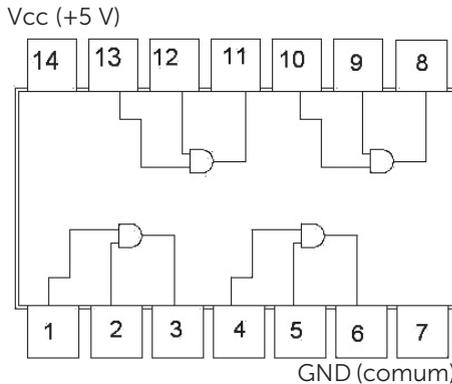
Você pode seguir a pinagem dos CIs 7447, apresentada na Figura 3.18, ou seguir as ligações dos pinos do CI 74150, apresentada na Figura 3.19.



## Resolução da situação-problema

O circuito TTL 7408, composto por quatro portas AND, seria suficiente para resolver esse problema. A Figura 3.20 mostra esse circuito.

Figura 3.20 | TTL-7408 (portas AND)



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/TTL\\_7408.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/TTL_7408.JPG)>. Acesso em: 9 jan. 2017.

O circuito tem quatro portas AND, e para nossos propósitos precisaremos de apenas duas. A tabela verdade da porta AND mostra que apenas duas entradas positivas (presença de sinal) geram um resultado positivo. A Figura 3.21 demonstra essa tabela verdade:

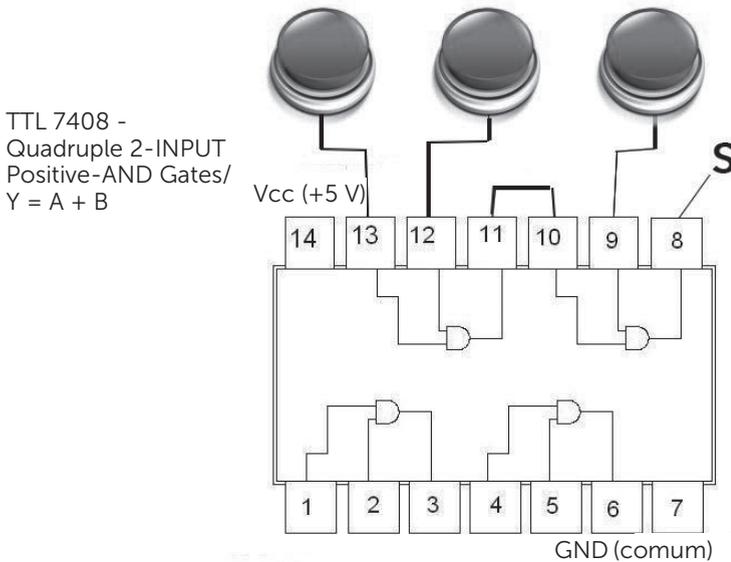
Figura 3.21 | Tabela Verdade da Porta AND

A	B	A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Fonte: <[http://www.bpiropo.com.br/graficos/FPC\\_AC20050704e.jpg](http://www.bpiropo.com.br/graficos/FPC_AC20050704e.jpg)>. Acesso em: 9 jan. 2017.

Podemos, para resolver esse problema, alimentar a saída de uma porta AND na entrada de outra, com o terceiro usuário provendo o segundo sinal. A saída (S), portanto, será positiva (presença de sinal) apenas se os três indivíduos apertarem o botão, como mostra a Figura 3.22.

Figura 3.22 | Circuito com AND de três entradas



Fonte: adaptada de: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/TTL\\_7408.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/TTL_7408.JPG)>. Acesso em: 9 jan. 2017.

### Faça valer a pena

**1.** As famílias de CIs se distinguem umas das outras pelo dispositivo semicondutor que é incorporado, e como os dispositivos semicondutores são interligados para formar a porta lógica, de acordo com a tecnologia empregada em sua fabricação.

As famílias de componentes digitais possuem características bastante distintas. Qual alternativa contém as famílias de circuitos integrados existentes?

- a) RTL, DTL, ECL e TTL.
- b) SSI, MSI, LSI, VLSI e ULSI.
- c) AND, OR, NAND e NOR.
- d) SOC e 3D-IC.
- e) MOS, CMOS e CMOSFET.

**2.** Os circuitos construídos a partir da Álgebra booleana foram, durante muito tempo, implementados, utilizando-se dispositivos eletromecânicos, como os relês. O nível de tensão correspondente

a um nível lógico poderia assumir qualquer valor, dependendo das características do projeto. Com o transistor ocorreu uma padronização dos sinais elétricos correspondentes aos níveis lógicos, assim a família TTL, que é a mais utilizada, foi o primeiro ramo da família lógica bipolar e, atualmente, tem a mais extensa opção de circuitos básicos.

Qual é o principal componente utilizado na família TTL e por que essa lógica substituiu a lógica DDL?

- a) Utiliza diodos e transistores em seus circuitos, e funcionam em dois estados, saturado e cortado.
- b) O transistor, substituindo os diodos, é usado em circuitos de pequena e média integração, e apresenta boa imunidade ao ruído.
- c) O resistor substituiu o capacitor, usado em circuitos de pequena integração.
- d) O capacitor, substituindo o transistor, usado em circuitos de média integração.
- e) Integração em média escala, possui de treze até noventa e nove portas lógicas por circuito integrado, ou componentes.

**3.** As famílias lógicas são diferentes umas das outras de acordo com os dispositivos que utilizam e como são interligados os dispositivos semicondutores para formar essa porta lógica, isso de acordo com a tecnologia que é empregada em sua fabricação.

Dentre as famílias de circuitos integrados, temos a família RTL. Qual o componente que essa lógica utiliza?

- a) Utiliza vários transistores por porta, nessa lógica, é a corrente elétrica que carrega a informação, e não a tensão.
- b) Utiliza o transistor bipolar como o principal componente, e trabalha com tensão de 5 V.
- c) Essa lógica utiliza apenas resistores e transistores em seus circuitos; foi uma das primeiras famílias transpostas para os circuitos integrados; ela está obsoleta hoje.
- d) Utiliza diodos e transistores em seus circuitos, e funciona em dois estados: saturado e cortado.
- e) Integração em larga escala, esses circuitos contêm grande escala de integração.

# Referências

AYALA, José L. **Communication Architecture for System-on-Chip**. Nova Iorque: CRC Press, 2011.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Tradução Rafael Monterio Simon. 8. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

CASTRO, F. C. C. de. **Eletrônica digital**. Porto Alegre: PUCRS, 2011.

CHVOJKA JUNIOR, Vladimir. **Tecnologia SOC e o microcontrolador PSoC (Programmable System on Chip)**. São Paulo: Universidade São Judas Tadeu, 2005. p. 251-257. Disponível em: <[ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/251\\_42.pdf](ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/251_42.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2013.

CODÁ, Luiza Maria Romeiro. **Apostila laboratório sistemas digitais**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015.

MALVINO, A. P.; LEACH, D. P. **Eletrônica digital princípios e aplicações**. São Paulo: McGraw Hill, 1987.

PIROPO, B. **Wafers e circuitos integrados**. 2012. Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/11/wafers-e-cis.html>>. Acesso em: 9 dez. 2016.



## Tópicos avançados em semicondutores

### Convite ao estudo

Prezado aluno, bem-vindo a esta nova seção de estudos dos materiais elétricos e semicondutores. Vamos estudar os supercondutores, que podem mudar a tecnologia atual, trazendo muito mais eficiência e diminuindo as perdas de energia. As pesquisas vêm avançando muito desde a descoberta desses materiais, muitas aplicações desses tipos, em vários campos da tecnologia, podem melhorar nossas vidas.

Enquanto os semicondutores apresentam condutividade entre os condutores e os resistores – aumentando a condutividade em condições especiais e em regiões determinadas, o que lhes permite serem usados como elementos de processamento de sinais –, os supercondutores apresentam condutividade bastante alta, também em condições especiais.

O objetivo desta unidade é, além de conhecer os supercondutores, conhecer e compreender os conceitos de computação por DNA, os cristais fotônicos, a robótica biomórfica e a computação quântica.

Você é um especialista em semicondutores e consultor em novas tecnologias em sistemas computacionais. Como tal, você foi procurado pelo investidor João Lallerno, que busca projetos em novas tecnologias para investir e produzir dispositivos inovadores. Ele conhece pouco de tecnologia, mas tem lido bastante sobre novos desenvolvimentos. Você foi o escolhido para ajudá-lo a entender melhor as novas fronteiras da computação.

Nesta unidade, veremos os seguintes assuntos em cada uma das seções:

Na Seção 4.1, veremos as características dos supercondutores, bem como suas aplicações na indústria.

Na Seção 4.2, veremos computação por DNA, bem como cálculos em cristais fotônicos e robótica biomórfica.

Na Seção 4.3, abordaremos o que é e como funciona a computação quântica.

Vamos em frente!

# Seção 4.1

## Supercondutores

### Diálogo aberto

Seja bem-vindo, prezado aluno. Veremos, nesta seção, um pouco dos supercondutores, materiais que podem contribuir grandemente na tecnologia de transportes que temos hoje, por exemplo.

Há muitas possibilidades para utilização desses materiais, como na redução de perdas de energia, na melhora de equipamentos e, até mesmo, na medicina.

Por exemplo, a geração de energia elétrica é feita nas usinas geradoras e, durante o processo de transporte até os centros consumidores, ocorre uma perda de energia significativa. Com a utilização dos supercondutores, a perda pode ser reduzida consideravelmente. Apesar de esse assunto estar sendo pesquisado intensamente, ainda não há trabalhos conclusivos, e os resultados positivos ainda estão no futuro.

O investidor João Lallerno está em busca de informações acerca dos supercondutores, pois tem interesse em criar uma linha de brinquedos de alta tecnologia, e está de olho nos skates sem rodas, os *hoverboards*, como representados no filme “De Volta para o Futuro II”, de 1987. O investidor quer saber se é possível fazer um skate assim, e você deve explicar como é possível, e quais as vantagens e desvantagens dessa tecnologia.

Enfim, temos muitas possibilidades para utilizarmos os supercondutores, venha comigo!

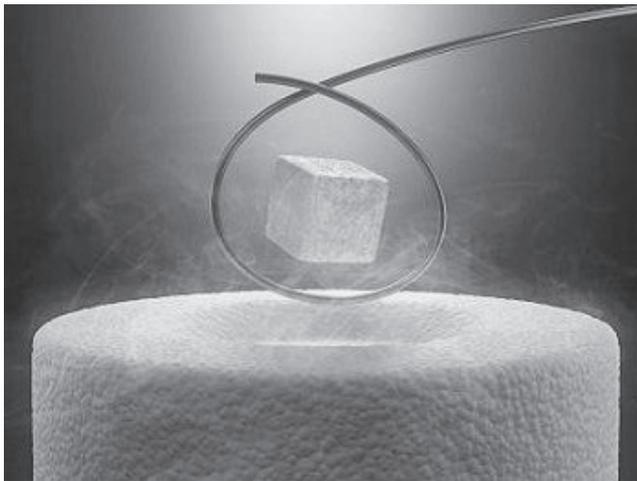
### Não pode faltar

A geração de energia elétrica é feita nas usinas geradoras e, durante o processo de transporte até os centros consumidores, a corrente elétrica sofre significativa perda de energia. Essa perda ocorre devido à resistência elétrica dos fios e cabos condutores de eletricidade. Boa parte da energia elétrica é transformada em energia térmica e, assim, dissipada para o meio ambiente. Para diminuir essa perda de energia, usa-se

fiios e cabos condutores com baixa resistênciia, como o cobre, que conduz corrente elétrica sob alta tensão, mas em distâncias que ultrapassam 400 km, as perdas mesmo assim acontecem e podem chegar a até 20%. Muitos cientistas buscam conseguir os chamados condutores ideais, que conduzem a corrente elétrica sem que ocorram perdas para o meio ambiente (OSTERMANN; PUREUR, 2005).

Existe uma propriedade física que certos materiais apresentam quando são resfriados a temperaturas próximas ao zero absoluto (zero graus na escala Kelvin), e que podem conduzir a corrente elétrica sem resistências e sem que ocorra perda de energia, essa propriedade é chamada de supercondutividade, como é mostrado na Figura 4.1. O fenômeno da supercondutividade foi descoberto em 1911, pelo físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes, quem observou que a resistência elétrica do mercúrio desaparecia quando resfriado a 4K, correspondente a  $-269,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo assim, o mercúrio é um material supercondutor em baixas temperaturas. A supercondutividade foi observada com outros metais, porém não foi possível a utilização prática desses novos materiais em usos de supercondutividade devido ao alto custo para conseguir manter temperaturas muito baixas (OSTERMANN; PUREUR, 2005).

Figura 4.1| Supercondutor



Fonte: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/imagens/010115150225-fitas-supercondutoras.jpg>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

Os físicos americanos John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer explicaram, em 1972, o fenômeno da supercondutividade. Essa explicação foi importante pelo fato de eles mostrarem que esse fenômeno não está ligado somente à diminuição da agitação térmica dos átomos e moléculas de um material, quando em baixas temperaturas. Assim, surgiu a possibilidade desse fenômeno com altas temperaturas também, porém, não deram resultados com os condutores metálicos (OSTERMANN; PUREUR, 2005).

Tempos depois, os físicos da IBM, o suíço Karl Alexandre Muller e o alemão Johannes G. Bednorz, conseguiram a supercondutividade com materiais à base de Lantano, à temperatura de 35K, correspondente a  $-238\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tal fato foi um enorme avanço para a ciência e permitiu avanços significativos para vários ramos de pesquisas.

O fenômeno da supercondutividade é muito importante e possui vasta aplicação. A supercondutividade não é aplicada somente na fabricação de cabos de transmissão de energia elétrica, como exemplo, citamos outras aplicações para esse fenômeno:

- em aparelhos eletrônicos, diminuindo seu tamanho e o gasto de energia;
- aplicação em ímãs, o que permite que possam flutuar sobre superfícies de materiais supercondutores, possibilitando a construção e operação dos trens-bala, que trafegam apenas flutuando sobre os trilhos;
- fios supercondutores que são utilizados em computadores, isso permite que os chips sejam cada vez menores e mais rápidos para o processamento de dados;
- em magnetos supercondutores, gerando um campo magnético extremamente forte, possibilitando a construção dos aceleradores de partículas.

A observação da supercondutividade em novos materiais, como materiais cerâmicos, os borocarbeto, os fullerenos e o composto  $\text{MgB}_2$  (diboreto de magnésio), despertou grande interesse na comunidade científica mundial devido ao seu potencial tecnológico em termos de dispositivos, máquinas, sensores, detectores e outros, e pela compreensão que poderá trazer no campo da física, de seus mecanismos (OSTERMANN; PUREUR, 2005).



### Assimile

Um material é supercondutor quando apresenta duas propriedades simultâneas: baixíssima resistência à passagem de corrente elétrica e diamagnetismo perfeito, ou seja, comportamento no qual os materiais têm de serem ligeiramente repelidos na presença de campos magnéticos fortes. Essa propriedade é conhecida como efeito Meissner-Hochsenfeld, ou efeito Meissner.

O material supercondutor, quando é resfriado, apresenta essas duas propriedades (apresentadas no item *Assimile*, acima) a partir da temperatura crítica ( $T_c$ ), em que o material fica entre o estado normal e o estado supercondutor. As aplicações estão limitadas pelo valor da temperatura crítica ( $T_c$ ), pelo valor de  $H_c$  (campo crítico) e pela densidade de corrente crítica ( $J_c$ ).

Até 1986, todos os supercondutores conhecidos eram metais puros, ligas metálicas, compostos intermetálicos e ligas dopadas, tais como o composto nióbio – germânio ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ) ( $T_c = 23\text{K}$  ou  $-250\text{ }^\circ\text{C}$ ). Tais materiais são conhecidos como supercondutores de baixa temperatura crítica, ou LTS (*low-temperature superconductor*). Após aquele ano, houve uma evolução e uma variação abrupta do valor de  $T_c$ , esses materiais ficaram conhecidos como supercondutores de alta temperatura, ou HTS (*high-temperature superconductor*) (ARAÚJO-MOREIRA et al., 2002).



### Pesquise mais

Prezado aluno, o artigo *Materiais supercondutores*, de Andréa Moreira et al., é uma boa leitura para a compreensão mais detalhada dos materiais semicondutores e sua utilização nas pesquisas que estão sendo realizadas. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/materiais/trab2>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

Veremos outras aplicações para os supercondutores que podem transformar e mudar a tecnologia. Uma das aplicações mais conhecidas é o trem Maglev, (Figura 4.2) que significa Levitação Magnética, o qual está em uso no Japão desde os anos 1970.

Figura 4.2 | Trem Maglev, uso prático dos supercondutores



Fonte: <[https://tecnoblog.net/wp-content/uploads/2013/09/maglev\\_l0-600x375.jpg](https://tecnoblog.net/wp-content/uploads/2013/09/maglev_l0-600x375.jpg)>. Acesso em: 9 jan. 2017.

O funcionamento do trem é devido às bobinas supercondutoras, isso faz com que o trem flutue a uma altura de 10 cm do solo e é puxado por um motor eletromagnético muito silencioso. Essa levitação é proporcionada por uma estrutura metálica montada no solo e que produz um campo magnético alto o suficiente para que o trem levite. Com isso, o trem pode atingir a velocidade de

500 km/h aproximadamente, uma velocidade proporcionada pela aerodinâmica. O trem Maglev tem sua geometria em filas, como uma agulha, porque a força do ar, comprimida pela aproximação do trem, poderia facilmente arrancá-lo dos trilhos. Quando for superado o problema e sem a resistência do ar, o trem pode atingir uma velocidade de 500 km/h. Para trechos pequenos, o Maglev é até duas vezes mais econômico que o próprio avião, assim, a viagem teria a mesma duração; é seguro, confortável, silencioso e não agride o meio ambiente.

O fenômeno da supercondutividade pode ser aplicado também em máquinas de tomografia por ressonância magnética, as quais utilizam bobinas supercondutoras metálicas que são resfriadas com hélio líquido.

A partir do princípio de funcionamento dos supercondutores foi possível desenvolver máquinas, como SQUIDS para a medicina, os quais são aparelhos que detectam o campo magnético produzido pela atividade cerebral, isso possibilita identificar a intensidade de atividade eletromagnético do cérebro (ARAÚJO-MOREIRA et al., 2002).

Também, temos o armazenamento da energia elétrica em forma de energia mecânica de rotação, uma invenção do físico Masato Murakami, do Centro Internacional de Tecnologia de Supercondutores, e que é conhecida pelo nome de acumulador de energia. Esse acumulador é baseado em um disco metálico que possui ímãs comuns instalados junto a uma bobina ligada à tomada que, quando ligada, faz com que o disco gire a 3600 rpm. Não seria possível o funcionamento do disco se ele estivesse preso a um eixo, devido à perda por atrito, mas como ele flutua sobre um campo magnético, que é criado por uma placa supercondutora resfriada a 77 Kelvins, o atrito, nesse caso, é praticamente eliminado (ARAÚJO-MOREIRA et al., 2002).

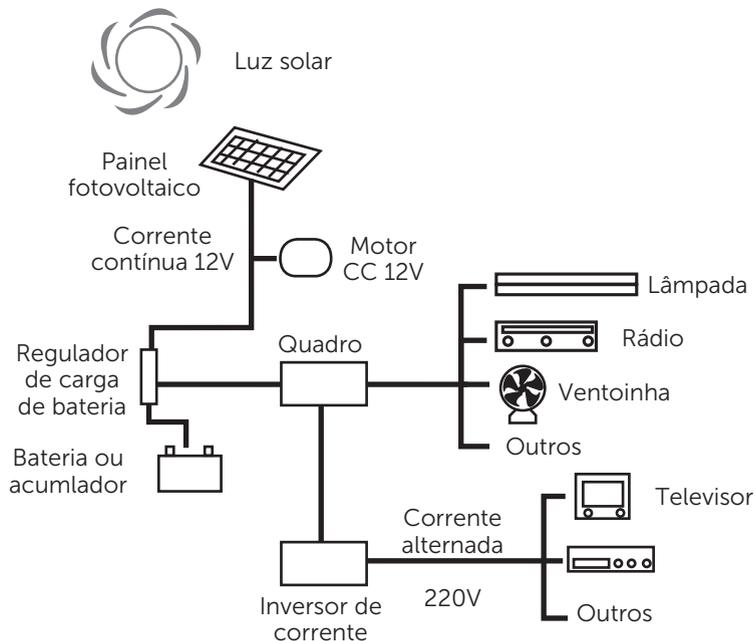
Como a utilização de cabos metálicos em transmissão de energia elétrica gera perda da ordem de 20%, para se obter uma redução drástica das perdas, pode-se utilizar os supercondutores para essa finalidade, isso também é válido na geração de energia elétrica.



### Exemplificando

Em sistemas elétricos de potência, é possível a utilização do acumulador de energia, no qual guardado o excedente de energia produzido durante o período de baixo consumo e liberado nos períodos de alto consumo. Assim, diminui o desperdício do potencial energético, como o risco de blackout. Na Figura 4.3, apresentamos um esquema de um sistema fotovoltaico em que a aplicação do fenômeno da supercondutividade poderá ser aplicada.

Figura 4.3 | Sistema Fotovoltaico



Fonte: adaptada de: <<http://www.proceedings.scielo.br/img/eventos/agrener/n5v2/084f01.gif>>. Acesso em: 19 jan. 2017



## Refleta

A supercondutividade vem permitindo conhecer novos mecanismos básicos da natureza, a utilização de importantes propriedades para aplicações em equipamentos e tecnologias em diversas áreas, mas ainda há muito a ser feito, descoberto e aperfeiçoado, com novos materiais com melhores parâmetros críticos.

## Sem medo de errar

O sonho do skate flutuante da série de filmes *De Volta para o Futuro* não é novo, mas apenas recentemente, com o desenvolvimento dos supercondutores, esse sonho deixou as telas de cinema e passou para os laboratórios.

Já é possível criar supercondutores resfriados com nitrogênio, e a combinação dessa tecnologia com os campos magnéticos permite que objetos flutuem, apoiados apenas pelo campo magnético em questão.

Uma solução possível para o *hoverboard* é o uso de trilhos com campos magnéticos. Dois campos adjacentes formados por polos magnéticos opostos (Sul-Norte e Norte-Sul, por exemplo) geram a estabilidade necessária para que a flutuação ocorra sem que o objeto “escorregue”. A Figura 4.4 ilustra essa situação.

Figura 4.4 | Ilustração de dois campos magnéticos opostos e adjacentes sobre um trilho



Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=3WOUNesftwU>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

O *hoverboard* deve conter em seu fundo o material supercondutor, como no caso do óxido de cobre-ítrio-bário ( $\text{YBaCu}_3\text{O}_7$ ). Quando esse material é resfriado com nitrogênio líquido, as propriedades supercondutoras se manifestam, e o material flutua sobre o trilho, como pode ser visto na Figura 4.5.

Figura 4.5 | O *hoverboard* (skate flutuante) flutuando sobre o trilho



Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=3WOUNesftwU>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

## Avançando na prática

### Melhorando as perdas na transmissão de energia

#### Descrição da situação-problema

A cidade de Gerimunha da Serra tem altos custos com energia elétrica. Situada em uma região que dificulta a chegada de cabos de alta-tensão, a cidade paga mais caro do que outras cidades do estado para receber energia elétrica. Uma saída possível seria aproveitar os 20% de energia perdida na transmissão.

Isso pode ser feito? Qual seria a solução? Como implementar essa solução? Seria viável sob o ponto de vista econômico?

#### Resolução da situação-problema

O uso de cabos feitos a partir de materiais supercondutores seria suficiente para reduzir a quase zero as perdas incorridas pelos cabos de transmissão. Para tanto, seria necessário:

- Substituição das linhas de transmissão por outras compostas de materiais que exibam comportamento de supercondutor.
- Resfriamento dos cabos até a temperatura que permite o surgimento da supercondutividade.
- Transmissão de energia por esses cabos, cuidando para que a temperatura os mantenham sempre na faixa de supercondutividade.

O que impossibilita essa solução, no momento, é que não temos ainda materiais supercondutores em temperatura ambiente. Os valores pagos para manter os cabos supercondutores resfriados (com o uso, possivelmente, de hidrogênio líquido) seriam bastante superiores às perdas incorridas pelo uso de cabos não supercondutores.

## Faça valer a pena

- 1.** A geração de energia elétrica é feita nas usinas geradoras e, durante o processo de transmissão até os centros consumidores, a corrente elétrica sofre significativa dissipação térmica. Essa perda ocorre devido à resistência elétrica dos fios e cabos condutores de eletricidade. Boa parte da energia elétrica é transformada em energia térmica e, assim, dissipada para o meio ambiente. Como diminuir a perda dessa energia?

- a) Usando fios e cabos condutores com baixa resistência, como o cobre.
- b) Usando cabos condutores com alta resistência.
- c) Usando fios e cabos condutores para baixas correntes.
- d) Usam-se resistores para diminuir a corrente elétrica.
- e) Diminuindo a potência de geração de energia.

**2.** O fenômeno da supercondutividade é muito importante e possui vasta aplicação. A supercondutividade não é aplicada somente na transmissão de energia elétrica, existem outras aplicações para esse fenômeno que podem vir a ser úteis em nosso dia a dia.

Em quais aplicações os supercondutores podem ser utilizados?

- a) Na construção de prédios residenciais e comerciais.
- b) Fios supercondutores que são utilizados em computadores, magnetos supercondutores para gerar campo magnético extremamente forte.
- c) Na fabricação de estruturas físicas que compõem os computadores.
- d) Na fabricação de monoblocos para veículos automotores.
- e) Na fabricação de estruturas para veículos espaciais.

**3.** A descoberta de novos materiais supercondutores, como materiais cerâmicos, os borocarbeto, os fullerenos e o composto  $MgB_2$  (diboreto de magnésio), despertou grande interesse na comunidade científica mundial devido ao seu potencial tecnológico em termos de dispositivos, máquinas, sensores, detectores e outros, e pela compreensão de seus mecanismos, que poderá trazer para o campo da física.

Qual característica um material precisa ter para ser considerado um supercondutor?

- a) Alta potência para transmissão de energia.
- b) Menor potência dissipada possível.
- c) Baixíssima resistência à passagem de corrente elétrica diamagnetismo perfeito.
- d) Alta resistência à passagem de corrente elétrica.
- e) Maior facilidade para perdas por efeito Joule.



## Seção 4.2

### Outros materiais: computação por DNA, cálculos com cristais e dispositivos biomórficos

#### Diálogo aberto

Prezado aluno, seja bem-vindo à nova seção de estudos de Materiais Elétricos e Semicondutores. Veremos um pouco do que é computação por DNA, um assunto novíssimo e que pode vir a ser uma realidade em nossas vidas. Todos sabemos o que é DNA (ácido desoxirribonucleico), composto orgânico cujas moléculas contêm as instruções genéticas que coordenam o desenvolvimento e funcionamento de todos os seres vivos e de alguns vírus.

Pois bem, os cientistas perceberam que é possível construir um computador, cujo processamento de dados é feito por DNA. Como é feito esse processamento? É o que veremos a seguir.

Os cristais fotônicos avançam em direção semelhante aos semicondutores que vimos até aqui, mas utilizando os fótons como elementos que carregam mensagens (bits) em lugar de elétrons. Avanços promissores nesse tipo de material, como meio para realização de operações digitais, vêm sendo realizados nas últimas décadas.

Já a robótica biomórfica é uma subdisciplina que tem por finalidade simular a mecânica, o sistema de sensores e as estruturas de computação e metodologias que encontramos em seres vivos.

O investidor João Lallerno está considerando investir em computação por meio de dispositivos fotônicos. Para tanto, ele quer saber quais são as diferenças entre dispositivos baseados nessa tecnologia e dispositivos baseados em semicondutores no sentido “clássico” do termo. Será que, quando essa tecnologia estiver em uso pela indústria, os computadores funcionarão com base nos mesmos paradigmas computacionais que conhecemos hoje? Ou será que haverá mudanças nesses paradigmas? Em que a computação baseada em dispositivos fotônicos se aproxima da computação clássica?

O objetivo desta seção é propiciar ao aluno conhecimentos sobre novos

desenvolvimentos tecnológicos e tendências em materiais elétricos e semicondutores

Ficou interessado em saber um pouco mais sobre esses temas? Então, venha comigo!

## Não pode faltar

### Computação por DNA

O encontro entre a ciência da computação e biologia molecular, à primeira vista, pode parecer muito improvável, pois esses dois campos de estudo possuem diferenças grandes. Porém, os desenvolvimentos mais recentes mostram que essa associação é um campo muito fértil para uma empolgante ciência, no caso a Computação por DNA (SIONEK, 2014).

Em 1994, um dos codescobridores do DNA, James Watson, escreveu o livro *Biologia Molecular dos Genes*, o qual inspirou Leonard Adleman, um cientista da computação, que sugeriu ser possível a construção de um computador baseado no DNA. Ele percebeu que o funcionamento de um processador era semelhante ao do DNA, e que seria possível carregar e gerar informações a partir de outros dados de entrada (SIONEK, 2014).

Os resultados do processamento são obtidos por meio das reações químicas de uma molécula de DNA. Como são necessárias poucas moléculas do reagente para fazer o processamento de informações, o custo de manutenção de um chip é baixo. Outra vantagem é a ausência de compostos nocivos ao meio ambiente, tanto no processo de fabricação quanto no produto final.

O processamento molecular pode ocorrer independentemente de outras instâncias de processamento, e em apenas uma gota de água de espaço poderiam ocorrer milhões ou trilhões de processamentos simultâneos.

Segundo Sionek (2014), testes foram realizados com processadores químicos, os quais foram capazes de fazer análises lógicas e apresentar resultados corretos em todos eles. Foram instruídos com regras simples, do tipo: "todo homem é mortal" e "Sócrates é homem"; o computador chegou a um resultado lógico "Sócrates é mortal". Mesmo quando o computador foi instruído com regras mais complexas ou que exigiam dele mais processamento, conseguia responder às perguntas corretamente.

Com os testes dos processadores químicos sendo realizados, conseguiram também projetar portas lógicas de DNA. Elas uniram cadeias simples de DNA

e devolveram um resultado lógico AND, ou subtraíram parte de uma cadeia e devolveram um resultado lógico NOT. Tal processamento seria analisado pelo tamanho da cadeia molecular resultante, um passo a mais rumo aos processadores de DNA (SIONEK, 2014).



### Refleta

O DNA é o principal exemplo de biomolécula que armazena informação. Ele pode ser manipulado por enzimas e interações com ácidos nucleicos para reter informação. É codificado com quatro bases (conhecidas como nucleotídeos), representadas pelas letras A, T, C e G, o que é muito parecido com a maneira com que a informação é armazenada em sistemas binários (uma cadeia que é codificada com zeros e uns).

A computação de DNA é baseada no desenvolvimento de algoritmos para desenvolver problemas usando a sequência de nucleotídeos do DNA para codificar informação, e na quebra e formação de novas ligações entre cadeias, como uma maneira para encontrar a resposta. Será que no futuro poderemos usar nosso próprio DNA, dentro de nossos próprios corpos, para fazer operações de computação digital?

Existem vantagens e desvantagens dos computadores de DNA, sendo o tempo de reação o maior problema no processamento, em que uma reação química poderá durar de alguns segundos a vários minutos, mas, num espaço de uma gota de água, poderão existir trilhões de reações químicas ocorrendo concomitantemente, isso nos diz que o processador de DNA seria capaz de milhões de processamentos simultâneos, o que superaria em capacidade e tempo os processadores de silício (ASSIS, 2009).



### Assimile

É preciso, ainda, ter processadores normais para que possam fazer a leitura dos dados químicos. Quando um determinado resultado é alcançado, esses dados são mostrados através de pequenas moléculas fluorescentes que se “iluminam”. Outra forma é fazer uma análise das moléculas de DNA, porém é necessário outro processador convencional para que a análise seja feita.

Como uma das principais aplicações do processamento por DNA, temos os diagnósticos médicos. Se um computador pode analisar efeitos de moléculas pré-programadas, também seria possível colocá-las dentro de uma célula para

que investiguem o funcionamento para conseguir diagnosticar doenças, como o câncer, de forma fácil, rápida e indolor. Também, poderíamos, além de diagnosticar as doenças, ativar a liberação de determinada quantidade de remédio para combatê-las (SIONEK, 2014).

### Cálculos com cristais

Nas tecnologias fotônicas, o processamento de sinais é feito 100% com luz, ao invés de ocorrer com elétrons, como nas tecnologias clássicas de semicondutores. Essa é uma área que vem se desenvolvendo desde a década de 1980, mas que, nos últimos anos, vem produzindo progressos que, hoje, nos colocam a pouca distância de produzirmos dispositivos computacionais baseados em fótons (SILVA, 2008).

Os cristais fotônicos são estruturas que apresentam variação periódica na condução de radiações eletromagnéticas, permitindo a criação de “caminhos” pelos quais os fótons podem passar, “barreiras” pelas quais os fótons não passam (SILVA, 2008).

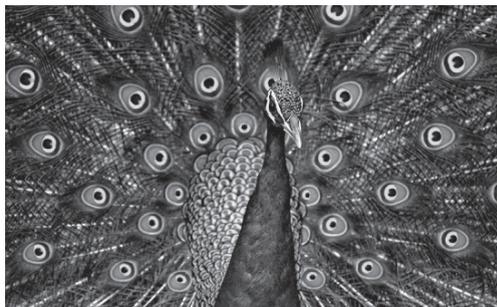
Os cristais fotônicos não são invenção do homem, ocorrendo também na natureza. Exemplos disso são encontrados nas figuras a seguir:

Figura 4.6 | Asas de borboletas apresentam estruturas de cristais fotônicos



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Blue\\_morpho\\_butterfly.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Blue_morpho_butterfly.jpg)>. Acesso em: 24 jan. 2017.

Figura 4.7 | Penas de um pavão



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Peacock\\_Plumage.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Peacock_Plumage.jpg)>. Acesso em: 24 jan. 2017

Figura 4.8 | Pedra preciosa opala



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e4/Jupiter\\_20\\_Opa\\_and\\_Diamond\\_Pendant.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e4/Jupiter_20_Opa_and_Diamond_Pendant.jpg)>. Acesso em: 24 jan. 2017.

Os cristais fotônicos presentes nessas estruturas provocam a difração de certos comprimentos de onda, o que gera as cores e os brilhos que tanto nos chamam a atenção (ASSIS, 2009).

Os cristais fotônicos são classificados em três tipos diferentes, de acordo com o que se convencionou chamar de variação espacial da rede periódica. De acordo com a quantidade de restrições que os caminhos possíveis para os fótons encontram, temos o tipo. De acordo com esse critério, temos o seguinte:

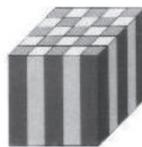
- **Cristais Fotônicos Unidimensionais** – têm restrição em apenas uma dimensão, com liberdade nas duas restantes.
- **Cristais Fotônicos Bidimensionais** – têm restrições em duas dimensões, com liberdade na dimensão restante.
- **Cristais Fotônicos tridimensionais** – têm restrições nas três dimensões.

A Figura 4.9, a seguir, mostra esses três tipos de cristais fotônicos em suas estruturas:

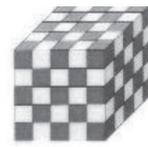
Figura 4.9 | Cristal fotônico unidimensional (a), bidimensional (b) e tridimensional (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Assis (2009).

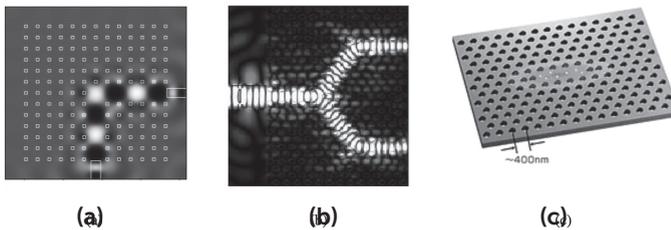
A utilidade prática dos cristais fotônicos se dá quando as restrições são removidas em pontos específicos, formando caminhos pelos quais os fótons podem passar, o que permite o fluxo de luz. Esse fluxo pode ser operacionalizado por meio de portas lógicas, o que permite sua utilização como sinais em processamento digital. Nesse caso, temos a presença de luz formando o bit "1" e a ausência de luz formando o bit "0" (ASSIS, 2009).

Os tipos de caminhos ópticos que podemos formar nos cristais fotônicos por meio da remoção controlada de obstáculos são (ASSIS, 2009):

- **Guia de Onda** – um caminho único que pode ser retilíneo ou curvado.
- **Divisor de potência** – um caminho bifurcado, que divide o sinal (e, conseqüentemente, a potência desse sinal).
- **Microcavidade ressonante** – uma cavidade semi-isolada, na qual o sinal entra e ressoa por um período antes de se dissipar (usada para armazenamento temporário).

A Figura 4.10 ilustra os tipos de caminhos possíveis nos cristais fotônicos.

Figura 4.10 | Tipos de caminhos em Cristais fotônicos – Guia de onda (a); Divisor de potência (b); Microcavidade ressonante (c)



Fonte: Assis (2009).

A partir desses elementos, podemos criar as portas lógicas AND, OR, NOT, XOR, XNOR, NAND e os circuitos complexos que usamos nos dispositivos baseados em semicondutores clássicos (ASSIS, 2009).

## Robótica Biomórfica

Para entendermos o que é robótica biomórfica, devemos observar que se trata da construção de robôs que são inspirados nos princípios de sistemas biológicos. Um dos pesquisadores no campo dos robôs biomórficos tem sido Mark W. Tilden (DINOIMPORTA, 2014).

Figura 4.11 | Mark Tilden e um de seus robôs biomórficos



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Mark\\_Tilden\\_Oslo.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Mark_Tilden_Oslo.jpg)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

Mark W. Tilden utilizou a teoria de Rodney Brooks de remover o modelo de mundo dos robôs colocando um hardware simples sem nem sequer usar microprocessadores algumas vezes, o que não significa dizer que a falta de um microprocessador faça algo biomórfico. Na Figura 4.12, temos a ilustração de um robô biomórfico (DINOIMPORTA, 2014).

Figura 4.12 | Roboraptor, o robô biomórfico que se baseia em um dinossauro (criação de Mark Tilden)



Fonte: Adaptado de: <<http://s3.amazonaws.com/estock/fspid2/131500/superstreng-robtoraptor-robots-131596-o.jpg>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

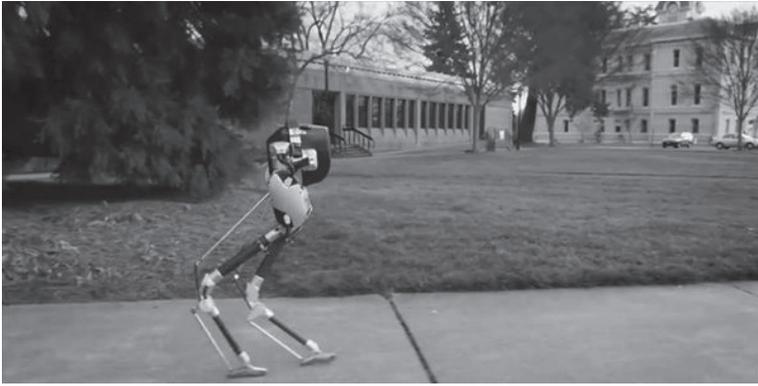
Há uma grande quantidade de trabalhos realizados que implementam redes neurais em dispositivos computadorizados, mas existe uma diferença básica entre neuromórfico e biomórfico: um se centraliza no controle e nos sistemas de sensores (neuromórfico), e o outro no sistema inteiro (biomórfico) (TILDEN, 1995).



### Exemplificando

Um exemplo interessante de robótica biomórfica é “Cassie”, a robôzinha bípede (seus criadores a definiram como sendo do sexo feminino), desenvolvida na Universidade do Oregon e lançada pela Agility Robotics. A Figura 4.13, a seguir, mostra Cassie, que se move com pernas que imitam o formato e o passo das aves.

Figura 4.13 – O robô bípede Cassie



Fonte: <[goo.gl/L4Q7eA](http://goo.gl/L4Q7eA)>. Acesso em: 3 mar. 2017.

Os sistemas computadorizados em robôs biomórficos são baseados em dispositivos criados especificamente para esse propósito, fundamentados em tecnologias que combinam sensores cinéticos (movimento) e mecânicos (aceleração, torque, gravidade, esforço, tensão, pressão, entre outros) com redes neurais de processamento, que são mais responsivas e mais adequadas às necessidades de processamento em tempo real desses dispositivos. Os robôs precisam, por exemplo, manter o equilíbrio em face de variações de inclinação do terreno, velocidade de seus próprios corpos e do vento, e interferências externas de vários tipos. As redes neurais devem ser “treinadas” para atuarem em tempo real nas questões resolvidas pelo robô, e os semicondutores são tecnologias fundamentais, uma vez que estão presentes tanto nos dispositivos de processamento quanto nos sensores (TILDEN, 1995).



### Pesquise mais

Prezado aluno, leia mais sobre o seguinte assunto e você poderá obter mais informações sobre computadores por DNA. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=computacao-de-dna-dentro-celulas-vivas#.WLmdr28rLIV>>. Acesso em: 3 mar. 2017.

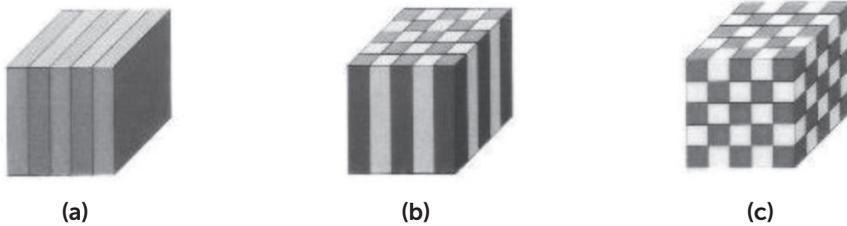
## Sem medo de errar

Você precisa mostrar a João que, do mesmo jeito que a dopagem de semicondutores cria caminhos para os elétrons, a criação de caminhos em cristais fotônicos permite a passagem de fótons. A primeira diferença, portanto, é que o elemento que cria o “sinal” a ser processado difere nas duas tecnologias:

- **Semicondutores clássicos** – o sinal é o elétron (ou a corrente elétrica).
- **Cristais Fotônicos** – o sinal é o fóton (ou o raio de luz).

A partir daí você pode explicar a João que é a quantidade de restrições que determina o tipo do cristal fotônico. A Figura 4.13 mostra os cristais fotônicos unidimensionais (a), bidimensionais (b) e tridimensionais (c):

Figura 4.14 | Cristais fotônicos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais



Fonte: Assis (2009)

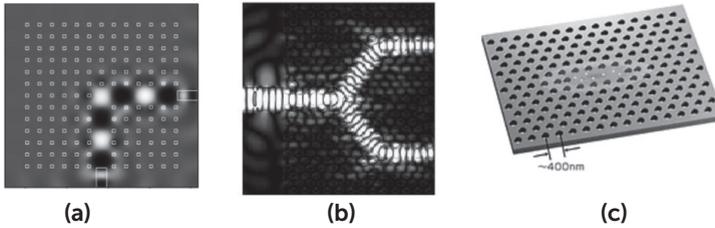
Você pode terminar sua explicação a João contando sobre a forma com que os caminhos para os elétrons são formados: pela remoção de pontos de barreira.

Os três tipos de caminhos que podemos criar são:

- **Guia de Onda** – um caminho único que pode ser retilíneo ou curvado.
- **Divisor de potência** – um caminho bifurcado, que divide o sinal (e, conseqüentemente, a potência desse sinal).
- **Microcavidade ressonante** – uma cavidade semi-isolada na qual o sinal entra e ressoa por um período antes de se dissipar (usada para armazenamento temporário).

Termine por ilustrar esses tipos de caminhos com uma imagem:

Figura 4.15 | Tipos de caminhos em cristais fotônicos – guia de onda (a); divisor de potência (b) e microcavidade ressonante (c)



Fonte: Assis (2008).

## Avançando na prática

### Melhorando as perdas na transmissão de energia

#### Descrição da situação-problema

O investidor Jaime Dromegna tem interesse em criar um dispositivo para explorar destroços de navios afundados, pois sabe que alguns deles ainda guardam materiais bastante valiosos.

Que tipo de dispositivo Jaime pode desenvolver que o auxilie em suas explorações? Por que esse tipo de dispositivo é útil ao explorador?

#### Resolução da situação-problema

Um tipo de dispositivo que, certamente, pode ser de auxílio a Jaime é o robô biomórfico, que é um dispositivo robótico e computacional para o qual adotamos características que imitam a vida e o relacionamento dos seres vivos com o espaço que ocupam e onde vivem.

Um robô biomórfico que imite o movimento de um peixe pode ser bastante útil para facilitar a movimentação embaixo d'água. Já um dispositivo que imita um polvo pode ser bastante útil na manipulação de objetos no fundo do mar.

Uma solução híbrida tende a unir as duas vantagens, e para tanto temos a "lula", que se movimenta como um peixe, tendo o formato de uma cunha que "corta as águas", mas que também tem tentáculos com ventosas, que podem se fixar temporariamente aos objetos e os manipular, ou mesmo arrastar.

Um robô biomórfico com características da lula é, portanto, uma boa sugestão a Jaime.

**Faça valer a pena**

**1.** O encontro entre a ciência da computação e a biologia molecular, à primeira vista, pode parecer muito improvável, pois esses dois campos de estudo possuem diferenças grandes. Porém, os desenvolvimentos mais recentes mostram que essa associação é um campo muito fértil para uma empolgante ciência, no caso a Computação por DNA.

Quem é o cientista que se inspirou no livro *Biologia Molecular dos Genes* e sugeriu ser possível a construção de um computador baseado no DNA?

- a) Leonard Adleman.
- b) Andrew Stuart Tanenbaum.
- c) Stephen Kleene.
- d) Allen Newell.
- e) Brian Kernighan.

**2.** O resultado do processamento das moléculas de DNA é conseguido pelas reações químicas. Como são necessárias poucas moléculas do reagente para fazer o processamento de informações, o custo de manutenção de um chip é baixo, e também não têm compostos nocivos ao meio ambiente. O processamento molecular pode ocorrer independentemente um do outro, e apenas em uma gota de água de espaço poderiam ocorrer milhões ou trilhões de processamentos simultâneos.

Com os testes dos processadores químicos sendo realizados, quais resultados foram conseguidos?

- a) Conseguiram projetar cabos mais resistentes para transmissão de energia.
- b) Conseguiram projetar portas lógicas de DNA.
- c) Motores elétricos mais eficientes.
- d) Conseguiram projetar computadores maiores para fins comerciais.
- e) Conseguiram fabricar materiais melhores.

**3.** O DNA é o principal exemplo de biomolécula que armazena informação. Ele pode ser manipulado por enzimas e ter interações com ácidos nucleicos para reter informação. É codificado com quatro bases (conhecidas como nucleotídeos), representadas pelas letras A, T, C e G, o que é muito parecido com a maneira com que a informação é armazenada em sistemas binários (uma cadeia que é codificada com zeros e uns).

No que se baseia o desenvolvimento da computação de DNA?

- a) No desenvolvimento de programas computacionais mais complexos.
- b) No desenvolvimento de processadores mais rápidos.
- c) No desenvolvimento de algoritmos para desenvolver problemas usando a sequência de nucleotídeos do DNA para codificar informação.
- d) No desenvolvimento de componentes mais adequados ao computador.
- e) No desenvolvimento de supercomputadores para cálculos mais rápidos.

## Seção 4.3

### Computação quântica

#### Diálogo aberto

Prezado aluno, veremos agora o que chamamos de computação quântica, uma tecnologia recente e que poderá avançar ainda mais a tecnologia computacional atual.

A evolução dos computadores está limitada por duas barreiras, as quais são inatingíveis atualmente: velocidade da luz no processamento das informações e dimensões da ordem de grandeza atômica no tamanho dos componentes em um chip. A computação quântica é a continuação dessa evolução dos computadores para tentar atingir fisicamente essas barreiras.

O investidor João Lallerno está fascinado com as novas tecnologias e pede uma explicação a você sobre o que é computação quântica. Esse tipo de computação pode ser utilizado na resolução de quaisquer problemas? Quais são as vantagens desse tipo de computação? Quais são as restrições?

O objetivo dessa seção é facilitar a compreensão de que há outros paradigmas computacionais diferentes daqueles que a computação clássica gerou. Os computadores quânticos usam novas tecnologias de semicondutores para lhes possibilitar o funcionamento.

Quer saber mais?

Venha comigo!

#### Não pode faltar

Segundo as Leis da Física, no mundo subatômico, as partículas ganham ou perdem energia em pequenos “pacotes”. Um pacote é chamado de “quantum”, e vários pacotes são “quanta” (plural de quantum). Por exemplo, um quantum de luz chama-se fóton, a menor porção possível de energia luminosa; um átomo não

fornece “ $\frac{1}{2}$  fóton” (isso não existe), fornece apenas múltiplos de 1 fóton: 2 fótons, 3 fótons etc. (LNCC, 2016).

Falando em propriedades das partículas subatômicas, estas podem assumir estados simultâneos diferentes até que um observador determine seu estado atual, porque um estado quântico é indefinido até que alguém o observe. Enquanto o sistema não é observado, todas as possibilidades devem ser consideradas, ou seja, o sistema pode estar em qualquer um dos estados. Estranho? Sim, pode apostar que é (LNCC, 2016).

Os computadores atuais são baseados na Física Clássica. Eles trabalham essencialmente com dois estados, 0 e 1, os quais são chamados de bits. Para um computador quântico, uma partícula poderia assumir o valor 0 e 1, ou ambos, e tais valores são chamados **qubits**. O terceiro estado (“indefinido”, ou “ambos ao mesmo tempo”) pode aumentar exponencialmente a capacidade de processamento de um dispositivo, bem como sua velocidade (LNCC, 2016).



### Assimile

A computação quântica, portanto, é a ciência que estuda o uso da mecânica quântica na realização de processamento computacional.

Vamos imaginar que enviamos uma mensagem entre dois computadores usando uma propriedade de um conjunto de partículas (um quark, por exemplo, que é uma partícula subatômica). Podemos enviar, junto à mensagem, outra de segurança. Se essa mensagem que enviamos chegasse ao seu destino com alguma alteração, significaria que algum observador, que pode ser um cracker ou um espião, provavelmente, já a interceptou antes mesmo de ela chegar ao seu destino. Também, podemos inserir uma chave de decifragem que só pode ser obtida por meio de uma observação única, e adicionada a uma porção da chave de decifragem que mantemos sob nosso poder. Se o espião observa a chave, só consegue um pedaço dela (não consegue decifrar a mensagem porque falta uma porção da chave), e nós ficamos sabendo que a chave já foi observada antes de a mensagem chegar até nós. Essa estratégia é chamada de criptografia quântica, e alguns bancos na Áustria já utilizam essa tecnologia para transmissão segura de informações (KOJIKOVSKI, 2016).

Essa tecnologia para computadores quânticos está muito longe de chegar às nossas casas. Alguns pesquisadores ainda duvidam de sua viabilidade por conta da verificação de erros em cálculos dos processadores quânticos, essa aferição de erros é uma tarefa que todos os computadores atuais realizam. Por conta da interferência magnética ou elétrica, o valor de um bit pode ser alterado, e caso o

computador não perceba essa alteração, poderá ter problemas, como perda de informações até uma tela azul.

Os métodos que são utilizados para aferição em computadores tradicionais não funcionam em computadores quânticos, devido ao ato de observar um qubit, que pode acabar por alterar o seu valor. Os computadores quânticos também operam em condições extremas, o que também é um obstáculo para esses processadores, os quais são muito sensíveis, e necessitam de ambientes extremamente isolados de interferências elétricas ou magnéticas.



### Refleta

Os computadores quânticos também dependem do efeito de supercondutividade, que, na maioria dos casos, ocorre em temperaturas baixíssimas, algo em torno de (-273 °C), bastante difícil de se atingir, por isso esses computadores só funcionam próximos a essa temperatura.



### Pesquise mais

Prezado aluno, a computação quântica é uma tecnologia muito nova, por isso, acesse o link a seguir, no qual você encontrará mais informações sobre o assunto. A leitura é muito interessante! Disponível em: <<http://dfis.uefs.br/caderno/vol10n12/a4MattielCQuantica.pdf>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

De modo geral e simplificado, a computação quântica nada mais é do que a aplicação das teorias e propriedades da mecânica quântica ao computador. Um computador quântico é capaz de realizar cálculos que utilizam propriedades da mecânica quântica, como a teoria da sobreposição. Na teoria, os computadores quânticos são assustadoramente mais rápidos do que o PCs que temos hoje, mas a própria física quântica possui suas limitações (KOJIKOVSKI, 2016).

### Funcionamento

Um computador convencional tem registradores com um número arbitrário de bits. Um computador hipotético que tivesse registradores de 1 bit poderia estar em um, e apenas um, de dois estados: "0" ou "1", dependendo do bit que ocupar o registrador. Um computador hipotético com um registrador de 2 bits poderia estar em um de quatro estados: "00", "01", "10" ou "11". De forma genérica, um computador com registrador de n bits poderia estar em um de  $2^n$  estados. Um registrador de 8 bits, por exemplo (como no caso dos registradores dos processadores Intel 8085

ou Zilog Z80), pode estar em um de 256 estados (de "00000000" até "11111111").

Já um computador quântico pode estar em qualquer um dos estados ao mesmo tempo, por mais estranho que isso possa parecer. O computador D-Wave, por exemplo, tem um registrador de 512 bits, e pode assumir  $2^{512}$  estados simultaneamente. Ao se realizar operações lógicas com esses qubits (posições do registrador), geramos uma resposta única a partir de todos os estados possíveis, ou seja, um algoritmo que, de maneira sequencial, deveria verificar  $2^{512}$  respostas possíveis, em alguns segundos, encontra a resposta correta se for executado no D-Wave.

A desvantagem é que apenas um conjunto finito de problemas pode ser resolvido com o uso da computação quântica, pois ainda conhecemos poucos algoritmos que podem se beneficiar de múltiplos estados simultâneos.

Um exemplo hipotético de como podemos usar o computador quântico para reduzir brutalmente o tempo computacional é a questão da quebra de uma senha. Suponhamos uma senha que tenha as seguintes características:

- Pode usar letras minúsculas (de "a" até "z", ou seja, 26 possibilidades para cada posição).
- Pode usar letras maiúsculas (de "A" até "Z", ou seja, mais 26 possibilidades para cada posição).
- Pode usar números (de "0" a "9", ou seja, mais 10 possibilidades para cada posição).
- Pode usar caracteres especiais (de "!" a "+", ou seja, mais 33 possibilidades para cada posição, considerando o teclado ABNT).

Teríamos, portanto,  $26+26+10+33 = 85$  possibilidades para cada posição.

Uma senha de uma posição teria 85 possibilidades. Uma senha de duas posições teria  $85 \times 85$  possibilidades, ou seja, 7225 possibilidades. Uma senha de três posições teria  $85 \times 85 \times 85$  possibilidades, ou seja, 614125 possibilidades. Vê como as possibilidades crescem exponencialmente?

Observemos a Tabela 4.1, a seguir, representando as possibilidades até uma senha de 12 posições:

Tabela 4.1 | Cálculo de possibilidades para senhas de 1 a 10 posições de tamanho

Posições	Representação	Total de senhas possíveis
1	85	85
2	$85 \times 85 = 85^2$	7.225
3	$85 \times 85 \times 85 = 85^3$	614.125
4	$85^4$	52.2000.625
5	$85^5$	4.437053125
6	$85^6$	377.149.515.625
7	$85^7$	32.057.708.828.125
8	$85^8$	2.724.905.250.390.625
9	$85^9$	$2,31 \times 10^{17}$
10	$85^{10}$	$1,96 \times 10^{19}$

Fonte: elaborada pelo autor.

Agora, imaginemos que um computador super-rápido consiga verificar (testar) um milhão de senhas por segundo, algo que podemos pensar nos dias de hoje. Vamos observar o tempo necessário para testar todas as senhas para cada quantidade de posições? Vejamos:

Tabela 4.2 | Cálculo de tempo para testar senhas de 1 a 10 posições de tamanho

Posições	Total de senhas possíveis	Tempo de cálculo
1	85	0,00005 segundos
2	7.225	0,007 segundos
3	614.125	0,6 segundos
4	52.200.625	52 segundos
5	4.437.053.125	1 hora e 14 minutos
6	377.149.515.625	4,26 dias
7	32.057.708.828.125	371 dias
8	2.724.905.250.390.625	2.072,3 anos
9	$2,31 \times 10^{17}$	176.148 anos
10	$1,96 \times 10^{19}$	15 milhões de anos

Fonte: elaborada pelo autor.

Mesmo que utilizemos 15 computadores com essa capacidade (o que sairia muito caro), e mesmo que esses 15 computadores pudessem fazer 1000 vezes mais cálculos por segundo (o que nem de longe é viável com a tecnologia que temos hoje em dia, ainda assim estaríamos falando em um tempo de 1000 anos para quebrar uma única senha de 10 posições com a tecnologia atual.

Ocorre que, com um computador quântico, todas as  $1,96 \times 10^{19}$  posições podem ser testadas quase que simultaneamente, permitindo que a mesma resposta seja atingida com apenas alguns minutos de cálculo. A diferença entre o computador quântico para cálculos que ele consegue fazer e o computador convencional para esses mesmos cálculos é de 15 milhões de anos para alguns poucos minutos, em suma.

Um computador quântico pode ser construído a partir de fótons, nêutrons, prótons, elétrons e até mesmo pósitrons, aquelas partículas presentes no átomo que você estudou nas aulas de química do colégio. Sendo assim, já é de se imaginar que os computadores quânticos, pelo menos os processadores, possuirão um tamanho mais do que diminuto, em escala atômica.

A quantidade de mudanças que seriam causadas pela criação de um computador quântico é enorme, mas não há como estimar com precisão quais seriam essas alterações. O fato de trabalhar com partículas atômicas torna possível a construção de computadores que sejam tão pequenos a ponto de não serem visíveis a olho nu (KOJIKOVSKI, 2016).

A velocidade de processamento não é igual ao tamanho. Os computadores quânticos são centenas de milhares de vezes mais rápidos que todos os computadores normais e notebooks que existem.

A velocidade se dá exatamente pela utilização de partículas atômicas em sua construção, uma vez que elas possuem velocidade próxima à da luz, e o processamento das informações poderia ser feito em total paralelismo, e até mesmo em outra dimensão.

A velocidade quântica é realmente útil na solução de apenas três problemas que os computadores atuais não são capazes de fazer em tempo hábil:

- fatoração de números inteiros com milhares de bits;
- logaritmo discreto;
- simulação de física quântica.

Um computador com a tecnologia atual resolveria a fatoração de um número

realmente grande, digamos, com alguns milhares de casas decimais. Para isso, seria necessário ter uma máquina clássica (um computador não baseado em princípios quânticos) com tamanho maior que o universo do qual temos conhecimento, ou seja, algo realmente inviável.

Outro problema facilmente resolvido por um computador quântico diz respeito à busca de dados e informações em um banco de dados totalmente desordenado, o que poderia levar anos nos computadores de hoje, um computador quântico resolveria num piscar de olhos.

### Sem medo de errar

Você pode explicar a João que os computadores quânticos diferem dos computadores clássicos porque, ao invés de bits, eles usam qubits. Enquanto um bit pode ter apenas um estado ("0" ou "1") ao mesmo tempo, um qubit é diferente, ele pode estar em todos os estados ao mesmo tempo. Isso significa que o computador quântico – para os problemas que ele consegue resolver – pode checar bilhões e bilhões de possibilidades em poucos segundos, o que não pode ser feito em computadores clássicos.

Um exemplo é o teste de senhas, que, para uma senha de 10 posições (letras, números e caracteres especiais), poderia demorar 15 milhões de anos em um computador convencional (mesmo que muito rápido), enquanto demoraria poucos minutos em um computador quântico.

Ou seja: a vantagem mais óbvia é a velocidade para os problemas que ele consegue resolver.

Acontece que ele consegue resolver – até o presente momento – apenas algumas classes de problemas bastante específicos:

- fatoração de números inteiros com milhares de bits;
- logaritmo discreto;
- simulação de física quântica.

Outros problemas? Ainda não é possível utilizá-lo, e os tempos de resposta são semelhantes ou piores que no caso dos computadores clássicos.

Essa é uma das maiores desvantagens. Outra desvantagem é o preço alto desse tipo de equipamento.



### Exemplificando

Haig Farris, co-fundador da empresa de computação quântica D-Wave, afirma que os computadores quânticos revolucionarão a vida das pessoas mais do que o fogo, a roda e a máquina a vapor. Um dos projetos em que esses computadores serão utilizados é o desenvolvimento de remédios geneticamente desenhados para o combate ao câncer, um tipo de problema de tamanha complexidade que se encontra além do poder de processamento de computadores baseados em arquitetura convencional (WADDELL, 2017).

## Avançando na prática

### Protegendo informações com criptografia quântica

#### Descrição da situação-problema

Uma empresa de pesquisas no setor agrícola está desenvolvendo uma semente híbrida imune tanto às geadas quanto às estiagens prolongadas e aos insetos. O projeto é sigiloso, e as informações devem ser protegidas o tempo todo, principalmente nas mensagens trocadas entre os pesquisadores de laboratórios diferentes.

A diretoria dessa empresa está procurando uma solução que auxilie na comunicação segura entre laboratórios e ouviu falar em criptografia quântica. Você foi contratado para ajudá-los a entender esse conceito.

Como a criptografia quântica pode auxiliar nesse caso?

#### Resolução da situação-problema

A criptografia quântica permite a troca segura de chaves de criptografia, bem como a identificação se as chaves foram observadas (copiadas) por uma terceira parte durante o processo. É considerada extremamente segura e é rápida tanto na cifragem quanto na decifragem de mensagens.

É uma solução bastante adequada para mensagens de alto valor agregado, como é o caso do laboratório em questão.

A criptografia quântica tem, ainda, uma vantagem adicional: por ser um mecanismo de alta efetividade, transmite segurança aos parceiros do laboratório, indicando que esse leva a segurança a sério, o que, no caso de clientes da instituição, é uma tranquilidade a mais.

**Faça valer a pena**

**1.** As propriedades das partículas subatômicas podem assumir estados simultâneos e diferentes até que um observador determine seu estado final. Os computadores atuais são baseados na Física Clássica, trabalham essencialmente com um de dois estados possíveis: 0 ou 1. Cada um desses algarismos é chamado de bit. Para um computador quântico, uma partícula poderia assumir o valor 0 e 1, ou ambos ao mesmo tempo.

Em um computador quântico, uma partícula poderia assumir o valor 0 e 1, ou ambos. Como são chamados esses valores?

- a) São chamados qubits.
- b) São chamados bytes.
- c) São chamados binary digit.
- d) São chamados ohms.
- e) São chamados volts.

**2.** Vamos imaginar que enviamos uma mensagem entre dois computadores usando uma propriedade de um conjunto de partículas (um quark, por exemplo, que é uma partícula subatômica). Podemos enviar, junto à mensagem, outra de segurança. Se essa mensagem que enviamos chegasse ao seu destino com alguma alteração, significaria que algum observador, que pode ser um cracker ou um espião, provavelmente, já a interceptou, antes mesmo de ela chegar ao seu destino.

Como é chamada a estratégia que alguns bancos na Áustria já utilizam?

- a) Código ANSI.
- b) Criptografia.
- c) Hexagonal.
- d) Binário.
- e) Decimal.

**3.** Um computador quântico é capaz de realizar cálculos que utilizam propriedades da mecânica quântica, como a teoria da sobreposição. Na teoria, os computadores quânticos são assustadoramente mais rápidos do que o PCs que temos hoje, mas a própria física quântica possui seus limitadores.

De modo geral, qual é a melhor definição de computação quântica?

- a) Aplicação das leis da física clássica no computador.
- b) Aplicação da eletricidade no computador.
- c) Aplicações das teorias de Newton ao computador.
- d) Aplicação das teorias e propriedades da mecânica quântica ao computador.
- e) Aplicação da teoria da relatividade no computador.

# Referências

- ARAÚJO-MOREIRA, F. M. et al. **O fascinante mundo dos materiais supercondutores**. São Paulo: Univerciência, 2002.
- ASSIS, P. **Computadores de DNA**. 2009. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/hardware/2678-computadores-de-dna.htm>>. Acesso em: 24 jan. 2017.
- DINOIMPORTA. **Entenda o que é robótica biomórfica**. 2014. Disponível em: <<http://www.dinoimporta.com.br/categorias/o-que-e-robotica-biomorfica.html>>. Acesso em: 24 jan. 2017.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA. **O que é Computação Quântica**. Disponível em: <<http://qubit.lncc.br/>>. Acesso em: 24 jan. 2017.
- KOJIKOVSKI, G. Como a computação quântica irá revolucionar a ciência. **Exame.com**. 17 de nov. 2016. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/como-a-computacao-quantica-ira-revolucionar-a-ciencia/>>. Acesso em: 24 jan. 2016.
- OSTERMANN, F.; PUREUR, P. **Temas atuais de Física**. São Paulo: Livraria da física, 2005.
- SILVA, A. **Modelagem de cristais fotônicos tridimensionais pelo método das diferenças finitas no domínio do tempo**. 2008. 108 f. (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- SIONEK, A. **Como o DNA é utilizado para resolver problemas computacionais?** 2014. Disponível em: <<http://www.polyteck.com.br/posts/como-odna-e-utilizado-para-resolver-problemas-computacionais>>. Acesso em: 24 jan. 2016.
- TILDEN, M. **Biomorphic Robotics and Nervous Net Research: A New Machine Control Paradigm**. EANN Conference Proceedings "Special Track on Robotics", 95., 1995, Otaniemi Finlândia.
- WADDELL, N. **Quantum computing will revolutionize cancer research, says D-Wave co-founder Farris**. Disponível em: <<http://www.cantechletter.com/2017/02/quantum-computing-will-revolutionizecancer-research-says-d-wave-co-founder-farris/>>. Acesso em 23 fev. 2017.

















ISBN 978-85-8482-851-7



9 788584 828517 >