

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO



**INSTITUTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA**

**EXPERIMENTOS PARA O ENSINO MÉDIO
QUE UTILIZAM O LED**

DAVID FERREIRA PORTES

Orientadores: Susana L. de Souza Barros

João José de Sousa

23/2010

Rio de Janeiro
2010



DAVID FERREIRA PORTES

EXPERIMENTOS PARA O ENSINO MÉDIO QUE UTILIZAM O LED

Orientadores: SUSANA L. DE SOUZA BARROS
JOÃO JOSÉ DE SOUSA

Rio de Janeiro,
2010

Aos meus avós, Alda e Domingos e à
minha mãe, Mariluci, pelo amor,
dedicação, educação e, sobretudo, pelo
alicerce familiar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, o fundamento de minha vida.

À Professora Susana Barros, minha orientadora, pela competência, incentivo e dedicação dispensada para me orientar neste trabalho.

Ao Professor João José, pela competência e incentivo dispensado para a construção deste trabalho.

À Professora Wilma Soares, pelos momentos de força e apoio que contribuíram para o desenvolvimento do meu trabalho.

À minha esposa Aline Portes, pela dedicação, esforço, compreensão, companheirismo e amor que teve em todos os momentos que precisei para a construção deste trabalho.

Ao meu amigo Márcio Henrique, pela amizade e companheirismo que sempre me proporcionou desde o início da faculdade.

Aos funcionários da oficina mecânica, em especial ao Francisco, que me ajudaram na construção dos experimentos que necessitava para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A tecnologia no Século XXI está cada vez mais avançada. Podemos perceber esta evolução no dia-a-dia, dentro de nossas residências, onde encontramos equipamentos eletrônicos como rádios, TV's, DVD's, constituídos por componentes cada vez menores, porém com maior capacidade de conduzir energia elétrica, de emitir luz ou ondas sonoras. Este é o caso do diodo emissor de luz (LED), objeto desta monografia, uma pequena lâmpada utilizada em circuitos eletrônicos que emite luz de diferentes cores, com a vantagem de ser bastante econômica e de possuir uma grande vida útil, quando comparada com a lâmpada incandescente. Para a compreensão da utilidade do LED, primeiramente foi necessário abordar os conceitos das válvulas eletrônicas e sua aplicação em circuitos elétricos, e das propriedades elétricas dos materiais, introduzindo as características dos materiais semicondutores e o processo de dopagem dos mesmos. Posteriormente foram introduzidos conhecimentos sobre o LED, suas aplicações e, por último, roteiros experimentais foram aplicados, proporcionando aos alunos do Ensino Fundamental e Médio a demonstração prática da teoria apresentada. Os resultados obtidos nas experiências foram bastante válidos, pois contribuíram para uma melhor compreensão e interesse dos alunos pela matéria de Física Moderna.

SUMÁRIO

1 Introdução.....	02
2 Conceitos introdutórios do diodo semicondutor.....	04
2.1 – Efeito Termiônico.....	04
2.2 – Breve histórico - As válvulas eletrônicas.....	06
2.2.1 – Substituição das válvulas termiônica pelos sistemas semicondutores.....	10
2.3 – Propriedades de sistemas condutores e isolantes.....	10
3 Do diodo semicondutor ao diodo emissor de luz (LED).....	13
3.1 – Semicondutores.....	13
3.2 – Semicondutores Dopados.....	14
3.3 – Diodo Emissor de Luz – LED.....	20
3.3.1 – O LED.....	21
4 Roteiros Experimentais.....	26
4.1 – Lanterna de LED.....	27
4.2 – O Semáforo.....	33
4.3 – A Constante de Planck.....	42
5 Conclusão.....	50
Referências Bibliográficas.....	52

Capítulo 1 - Introdução

No cotidiano nos deparamos com vários equipamentos eletrônicos e não conseguimos entender como peças tão pequenas e visualmente frágeis conseguem ter tanta eficácia. Analisando dentro de nossas residências encontramos TV's, rádios, DVD's, dentre outros equipamentos, que são constituídos por várias pequenas peças, porém com grande capacidade de conduzir energia elétrica, de emitir luz ou ondas sonoras, entre outras funções. Um dispositivo que se encontra na maioria destes aparelhos e que é de suma importância, pois tem grande durabilidade e é muito econômico, é o LED (Diodo Emissor de Luz), objeto de estudo deste trabalho.

O Diodo Emissor de Luz ou LED, acrônimo de Light Emitting Diode faz dezenas de diferentes tarefas em nosso cotidiano e é encontrado nos mais diferentes tipos de dispositivos eletrônicos. Os LEDs são pequenas lâmpadas que podem ser encaixadas facilmente em circuitos eletrônicos e que emitem luz de diferentes cores, dependendo do seu tipo de composição. Entre outras coisas, eles fazem parte de relógios digitais e dos controles remotos, na TV e nos rádios digitais, nos indicando quando os aparelhos eletrônicos estão em operação. Podem ser arrumados para criar imagens ou controlar o tráfego, como sinalizadores.

Para conseguirmos entender a composição destes emissores de luz, necessitaremos conhecer várias propriedades eletrônicas dos materiais e sua classificação. Vamos analisar os materiais isolantes, ou seja, os que apresentam condutividade elétrica praticamente nula (a porcelana, a borracha, o vidro e a maioria dos plásticos), os materiais condutores, ou seja, que apresentam alta condutividade elétrica (os metais, a água e o corpo humano) e os materiais semicondutores, que têm uma condutividade elétrica intermediária entre os isolantes e os condutores. O LED, um tipo de diodo, faz parte desta última classificação dos materiais, os semicondutores.

Os LEDs são muito utilizados na substituição das lâmpadas incandescentes, pois consomem menos energia, com a conseqüente economia, além de possuírem uma vida útil maior e um custo menor, quando se considera a frequência da troca e o tempo de trabalho humano necessário. Geralmente, os LEDs são utilizados em substituição às lâmpadas de sinalização ou lâmpadas pilotos nos painéis dos

instrumentos e aparelhos diversos. São também empregados na construção dos displays alfanuméricos e hoje em dia começam a substituir iluminação pública em algumas cidades da China, EUA e da Holanda, com vantagens consideráveis, pela qualidade da iluminação e pelos aspectos logísticos e econômicos envolvidos¹.

Por meio do estudo do LED, este trabalho objetiva diminuir a distância entre a teoria da física e as experiências vivenciadas no dia a dia pelos alunos, conforme orientação dos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM's)². O estudante, ao observar o funcionamento de um aparelho elétrico ou eletrônico, acredita ser alguma coisa de alta complexidade, ou mesmo misterioso. Porém, ao estudar os conceitos físicos necessários para a compreensão da constituição de um circuito elétrico, das funções de um LED, perceberá que está relacionado com os conceitos da física que ele estuda na escola.

Também desenvolvemos três experimentos simples, nos quais são apresentados exemplos da utilização do LED no funcionamento dos equipamentos encontrados em nossas residências, na escola e na indústria, dentre outros.

¹ CALTRANS - Departamento de Transportes do Estado da Califórnia.

² Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio são orientações elaboradas a partir de ampla discussão com as equipes técnicas dos Sistemas Estaduais de Educação, professores e alunos da rede pública e representantes da comunidade acadêmica. Seu objetivo é contribuir para o diálogo entre professor e escola sobre a prática docente.

Capítulo 2 - Conceitos introdutórios do diodo semicondutor

Para entendermos o significado e a composição de um diodo, apresentaremos os conceitos físicos básicos neste capítulo. Para este estudo, utilizamos como referência os autores Máximo e Alvarenga (2000), Mosqueiro (2008), Hewitt (2002), Tipler e Llewellyn (2001).

2.1 – Efeito Termiônico

O fenômeno denominado Efeito Termiônico (Efeito Edison) foi inicialmente observado por Frederick Guthrie³, em 1873, na Inglaterra, quando fazia experimentos com objetos carregados eletricamente. Guthrie³ verificou comportamentos diferentes na descarga elétrica das esferas metálicas, quando estas estavam carregadas a temperaturas muito elevadas.

Assim como acontece com as moléculas de um gás, os elétrons livres existentes em um corpo metálico, a uma temperatura qualquer, possuem um movimento desordenado, devido à sua agitação térmica. Nestas condições, os elétrons que atingem a superfície do metal são atraídos pelos íons positivos.

Quando um corpo metálico está à temperatura ambiente, os elétrons não possuem energia suficiente para romper a atração dos íons positivos. Aumentada a temperatura do corpo, a agitação térmica dos elétrons aumenta e uma parte deles conseguirá vencer a atração e escapar do corpo metálico, formando assim uma nuvem eletrônica próxima à superfície do corpo.

Em 1880 o inventor americano Thomas Alva Edison⁴ observou esse fenômeno da emissão de elétrons pela superfície de um metal aquecido (Efeito Termiônico) enquanto tentava descobrir a causa da ruptura do filamento de sua lâmpada incandescente.

³ O inglês Frederick Guthrie (1833 – 1886) foi o físico que primeiro observou o Efeito Termiônico.

⁴ O americano Thomas Alva Edison (1847-1931) foi um inventor e empresário dos Estados Unidos que desenvolveu muitos dispositivos importantes de grande interesse industrial. Edison é considerado um dos inventores mais prolíficos do seu tempo, registrando 1093 patentes em seu nome.

Edison, a priori, não viu nenhum uso prático para esse efeito, embora o patenteasse em 1883. Por esse motivo, a emissão termiônica também ficou conhecida como Efeito Edison.

Na Figura 1 podemos observar a montagem do circuito no qual Edison, inesperadamente, observou o fenômeno da emissão termiônica.

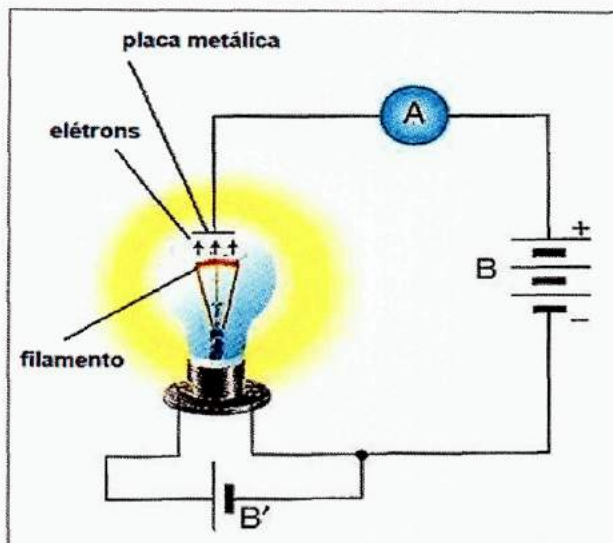


Figura 1. Circuito usado por Edison onde detectou o efeito termiônico.

(fonte: MÁXIMO, A., ALVARENGA, B., p. 197)

Uma folha metálica foi introduzida numa lâmpada elétrica comum, acima do filamento metálico, como mostra a Figura 1. A placa foi ligada ao pólo positivo de uma bateria B e o filamento, ao pólo negativo da mesma. Este, ao ser aquecido por outra bateria B', emitiu um grande número de elétrons que foram atraídos pela placa.

O aquecimento do filamento da lâmpada pela bateria B' se explica através do Efeito Joule, onde ocorre a dissipação da energia potencial elétrica no filamento, convertendo-a em energia térmica. Edison confirmou, com o amperímetro, que a quantidade de elétrons atraídos pela placa produz uma corrente elétrica no circuito da bateria B. Edison, assim como outros cientistas da época, não conseguiu uma explicação para o fato observado.

Somente em 1904, o físico britânico John Ambrose Fleming⁵ descobriu que o efeito termiônico poderia ser usado para detectar ondas de rádio. Fleming

⁵ John Ambrose Fleming (1849-1945) foi um engenheiro eletrônico e físico britânico. Desenvolveu técnicas de radiotelegrafia, osciladores de centelhamento, geradores de ruído branco e

trabalhou no desenvolvimento de um tubo de vácuo de dois eletrodos, denominado diodo, uma das mais simples válvulas eletrônicas, muito usadas em aparelhos de rádio, TV, entre outros. O Efeito Termiônico encontra a sua mais importante aplicação na construção destas válvulas, que serão melhor explicadas no próximo tópico.

2.2 – Breve histórico - As válvulas eletrônicas

Grandes consumidoras de energia, ultrapassadas e volumosas, as válvulas eletrônicas, também denominadas válvulas termiônicas, foram a base para o desenvolvimento da tecnologia eletrônica e são ainda utilizadas em aplicações específicas, como em equipamentos industriais, radares e transmissores de potência.

A denominação “válvula” é praticamente universal, no inglês “eletronic valve”. Esta denominação, “válvula”, provém da característica fundamental do diodo, que é permitir a circulação da corrente elétrica somente em um sentido, atuando como um interruptor.

A mais simples das válvulas eletrônicas é denominada diodo, que será o assunto principal deste tópico, pois é a partir dela que entenderemos o Diodo Emissor de Luz (LED).

O nome diodo indica que esta válvula possui dois eletrodos. O dispositivo é uma adaptação da lâmpada criada por Edison.

A válvula diodo consiste em dois cilindros metálicos, sendo um, o catodo (eletrodo negativo) e o outro, o anodo (eletrodo positivo). No interior do catodo, existe um filamento por onde passa uma corrente elétrica, acarretando o seu aquecimento. Como mostra a Figura 2, observa-se que o catodo é envolvido pelo anodo e, ao aplicar uma voltagem nos terminais A e B, os elétrons emitidos pelo catodo aquecido deslocam-se para o anodo. Isto ocorre em virtude do Efeito Termiônico. Estes cilindros metálicos estão inseridos em um invólucro de vidro onde existe vácuo.

desenvolvimento de circuitos sintonizados. Aperfeiçoou diversos sistemas de geradores e luminárias e encontrou a solução viável do Efeito Edison, construindo o primeiro diodo detetor para sinais de radiofrequência, em 1904.

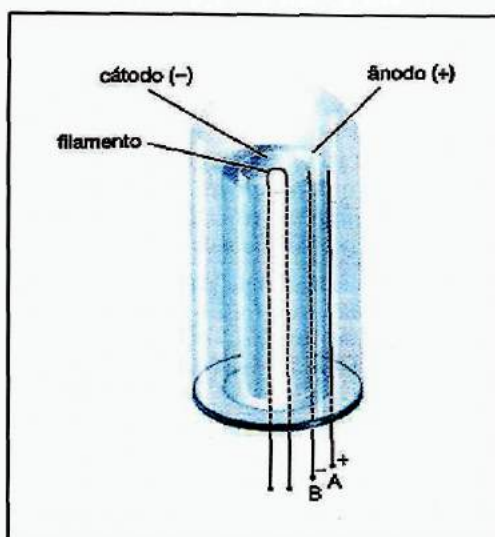


Figura 2. Esquema de uma válvula diodo.
(fonte: MÁXIMO, A., ALVARENGA, B., p. 189)

A mais importante aplicação da válvula diodo em circuitos eletrônicos se deu pelo fato desta válvula ter a função de retificar uma corrente alternada, ou seja, a transformação de uma corrente alternada em corrente contínua. Na Figura 3 apresentam-se dois esquemas para a compreensão de como esta válvula produz esta função retificadora.

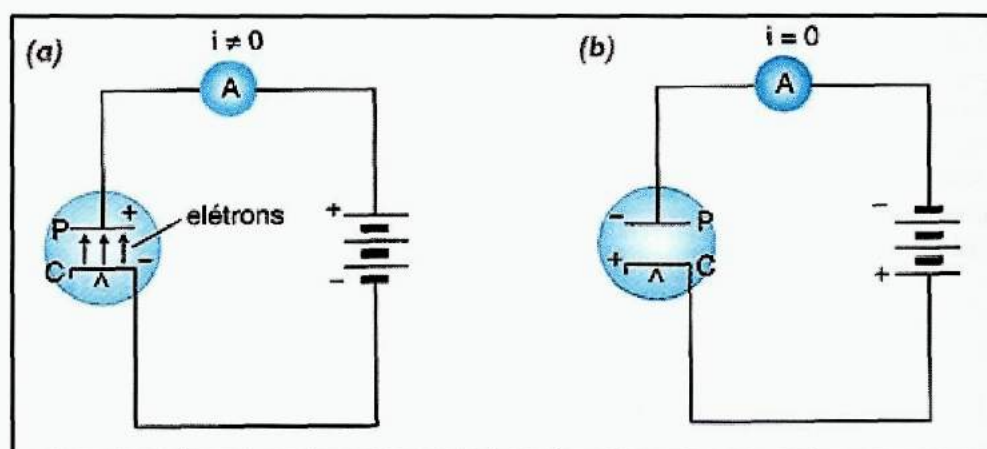


Figura 3. Circuito com diodo usado como retificador de corrente alternada, na Figura (a) há passagem da corrente elétrica, mas no circuito da Figura (b) temos $i = 0$.

(fonte: MÁXIMO, A., ALVARENGA, B., p. 199)

Na Figura 3(a), observa-se um circuito elétrico, onde o pólo positivo de uma bateria é ligado a placa P de um diodo, e o pólo negativo desta bateria é ligado a

placa C. Os elétrons emitidos pelo catodo (placa C) aquecido são atraídos pelo anodo (placa P), estabelecendo uma corrente elétrica no circuito, observada pelo amperímetro.

Na Figura 3(b), a placa P é ligada ao catodo e a placa C, ao anodo. Com esta ligação à bateria, o circuito deveria apresentar uma corrente no sentido contrário da Figura 3(a), pois a placa C continua a ser aquecida, emitindo elétrons. Porém, ao invés dos elétrons serem atraídos pela placa P, estes foram repelidos, não havendo passagem da corrente elétrica entre as placas C e P. Logo, o amperímetro não acusa corrente no circuito. Portanto, pode-se concluir que a válvula diodo só permite a passagem de corrente quando a placa P está a um potencial mais alto que a placa C.

A Figura 4(a) mostra um circuito onde foi inserido um gerador de corrente alternada ligado a uma resistência R. Pode-se perceber que o gráfico (b) mostra que a intensidade da corrente varia periodicamente, ora passando pela resistência R em um sentido, ora passando em sentido contrário.

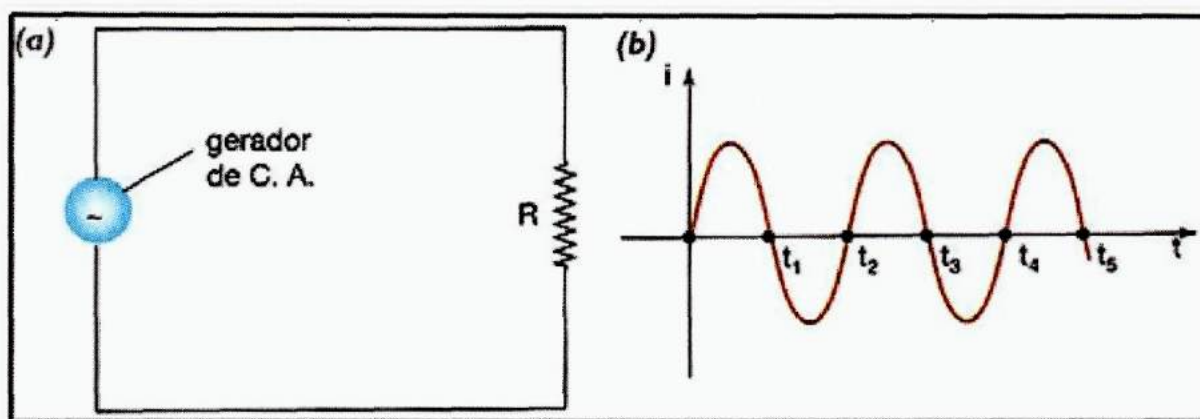


Figura 4. Gerador de corrente alternada ligado a uma resistência (a) e o gráfico mostrando a variação da intensidade da corrente que passa pelo circuito com o tempo (b).

(fonte: MÁXIMO, A., ALVARENGA, B., p. 199)

Com a introdução da válvula diodo no circuito, como mostra a Figura 5(a), permite a passagem da corrente em um único sentido, de modo que a corrente não varia o seu sentido no circuito, conforme mostra o gráfico (b) da Figura 5.

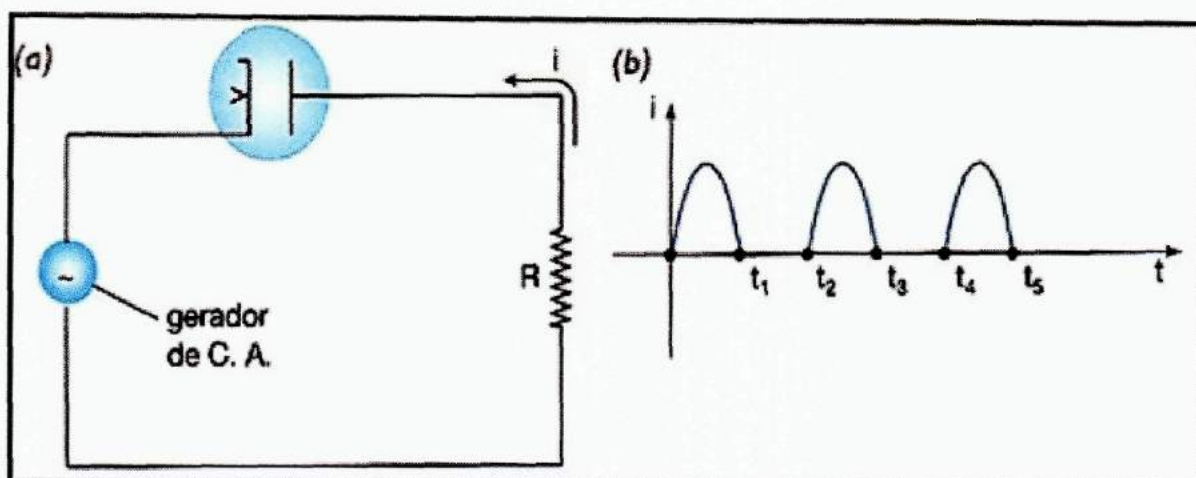


Figura 5. Gerador de corrente alternada ligado a um circuito contendo uma resistência e um diodo (a).

A intensidade da corrente, no circuito, varia com o tempo da maneira mostrada no gráfico (b).

(fonte: MÁXIMO, A., ALVARENGA, B., p. 199)

A corrente é interrompida periodicamente e é retificada, porém não é contínua, como aquelas fornecidas por pilhas e baterias.

Pode-se concluir que a válvula diodo em um circuito elétrico apresenta uma corrente retificada de intensidade praticamente constante, apresentando pequenas flutuações no decorrer do tempo, como mostra na Figura 6.

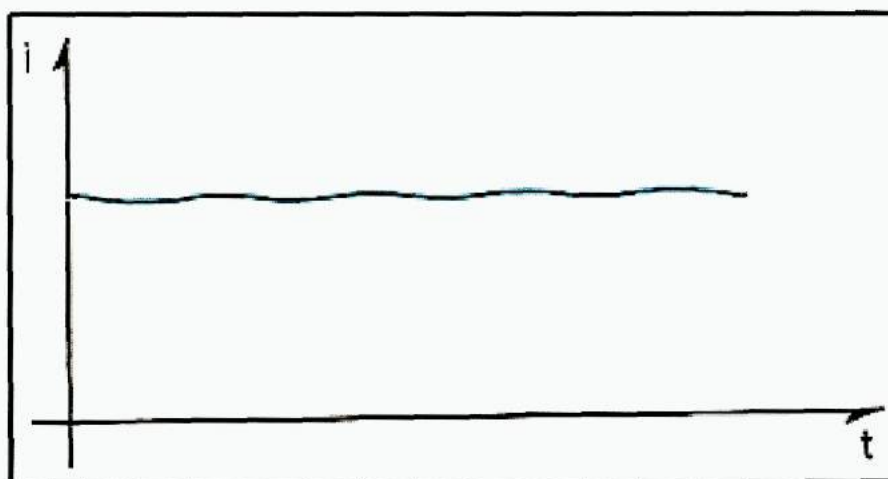


Figura 6. É possível associar à válvula diodo certos dispositivos de modo a obter, no circuito do gerador de corrente alternada, uma corrente de intensidade praticamente constante.

(fonte: MÁXIMO, A., ALVARENGA, B., p. 200)

Com o avanço da tecnologia, a válvula diodo foi recebendo novos elementos e foram desenvolvidas novas válvulas mais complexas como o triodo, tétrodo, pêntodo, entre outras.

2.2.1 – Substituição das válvulas termiônicas pelos sistemas semicondutores

As válvulas diodo foram importantes para os avanços tecnológicos, porém suas desvantagens foram percebidas. Seus tubos de vidro volumosos e frágeis, seu forte aquecimento e a dissipação de energia mostraram sua incapacidade de lidar com altas temperaturas, tornando sua vida útil muito curta.

Dessa forma, novos estudos foram feitos para o aprimoramento da tecnologia, e assim foram desenvolvidos dispositivos menores, mais econômicos e duráveis, construídos com o auxílio de materiais semicondutores, que fazem parte de um grupo intermediário entre os materiais condutores e isolantes de eletricidade. Para o melhor entendimento e análise das características e composição dos semicondutores, que serão abordados no próximo capítulo, são necessárias explicações preliminares, que são descritas no próximo tópico.

2.3 – Propriedades de sistemas condutores e isolantes

Qualquer corpo existente no Universo é composto por milhões de minúsculas partículas, denominadas átomos. Cada átomo possui um núcleo, composto pelos prótons (cargas positivas) e pelos nêutrons (cargas neutras) e este núcleo é rodeado pelos elétrons (cargas negativas) em níveis de energia (Figura 7).

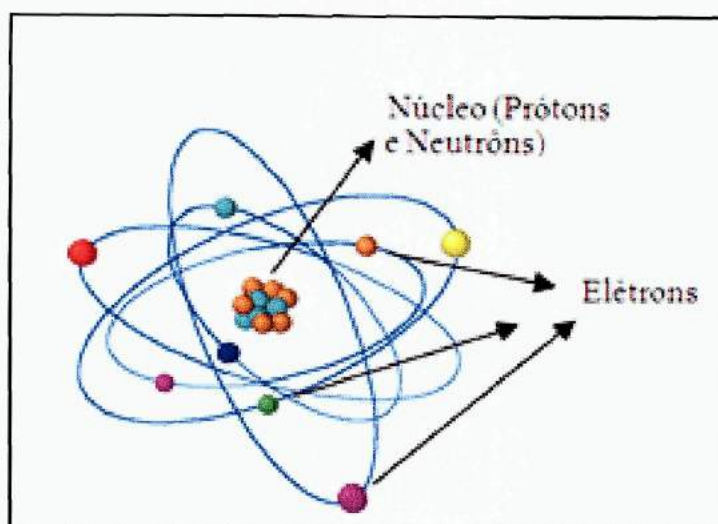


Figura 7. Estrutura atômica.

(fonte: <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/estrutura-atomica/imagens/estrutura-atomica-6.gif>)

O que caracteriza um material sólido cristalino como condutor ou isolante é o tipo de átomo que o constitui e os seus níveis de energia. A Figura 8 representa a constituição desses materiais, mostrando as suas bandas de energia (bandas de valência e bandas de condução).

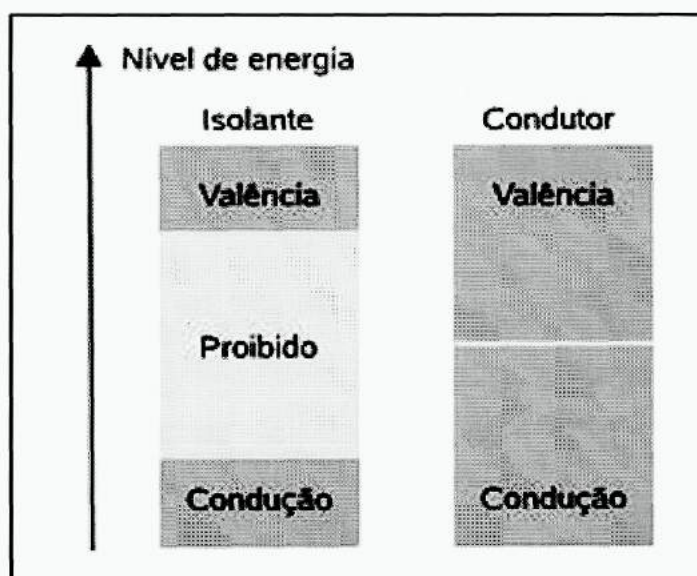


Figura 8. Representação esquemática dos níveis de energia em um cristalino.

(fonte: http://www.mspsc.eng.br/elettrn/im01/semic_010.png)

A banda de valência é a faixa de energia onde se encontram os elétrons que estão presos aos átomos. A banda de condução é a faixa de energia onde os

elétrons estão livres. Entre estas duas faixas de energia existe uma região proibida, onde não há níveis de energia que possam ser ocupados por elétrons. Dependendo da largura da região proibida e da quantidade de elétrons livres, o material pode se comportar como um isolante ou um condutor.

Chamam-se condutores de eletricidade os materiais que possuem elétrons livres (elétrons das camadas mais externas dos átomos que não estão firmemente presos ao núcleo). Como nos condutores a região proibida é pequena, fazendo com que a banda de condução esteja bem próxima à banda de valência, os elétrons livres atingem a banda de condução, permitindo o transporte da carga elétrica. Os metais, a água e a terra são exemplos de bons condutores.

Chamam-se isolantes elétricos os materiais que não possuem elétrons livres. Os elétrons estão firmemente ligados ao núcleo de cada átomo, não estando livres para se mover entre os outros átomos do material. Nos isolantes, a região proibida é relativamente grande, impedindo a passagem dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, não permitindo o fluxo de carga elétrica. A porcelana, a borracha, a madeira, o vidro e a maioria dos plásticos são exemplos de bons isolantes.

Capítulo 3 - Do diodo semicondutor ao diodo emissor de luz (LED)

Neste capítulo abordaremos os conceitos dos diodos semicondutores, especificamente, o diodo emissor de luz. Para isso, foram utilizados como referência conceitual os autores Hewitt (2002), Tipler e Llewellyn (2001), Boylestad e Nashelsky (2004).

3.1 – Semicondutores

No capítulo anterior foi explicado o que significa um material ser condutor ou isolante, porém, também existe uma classe de materiais que são chamados de semicondutores, tais como o germânio e o silício, que não são considerados bons condutores nem bons isolantes. Isto porque ao alterar a sua temperatura consegue-se modificar sua propriedade elétrica. Estes materiais apresentam um número pequeno de elétrons livres quando se encontram a temperatura aproximada de 0 K, comportando-se como materiais isolantes. Quando aumenta para temperatura ambiente em torno de 298 K (25° C), também aumenta a agitação térmica, fazendo com que um número grande de elétrons se separe de seus átomos, tornando-se elétrons livres, o que provoca a diminuição da resistência elétrica, tornando um material condutor. Estes materiais, que algumas vezes se comportam como isolantes e outras como condutores são denominados semicondutores.

Nos semicondutores, a região proibida é relativamente pequena, ou seja, a banda de condução não está tão afastada da banda de valência, conforme pode se verificar na Figura 9. Por isso, ao aumentar a temperatura, a agitação térmica dos elétrons aumenta e estes conseguem “pular” da banda de valência para a banda de condução.

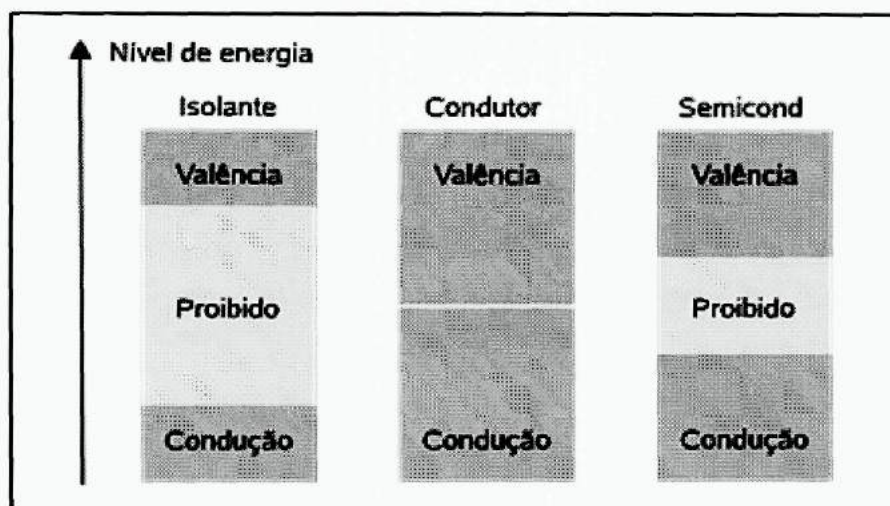


Figura 9. Representação esquemática dos níveis de energia em um cristalino.
(fonte: http://www.mspc.eng.br/elettrn/im01/semic_010.png)

Os semicondutores puros como o silício (Si) e o germânio (Ge) podem ser utilizados nos circuitos elétricos dos componentes eletrônicos, tais como diodos, transistores, microprocessadores e outros diversos graus de complexidade tecnológica, porém são raramente usados, pois precisam de grandes quantidades de energia para transportar correntes elétricas significativas. Para aumentar a condutividade desses materiais a níveis de circulação de corrente que possam facilmente ser utilizados na indústria, é feita a chamada dopagem, ou seja, são introduzidas quantidades pequenas e controladas de impurezas (dopantes) aos semicondutores, fazendo com que mudem suas propriedades eletrônicas.

3.2 – Semicondutores Dopados

Os cientistas perceberam que ao adicionar quantidades muito pequenas de certos materiais, chamadas de impurezas ou dopantes, a um semicondutor conseguia-se alterar significativamente as suas propriedades elétricas. Um bom exemplo de dopagem pode ser feito com o silício. A Figura 10 mostra a estrutura cristalina do silício puro.

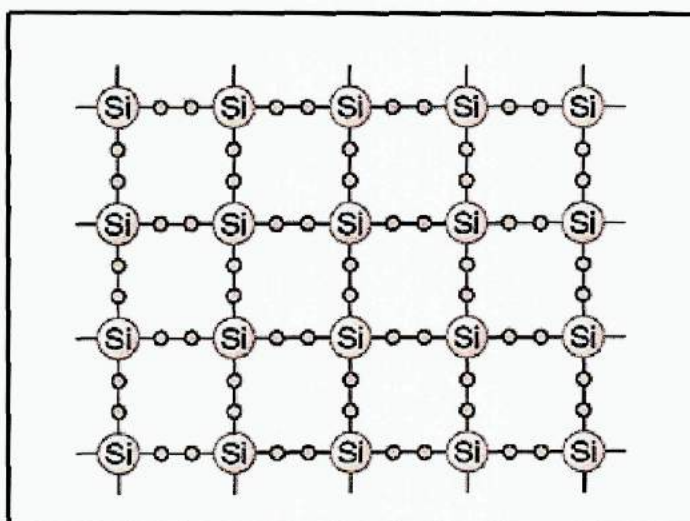


Figura 10. Representação bidimensional de um cristal de silício. Cada átomo forma ligações covalentes com quatro vizinhos, compartilhando com cada um deles um dos seus quatro elétrons de valência.

(fonte: TIPLER, P., LLEWELLYN, R., p. 309)

No estado puro do semicondutor, cada par de elétrons de átomos distintos forma a chamada ligação covalente, de modo que cada átomo fica no estado mais estável, isto é, com oito elétrons na camada externa. A camada ou nível mais externo do átomo é denominado nível ou camada de valência e os elétrons presentes nele são os elétrons de valência. O número de elétrons de valência é um fator importante para o elemento, pois define a capacidade do átomo de ganhar ou perder elétrons e de se combinar com outros elementos.

Ao dopar-se o silício colocando uma pequena concentração de arsênio, percebe-se que os átomos do arsênio tomam o lugar de alguns dos átomos de silício na rede cristalina, conforme a Figura 11.

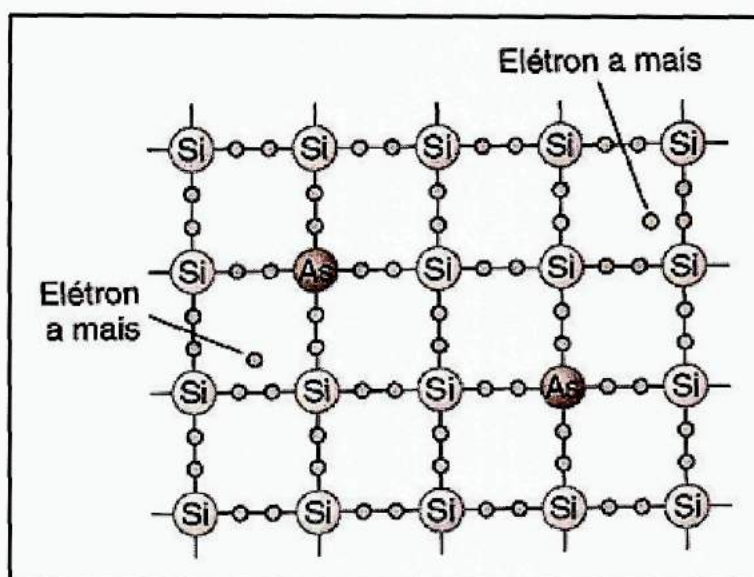


Figura 11. Representação bidimensional de um cristal de silício dopado com arsênio. Como o arsênio tem cinco elétrons de valência, um desses elétrons não forma ligações covalentes com os átomos vizinhos de silício e pode ser excitado facilmente para a banda de condução, onde passa a contribuir para a condução de eletricidade.

(fonte: TIPLER, P., LLEWELLYN, R., p. 309)

O arsênio possui cinco elétrons de valência na camada $n = 4$, enquanto o silício tem quatro elétrons de valência na camada $n = 3$. Quatro elétrons do arsênio formam ligações covalentes com os quatro elétrons do silício vizinho e o quinto elétron do arsênio fica frouxamente ligado ao átomo. Este elétron sobressalente ocupa um nível de energia ligeiramente abaixo da banda de condução e pode ser facilmente excitado para esta banda, onde contribui para a condução de eletricidade. Os níveis de energia destes átomos, como o arsênio, que doam elétrons para a banda de condução são denominados de níveis doadores.

Os semicondutores dopados com impurezas pentavalentes (cinco elétrons na camada de valência) são conhecidos como semicondutores *tipo n* (negativo), já que o cristal possui mais elétrons, tornando a energia predominantemente negativa.

Outro tipo de dopagem de um semicondutor é feita através da substituição de alguns átomos de silício na rede cristalina por átomos do gálio, que possui três elétrons de valência. O átomo do gálio recebe um elétron da banda de valência do silício para completar as quatro ligações covalentes com átomos vizinhos do silício, criando assim um buraco ou lacuna positivamente carregado na camada de valência, conforme pode-se verificar na Figura 12.

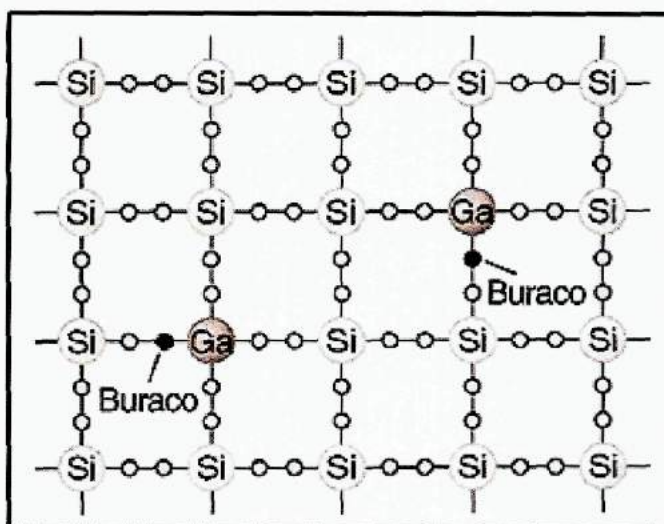


Figura 12. Representação bidimensional de um cristal de silício dopado com gálio. Como o gálio tem três elétrons de valência, existe um buraco em uma de suas ligações covalentes com os átomos vizinhos de silício. Estes buracos podem se mover pelo cristal, contribuindo para a condução de eletricidade.

(fonte: TIPLER, P., LLEWELLYN, R., p. 310)

Os níveis vazios acima da banda de valência decorrentes dos buracos causados pelos átomos de gálio são denominados de níveis aceitadores, pois o átomo de gálio aceita elétrons da banda de valência. Estes semicondutores dopados com impurezas trivalentes são conhecidos como semicondutores *tipo p* (positivo), já que possuem os buracos ou lacunas que se comportam como uma carga positiva livre capaz de atrair um elétron externo.

Assim, percebe-se que é fácil controlar a condutividade de um semicondutor dopado, já que ela depende da concentração relativa dos átomos da impureza. A inclusão de quantidades muito pequenas de uma impureza pode resultar em um aumento de várias ordens de grandeza na condutividade de um semicondutor.

Além da dopagem, estudos mostraram que se pode melhorar ainda mais o funcionamento dos semicondutores por meio das junções destes, utilizando semicondutores *tipo n* e *tipo p*, como mostra a Figura 13.

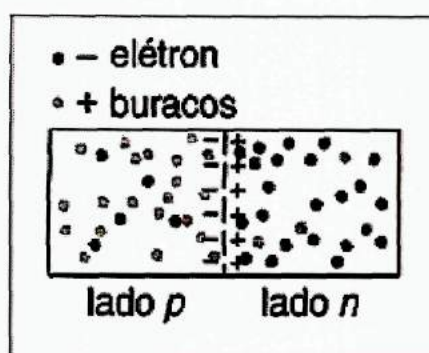


Figura 13. Junção pn. Por causa da diferença de concentrações, os buracos se difundem do lado p para o lado n e os elétrons se difundem do lado n para o lado p; em consequência, aparece uma camada dupla de cargas na junção, com as cargas negativas do lado p e as cargas positivas do lado n.

(fonte: TIPLER, P., LLEWELLYN, R., p. 312)

Na prática, os dois tipos de semicondutores são obtidos no mesmo cristal de silício, dopando-se o material com impurezas doadoras de um lado e impurezas aceitadoras do outro. Quando os dois tipos de semicondutores (*n* e *p*) são postos em contato, estes apresentam concentração desigual de elétrons e buracos, ocasionando a difusão de elétrons no lado *p* e de buracos no lado *n* até que o equilíbrio seja estabelecido, ou seja, quatro ligações covalentes em cada átomo.

Este processo de intercâmbio de cargas é extremamente rápido e continuará até que na divisa entre os dois materiais, denominada camada de depleção (Figura 14), seja formada uma barreira de potencial que impede a passagem de um lado para o outro.

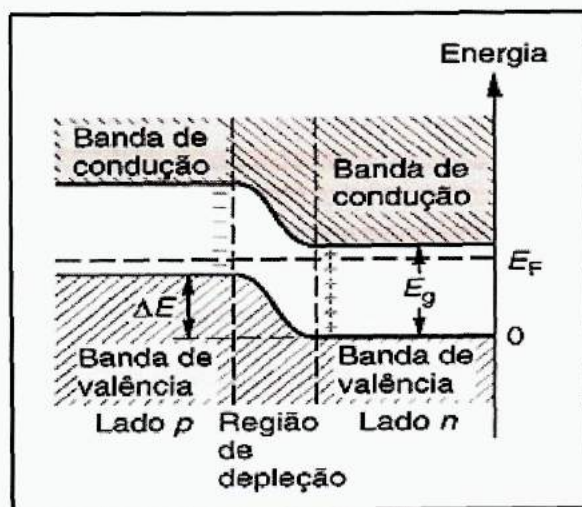


Figura 14. Níveis de energia dos elétrons em uma ligação pn não polarizada.

(fonte: TIPLER, P., LLEWELLYN, R., p. 313)

Ao ligar-se uma bateria a um semiconductor *tipo n-p* com o pólo positivo ligado ao lado *n* e o pólo negativo ligado ao lado *p* obtém-se o circuito mostrado na Figura 15 (a). Ao estabelecer-se esta ligação, denominada polarização inversa, observa-se um grande aumento das cargas positivas no lado *n* e negativas no lado *p*, acarretando no alargamento da região de depleção e criando uma resistência muito elevada à passagem de corrente. Esta ligação comporta-se como um material isolante.

Invertendo-se a polaridade da bateria, ou seja, o pólo positivo ligado ao lado *p* e o pólo negativo ao lado *n*, obtém-se o circuito formado na Figura 15 (b). Esta ligação é denominada polarização direta, onde haverá uma diminuição considerável das cargas elétricas da junção, fazendo com que a região de depleção se estreite e a difusão de elétrons e buracos aumente, ocorrendo, assim, a passagem de corrente no circuito. Esta ligação comporta-se como um material condutor.

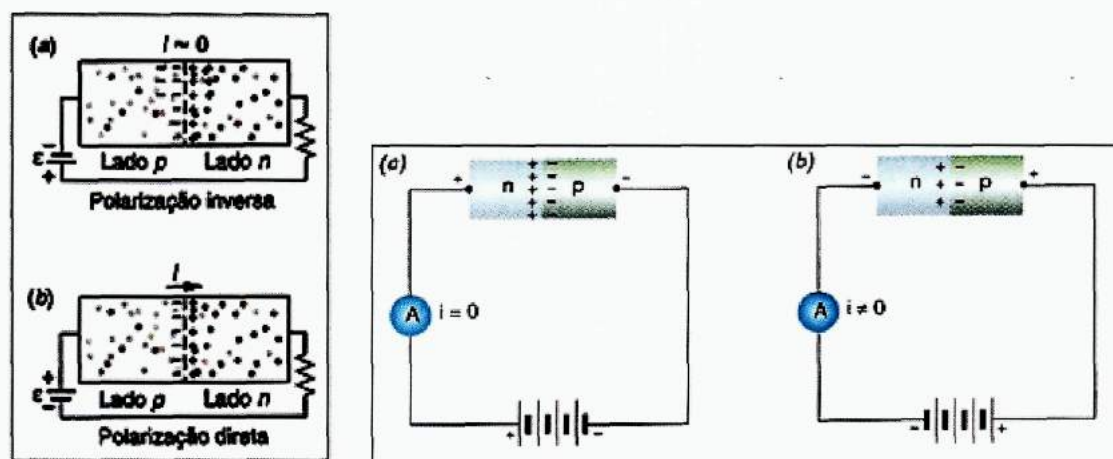


Figura 15. Junção pn polarizada. (a) Polarização inversa, a corrente é nula e, em (b) Polarização direta, há passagem de corrente.

(fonte: TIPLER, P., LLEWELLYN, R., p. 313 / MÁXIMO, A. e ALVARENGA, B., p. 201)

Podemos concluir que um semiconductor de junção *n-p* se comporta como uma válvula diodo, deixando a corrente elétrica fluir no sentido de *p* para *n* e impedindo a passagem da corrente no sentido de *n* para *p*. Um semiconductor *n-p* poderá ser usado como um retificador de corrente do mesmo modo que uma válvula diodo, caracterizando-se como um diodo semiconductor.

O diodo semicondutor substituiu as antigas válvulas de mesmo nome, pois é bem mais econômico, não provoca aquecimento inconveniente nos aparelhos, funciona rapidamente quando ligado e é muito menor e mais durável.

3.3 – Diodo Emissor de Luz – LED

Podemos verificar a importância do diodo na utilização de equipamentos computadorizados ou que utilize ondas de rádio. O emprego do diodo semicondutor depende da tecnologia usada na sua fabricação, podendo ser diodos retificadores, de sinais, de computação, de alta frequência, estabilizadores de tensão e diodos especiais.

Dentre esta variedade de diodos, será abordado apenas um dos tipos de diodos especiais, chamado LED, objeto de análise deste trabalho. LED é a sigla em inglês para Light Emitting Diode, ou Diodo Emissor de Luz. Este dispositivo faz dezenas de diferentes tarefas no cotidiano e é hoje encontrado nos mais diferentes tipos de dispositivos eletrônicos. Entre outras coisas, ele faz parte de relógios digitais, transmite informação por controle remoto, e indica quando os aparelhos eletrônicos estão em operação. Pode ser arrumado para criar imagens, controlar o tráfego como sinalizadores ou na iluminação pública.

3.3.1 – O LED

Basicamente o LED (Figura 16) é uma pequena lâmpada que pode ser encaixada facilmente em circuitos eletrônicos. Mas, diferentemente da lâmpada incandescente, ele não possui um filamento que é aquecido e não se aquece enormemente em relação ao ambiente. Ele emite luz somente devido ao movimento dos elétrons no material semicondutor, e este tem uma durabilidade comparável aos diodos tradicionais.

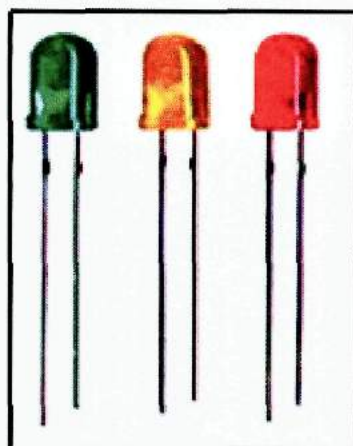


Figura 16 – LEDs utilizados em computadores, controles remotos, rádio e outros aparelhos eletrônicos.

(fonte: <http://eficienciaenergtica.blogspot.com/2008/08/led-i.html>)

O LED é um diodo semicondutor (junção p-n) capaz de converter certa quantidade de energia elétrica em luz visível. Como todo diodo, o LED emite luz quando é polarizado diretamente (condutor) e, quando é polarizado inversamente (isolante), ele não funciona.

A luz emitida pelo LED é monocromática e é produzida pelas interações energéticas do elétron. O processo de emissão de luz pela aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado *eletroluminescência*. Em qualquer junção p-n polarizada diretamente, dentro da estrutura, próximo à junção, ocorrem recombinações de buracos e elétrons. Essa recombinação exige que a energia desse elétron, que até então era livre, seja liberada, o que pode ocorrer na forma de calor ou fótons de luz.

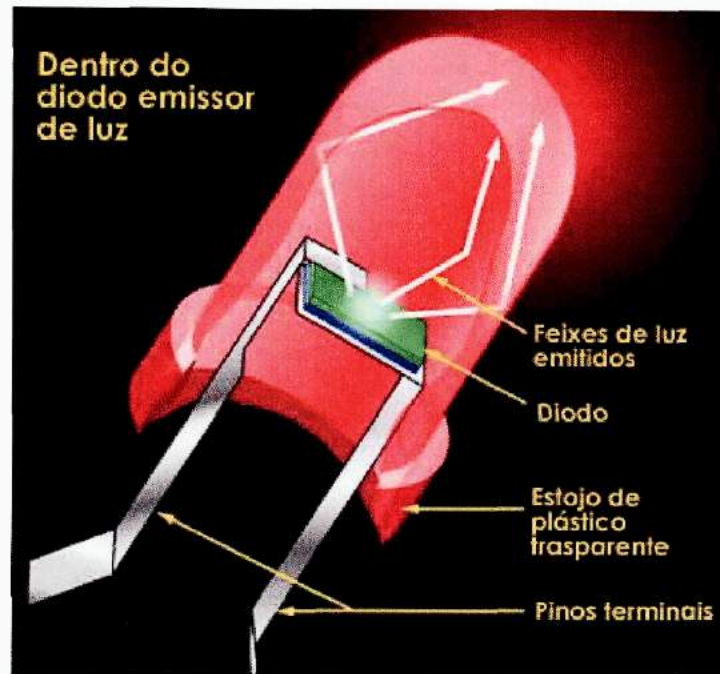


Figura 17 – Cores disponíveis para o LED.

(fonte:

http://www.eletrica.ufu.br/pastas/Ciencia_e_Tecnologia_dos_Materiais/Apostila_CTM_PARTE_2.pdf)

No silício e no germânio, que são os elementos básicos dos diodos e de outros componentes eletrônicos, a maior parte da energia é liberada na forma de calor, sendo insignificante a luz emitida (devido à capacidade do material), e os componentes que trabalham com maior capacidade de corrente chegam a precisar de irradiadores de calor (dissipadores) para ajudar na manutenção dessa temperatura em um patamar tolerável. Já em outros materiais, como o Arsenieto de Gálio (GaAs) ou o Fosfato de Gálio (GaP), o número de fótons de luz emitido é suficiente para constituir fontes de luz eficientes.

A forma simplificada da junção p-n de um LED é demonstrada em seu processo de eletroluminescência. Como já foi dito, a luz emitida pelo LED é monocromática e a sua cor depende do cristal e da impureza de dopagem com que o componente é fabricado. O LED que utiliza o Arsenieto de Gálio emite radiações infra-vermelhas. Dopando-se com fósforo, a emissão pode ser vermelha ou amarela, de acordo com a concentração. Utilizando-se Fosfato de Gálio com dopagem de nitrogênio, a luz emitida pode ser verde ou amarela. Hoje em dia, com o uso de outros materiais, consegue-se fabricar LEDs que emitem luz azul, violeta e até ultravioleta. Existem também os LEDs brancos, mas esses são geralmente LEDs

emissores de cor azul, revestidos com uma camada de fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes, que absorve a luz azul e emite a luz branca.



Figura 18 – Cores disponíveis para o LED.

(fonte: <http://www.btuning.kit.net/biznovo/ccc/led.jpg>)

Pelo seu baixo preço de venda, alto rendimento e grande durabilidade, esses LEDs tornam-se ótimos substitutos para as lâmpadas comuns, e devem substituí-las a médio ou longo prazo. Existem também os LEDs brancos, que podem ser formados de duas maneiras: a primeira através do revestimento de Fósforo no chip de cor azul ou ultravioleta, e a segunda é o chamado RGB, que é formado por três "chips", um vermelho (R de red), um verde (G de green) e um azul (B de blue). Uma variação dos LEDs RGB são os LEDs com um micro-controlador integrado, o que permite que se obtenha um verdadeiro show de luzes utilizando apenas um LED.

Em geral, os LEDs operam com nível de tensão de 1,6 a 3,3V, sendo compatíveis com os circuitos de estado sólido. É interessante notar que a tensão é dependente do comprimento da onda emitida. Assim, os LEDs infra-vermelhos geralmente funcionam com menos de 1,5V, os vermelhos com 1,7V, os amarelos com 1,7V ou 2.0V, os verdes entre 2.0V e 3.0V, enquanto os LEDs azul, violeta e ultra-violeta geralmente precisam de mais de 3V. A potência necessária está na faixa típica de 10 a 150 mW, com um tempo de vida útil de 100.000 horas ou mais.

Por operarem em baixa tensão, os LEDs devem ser ligados a um resistor, e o resistor à fonte de energia. O resistor funciona como limitador de corrente elétrica e

promove uma queda de tensão, fazendo com que o LED receba uma tensão menor. Se estivesse ligado diretamente à fonte de energia, o LED não resistiria à grande tensão aplicada e, após alguns segundos de funcionamento, ele queimaria.

Sendo polarizado, a maioria dos fabricantes adota um "código" de identificação para a determinação externa dos terminais A (anodo) e K (catodo) dos LEDs. Nos LEDs redondos, duas codificações são comuns: identifica-se o terminal K como sendo aquele junto a um pequeno chanfro na lateral da base circular do seu invólucro ("corpo"), ou por ser o terminal mais curto dos dois. Existem fabricantes que adotam simultaneamente as duas formas de identificação. Nos LEDs retangulares, alguns fabricantes marcam o terminal K com um pequeno "alargamento" do terminal junto à base do componente, ou então deixam esse terminal mais curto. Mas, pode acontecer de o componente não trazer qualquer referência externa de identificação dos terminais. Nesse caso, se o invólucro for semi-transparente, pode-se identificar o catodo (K) como sendo o terminal que contém o eletrodo interno mais longo do que o eletrodo do outro terminal (anodo). Além de mais longo, às vezes o catodo é mais baixo do que o anodo.

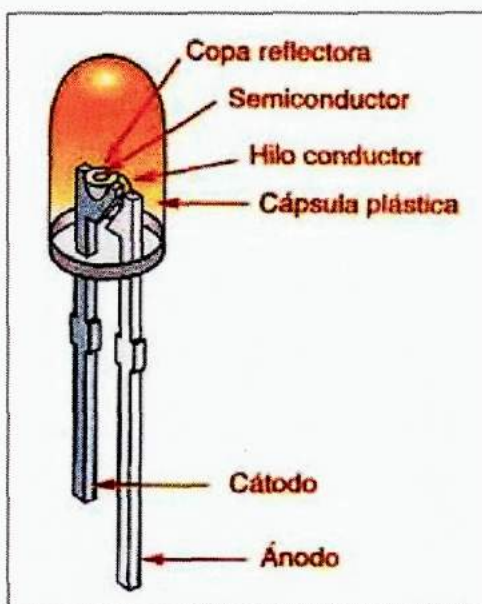


Figura 19 – Estrutura do LED.

(fonte: <http://foro.acuarios.es/bricolaje/3276-luz-luna-facil-facil-2.html>)

Há também LEDs bicolores, que são constituídos por duas junções de materiais diferentes em um mesmo invólucro, de modo que uma inversão na polarização muda a cor da luz emitida de verde para vermelho, e vice-versa. Existem

ainda LEDs bicolores com três terminais, sendo um para acionar a junção dopada com material para produzir luz verde, outro para acionar a junção dopada com material para gerar a luz vermelha, e o terceiro comum às duas junções, como mostra a Figura 20. O terminal comum pode corresponder à interligação dos anodos das junções (LEDs bicolores em *anodo comum*) ou dos seus catodos (LEDs bicolores em *catodo comum*).

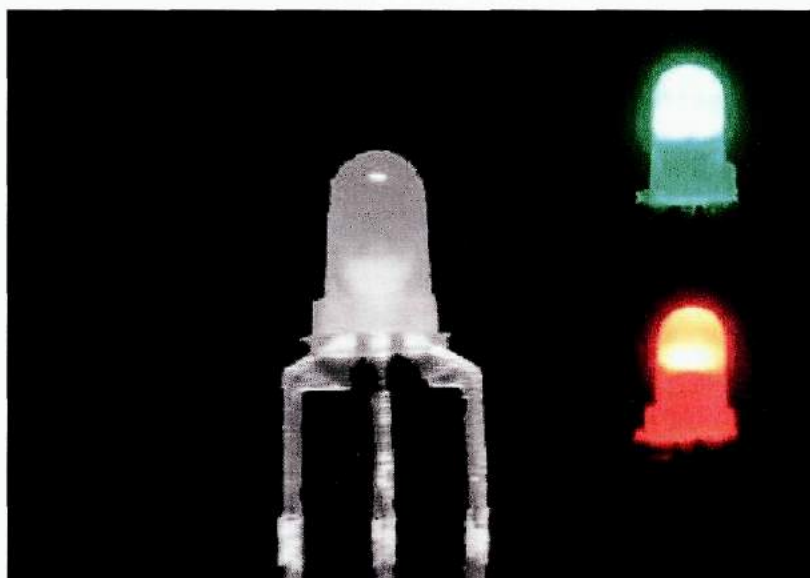


Figura 20 – Estrutura do LED bicolores.

(fonte: http://www.effiled.com/images/products/bicolor-led/throughhole-led/3mm_Bin_Color_LED_RG.jpg)

Embora normalmente seja tratado por LED bicolor (vermelho+verde), esse tipo de LED é na realidade um "tricolor", já que além das duas cores independentes, cada qual gerada em uma junção, essas duas junções podem ser simultaneamente polarizadas, resultando na emissão de luz alaranjada.

Capítulo 4 - Roteiros Experimentais

Neste capítulo serão demonstradas várias aplicações do LED, algumas delas perceptíveis no nosso cotidiano. Esta preocupação de demonstrar na prática a teoria visa aproximar o aluno à sua realidade, pois é muito comum vermos nas escolas de ensino fundamental e médio a apresentação de princípios e equações para memorização, sem a preocupação de demonstrar aos alunos como foram obtidos os resultados. Nesse respeito, os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio solicitam:

“O ensino de Física tem-se realizado frequentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. Privilegia a teoria e a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual da abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos. Enfatiza a utilização de fórmulas, em situações artificiais, desvinculando a linguagem matemática que essas fórmulas representam de seu significado físico efetivo.”
(PCN, 2000)

Além disso, o tema tratado nesta monografia também vai de encontro à orientação dada pelos PCNEM's sobre o currículo da Física:

“Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores.” (PCN, 2000)

Dadas estas premissas, algumas experiências foram desenvolvidas para mostrar a aplicação da eletrônica moderna, objetivando atender alguns aspectos

fundamentais necessários para a modernização curricular da educação no nosso país. Apresentaremos roteiros de três experimentos: o primeiro poderá ser aplicado no Ensino Fundamental e os outros no Ensino Médio.

Com referência ao método utilizado para o desenvolvimento destes experimentos, primeiramente foi apresentada a teoria aos alunos em sala de aula. Após, a turma foi encaminhada ao laboratório do colégio e dividida em cinco grupos de seis alunos. Cada aluno recebeu o roteiro experimental e um kit de materiais necessários e orientações para a montagem e realização dos experimentos. Após a obtenção do registro dos dados, os alunos responderam às questões que constam nos roteiros.

4.1 – Lanterna de LED

O professor de Física do 9º ano do Ensino Fundamental pode introduzir conhecimentos básicos sobre circuitos elétricos na sua aula, buscando compreender as aplicações no cotidiano. Mostramos a montagem de um circuito elétrico simples, utilizando o LED, para demonstrar aos alunos o funcionamento de uma lanterna.

Como pré-requisitos, o professor deverá ter apresentado aos alunos os conceitos sobre carga elétrica, condutores e isolantes, corrente elétrica, circuitos elétricos simples, resistência elétrica e instrumentos elétricos de medida. Deverá ser preparado um material para cada aluno com o resumo das teorias e a instrução de montagem da experiência.

Para o professor

Esta experiência tem por objetivo ensinar ao aluno como montar um circuito elétrico simples, aplicando as teorias sobre carga elétrica, condutores, isolantes, semicondutores, corrente elétrica, resistência elétrica e LED aprendidas em aula. Através da montagem da lanterna, o aluno poderá observar na prática os conceitos que aprende na escola.

O aluno tem a oportunidade de conhecer os elementos que compõem um circuito elétrico e o sentido correto de suas ligações. Nesta experiência ele pode

comprovar que o LED tem que estar conectado na posição correta para passar a corrente elétrica (ligação direta), senão ele não se comportará com um material condutor, e sim como um material isolante (ligação inversa).

Além disso, o aluno também conhecerá as características principais do LED e suas vantagens, entendendo melhor a importância da substituição das lâmpadas incandescentes pelos LEDs.

Roteiro do aluno

Experiência 1: Circuito elétrico simples com utilização de LED - lanterna

Fundamentação teórica

O LED é uma pequena lâmpada que substitui a lâmpada incandescente. Esta funciona quando um filamento de metal colocado no seu interior se aquece pela passagem de uma corrente. Os átomos têm seu grau de agitação aumentado de tal forma que ocorre a emissão de luz.



Figura 21 – Estrutura de uma lâmpada incandescente.
(fonte: <http://www.contra-ataque.com/forum/lofiversion>)

Por possuir um filamento aquecido que emite luz, a lâmpada incandescente consome muita energia e possui uma baixa durabilidade pelo fato de queimar facilmente. O LED emite luz somente devido ao movimento dos elétrons, possuindo uma durabilidade grande (em torno de 100 vezes maior que a lâmpada incandescente), tornando-se mais econômico.

Como todo diodo, o LED, para se comportar como um condutor de energia e, assim, emitir luz, ele deve ser polarizado diretamente, ou seja, o anodo (A) receberá a alimentação positiva e o catodo (K) receberá a alimentação negativa, conforme a Figura 22.

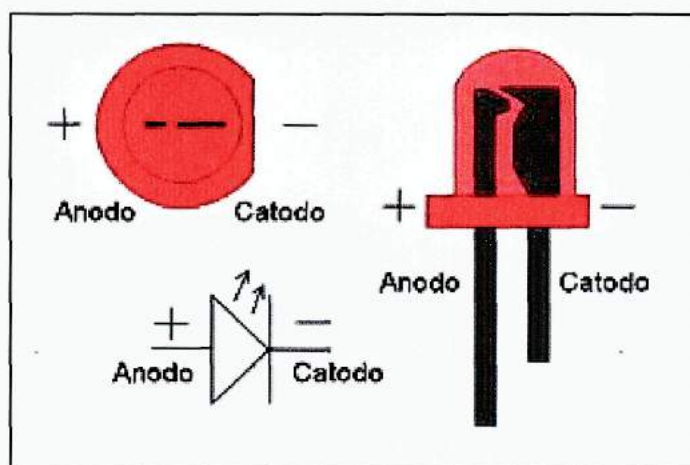


Figura 22 – Estrutura do LED.

(fonte: <http://www.ldengineering.com>)

O LED é caracterizado como um material semicondutor dopado, ou seja, ele é um material que necessita receber quantidades pequenas de certas substâncias, chamadas de impurezas ou dopantes, para conseguir alterar suas propriedades elétricas, transformando-se em um material condutor de energia.

A luz emitida pelo LED é monocromática (uma única cor) e sua cor depende do cristal e da impureza de dopagem com que o componente é fabricado. Existe o LED branco, que é geralmente o LED emissor de cor azul, revestido com uma camada de Fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes, que absorve a luz azul e emite a luz branca. O LED que utiliza o Arsenieto de Gálio emite radiação infra-vermelha. Dopando-se com Fósforo, a emissão pode ser vermelha ou amarela, de acordo com a concentração. Utilizando-se Fosfeto de Gálio com dopagem de Nitrogênio, a luz emitida pode ser verde ou amarela. Hoje em dia, com

o uso de outros materiais, consegue-se fabricar LEDs que emitem luz azul, violeta e até ultravioleta.

Como também sabemos, o LED deve ser ligado a um resistor que determina o valor da corrente que pode passar através dele, pois ele opera com uma baixa tensão e, se for ligado diretamente a uma pilha ou bateria, ele não resistiria à tensão aplicada e após alguns segundos de funcionamento queimaria.

Materiais

- 1 LED branco;
- 1 resistor de 47 ohms (amarelo, violeta, preto);
- 1 suporte de pilhas;
- 2 pilhas AA;
- 4 cabos banana-banana;
- 8 conectores simples;
- 1 tábua de madeira de aproximadamente 20 cm x 20 cm;
- 1 interruptor.

Esquema Experimental

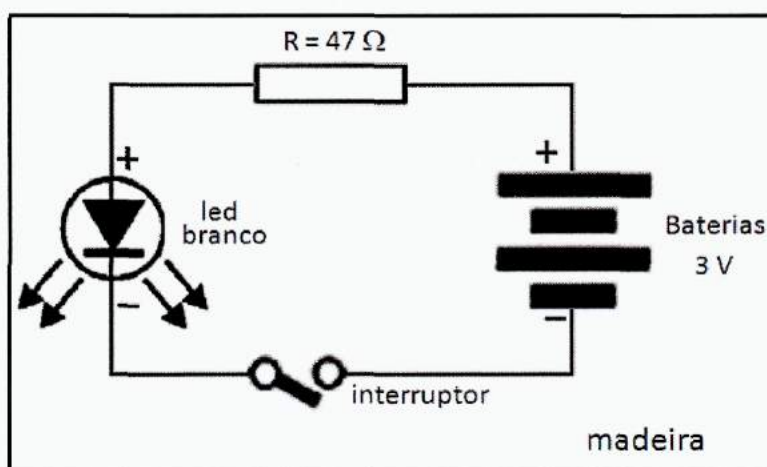


Figura 23: Esquema experimental para montagem de uma lanterna

Construção

Fixe o suporte das pilhas, o resistor, o LED branco e o interruptor, já com seus devidos conectores presos, na base de madeira, de acordo com a Figura 24.

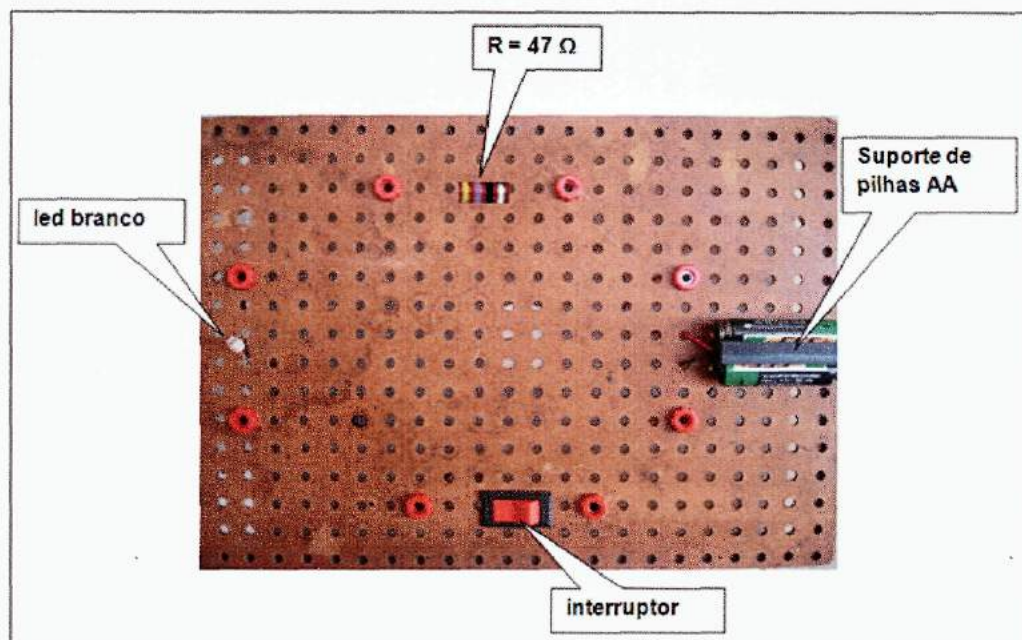


Figura 24: Esquema para montagem de circuito elétrico

Instruções para montagem

Ligue os cabos banana-banana nos conectores da seguinte forma: da bateria ao resistor, do resistor ao LED, do LED ao interruptor e do interruptor à bateria, conforme a Figura 25.

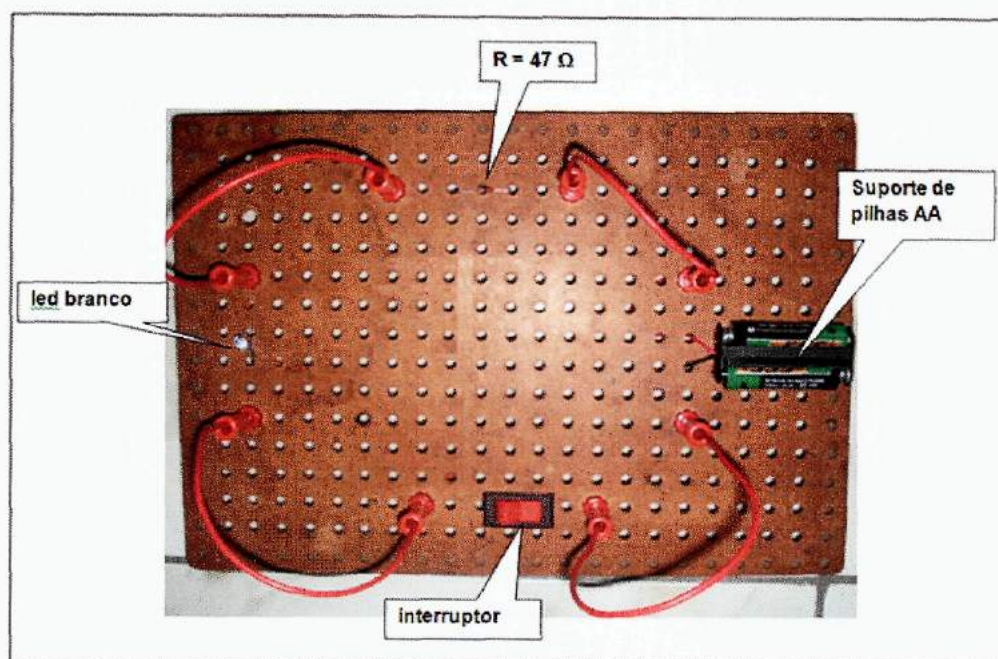


Figura 25: Circuito da lanterna - conexão dos equipamentos

Ligue o interruptor para que sua lanterna funcione, como mostra a Figura 26. Depois você poderá montar os componentes da lanterna num tubo de papelão ou de plástico.

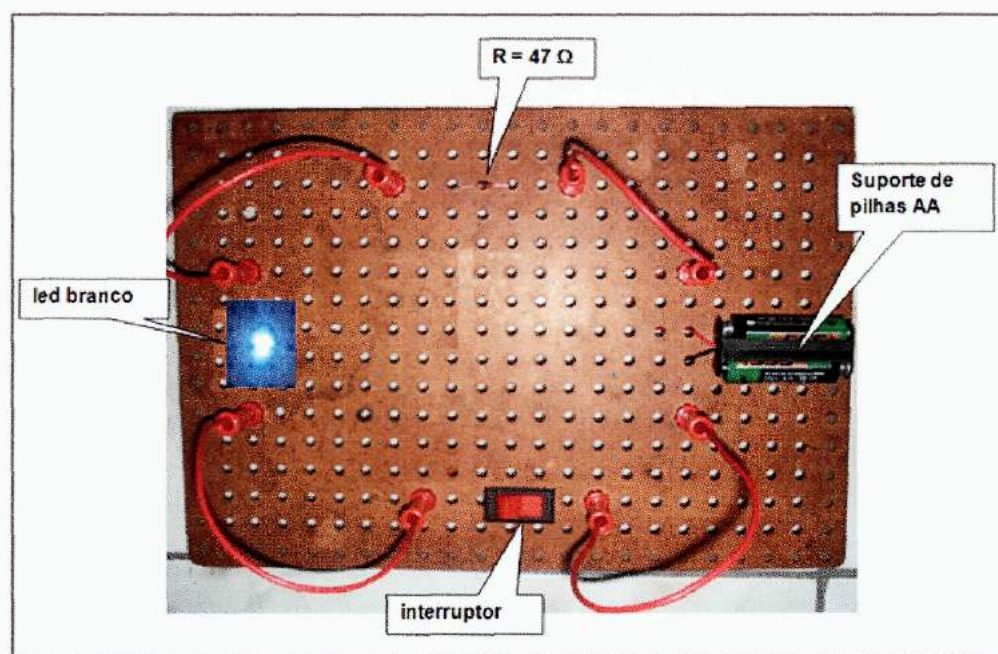


Figura 26: Esquema de circuito elétrico concluído

Questões:

1. Qual é a razão das lâmpadas incandescentes não serem econômicas?
2. Qual o nome dado aos pólos de um LED?
3. Como se obtém o LED que emite luz branca?
4. Explique o tipo de material e a dopagem necessária para a criação do LED de cor amarela.
5. Explique como é o comportamento dos materiais condutores e isolantes.
6. Qual é a função do interruptor e da bateria no circuito elétrico apresentado?

4.2 – O Semáforo

Esta experiência mostra a construção de um semáforo simples, onde serão abordados os conceitos de polarização direta e inversa de um circuito elétrico.

Como pré-requisitos, o professor deverá ter apresentado aos alunos os conceitos sobre carga elétrica, condutores e isolantes, corrente elétrica, circuitos elétricos simples, resistência elétrica, lei de Ohm, associação de resistores e instrumentos elétricos de medida. Deverá ser preparado um material para cada aluno com o resumo das teorias e a instrução de montagem da experiência.

Para o professor

Esta experiência tem por objetivo ensinar ao aluno como montar um circuito elétrico e levar ele a compreender novas alternativas para o uso eficiente da energia nas cidades através da substituição das lâmpadas comuns por LEDs.

Através da montagem dos semáforos, um com lâmpadas incandescentes (1ª parte) e outro com LED (2ª parte), o aluno terá a oportunidade de entender como funciona o circuito retificador. Na 1ª parte da experiência, inserimos os diodos juntos às lâmpadas incandescentes, pois foi necessária sua introdução para aplicarmos na prática os conceitos de polarização direta e inversa atuando no circuito. Na 2ª parte da experiência, não foi necessário manter os diodos, pois as lâmpadas de LED já possuem um circuito retificador próprio.

Além disso, o aluno também conhecerá algumas vantagens e importância da substituição das lâmpadas incandescentes pelos LEDs nos sistemas semaforicos, já que isto influencia na economia de energia, bem como na redução da reflexão da luz solar no semáforo, evitando acidentes de trânsito.

Roteiro do aluno

Experiência 2: Funcionamento do Semáforo de LED

Fundamentação teórica

Em algumas cidades do Brasil, como Curitiba, Florianópolis, Porto Alegre e São Paulo, utiliza-se o LED em substituição às lâmpadas incandescentes nos semáforos. Isto se dá pelo fato do LED ser mais econômicos, além de ter durabilidade muito maior que a das lâmpadas comuns.

A lâmpada incandescente consome muita energia porque precisa ser aquecida para emitir luz, além de queimar com mais facilidade devido a este aquecimento, tornando-se mais dispendiosa. O LED emite luz somente devido ao movimento dos elétrons no material semicondutor e tem uma vida útil 100 vezes maior que a lâmpada incandescente.

Outra vantagem da utilização do LED nos semáforos é a redução do índice de reflexão da luz solar, eliminando a falsa impressão de uma lâmpada indevida estar acesa nas situações de reflexão da luz do Sol no semáforo, cedo pela manhã ou no final da tarde, evitando acidentes de trânsito. Isto foi verificado nos testes realizados pelo CALTRANS (Departamento de Transportes do Estado da Califórnia), onde se concluiu que o índice de reflexão da luz do Sol é 50% mais baixo nos semáforos a LED do que na tecnologia convencional.

Além disso, a lente usada nos semáforos é composta de inúmeras lâmpadas de LED, que funcionam de maneira independente umas das outras. Então, a queima de uma pequena quantidade de LEDs não afeta totalmente a transmissão do sinal luminoso.

Também se pode destacar a vantagem do semáforo de LED poder ser ligado através de baterias, quando houver problemas no fornecimento de energia elétrica,

já que uma de suas características principais é possuir um baixo consumo energético.

Para entender e explicar o funcionamento do semáforo, primeiramente será necessário relembrar os conceitos dos materiais condutores, isolantes e semicondutores.

O que caracteriza a condutividade de um material é o tipo de átomos que o constitui e os seus níveis de energia, que são divididos em banda de valência (faixa onde se encontram os elétrons presos aos átomos), banda de condução (faixa onde os elétrons estão livres) e uma região proibida, que divide as duas faixas.

Chamam-se de materiais condutores aqueles que possuem elétrons livres na camada mais externa e que possuem uma região proibida pequena, fazendo com que a banda de condução esteja próxima à banda de valência, permitindo que estes elétrons da banda de valência saltem com facilidade para a de condução, transportando carga elétrica.

Chamam-se de materiais isolantes os que não possuem elétrons livres e que têm uma região proibida relativamente grande, impedindo a passagem de carga elétrica.

Os materiais semicondutores a temperatura de 0 K apresentam um pequeno número de elétrons livres. Porém, quando aumenta para temperatura ambiente, em torno de 298 K (25° C), também aumenta a agitação térmica, fazendo com que um grande número de elétrons se desprenda dos átomos. Como a região proibida é relativamente pequena, estes elétrons conseguem passar para a banda de condução, gerando carga elétrica.

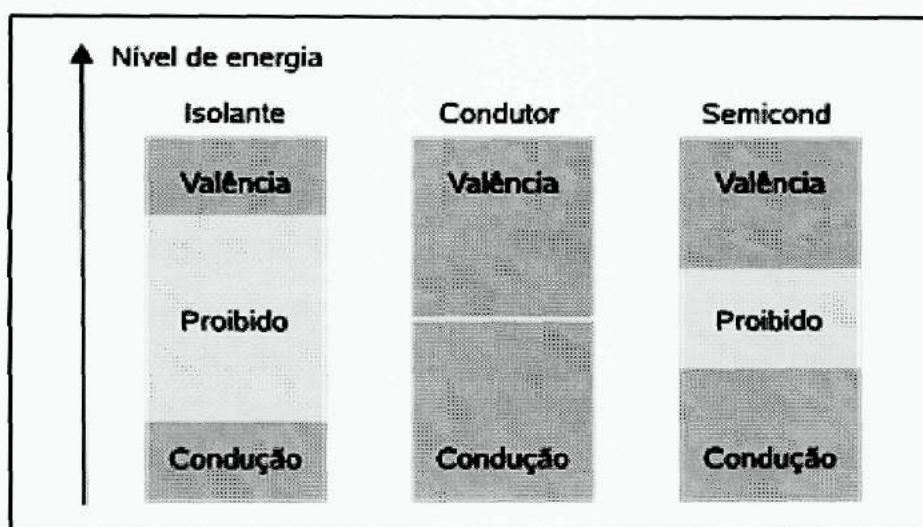


Figura 27. Representação esquemática dos níveis de energia em um cristalino.
(fonte: http://www.mspc.eng.br/eletro/im01/semic_010.png)

Para entender como a luz vermelha e verde do semáforo somente acende uma de cada vez, serão lembrados os conceitos de polarização direta e inversa do diodo.

Os metais usados como impureza podem ter átomos trivalentes ou pentavalentes, isto é, com três ou cinco elétrons na última camada. Se na dopagem usarmos impurezas trivalentes (ou aceitadoras), cria-se, no cristal, portadores de carga positiva ou lacunas, pois, para participar da ligação covalente o átomo da impureza necessita de um elétron para completar sua última camada com quatro elétrons. Este cristal é chamado de positivo ou *p*. Porém, se na dopagem usarmos impurezas pentavalentes ou doadoras, cria-se no cristal elétrons livres, pois para participar da ligação covalente o átomo da impureza doa um elétron que estava em excesso. Este elétron pode então ser considerado livre. Este cristal é chamado de negativo ou *n*.

No elemento *p* os átomos que se ionizam são os das impurezas aceitadoras e no elemento *n* os das impurezas doadoras. Esta região ionizada entre os elementos *p* e *n* é dotada de um campo eletrostático negativo, no lado *p* e positivo no lado *n*, formando a *junção n-p* ou *p-n*.

Ao ligar-se uma fonte de energia a um semiconductor tipo *n-p*, com o pólo positivo ligado ao lado *n* e o pólo negativo ligado ao lado *p*, obtém-se a polarização inversa, onde se observa um grande aumento das cargas positivas no lado *n* e negativas no lado *p*, acarretando no alargamento da região de depleção e criando

uma resistência muito elevada à passagem de corrente. Esta ligação comporta-se como um material isolante. Invertendo-se a polaridade da fonte, ou seja, o pólo positivo ligado ao lado p e o pólo negativo ao lado n, obtém-se a polarização direta, onde haverá uma diminuição considerável das cargas elétricas da junção, fazendo com que a região de depleção se estreite e a difusão de elétrons e buracos aumente, ocorrendo, assim, a passagem de corrente no circuito. Esta ligação comporta-se como um material condutor. A Figura 28 mostra a representação da polarização direta e inversa.

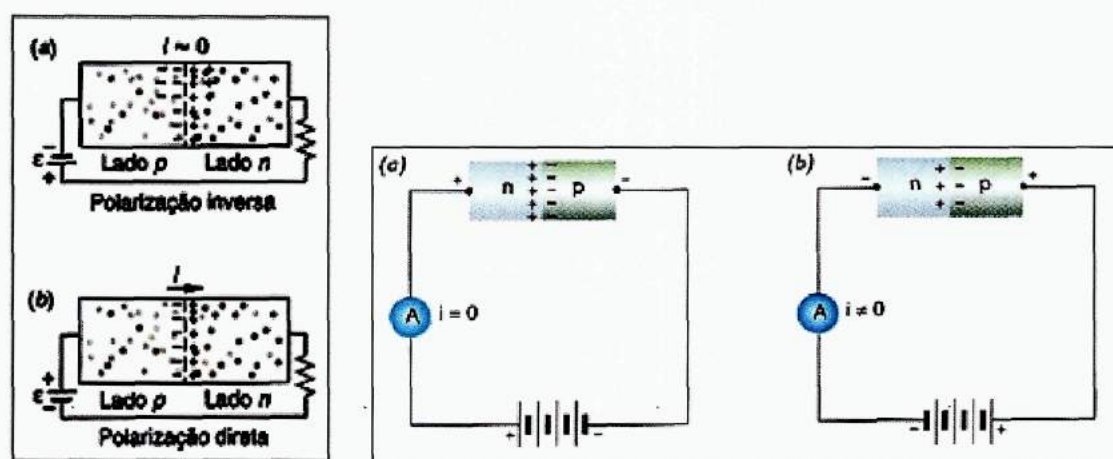


Figura 28. Junção pn polarizada. (a) Polarização inversa, a corrente é nula e, em (b) Polarização direta, há passagem de corrente.

(fonte: TIPLER, P., LLEWELLYN, R., p. 313 / MÁXIMO, A. e ALVARENGA, B., p. 201)

Materiais

- 2 lâmpadas de LEDs nas cores vermelho e verde (1W, 127V);
- 2 lâmpadas incandescentes (15W, 127V);
- 4 cabos com garra jacaré;
- 1 tábua de madeira de aproximadamente 50 cm x 50 cm;
- 1 tomada;
- 2 bocais para as lâmpadas;
- Fio condutor 0,5 mm²;
- 4 diodos 1N4007.

Esquema Experimental

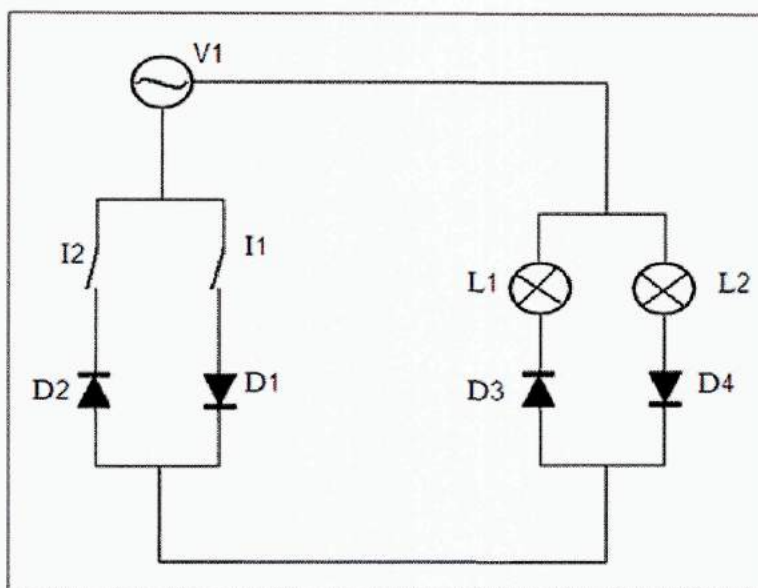


Figura 29: Esquema experimental para montagem de um semáforo

V1 – fonte de tensão alternada (127V), I1 – interruptor1, I2 – interruptor2, D1=D2=D3=D4 – diodo 1N4007 e L1=L2 – lâmpada.

Construção

1ª Parte:

Fixe os 2 interruptores, a tomada, os bocais, os fios e os diodos na base de madeira, no formato e ordem demonstrados na Figura 30 abaixo;

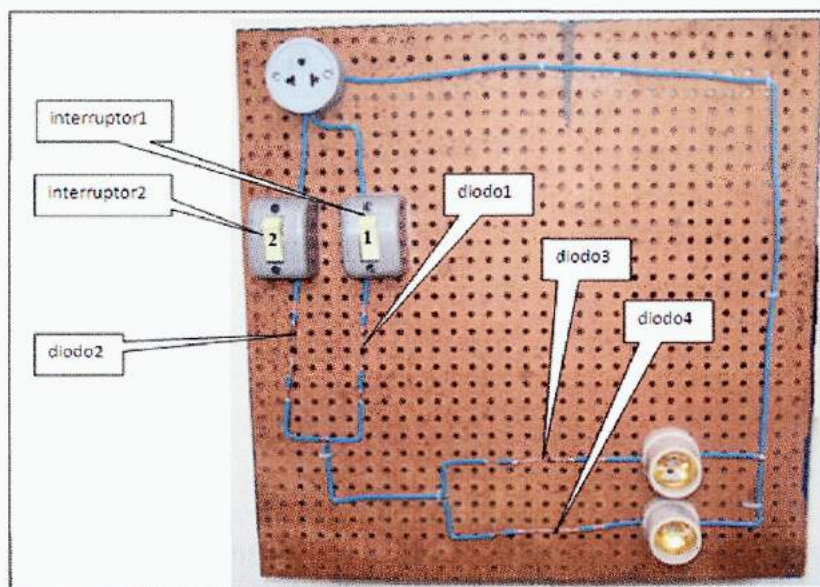


Figura 30: Montagem do circuito elétrico

Instruções para montagem

Encaixe as lâmpadas incandescentes nos bocais. Ligue o interruptor 1 e observe que o diodo D1 irá retificar o semi-ciclo positivo da tensão. Logo, apenas o diodo D3 ficará diretamente polarizado, funcionando como uma chave fechada e acenderá a lâmpada incandescente 1 (Figura 31).

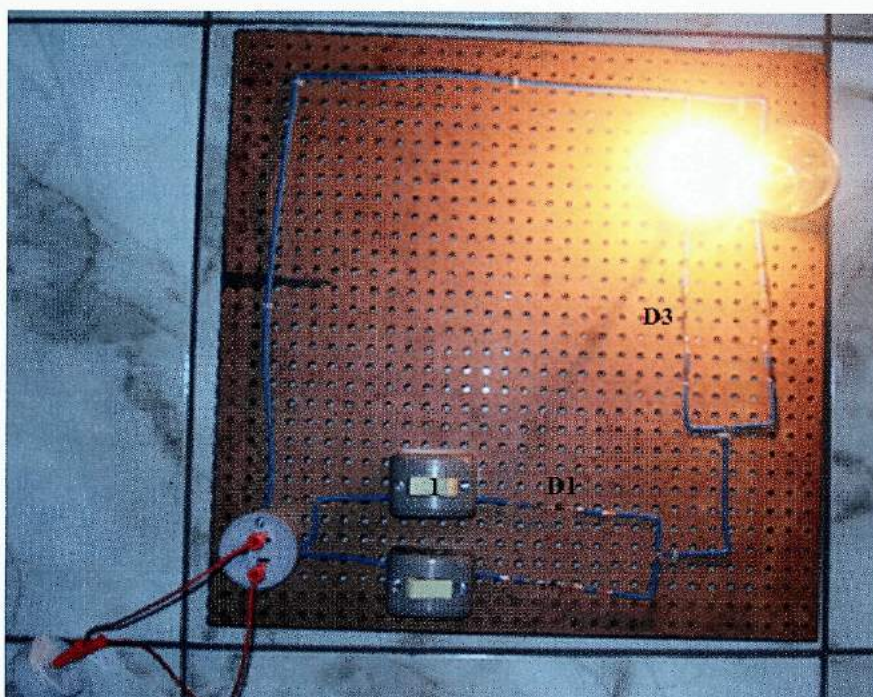


Figura 31: Retificação do semi-ciclo positivo da tensão

Ligue o interruptor 2 e observe que o diodo D2 irá retificar o semi-ciclo negativo da tensão. Logo, apenas o diodo D4 ficará diretamente polarizado, funcionando como uma chave fechada e acenderá a lâmpada incandescente 2 (Figura 32).

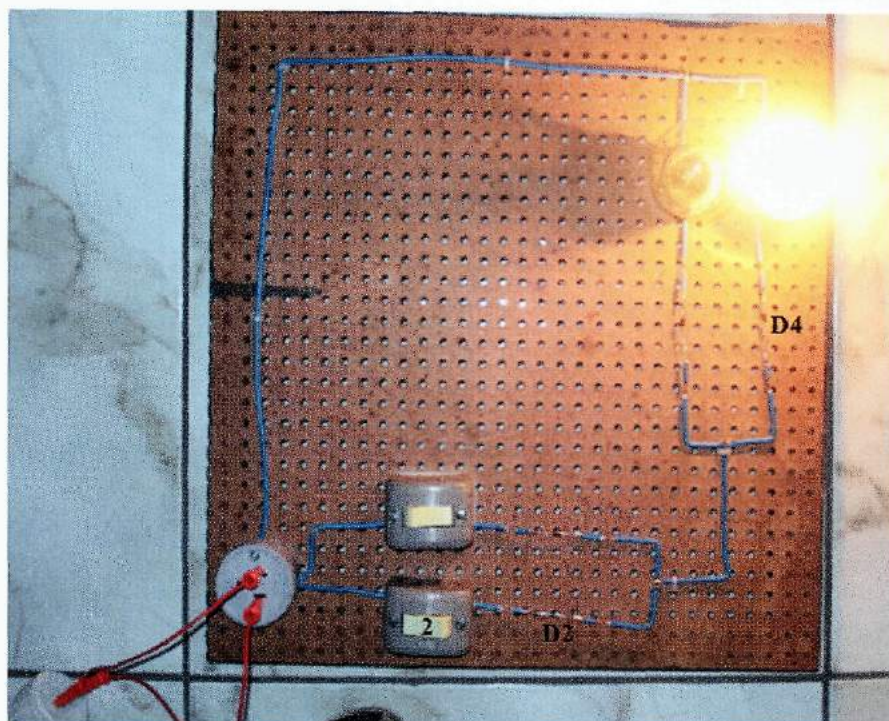


Figura 32: Retificação do semi-ciclo negativo da tensão

2ª Parte:

Utilizando a mesma montagem da 1ª parte, apenas acrescentaremos cabos com garra jacaré nos diodos D1 e D3 e, posteriormente, nos diodos D2 e D4. A inserção desses cabos é necessária para fazer um curto-circuito nos diodos, pois as lâmpadas de LEDs já têm um circuito retificador, o que elimina os diodos.

Instruções para montagem

Conecte os cabos com garra jacaré nos diodos D1 e D3 e, após conectados, ligue o interruptor 1. A lâmpada de LED verde acende, conforme se observa na Figura 33.

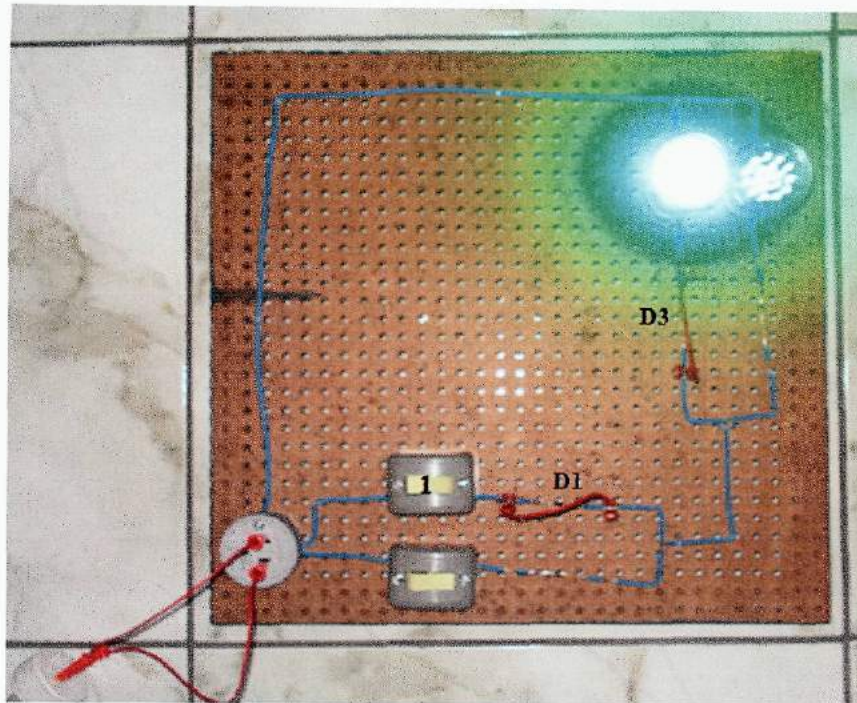


Figura 33: Curto-circuito nos diodos D1 e D3 para acendimento da lâmpada de LED verde

Desconecte os cabos com garra jacaré dos diodos D1 e D3 e, posteriormente, conecte-os nos diodos D2 e D4. Após conectados, ligue o interruptor 2 e observe que a lâmpada de LED vermelha acende, como mostra a Figura 34.

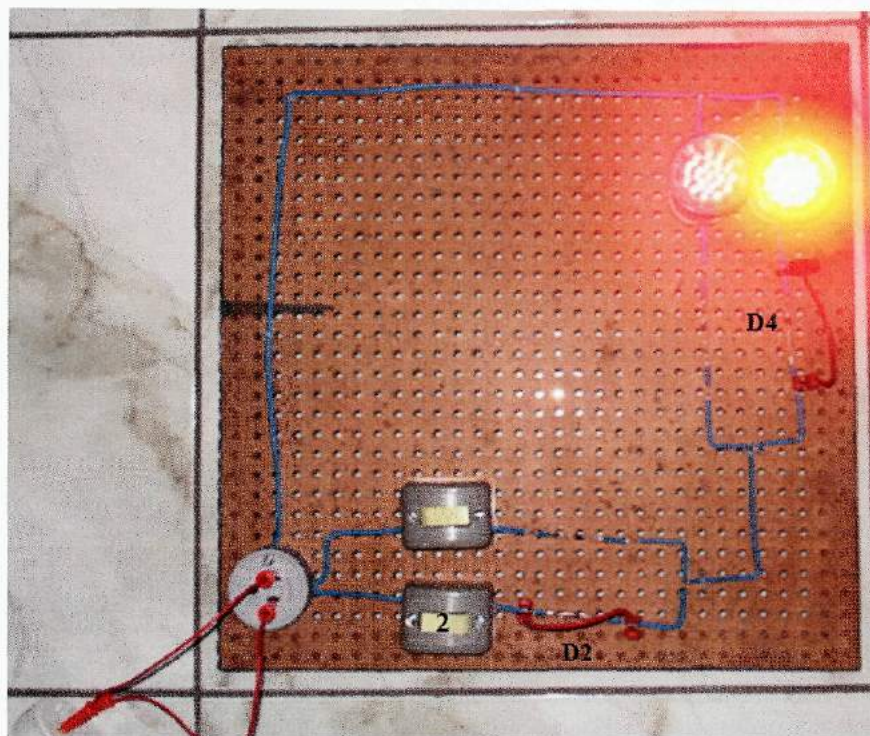


Figura 34: Curto-circuito nos diodos D2 e D4 para acendimento da lâmpada de LED vermelha

Questões:

1. Qual é a vantagem das lâmpadas incandescentes serem substituídas pelos LEDs?
2. A utilização dos LEDs nos semáforos pode reduzir o índice de acidentes de trânsito. Justifique a afirmativa.
3. O que faz a diferença entre os materiais condutores, isolantes e semicondutores.
4. Como funciona a polarização direta e inversa nos semicondutores.

4.3 – A Constante de Planck

O professor pode proporcionar aos alunos a oportunidade de montar um circuito elétrico e realizar um experimento simples relacionado à Física Moderna. Para isso, é importante que o professor introduza os fundamentos teóricos para compreender a constante de Planck, utilizando um experimento simples montado com LEDs. Deverá ser preparado um material para cada aluno com o resumo da teoria e a instrução de montagem da experiência.

Para o professor

Este trabalho é interessante para os alunos do Ensino Médio, pois permite determinar experimentalmente uma constante fundamental da Física Quântica.

Apesar do experimento ser de baixo custo, bastante simples e a observação do instante em que o LED acende utilizar informação apenas visual, os desvios percentuais são pequenos. No entanto, o experimento pode ser melhorado através de uma estimativa mais precisa da ddp. Para isto, pode-se associar um amperímetro ao experimento, construir a curva característica do LED e estimar a ddp de corte através do processo de extrapolação. Porém, os resultados obtidos sugerem que, para fins didáticos de aplicação com alunos do 3º ano do Ensino Médio, a observação visual pode ser utilizada como uma boa aproximação.

Os resultados da determinação da Constante de Planck também podem ter uma maior precisão se obtivermos o valor do comprimento de onda dos LEDs

indicado pelo fabricante. Caso contrário, seria necessário utilizar experimentos mais elaborados para determinar os comprimentos de onda da luz emitida pelos LEDs.

Roteiro do aluno

Experiência 3: Determinação experimental da Constante de Planck

Fundamentação teórica

Uma junção *p-n* pode emitir luz. Quando um elétron na base da banda de condução de um semicondutor cai em uma lacuna no topo da banda de valência, uma energia *E* é liberada, onde *E* é a largura da banda proibida. Existem pelo menos duas possibilidades para o que acontece com esta energia liberada. Ela poderia ser transformada em energia interna da rede em vibração. Em alguns materiais semicondutores a energia emitida pode aparecer como uma radiação eletromagnética com comprimento de onda dada pela combinação das Eqs. 1 e 2 por

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

$$E = h f \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{c}{E/h} = c \cdot \frac{h}{E} \rightarrow \lambda = \frac{c \cdot h}{E}$$

onde *h* é a constante de Planck.

O valor de *h* foi inicialmente determinado através do ajuste do espectro emitido por corpos negros com a teoria de Planck. O valor de *h* conhecido hoje é de *h* = 6,6260693.10⁻³⁴ J.s.

Em 1905, a teoria do efeito fotoelétrico de Einstein (baseada na teoria quântica de Planck), aplicada aos resultados experimentais, proporcionou uma nova maneira de determinar o valor de *h*. Este fato representou um grande triunfo para as teorias quânticas. Nesta prática, vamos utilizar um método um pouco diferente, que

consiste em determinar a energia de ativação de LEDs (*light emission diodes*), necessária para que ocorra a emissão de fótons.

Em materiais semicondutores, a passagem de corrente elétrica através de uma junção **p-n** diretamente polarizada implica em liberação de energia devida à recombinação de elétrons em abundância na banda de condução no lado **n** da junção com os buracos na banda de valência no lado **p** da junção. Nesse processo, os elétrons ao atingirem a banda de condução no lado **p**, decaem para a banda de valência através da barreira de energia designada por E .

Nos LEDs essa energia é liberada na forma de ondas eletromagnéticas com frequências que podem estar na faixa do visível ou do infravermelho, como é o caso dos LEDs comumente encontrados em aplicações comerciais (como em indicadores de aparelhos eletrônicos, controles remotos, etc). Assumindo a ocorrência de recombinação direta dos elétrons com os buracos através da junção, com toda a energia envolvida sendo convertida em energia do fóton, então a seguinte equação é válida:

$$E = h f,$$

onde, $f = c/\lambda$ é a frequência da radiação emitida ($c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s é a velocidade da luz no vácuo).

A diferença de potencial V aplicada ao LED na polarização direta (cujo valor varia pouco após ultrapassado o limiar de condução do diodo) corresponde à energia (por unidade de carga) fornecida aos elétrons para vencerem a barreira de energia entre o lado **n** e o lado **p** existente inicialmente (na ausência de tensão aplicada). Igualando a energia fornecida aos elétrons pela fonte de tensão à energia da barreira, temos portanto:

$$E \cong eV \quad (3)$$

onde $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C é a carga do elétron; $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ J.

Se a tensão V fosse exatamente constante na polarização direta, combinando-se as Eqs. 2 e 3 seria possível assim a determinação imediata da constante de Planck a partir das medidas de V e de, através da expressão:

$$h f \cong eV$$

$$h = \frac{eV}{f}$$

Onde h é a constante de Planck, e é a carga elétrica elementar, V é a ddp nos terminais do LED e f é a frequência de radiação emitida pelo LED.

Dessa forma, determinando a tensão mínima necessária para acender o LED e conhecendo-se a frequência ou comprimento de onda da radiação emitida pelo LED pode-se determinar o valor da constante de Planck. Assim, coletando dados experimentais e analisando-os em conjunto com o modelo de Planck, você conseguirá determinar, experimentalmente, o valor da constante, mesmo que de maneira indireta.

Materiais

- 1 LED vermelho ($\lambda = 660 \text{ nm}$);
- 1 LED verde ($\lambda = 570 \text{ nm}$);
- Potenciômetro 500Ω ;
- 1 multímetro;
- 2 pequenas pilhas de 1,5V associadas em série;
- Fios de ligação;
- 1 suporte para duas pilhas AA;
- 1 tábua de madeira de 50 cm x 50 cm.

Esquema Experimental

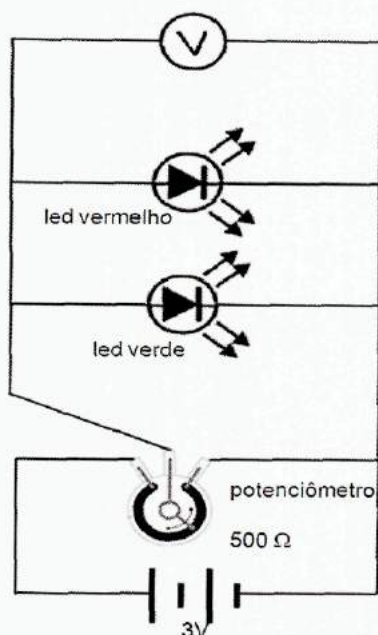


Figura 35: Esquema experimental para montagem de circuito elétrico

Construção

Fixe o suporte das pilhas, o potenciômetro, os LEDs e o multímetro na base de madeira, conecte os fios e ligue os equipamentos, de modo que todos fiquem em paralelo, conforme a Figura 36;

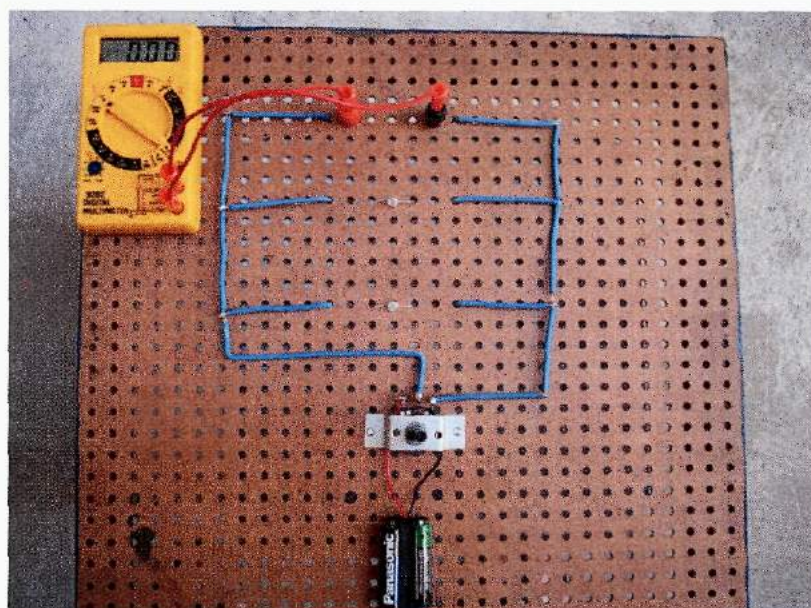


Figura 36: Esquema para montagem de circuito elétrico

Instruções para montagem

Aumente gradativamente a ddp aplicada no circuito (variando a resistência através do potenciômetro) e meça a ddp mínima para o qual o LED vermelho acende, como na Figura 37.

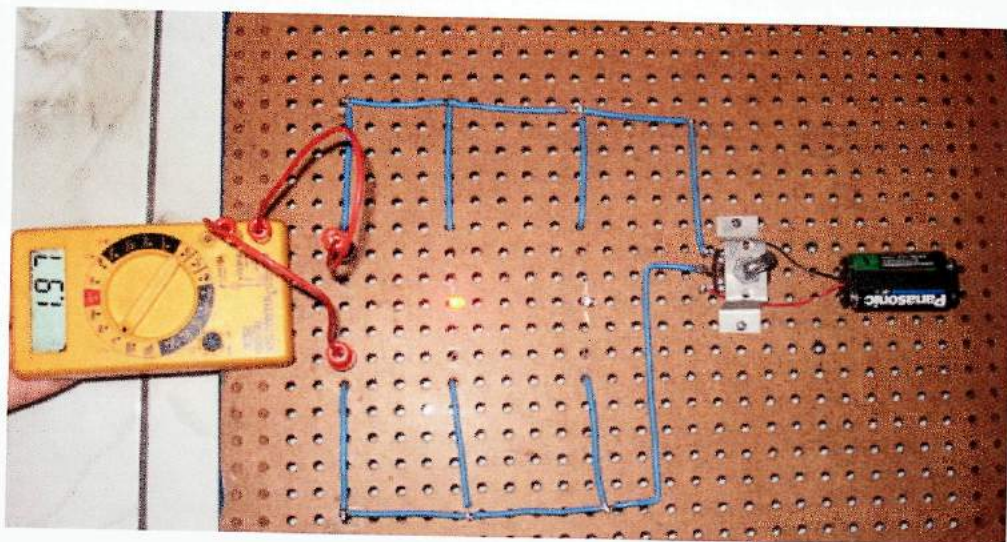


Figura 37: Diferença de potencial (ddp) mínima necessária para o LED vermelho acender

Continue modificando a ddp e verifique a tensão mínima para o qual o LED verde acende (Figura 38).

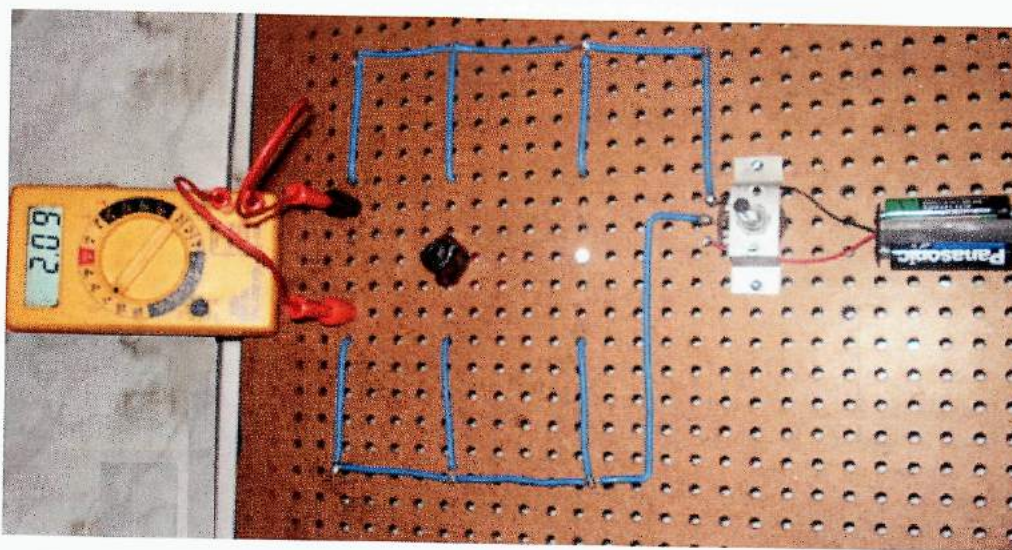


Figura 38: Diferença de potencial (ddp) mínima necessária para o LED verde acender

Registre os valores encontrados numa tabela, conforme modelo abaixo.

LED (cor e comprimento da onda)	ddp necessária para o LED acender (V)
Vermelho transparente $\lambda = 660 \times 10^{-9} \text{ m}$	1,97
Verde transparente $\lambda = 570 \times 10^{-9} \text{ m}$	2,09

Tabela 1: ddp necessária para acendimento dos LEDs

Com os valores de tensão medidos e o comprimento de onda da luz emitida de cada LED para calcular o valor da Constante de Planck.

$$h = \frac{e \cdot V}{f}$$

Onde:

h = Constante de Planck

$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (carga elétrica elementar)

V = ddp nos terminais do LED

f = frequência de radiação emitida pelo LED ($f = c/\lambda$, onde $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$)*

* A frequência de radiação emitida pelo LED será determinada a partir do comprimento de onda fornecido pelo fabricante do LED.

Os resultados obtidos são mostrados na tabela abaixo:

LED (cor)	ddp LED (V)	Frequência da radiação f (Hz)	Valor experimental de h_{exp} (J . s)
Vermelho transparente	1,97	$4,54 \times 10^{14}$	$6,94 \times 10^{-34}$
Verde transparente	2,09	$5,26 \times 10^{14}$	$6,36 \times 10^{-34}$

Tabela 2: Valores calculados da Constante de Planck

Usando o valor para a Constante de Planck $h_{\text{teo}} = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J . s}$, estime o desvio percentual em relação aos valores experimentais (h_{exp}).

$$e \% = \frac{|h_{teo} - h_{exp}|}{h_{teo}} \times 100$$

Os resultados obtidos são mostrados na tabela abaixo:

LED (cor)	ddp LED (V)	Frequência da radiação f (Hz)	Valor experimental de h_{exp} (J . s)	$e\%$
Vermelho	1,97	$4,54 \times 10^{14}$	$6,94 \times 10^{-34}$	4,83
Verde	2,09	$5,26 \times 10^{14}$	$6,36 \times 10^{-34}$	3,93

Tabela 3: Resultados dos desvios percentuais

Capítulo 5 - Conclusão

O trabalho desenvolvido sobre o Diodo Emissor de Luz (LED) e sua aplicação na prática foi de grande valia para os alunos do Ensino Fundamental e Médio, pois abordou conceitos importantes de Física na sala de aula. O estudo abrangeu desde o Efeito Termiônico até o desenvolvimento dos diodos semicondutores dopados, onde se situa o LED. Este estudo trouxe conceitos fundamentais das propriedades elétricas dos materiais e sua classificação, que poderão ser de utilidade para o cotidiano dos alunos, como é o caso dos conceitos dos materiais condutores, isolantes e semicondutores.

O uso do LED em circuitos elétricos de equipamentos encontrados em nossas residências, escolas e indústrias motivaram os alunos a procurar conhecer seu funcionamento, proporcionando a interação da prática com os conteúdos apresentados. As aplicações experimentais, com a utilização de esquemas e fotografias dos resultados alcançados, foram de utilidade para interessar os alunos pelo estudo. Os experimentos constituem-se numa estratégia para o professor.

O baixo custo dos materiais tornou a montagem dos experimentos viável tanto para o professor aplicar em sala de aula, quanto para os alunos que desejarem desenvolvê-los individualmente. Pode-se assim transformar a sala de aula em um mini-laboratório, não necessitando de alto investimento, ajudando na motivação do aluno pelo aprendizado, além de inseri-lo num contexto prático. Buscou-se com isso proporcionar aos alunos a construção de conceitos, o desenvolvimento da observação de fenômenos, além do manuseio de equipamentos e instrumentos de medida.

Ao observar como é feita a montagem dos experimentos pelos alunos, pôde-se perceber que o roteiro experimental foi importante para a orientação do trabalho. Os alunos fizeram uma leitura prévia da fundamentação teórica para a melhor compreensão do tema, onde se apresentaram todos os conceitos relacionados aos pré-requisitos e seguiram acompanhando cada passo das instruções de montagem.

A experiência 1, "Lanterna de LED", foi feita com maior eficiência na montagem dos alunos. Isto pode ser explicado por ser uma experiência simples e fácil. A construção da lanterna de LED pode ser usada em sala de aula com facilidade para compreender os conceitos básicos de eletricidade.

A experiência 2, "O Semáforo", foi rica em conhecimento, pois foram analisadas duas estruturas distintas no mesmo trabalho: a primeira com lâmpadas incandescentes e a segunda com lâmpadas de LED. No primeiro instante, isto causou dúvidas aos alunos, porém, após a explicação do professor mostrando a diferença da lâmpada comum para um diodo semicondutor os alunos ficaram mais interessados no trabalho e entusiasmados por poderem comprovar os conceitos ensinados pelo professor sobre circuito retificador.

Por fim, a experiência 3, "A Constante de Planck", foi a mais difícil de ser aplicada, pois exigiu a introdução de conceitos novos. Os alunos tiveram dificuldades para compreendê-los, porém, após esclarecimentos e com acompanhamento do professor de detalhes da teoria e da construção do experimento, eles conseguiram realizar a experiência. Apesar da teoria ser mais complexa, os alunos sentiram-se motivados na preparação do trabalho por utilizarem um instrumento de medida, o multímetro, onde puderam aferir resultados numéricos para aplicá-los nas equações apresentadas na fundamentação teórica.

O objetivo deste trabalho foi demonstrar, com a ajuda dos circuitos elétricos simples, a possibilidade de aplicar conceitos e práticas que utilizam os diodos no Ensino Fundamental e Médio, já que estes são os mais simples dispositivos semicondutores e por estarem presentes na maioria dos equipamentos eletrônicos, introduzem conceitos importantes das tecnologias atuais e da Física Moderna e diminuem a distância entre a teoria da Física e as experiências vivenciadas pelos alunos no dia a dia, conforme orientam os PCN's. Também traz aos alunos a consciência da importância do racionamento do consumo de energia e economia financeira que estes novos dispositivos proporcionam para a sociedade, por serem mais econômicos, duradouros e de melhor qualidade.

Referências Bibliográficas

AMARAL Jr., M. R. *Laboratório de Eletrônica Moderna*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos*. 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

BRAGA, N. C. *Lanterna de LED – Experimento PV006 – Ensino Fundamental*. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/arquivos/pv0006.pdf>. Acesso em: 02 maio 2010.

CALTRANS. Departamento de Transportes do Estado da Califórnia. Disponível em: <http://www.dot.ca.gov>. Acesso em: 03 abril 2010.

GASPAR, A. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. São Paulo: Ática, 2003.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

Materiais Semicondutores. Disponível em: http://www.eletrica.ufu.br/pastas/Ciencia_e_Tecnologia_dos_Materiais/Apostila_CTM_PARTE_2.pdf. Acesso em: 02 julho 2010.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Curso de Física – Volume 3*. São Paulo: Scipione, 2000.

MEC. Ministério da educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros curriculares nacionais – Ensino Médio*. Brasília: SEMTEC/MEC, 2000.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: 3 – Eletromagnetismo*. São Paulo: Edgar Blücher, 2001.

O uso do mouse no laboratório de ensino médio. Disponível em: <http://omnis.if.ufrj.br/~carlos/infoenci/alunos/andre/usodomouse.htm>. Acesso em: 02 maio 2010.

PROJETO EUREKA. *Um semáforo ornamental de "LEDs".* Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/showdefisica/experimentos/semaforo>. Acesso em: 02 maio 2010.

PEREIRA, S. J. *Fundamentos de Física Quântica: salto quântico e a constante de Planck.* Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/1971-6.pdf>. Acessado em: 10 junho 2010.

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO FUNDAMENTAL. *Parâmetros curriculares nacionais: Ciências Naturais.* Brasília: MEC/SEF, 1998.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física Moderna.* 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

Uso de leds em semáforos de trânsito: um estudo da viabilidade técnico-econômica. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/Anderson-Andre-Ewaldo-Revista Energia Alternativa.pdf>. Acesso em: 03 abril 2010.