

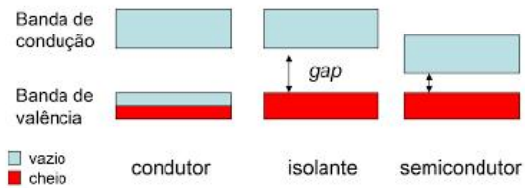
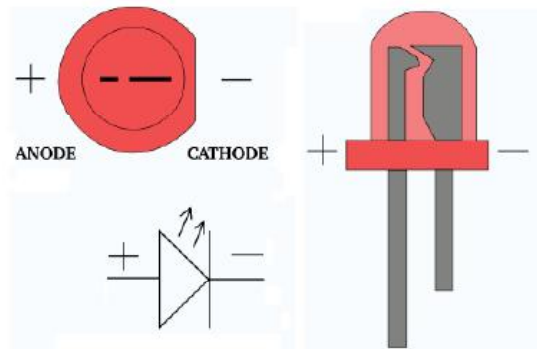
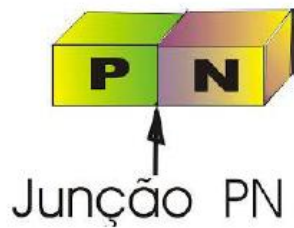
Apêndice A

Material do aluno

Segue como parte da dissertação o texto “Dispositivo eletrônico – semicondutores, Diodos e LEDs” destinado aos alunos. Este material foi desenvolvido com o objetivo de ser um material de apoio para o aluno, tendo como objetivo ser um material específico e de fácil compreensão sobre semicondutores, diodos e LEDs. No texto há uma descrição do princípio da emissão de luz, assim como o funcionamento de lâmpadas convencionais e comparações entre os tipos de lâmpadas existentes no mercado. Esse tema é abordado devido ao destaque do assunto no cotidiano do aluno.

Dispositivo eletrônico – Semicondutores,

Diodos e LEDs



Autor: Prof. Sebastião Carlos do Espírito Santo

Orientador: Prof. Dr. Marcelo O. C. Pires

2016
UFABC – Santo André

Sumário

1.	Introdução.....	2
2.	Classificação dos materiais segundo a condução elétrica.....	3
2.1.	Condutores Sólidos (metais).....	3
2.2.	Isolantes.....	4
2.3.	Semicondutores.....	4
3.	Como ocorre a condução em termos de Bandas Eletrônicas.....	6
3.1.	Semicondutores intrínsecos e extrínsecos.....	7
3.2.	Semicondutor tipo N.....	8
3.3.	Semicondutor tipo P.....	9
3.4.	Diodo - Junção p-n.....	11
4.	Funcionamento do LED.....	13
4.1.	Como ocorre a emissão de luz.....	13
4.2.	Níveis de energia de um elétron num átomo de hidrogênio.....	18
4.3.	Funcionamento de LEDs.....	19
4.4.	Lâmpada incandescente.....	21
4.5.	Lâmpada fluorescente.....	23
5.	Comparação entre as lâmpadas.....	24
5.1.	Principais vantagens do LED.....	25
6.	Charges.....	27
7.	Exercícios resolvidos.....	28
8.	Bibliografia.....	29
9.	Anexo 1.....	30
	Dicionário.....	30
10.	Anexo 2.....	31
	Espectro eletromagnético.....	31
11.	Anexo 3.....	33
	Lista de exercícios.....	33
12.	Anexo 4.....	35
	Material de apoio.....	35
	Notas de aula - Artigos - Apostilas.....	35
	Experiências.....	35
	Vídeos.....	35

1. Introdução

Os campos elétricos ao interagir com os elétrons dos materiais¹ movimentam as cargas elétricas do material. Cada material apresenta uma maior ou menor facilidade das cargas se moverem dentro dele. A medida dessa facilidade é a condutividade elétrica. Materiais de alta condutividade têm elétrons livres dentro de sua estrutura atômica. Já para os materiais de baixa condutividade, os elétrons estão presos aos átomos de forma que o campo elétrico somente deforma a estrutura atômica. Estes resultados obtidos são controláveis e úteis para a fabricação de circuitos elétricos no suprimento de forças, equipamentos de comunicação e de controle.

Os metais são bons condutores (condutividade da ordem de 10^7 ($\Omega \cdot m$)⁻¹), por outro lado os não metais são isolantes (condutividade entre 10^{-10} e 10^{-20} ($\Omega \cdot m$)⁻¹). Há também materiais com condutividades intermediárias (entre 10^{-6} e 10^4 ($\Omega \cdot m$)⁻¹) e são denominados semicondutores.

A corrente elétrica é o fluxo de cargas elétricas que passam por uma seção transversal devido às forças que atuam sobre as mesmas a partir de um campo elétrico aplicado externamente. Nos sólidos a corrente vem do fluxo de elétrons.

A magnitude da condutividade eletrônica depende fortemente do número de elétrons disponíveis para participar do processo de condução, sendo que nem todos os elétrons de todos os átomos sofrerão aceleração na presença de campo elétrico.

As características de transporte elétrico dos materiais permitem ao físico e ao engenheiro possibilidades infinitas de aplicações em componentes eletrônicos, seja pela sua condutibilidade ou resistividade, pelo seu comportamento isolante ou até mesmo por seu comportamento intermediário como semicondutor.

Estes materiais podem transportar energias. No transporte de cargas (corrente elétrica) as partículas provenientes de um gerador elétrico fluem no circuito elétrico, passando por determinados dispositivos elétricos (resistores, capacitores, diodos e outros mais) onde esta energia é convertida em outras formas de energias, como: som, calor, luz, pulsos elétricos carregando informações, etc.

¹ Nesse texto quando se fala de materiais entende-se como uma substância sólida condutora de corrente elétrica (exemplo metais e não metais).

Para uma melhor compreensão e bom entendimento sobre o funcionamento de dispositivos elétricos (como de um diodo emissor de luz - Led), serão apresentadas as estruturas internas dos materiais. Serão demonstradas as propriedades de condução de elétrons, as órbitas estacionárias no modelo atômico de Bohr com suas respectivas energias, e conseqüentemente as possíveis transições do elétron. Com o estudo das mudanças de órbitas dos elétrons e da junção p-n espera-se compreender como ocorre a emissão de luz em um Led. Com isso espera-se que o leitor possa estabelecer comparativos de eficiência e economia entre os tipos de lâmpadas existentes no mercado.

2. Classificação dos materiais segundo a condução elétrica

2.1. Condutores Sólidos (metais)

Estes materiais possuem elétrons livres que são responsáveis pela alta condutividade. Esses elétrons podem se deslocar em movimentos que dependem da temperatura, do campo elétrico externo e da estrutura cristalina do material. Os elétrons livres estão em movimento devido agitação térmica, mas com movimentos desordenados e equilibrados no conjunto, não constatando uma corrente elétrica. Se a substância for submetida a um campo elétrico, os elétrons se movem formando uma corrente elétrica.

O sentido positivo da corrente elétrica como foi visto em circuitos elétricos como sendo contrário ao do deslocamento dos elétrons. A corrente elétrica tem um valor muito baixo (na ordem dos cm/s) quando comparado com a velocidade de agitação térmica (da ordem dos 100 km/s), porém os efeitos da corrente nos fenômenos de eletricidade são mais evidentes que a agitação, isso ocorre, devido a corrente ser um movimento ordenado dos elétrons.

O efeito joule em um condutor ocorre quando os elétrons se movem colidindo com as moléculas da estrutura cristalina e conseqüentemente perdem parte da sua energia cinética sob a forma de calor.

Podemos mensurar as características dos materiais condutores por: condutividade ou resistividade elétrica, coeficiente de temperatura, condutividade térmica, potencial de contato, comportamento mecânico, etc.

Os metais nobres (ouro, prata e platina), acrescidos de alguns outros grupos e de suas ligas possuem alta condutividade elétrica. Estes materiais de alta condutividade são empregados como condutores em circuitos elétricos contidos nos dispositivos eletrônicos, enrolamentos de máquinas elétricas, transformadores, fusíveis, etc. Há aplicação destes materiais, normalmente ligas de alta resistência, para a fabricação de aparelhos resistivos, por exemplo: aparelhos de aquecimento, fornos elétricos, grelhas elétricas, filamentos para lâmpadas incandescentes, etc.

2.2. Isolantes

Existem substâncias que quando submetidas a campos eletrostáticos não apresentam corrente elétrica. Isso ocorre devida a substância possuir resistividade muito alta, opondo-se à passagem de corrente elétrica de condução, motivo pelo qual recebe o nome de dielétrico. O material que o constitui é designado por isolante.

A condutividade baixa em materiais isolantes é devido a não possuírem elétrons livres. Os elétrons dessas substâncias estão fortemente ligados por interações elétricas com os núcleos das moléculas que constitui o material. Para observar algum transporte de cargas nesses materiais, o campo elétrico externo deve ser muito intenso ao ponto de quebrar a ligação que esses elétrons têm com os núcleos dessas moléculas.

Exemplos de sólidos isolantes: quartzo, pedra sabão, mica, mármore, ardósia, porcelana, vidro, borracha natural, guta-percha, neoprene, algodão, seda, linha, papel, vidro, madeira, celofane, nylon. Os isolantes são frequentemente usados como isolantes de aparelhos elétricos. Além de ser usado como material dielétrico em capacitores

2.3. Semicondutores

Os semicondutores possuem propriedades elétricas que são intermediárias entre aquelas apresentadas pelos condutores elétricos e pelos isolantes. São compostos por materiais específicos e similares aos de cerâmicas. Além disso, as características elétricas destes materiais são extremamente sensíveis à presença de minúsculas concentrações de átomos de impurezas, concentrações que podem ser controladas ao longo de regiões espaciais muito pequenas. Os semicondutores tomaram possível o advento dos dispositivos e circuitos integrados eletrônicos, que revolucionaram totalmente as indústrias de produtos eletrônicos e de computadores (para não

mencionar as nossas vidas) ao longo das últimas duas décadas. No caso do semicondutor de Si, este apresenta também propriedades mecânicas excelentes que o torna utilizável em dispositivos micromecânicos (micromotores, microinjetores, microsensores, etc).

As propriedades elétricas de um material dependem da configuração de suas bandas de energia e do tamanho da banda proibida, sendo esta banda a diferença de energia que há entre a banda de valência e da banda de condução.

Banda de valências é a última banda de energia ocupada por elétrons ligados. Sendo o que define a valência de um elemento químico a configuração do último orbital do átomo.

Na medida em que os elétrons absorvem energia passando da banda de valência para a banda de condução, esta "quantidade" de energia necessária para que o elétron efetue essa transição é chamada de gap de energia (em inglês *band gap*), ou banda proibida.

Banda de condução corresponde ao próximo nível energético permitido, logo acima da banda de valência, região onde os elétrons livres podem se movimentar no material originando corrente elétrica. Ao observar o comportamento elétrico de um material devemos verificar o posicionamento das bandas de valência, condução e a proibida.

Portanto, elétrons de valência ocupam camadas mais externas, sendo estes elétrons importantes, pois participam das ligações entre os átomos no qual influenciam em diversas propriedades físicas e químicas dos sólidos.

Corrente elétrica como já visto, é o resultado do movimento de partículas elétricas carregadas, ocasionado por forças que atuam sobre as cargas em um campo elétrico aplicado externamente

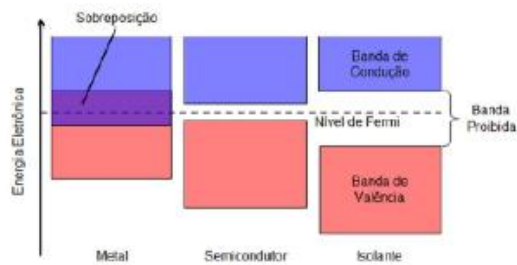


FIG. 1 – Bandas de energia para materiais condutores, semicondutores e isolantes.
 (Fonte: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721254_10_cap_02.pdf)

Sólidos cuja banda de valência está totalmente preenchida e que possuem “gap” de energia proibida largo ($\gg 1$), se comportam como isolantes elétricos.

Em resumo conclui-se que materiais metálicos são condutores, pois há elétrons livres na última camada (pouco ligados). Com o fato de alguns elétrons serem deslocáveis deixando seus átomos, podendo facilmente transferir carga elétrica e energia térmica. Nos materiais isolantes sua estrutura é composta por ligações muito fortes entre o núcleo e os elétrons, não permitindo o deslocamento de elétrons no átomo. Materiais como Si, Ge, Sn e outros mais são considerados materiais semicondutores, pois não possuem elétrons fortemente ligados na última camada, mas também não estão tão livres como em um metal.

3. Como ocorre a condução em termos de Bandas Eletrônicas

Energia de Fermi (E_F) é uma característica da consequência do caráter estatístico do comportamento dos elétrons e do Princípio de Exclusão de Pauli¹. Para metais a uma temperatura de zero Kelvin, a E_F é definida como a energia máxima dos estados eletrônicos ocupados.

Elétrons com energia acima da energia de Fermi (E_F) podem ser acelerados quando submetidos a um campo elétrico. Os elétrons livres são os que participam do processo de condução, assim como a carga eletrônica chamada *lacuna* ou *buraco*, participa do processo de condução em semicondutores.

Nos metais, somente elétrons com energia maior que E_F podem ser acelerados na presença de um campo elétrico. Os elétrons que participam do processo de condução são chamados de elétrons livres.

Nos semicondutores e isolantes, há lacunas eletrônicas que possuem energia menor que E_F e que também participam do processo de condução. O processo de condução se origina na mobilidade dos portadores de cargas.

Para um elétron se tornar livre ele precisa estar em um dos níveis disponíveis com energia acima da energia de Fermi (E_F). Para os metais, há estados energéticos disponíveis adjacentes ao mais alto estado preenchido E_F . Portanto uma baixa energia é necessária para promovê-los e a energia fornecida por um campo elétrico é suficiente para excitar um grande número de elétrons para o estado de condução.

3.1. Semicondutores intrínsecos e extrínsecos

Semicondutores sem impurezas em sua estrutura são denominados intrínsecos, cuja característica é a concentração de elétrons livres é sempre igual à concentração de lacunas.

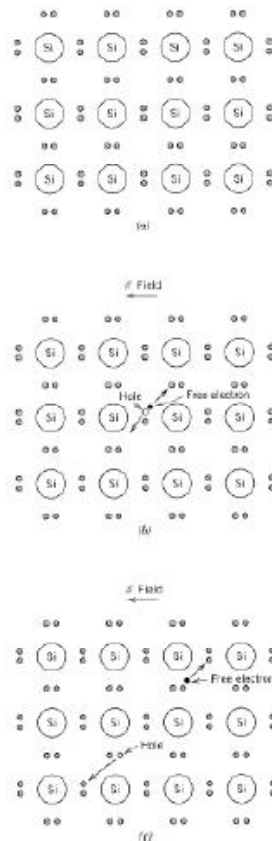


FIG.2 – Modelo de condução intrínseca. Silício intrínseco. (a) antes da excitação (b) e (c) após a excitação e subsequentes movimentos do elétron e da lacuna em resposta a campo elétrico externo. (Fonte: <http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/matelet.html>)

Por outro lado semicondutores extrínsecos são Semicondutores dopados com adição de impurezas na sua estrutura, alterando a concentração de portadores. Essas impurezas são classificadas como: doadoras (tipo N) onde sobram um ou mais elétrons ou receptores (tipo P) onde faltam um ou mais elétrons.

3.2. Semicondutor tipo N

Um semicondutor com impureza tipo N pode ser exemplificado como um material semicondutor (silício) contendo em sua estrutura elementos com 5 (cinco)

elétrons na camada de valência (Sb, As ou P). Este quinto elétron fica desagregado de qualquer ligação tornando-se livre, podendo nessa condição vagar pelo cristal.

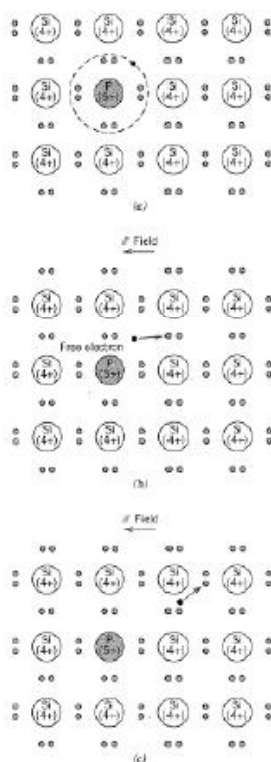


FIG. 3 – Modelo de semicondução extrínseca. (a) uma impureza com cinco elétrons na camada de valência é introduzida substituindo um átomo de silício (b) um elétron se torna livre (c) o elétron livre se movimenta de acordo com o campo elétrico externo.

(Fonte: <http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/matelet.html>)

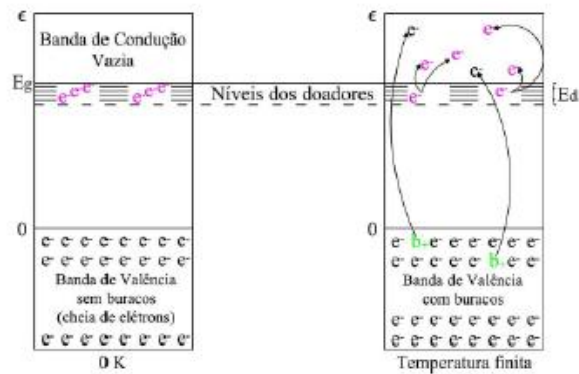


FIG. 4 – Diagrama de bandas de um semiconductor tipo N mostrando o nível doador.
 (Fonte: www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap15.pdf)

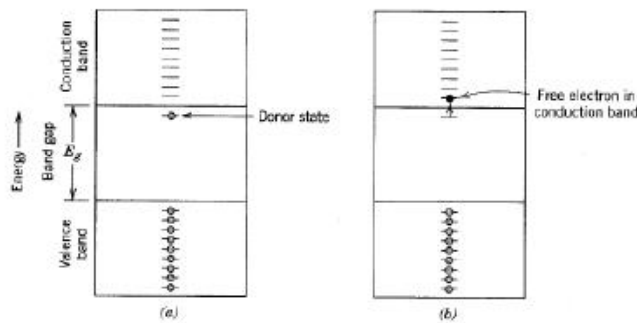


FIG. 5 – Bandas de energia para elétron de impureza doadora.
 (Fonte: <http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/matelet.html>)

3.3. Semiconductor tipo P

Para ter um semiconductor tipo P, onde o silício tem em sua estrutura elementos trivalentes (B, Ga ou In). Nessa ocasião há um número insuficiente de elétrons para completar as ligações covalentes. A ausência dessa ligação é chamada de lacuna ou buraco. A lacuna pode ser preenchida por um elétron. As impurezas trivalentes acrescentadas ao silício ou germânio intrínseco, são chamados de átomos aceitadores ou receptores.

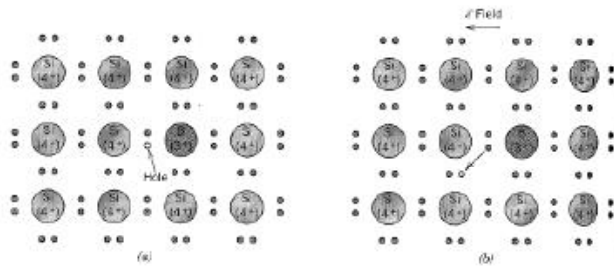


FIG. 6 – Modelo de semicondução extrínseca. Tipo P.
 (Fonte: <http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/matelet.html>)

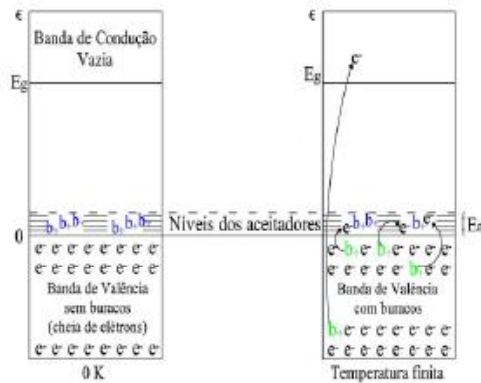


FIG. 7 – Diagrama das bandas de energia para semicondutores extrínsecos do tipo P. Em temperatura finita, elétrons da banda de valência são excitados para os buracos nos níveis aceitadores. Para cada elétron excitado surge um respectivo buraco na banda de valência. Adicionalmente, elétrons da banda de valência são excitados para a banda de condução e também deixam seus respectivos buracos. Assim os buracos na banda de valência estão em maior número do que os elétrons na banda de condução.

(Fonte: www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap15.pdf)

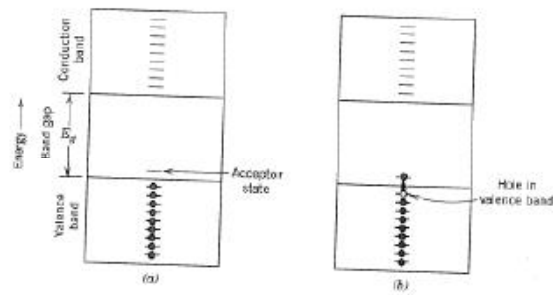


FIG. 8 – (a) Esquema de bandas de energia para uma impureza aceitadora. (b) Excitação de um elétron para o nível da impureza aceitadora, deixando um vazio na banda de valência.
(Fonte: <http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/matelet.html>)

Portanto observa-se que o nível de Fermi (E_F) nos semicondutores dopados corresponde à energia do último estado ocupado do elétron no semiconductor, sofrendo alterações na sua posição devido a presença de dopantes (ver figura 9 abaixo).

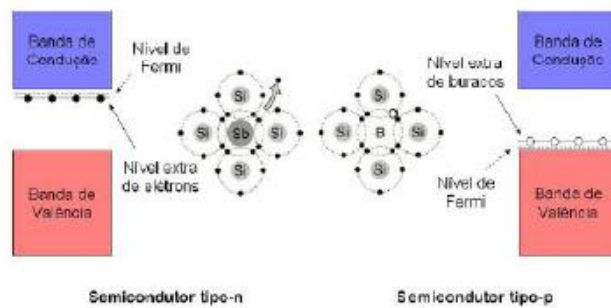


FIG. 9 – Semicondutores dopados com impurezas tipo-n e tipo-p.
(Fonte: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721254_10_cap_02.pdf)

3.4. Diodo - Junção P-N

O diodo é um componente eletrônico que se comporta como condutor ou isolante elétrico, dependendo de como a tensão seja aplicada aos seus terminais. Esta característica permite o diodo transformar corrente alternada em corrente contínua, extraindo informações de um sinal modulado em amplitude (AM). Sendo muito útil em diversas aplicações nos circuitos elétricos.

Ao juntar em uma única pastilha dois materiais extrínsecos um do tipo P e outro do tipo N forma-se uma junção P-N normalmente chamado de diodo. No instante de formação o lado P tem muitas lacunas (falta de elétrons) e o lado N tem excesso de elétrons.

Os elétrons do lado N ocupam os buracos do lado P. Dessa maneira na junção o lado P fica ligeiramente com carga negativa e o lado N fica com carga positiva. Os elétrons livres que queiram ir do lado P para o N encontram maior dificuldade, comparado com os que vão do lado oposto. Essa dificuldade encontrada para os elétrons passarem de P para N é devido a uma barreira de cargas negativas e repulsivas.

Assim, ao polarizar o diodo de forma direta, [quando o polo positivo de uma fonte é conectado ao terminal da região tipo-p (anodo) e o polo negativo é aplicada ao outro terminal da região tipo-n (catodo)], a barreira c diminui, permitindo a passagem da corrente elétrica.

Ao inverter os polos, conectando o polo positivo no tipo-N, e o negativo no tipo-P, dizemos que o diodo está polarizado reversamente, onde a barreira criada pela junção P-N aumenta, impedindo a passagem da corrente. A figura abaixo ilustra a explicação apresentada:

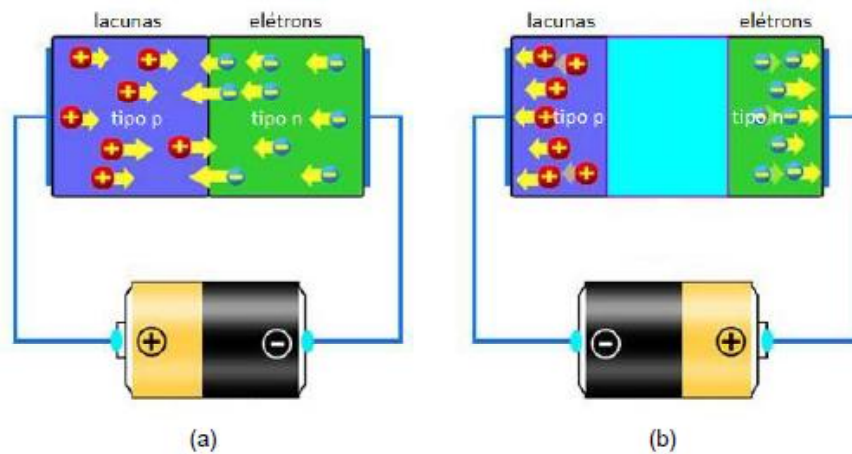


FIG. 10 – (a) Polarização direta em um diodo. (b) Polarização reversa em um diodo.
(Fonte: <http://www.eletronicadidatica.com.br/componentes/diodo/diodo.htm>)

Na verdade o que ocorre na polarização reversa é que, o valor da corrente cai para níveis praticamente desprezíveis, não ultrapassando o valor da tensão de ruptura.

Tensão de ruptura é quando um diodo polarizado reversamente começa a conduzir corrente elétrica a partir de uma tensão máxima. Esse evento não é desejado, exceto em casos específicos.

4. Funcionamento do LED

A palavra LED (light-emitting-diode) vem do inglês, que significa diodo emissor de luz. LEDs são componentes importantíssimos no mundo da eletroeletrônica. A principal função do LED é da emissão de luz em equipamentos eletrônicos, sejam eles produtos de microeletrônica como sinalizador de avisos, ou em algum equipamento maior, como sinalizadores, outdoors, etc.



FIG. 11 – Modelos de LEDs.

Para entender o funcionamento do LED, faz necessário entender os processos de emissão e absorção de radiação pelos materiais.

4.1. Como ocorre a emissão de luz

É importante saber que as hipóteses de Niels Bohr teve o objetivo, de explicar o comportamento do movimento do elétron ao redor do núcleo para um átomo de hidrogênio. Mesmo explicando o movimento do elétron no átomo de hidrogênio, o modelo proposto por Bohr não obteve um resultado satisfatório ao ser aplicado em

átomos de outros elementos, não resolvendo o problema da estrutura atômica. Sem uma resposta satisfatória para o problema da estrutura atômica dos elementos, surge a mecânica quântica, explicando de forma mais satisfatória a estrutura atômica através do modelo de Schrödinger.

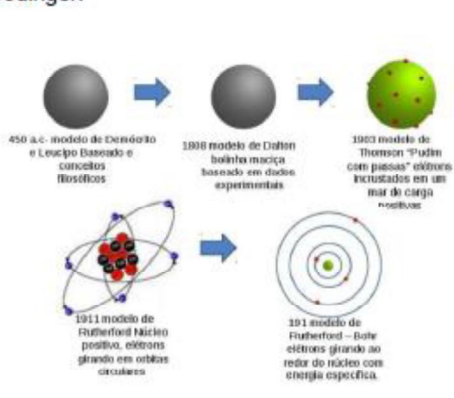


FIG. 12 – Evolução do modelo atômico.

(Fonte: <http://fisicaemclasse.blogspot.com.br/2015/03/a-espectroscopia-e-cor-das-estrelas-e.html>)

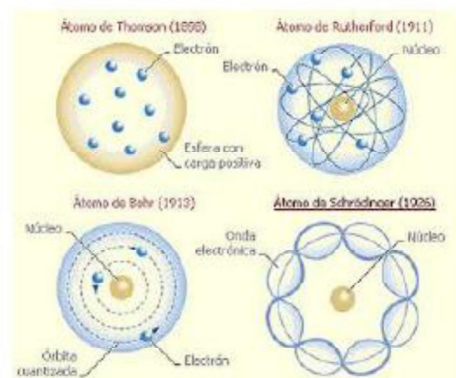


FIG. 13 – Evolução do modelo atômico.

http://enigmadaciencia.blogspot.com.br/2012_11_01_archive.html

Segundo o modelo atômico de Rutherford, um átomo é composto por um pequeno núcleo carregado positivamente (prótons e nêutrons) rodeado por uma grande

eletrosfera, composta por elétrons (carga negativa), sendo que no núcleo está concentrada a maior parte da massa do átomo.

Era necessário propor um novo modelo para explicar a estrutura atômica, pois pelas leis da Física Clássica o modelo proposto por Rutherford não poderia existir, de acordo com o eletromagnetismo clássico, os elétrons como qualquer carga em movimento acelerado e girando ao redor do núcleo emitem radiações, e ao emitirem essas radiações eles perdem energia. Portanto os elétrons perderiam toda sua energia e se chocariam com o núcleo.

Diante de tal problema Niels Henrik David Bohr em 1913, propôs um modelo atômico, baseado nos seguintes postulados:

1. *A energia radiada não é emitida ou absorvida de maneira contínua, somente quando um elétron passa de uma órbita estacionária para outra diferente (salto quântico).*
2. *Os elétrons giram em torno do núcleo em órbitas circulares e bem definidas (fixas) que são as órbitas estacionárias. Mais tarde, seriam as chamadas "camadas eletrônicas" (K, L, M, N, O, P e Q).*
3. *O equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários se dá pelas leis da mecânica clássica, o que não é verificado quando um elétron passa para um diferente estado estacionário.*
4. *Ao passar de um estado estacionário para outro, um elétron absorve uma radiação bem definida, que é o quantum, dado pela relação $E = h.f$, onde f é a frequência e h é a constante de Planck.*

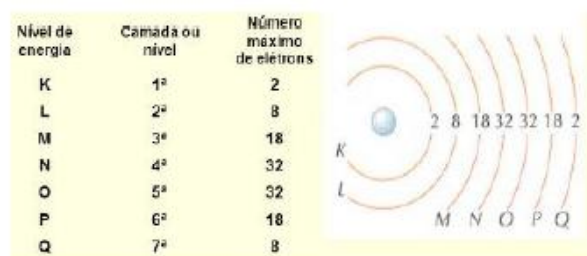


FIG. 14 – Modelo atômico proposto por Bohr.
(Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/1724267/>)

Um quanta possui energia correspondente a $h.f$. Portanto, a variação de energia produzida num átomo será igual à energia emitida ou recebida. Essa variação de energia é dada por:

$$E_e - E_i = h \cdot f \text{ ou } E_e - E_i = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Em que:

E_e : energia da órbita mais externa (de maior energia);

E_i : energia da órbita mais interna (de menor energia);

h : constante de Planck ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$);

f : frequência do fóton absorvido ou emitido;

λ : comprimento de onda do fóton absorvido ou emitido.

c : velocidade da luz ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

O elétron ao absorver uma quantidade de energia externa (ultravioleta, luz visível, infravermelho-calor, eletricidade), ocorre que ele fica excitado ocorrendo uma transição eletrônica de uma órbita (nível) mais interna e menos energética, para uma mais externa e mais energética (estado excitado).

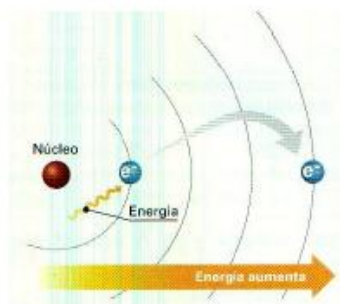


FIG. 15 – Salto do elétron de uma camada mais interna para mais externa.

(Fonte: <http://evolucaoatomica.blogspot.com.br/2013/05/modelo-atomico-de-niels-bohr.html>)

Em uma transição eletrônica ao retornar para a órbita de origem, o elétron perde energia (a mesma energia absorvida anteriormente), esta energia é emitida na forma de ondas eletromagnéticas (fóton – luz de cor definida).

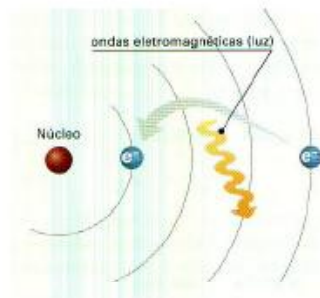


FIG. 16 – Retorno do elétron à órbita de origem.

(Fonte: <http://evolucaoatomica.blogspot.com.br/2013/05/modelo-atomico-de-niels-bohr.html>)

Os saltos acontecem milhares de vezes por segundo, produzindo uma onda eletromagnética, que nada mais é que uma sucessão de ondas emitidas.

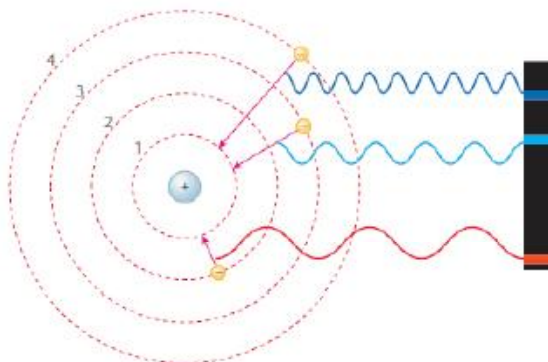


FIG. 17 – Exemplificação de emissão de fóton emitido pela transição do elétron em diferentes níveis de energia de um determinado elemento químico.

(Fonte: <http://quimicozinhos.blogspot.com.br>)

4.2. Níveis de energia de um elétron num átomo de hidrogênio

Como exemplo as energias dos estados eletrônicos do átomo de hidrogênio:

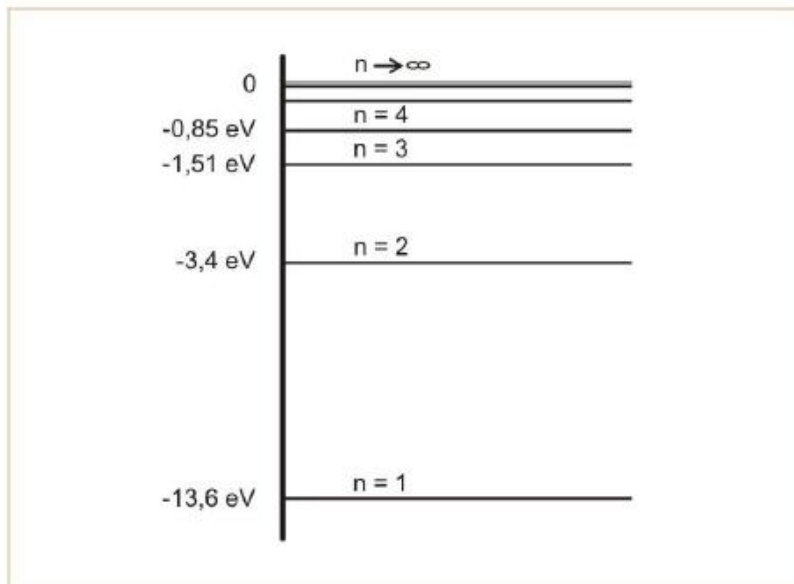


FIG. 18 – Diagrama dos níveis de energia do átomo de hidrogênio.

(Fonte: http://osfundamentosdafisica.blogspot.com.br/2013/12/cursos-do-blog-eletricidade_11.html)

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)}$$

O elétron está separado do núcleo quando $n = \infty$, sendo a energia do elétron igual a zero.

Quando os elétrons de um átomo indicam energias muito baixas, conclui-se que o átomo se encontra em seu estado fundamental, ocorrendo uma absorção de energia nesse estado, n terá um valor maior sendo possível que o átomo retorne ao estado normal e libere energia.

Considerações importantes:

- Caso o elétron do primeiro nível receba 1 quantum de 10,2 eV, ele irá para o segundo nível. Ao voltar para o primeiro nível, emitirá 1 quantum de 10,2 eV.
- Caso o elétron do primeiro nível receba 1 quantum de 12,1 eV, ele irá para o terceiro nível diretamente.
- Elétrons no primeiro nível não podem receber 1 quantum de 9 eV nem de 11 eV.
- Para arrancar o elétron do átomo, é preciso uma energia mínima de 13,6 eV.

Um fóton surge quando ocorre a transição de um elétron de um átomo entre dois estados de energias diferentes. Um elétron ao receber uma energia externa fica estimulado saindo de uma camada mais interna e se deslocando para uma mais externa. Quando este elétron retorna para o estado inicial, ele emite a mesma energia (fóton) correspondente a essa diferença. Conclui-se que, quanto maior a frequência maior será a energia e o impulso do fóton, conseqüentemente sendo mais evidentes as propriedades corpusculares da luz. Portanto pode-se comprovar que as fontes de luz emitidas de diferentes cores, possuem fótons com diferentes frequências, pois as energias correspondem às características de uma determinada frequência. Cada elemento químico possui um espectro de luz bem definido devida as possíveis transições dos elétrons em diferentes níveis de energia do átomo.

4.3. Funcionamento de LEDs

O LED nada mais é que um diodo emissor de luz, e que por sua vez um diodo é composto de materiais semicondutores. Na composição dos LEDs normalmente tem-se arseneto de alumínio e gálio (Al,Ga,As).

Dopando o semicondutor com fósforo, obtém-se uma emissão de luz vermelha ou amarela, variando de acordo com a concentração. Ao utilizar fosfeto de gálio com uma dopagem de nitrogênio, a luz emitida será verde ou amarela.

Ao utilizar outros materiais, pode-se obter LEDs que emitem luz azul, violeta e até ultravioleta. Há LEDs brancos, que são no geral LEDs emissores de cor azul. Estes LEDs são revestidos com uma camada de fósforo do mesmo tipo usado nas lâmpadas fluorescentes, que absorvem a luz azul e emite a luz branca.

Ao aplicar uma corrente elétrica em que os elétrons passam do lado N para o P, os elétrons perdem energia. Do mesmo modo que pessoas perdem energia quando, ao caminhar descem um degrau do passeio. Nos modelos atômicos, a perda de energia implica na emissão de um fóton cuja energia é proporcional à frequência. Dessa maneira a corrente elétrica aplicada na junção P-N, emite constantemente milhares de fótons gerados pela perda de energia que cada elétron tem quando passa pela junção.

A diferença de energia que os elétrons livres têm do lado P para o lado N é devido à estrutura cristalina do silício dopado. Assim, o valor dessa diferença depende dos elementos usados na dopagem do silício. Essa diferença de energia identifica o dopante, sendo proporcional à frequência do fóton emitido. Para cada tipo de dopante temos uma radiação com frequência característica.

Enfim o LED é um diodo semicondutor que, quando submetido a uma DDP emite luz. Para uma melhor compreensão do funcionamento do LED é importante entender o funcionamento da junção P-N de um semicondutor (como visto anteriormente), que tem como atividade permitir a emissão de luz. A junção é responsável por permitir somente a passagem de corrente positiva (Polarização direta – assunto visto anteriormente no item 3.4.).

A luz emitida por um LED é monocromática, e a cor emitida por ele depende do cristal e da impureza de dopagem do material de que é composto.

Color	Wavelength [nm]	Voltage [V]	Semiconductor material
Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.9$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.16$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[47]} < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)
Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate — (under development)
Violet	$400 < \lambda < 460$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
Purple	multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamond (235 nm) ^[48] Barium nitride (215 nm) ^{[49][50]} Aluminium nitride (AlN) (210 nm) ^[51] Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN) — (down to 210 nm) ^[52]
White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

Tabela 1 – Tabela dos diversos materiais usados para cada cor / comprimento de onda.
(Fonte: <http://www.reefforum.net/showthread.php?22015-Leds-Ecoxotic-pendants-e-testes-Par38>)

4.4. Lâmpadas incandescentes

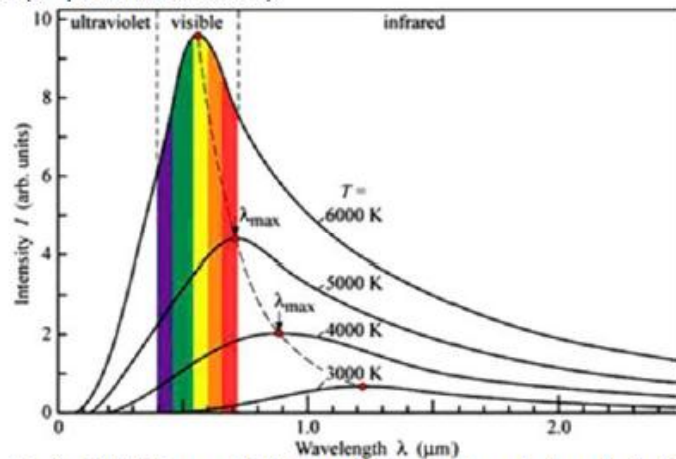
Para que possamos compreender uma lâmpada incandescente estudemos antes o conceito de radiação térmica.

Todo corpo emite e absorve radiação, portanto quando uma radiação incide em um determinado corpo opaco, parte é refletida e parte é absorvida. A radiação absorvida pelo corpo aumenta a energia cinética dos átomos que o constituem, fazendo-os oscilarem de forma mais intensa. A temperatura de um corpo é determinada pela energia cinética média dos átomos que o constitui. A absorção de radiação faz com que a temperatura do corpo aumente. Quando temos um corpo com taxa de absorção igual à de emissão dizemos que o corpo se encontra em equilíbrio térmico com o ambiente. Portanto neste caso podemos dizer que o material é um bom absorvedor e emissor de radiação.

Nesta situação a radiação eletromagnética emitida é a radiação térmica. Radiação térmica é a radiação emitida por um corpo em função de sua temperatura. Para temperaturas abaixo de 600°C a radiação térmica emitida por um corpo não é visível, devida a energia desta radiação estar concentrada em comprimento de ondas maiores que a da luz visível (ou de frequências abaixo do espectro do visível). Ao aquecer um corpo a radiação térmica emitida aumenta e a energia irradiada se prolonga a comprimentos de ondas cada vez menores (frequências cada vez maiores). Para temperaturas entre 600°C e 700°C, há energia suficiente no espectro do visível para que o corpo comece a brilhar com luz própria de coloração vermelho-escuro. Para temperaturas mais elevadas o corpo bilha de cor mais vermelho-claro ou até mesmo branca.

Um corpo que é capaz de absorver *toda* a radiação incidente sobre ele (ou seja, quando ele não é capaz de refletir a radiação incidente) é denominado *corpo negro ideal*.

Um exemplo de radiação de corpo negro que há no cotidiano é a lâmpada de filamento (lâmpada incandescente).



Gráf. 1 – Função distribuição espectral $R(\lambda)$ para várias temperaturas. O eixo vertical está em unidades arbitrárias apenas para fins de comparação. A faixa do espectro visível está indicada por retas tracejadas. A radiação emitida pelo Sol se parece muito com a de um corpo negro a 5800K. o comprimento de onda λ_m (comprimento de onda para o qual a radiação é máxima) está indicado para as curvas de 3000 K a 6000 K.

(Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/1788985/>)

A passagem de corrente elétrica por um material condutor, que oferece certa resistência a esta passagem gera energia, esta mesma transformada em calor por efeito Joule (I^2R), sendo igual ao calor que deixa a superfície do condutor por convecção e radiação. Há materiais que aquecem tanto a ponto de emitirem luz, este é o princípio de funcionamento da lâmpada incandescente.

Thomas Edison levou o crédito pela invenção da lâmpada incandescente, devido sua contribuição ao descobrir melhores ligas metálicas que resistissem a queima devido as altas temperaturas. Tal descoberta possibilitou uma produção comercial, sendo que as ligas anteriores duravam apenas algumas horas.

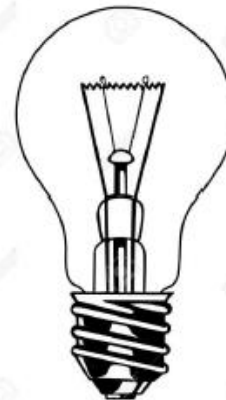


FIG. 19 – Lâmpada incandescente.

No interior de uma lâmpada incandescente não há oxigênio, pois devido a altas temperaturas que o filamento pode chegar. Havendo oxigênio pode ocorrer a queima da lâmpada, ou seja, o rompimento do filamento devido ao ponto de fusão do metal de que é feito. As lâmpadas incandescentes atuais são compostas por filamentos de tungstênio que suportam temperaturas de aproximadamente 3400°C.

A eficiência de uma lâmpada incandescente é muito pequena. Da energia total que a lâmpada consome apenas 20% dessa energia terá como função de iluminar, já 80% desta energia será transformada em calor (Efeito Joule).

4.5. Lâmpadas fluorescentes

Nos interiores das lâmpadas fluorescentes há argônio e vapor de mercúrio. Sendo que nas extremidades há eletrodos que ao serem submetidos por uma DDP, passa uma corrente elétrica aquecendo-os e com isso emitindo elétrons ionizando a mistura gasosa. Essa reação emite radiação ultravioleta (UV), que ao colidir com as paredes de vidro da lâmpada (que possuem um revestimento de tungstato de magnésio ou silicato de zinco), acabam absorvendo a radiação UV e emitindo radiação visível (luz).

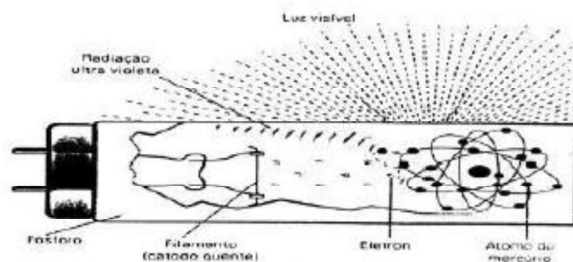


FIG. 20 – Esquema de uma lâmpada fluorescente.

(Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAPOIAE/tipos-lampadas>)

5. Comparação entre as lâmpadas

“Uma lâmpada LED de 3 W, por exemplo, pode substituir uma lâmpada fluorescente de 6 W e uma incandescente de 20 W por ser mais eficiente, além da grande durabilidade que chega até 25 mil horas. Ao usar uma lâmpada LED os benefícios não se restringem apenas a quem consome, mas também ao meio ambiente. A constituição das lâmpadas LED é 95% feita de materiais recicláveis, o que torna o descarte desta lâmpada fácil, além de que por ela não emitir calor, reduz os gastos com ar condicionado. A estimativa é que futuramente as lâmpadas LED estejam presentes nas residências para que os benefícios sejam vistos a longo e médio prazo.”

(Fonte: www.mundodaeletrica.com.br/como-funcionam-as-lampadas-led/ (Acessado em: 22/09/2016))

COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS



	LED	Fluorescente	Incandescente
EQUIVALÊNCIA			
VIDA ÚTIL	50000 Hs	8000 Hs	1200 Hs
CONSUMO	5 W	10 W	50 W
CUSTO EM 6 MESES (KW SP)	R\$ 5,50	R\$ 10,50	R\$ 52,40
DURABILIDADE (ciclo 12hs)	10 anos	18 meses	3 meses
EMIÇÃO DE CALOR	MUITO BAIXA	MÉDIA	MUITO ALTA
ECOLÓGICA	não contem mercúrio	contem mercúrio	não contem mercúrio

FIG. 21 – Comparativo entre os tipos de lâmpadas.

(Fonte: <http://www.faiBrasil.com.br/lampada-led-9w-lilun-e27-equivalente-a-100wp611>)

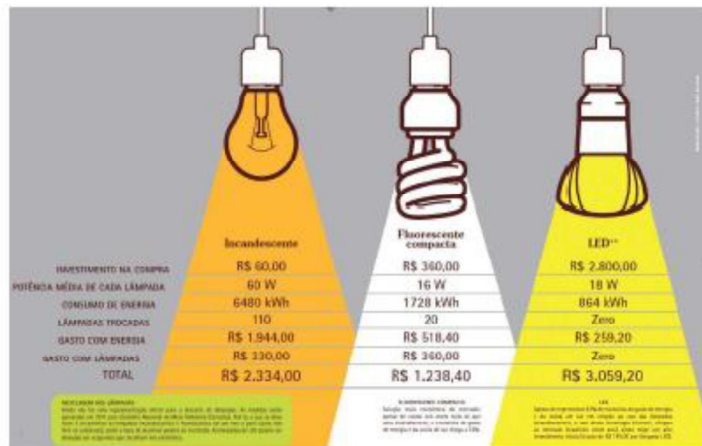


FIG. 22 – Comparativo entre os tipos de lâmpadas.

(Fonte: <http://www.coletivoverde.com.br/lampadas-sustentabilidade/>)

5.1. Principais vantagens do LED

- Longa vida útil;
- Redução dos custos de manutenção;
- Alta Eficiência Energética;
- Não emite Infra Vermelho e Ultra Violeta no fecho de luz, o que não desbota roupas ou obras de arte;
- Com o uso de lentes o fecho pode ser direcionado aumentando a eficiência;
- Dimerização sem variação de cores;
- Controle de cores é dinâmico;
- Graças ao seu tamanho o led gera novos conceitos de iluminação;
- Resistente a vibrações e impactos;
- Não tem materiais pesados como mercúrio, não poluindo o meio ambiente no descarte;
- Baixa tensão o torna mais seguro em algumas aplicações;

- Alta Eficiência em ambiente frio;
- Baixa emissão de calor, reduzindo o consumo de ar condicionado;
- Pode ser desligado e ligado sem alterar a sua vida útil.

Fonte: Solelux (A Solelux é a divisão de iluminação da Soliton, empresa nacional especializada em led desde 1992 – disponível em: <http://www.solelux.com.br/tecnologia-led/vantagens-e-beneficios-saving/> acessado em 27/08/2016)

6. Charges

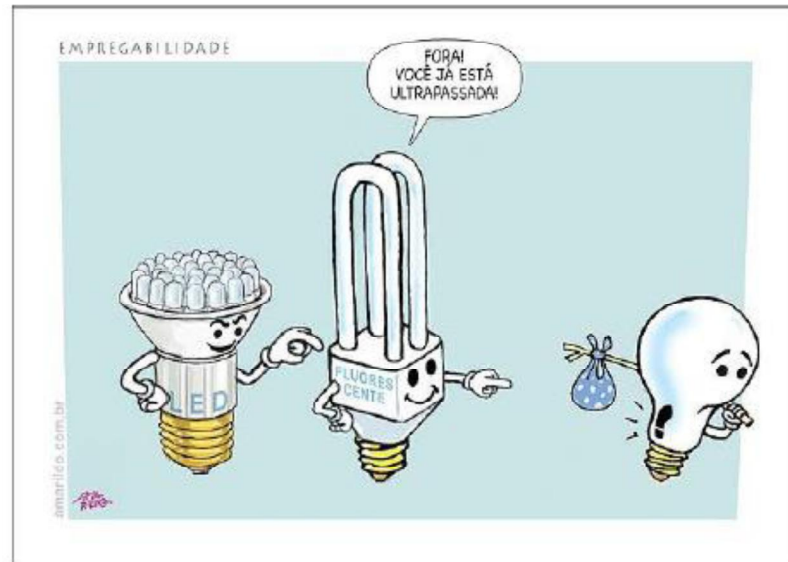


FIG. 23 – Charge do artista Amarildo.



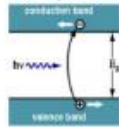
FIG. 24 – Charge do artista Sinovaldo.

7. Exercícios resolvidos

Exercício 1:

Em um certo cristal, a última banda ocupada está completa. O cristal é transparente a todos os comprimentos de onda maiores que 295 nm, mas opaco a comprimentos de onda menores. Calcule a distância, em elétrons-volts, entre a última banda ocupada e a primeira banda vazia neste material.

$$h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$



$$E = hf = E_g$$

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(4,14 \times 10^{-15})(3 \times 10^8)}{295 \times 10^{-9}}$$

$$E_g = 4,21 \text{ eV}$$

Exercício 2:

O elétron do átomo de hidrogênio ao absorver um fóton passa do estado fundamental ($n = 1$) para o primeiro estado estacionário excitado ($n = 2$). Sendo $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ a constante de Planck, determine:

- a) a energia absorvida nessa transição;
- b) a frequência do fóton absorvido.

a) De $E_n = -13,6/n^2 \text{ (eV)}$, vem:

para $n = 1$: $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ e para $n = 2$: $E_2 = -3,4 \text{ eV}$

A energia absorvida é igual a: $\Delta E = -3,4 \text{ eV} - (-13,6 \text{ eV}) = 10,2 \text{ eV}$

b) $\Delta E = h \cdot f \Rightarrow 10,2 = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot f \Rightarrow f \cong 2,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$

Exercício 3:

A figura abaixo mostra os níveis de energia do átomo de hidrogênio. Na transição do nível 4 para o nível 1, determine a frequência e o comprimento de onda do fóton emitido. Dados:

Constante de Planck $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

Velocidade da luz $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Da figura temos:

$$\Delta E = h \cdot f$$

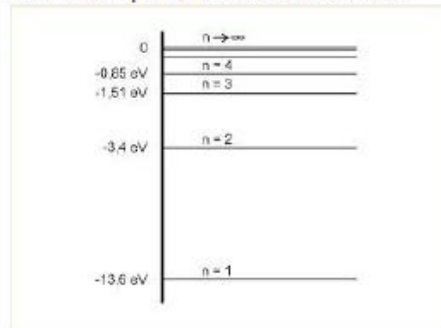
$$-0,85 \text{ (eV)} - (-13,4 \text{ eV}) = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot f$$

$$f \cong 3,0 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda = c/f$$

$$\lambda = 3,0 \cdot 10^8 / 3,0 \cdot 10^{15}$$

$$\lambda \cong 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$



8. Bibliografia

- CALIL, Vanessa Luz e. Desenvolvimento de substratos poliméricos avançados para a aplicação em dispositivos orgânicos flexíveis. Dissertação de mestrado para a obtenção do grau de mestre em Física – Departamento de Física da PUC – Rio – 2010. Certificação digital nº 0721254/CA. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0721254_10_cap_02.pdf> Acessado em 27/08/2016.
- ROLIM, Jacqueline Gisèle. Notas de aula da disciplina Materiais Elétricos. Capítulo 7. Oferecida para os cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Produção Elétrica – 2001. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/matelet.html>> Acessado em 27/08/2016.
- MACEDO, Valquiria Gusmão. Notas de aula da disciplina MATERIAIS ELÉTRICOS 1. Capítulo 7. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – INSTITUTO DE TECNOLOGIA – FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA – 2012. Disponível em: <<http://www.laps.ufpa.br/valquiria/Materiais%20Elétricos/capituloVII.pdf>> Acessado em 27/08/2016.
- WENDLING, Marcelo. Semicondutores- Apostila. UNESP – Colégio técnico industrial de Guaratinguetá Prof. Carlos Augusto Patrício Amorim – 2009. Disponível em: <http://www.feg.unesp.br/~jmarcelo/restrito/arquivos_downloads/apostilas/eb2/semicondut_v1.pdf> Acessado em 27/08/2016.
- TIMÓTEO, Luis F.M. Semicondutores: Junção p-n. Publicada em 01/08/2013. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/MarioTimotius/semicondutores-juno-pn-24835671>> Acessado em 27/08/2016.
- TIPLER, Paul A. e LIEWELLYN, Ralph. A., Física Moderna, 3ª edição – LTC, Rio de Janeiro, 2001.
- UNIOESTE. Apostila de Materiais Elétricos, Capítulo 15 - Materiais semicondutores. Campus de Foz do Iguaçu. Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais.html>> Acessado em 27/08/2016.
- VAN VLACK, Lawrence Hall – 1920. Princípios de ciência e tecnologia dos materiais; tradução Edson Monteiro – Rio de Janeiro – Editora Campus, 1984. 5ª edição.

9. Anexo 1

Dicionário

¹ O princípio de exclusão de Pauli é um princípio da mecânica quântica formulado por Wolfgang Pauli em 1925. Ele afirma que dois férmions² idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente.

² Os férmions são partículas que têm spin³ semi-inteiro e, portanto, são limitados pelo princípio da exclusão de Pauli. Partículas com spin inteiro são chamadas de bósons. Férmions incluem elétrons, prótons, nêutrons.

³ O termo spin em mecânica quântica associa-se, sem rigor, às possíveis orientações que partículas subatômicas carregadas como prótons, elétrons e alguns núcleos atômicos podem apresentar quando imersas em um campo magnético.

10. Anexo 2
Espectro eletromagnético

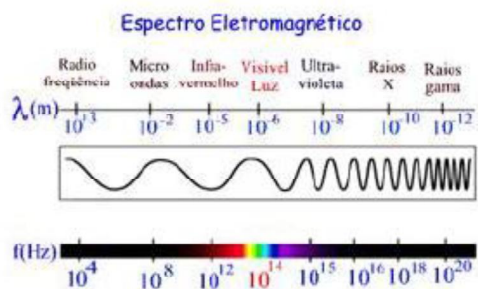


FIG. 1 – Espectro eletromagnético.

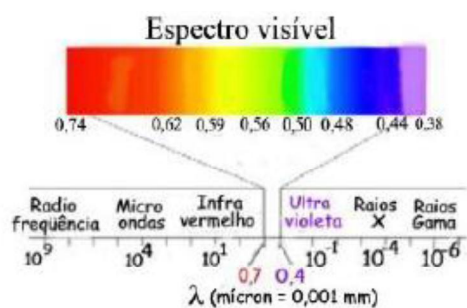


FIG. 2 – Espectro eletromagnético faixa do visível.

Bandas do espectro visível

Região	Comprimento de onda (10^{-6} m)	Frequência (10^{14} Hz)
vermelha	0,74 a 0,62	400 a 484
laranja	0,62 a 0,59	484 a 508
amarela	0,59 a 0,56	508 a 536
verde	0,56 a 0,50	536 a 600
ciano (anil)	0,50 a 0,48	600 a 625
azul	0,48 a 0,44	625 a 682
violeta	0,44 a 0,38	682 a 789

Tabela. 1 – Tabela de espectro eletromagnético na faixa do visível.

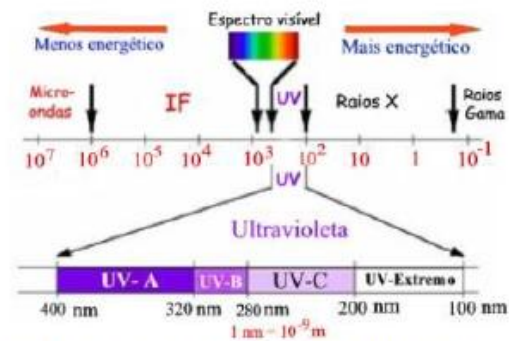


FIG.3 – Espectro eletromagnético na faixa do ultravioleta.

O espectro das ondas UV é dividido em:

UV-A	(400 nm < λ < 320 nm)
UV-B	(320 nm < λ < 280 nm)
UV-C	(280 nm < λ < 200 nm)
UV-Extremo	(200 nm < λ < 100 nm)

Tabela 2 – Tabela de espectro eletromagnético na faixa do ultravioleta (UV).

Figuras disponíveis em:

<http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Ondas%20eletromag.htm>. Acessado em 28/08/2016.

11. Anexo 3

Lista de exercícios

Com o auxílio da tabela abaixo responda as questões.

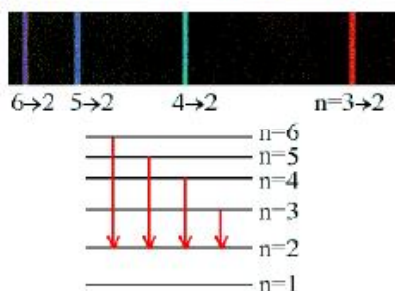
Luz	Comprimento de onda (10^{-7} m)	Frequência (10^{14} Hz)
Violeta	4,0 a 4,5	6,7 a 7,5
Anil	4,5 a 5,0	6,0 a 6,7
Azul	5,0 a 5,3	5,7 a 6,0
Verde	5,3 a 5,7	5,3 a 5,7
Amarela	5,7 a 5,9	5,0 a 5,3
Alaranjada	5,9 a 6,2	4,8 a 5,0
Vermelha	6,2 a 7,5	4,0 a 4,8

1. Um fóton emitido por um Led possui uma energia de 3,9 eV. Dado a Constante de Planck $h = 4,0 \cdot 10^{-15}$ eV.s, determine a cor emitida pelo cálculo da frequência.

2. Um fóton emitido por um Led possui uma energia de 4,3 eV. Dados $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s e $h = 4,0 \cdot 10^{-15}$ eV.s, determine a cor emitida pelo cálculo do comprimento de onda..

Série de Balmer

A série de Balmer corresponde ao conjunto de transições eletrônicas num átomo de hidrogênio de estados excitados ($n > 2$) para o nível $n = 2$ responsáveis pela emissão de radiação na zona do visível e do ultravioleta (UV) próximo.



3. Considere que o elétron do átomo de hidrogênio "salte" do nível de energia $n=3$ para o nível $n=2$. Dados: $E_2 = -3,4$ eV e $E_3 = -1,51$ eV.

a) Ao realizar esse "salto", o elétron absorve ou emite energia?

b) Qual o valor da energia envolvida em eV?

c) Qual o valor da frequência do fóton ao realizar essa transição de nível? Dado: $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$ eV s.

4. Qual o valor da frequência do fóton ao realizar um transição do nível de energia $n=2$ para o nível $n=5$? Dados: $E_2 = -3,4 \text{ eV}$ e $E_5 = -0,45 \text{ eV}$, $h = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$.

LEDs		
Cor do LED	Tensão em Volts (V)	Corrente em Milliamperes (mA)
Vermelho	1,8V - 2,0V	20 mA
Amarelo	1,8V - 2,0V	20 mA
Laranja	1,8V - 2,0V	20 mA
Verde	2,0V - 2,5V	20 mA
Azul	2,5V - 3,0V	20 mA
Branco	2,5V - 3,0V	20 mA

5. Com o auxílio da tabela acima determine o valor da resistência elétrica para que cada Led funcione individualmente em sua tensão máxima, utilizando uma bateria de fonte 12V.

6. Imagine que você quer ligar um Led vermelho, de tensão igual a 2V e corrente igual a 20 mA em uma alimentação, usando 2 pilhas de 1,5V. Determine o valor da resistência elétrica para que o Led funcione em sua tensão máxima.