



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA**

GLEISON SIQUEIRA DE SOUZA

**ESTUDO TEÓRICO SOBRE MATERIAIS SEMICONDUTORES E APLICAÇÕES
TECNOLÓGICAS**

**Palmas
JUNHO/2014**

GLEISON SIQUEIRA DE SOUZA

**ESTUDO TEÓRICO SOBRE MATERIAIS SEMICONDUTORES E APLICAÇÕES
TECNOLÓGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins, *Campus* Palmas,
como parte das exigências para a conclusão do
Curso de Licenciatura em Física, sob a
orientação do Professor Ademar Paulo Júnior.

**Palmas
JULHO/2014**

Souza, Gleison Siqueira de
Estudo teórico sobre materiais semicondutores e aplicações
tecnológicas / Gleison Siqueira de Souza. – Palmas, 2014
63 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Educação do
Tocantins, Campus Palmas, 2014.

Orientador: Prof. Ademar Paulo Junior

1. Semicondutores 2. Aplicações I. Título



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo teórico sobre materiais semicondutores e aplicações tecnológicas.

AUTOR: Gleison Siqueira de Souza.

ORIENTADOR: Ademar Paulo Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *campus* Palmas, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Licenciatura em Física.

Aprovada em 18/07/2014.

Prof.^o Ademar Paulo Júnior
IFTO – Campus Palmas
Presidente/Orientador

Prof.^o Weimar Silva Castilho
IFTO – Campus Palmas

Prof.^a Jeane Silveira de Oliveira
UniEvangélica – Anápolis - GO

Dedico este trabalho à minha família e minha querida e amada esposa Millena, por estarem sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

“Mas os que esperam no Senhor, renovarão as suas forças e subirão com asas como águias; correrão e não se cansarão; caminharão e não se fatigarão.” (Isaías 40:31)

Agradeço a Deus por me conceder esta benção, me dando saúde, perseverança, e a certeza da vitória, não me deixando desanimar mesmo em tempos difíceis.

A minha família em especial a minha mãe, mulher forte, guerreira e exemplo para mim, que sempre me apoiou acreditando no meu sucesso, sendo uma base firme de sustentação.

A Millena, amiga, namorada, noiva e agora minha amada esposa pelos incentivos, por estar ao meu lado, sendo meu braço forte, contribuindo com este trabalho.

Ao meu sogro, minha sogra e cunhada por me recebem na família de corações abertos e fazerem parte da minha vida.

Ao pastor e irmãos em Cristo Jesus da Primeira Igreja Batista em Taquaruçu pelo apoio em oração.

Ao meu orientador Ademar, pela coragem e força de vontade em contribuir significativamente neste trabalho.

Aos professores que fizeram parte da minha formação acadêmica em especial Weimar, Denise e Márcio.

Aos amigos, colegas e todos que passaram pela minha vida e de alguma forma contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal.

"[...] O bom professor é aquele que consegue enquanto fala, trazer o aluno até a intimidade do movimento de seu pensamento. Sua aula é assim um desafio e não uma cantiga de ninar. Seus alunos cansam, não dormem. Cansam porque acompanham as idas e vindas de seu pensamento, surpreendem suas pausas, suas dúvidas, suas incertezas."
Paulo Freire

RESUMO

SOUZA, Gleison Siqueira. Estudo teórico sobre materiais semicondutores e aplicações tecnológicas. 2014. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, *Campus Palmas*, Palmas -TO, 2014.

O presente trabalho é um estudo teórico que apresenta um pouco da história atomística desde a primeira ideia de átomo na Grécia antiga, passando por alguns autores importantes como Dalton, Thomson, Rutherford, até o modelo de Bohr, que não é o modelo vigente, porém teve um papel importante na compreensão do mundo microscópico com a determinação dos níveis de energia do átomo. A partir do modelo de Bohr, apresentamos os materiais semicondutores e suas particularidades, que devido o conhecimento dos níveis de energias podem ser trabalhados para melhor atender determinadas finalidades. Esses materiais semicondutores são a base do avanço tecnológico com muitas aplicações na sociedade. O conhecimento da eletrônica desses materiais, que se deu através da evolução da Física, proporcionou melhorias para o dia a dia das pessoas. Essas aplicações da Física devem ser trabalhadas em sala de aula com os alunos que, muita das vezes, não veem um motivo real de se estudar Física. A Física tem evoluído e melhorado o bem estar das pessoas, o professor deve ter essa consciência, saber trabalhar as aplicações físicas com os alunos, para que eles possam gostar da disciplina.

Palavras-chave: semicondutores; física; aplicações; átomos.

ABSTRACT

SOUZA, Gleison Siqueira. Theoretical study of semiconductor materials and technological applications. 2014. 65f. Completion of course work. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, *Campus Palmas*, Palmas -TO, 2014.

The present work is a theoretical study that presents a bit of history from the first atomistic idea of atom in ancient Greece, through some important authors such as Dalton, Thomson, Rutherford, until the Bohr model, which is not the current model, but played an important role in understanding the microscopic world with the determination of the energy levels of the atom. From the Bohr model we present semiconductor materials and their characteristics, due to the knowledge of the energy levels can be worked to better serve certain purposes. These semiconductor materials are the foundation of technological advancement with many applications in society. Knowledge of electronics these materials, which occurred through the evolution of physics provided improvements to the daily lives of people. These applications of physics should be worked in the classroom with the students, a lot of times, they do not see a real reason to study physics. Physics has evolved and improved the welfare of the people, the teacher should have this awareness, learn to work with the students the physical applications, so they can enjoy the discipline.

Keywords: semiconductors; physics; applications; atoms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – John Dalton.

Figura 02 – Modelo atômico de John Dalton.

Figura 03 – Joseph John Thomson.

Figura 04 – Modelo atômico de Joseph John Thomson.

Figura 05 – Ernest Rutherford.

Figura 06 – Experimento de Rutherford, espalhamento de partículas alfa.

Figura 07 – Espalhamento de partículas alfa segundo o modelo de Thomson.

Figura 08 – Fatos observados no espalhamento de partículas alfa.

Figura 09 – Modelo atômico de Rutherford.

Figura 10 – Niels H. D. Bohr.

Figura 11 – Espectro do átomo de hidrogênio.

Figura 12 – Modelo atômico segundo a teoria clássica.

Figura 13 – Modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio.

Figura 14 – Diagrama de níveis de energia para o átomo de hidrogênio.

Figura 15 – Representação das camadas eletrônicas de um átomo.

Figura 16. Distribuição eletrônica do átomo de silício com quatro elétrons na última camada.

Figura 17 – Ligações covalentes em um cristal de silício puro.

Figura 18 - a) distribuição dos níveis energéticos de material isolante. b) distribuição dos níveis energéticos de material condutor.

Figura 19 – Diagrama de energia para os semicondutores.

Figura 20 – Elétrons excitados para a camada de condução.

Figura 21 – Cristal de silício dopado com arsênio, contendo cinco elétrons na camada de valência, deixando um elétron extra.

Figura 22 – Elétrons extras do átomo doador ocupando um nível próximo a banda de condução.

Figura 23 – Cristal de silício dopado com um átomo contendo três elétrons na camada de valência, deixando um buraco aceitador.

Figura 24 – buracos dos átomos aceitadores ocupando um nível energético próximo a banda de valência.

Figura 25 – Junção p-n.

Figura 26 – Junção p-n com formação de região de depleção.

Figura 27 – Representação do diodo.

Figura 28 – Junção p-n com polarização direta.

Figura 29 – Junção p-n com polarização inversa.

Figura 30 – Diodo emissor de luz.

Figura 31 – Estrutura de OLED.

Figura 32 – Tecnologias de OLED em telas de microfilmes.

Figura 33 – Representação da junção bipolar.

Figura 34 – Transistor de junção bipolar.

Figura 35 – Termistor NTC e PTC.

Figura 36 – Representação do fotocondutor.

Figura 37 – Relé-fotoelétrico.

Figura 38 – Representação de célula fotovoltaica.

Figura 39 – Placas solares.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 – Força centrípeta.

Equação 02 – Frequência de revolução.

Equação 03 – Frequência de revolução.

Equação 04 – Energia total do elétron.

Equação 05 – Comprimento de onda empírica da série de Balmer.

Equação 06 – Equação de Rydberg.

Equação 07 – Força eletrostática e força centrípeta.

Equação 08 – Força eletrostática.

Equação 09 – Força centrípeta.

Equação 10 – Raio quântico.

Equação 11 – Raio quântico.

Equação 12 – Raio de Bohr.

Equação 13 – Energia do átomo de hidrogênio.

Equação 14 – Energia total quantizado do elétron.

Equação 15 – Frequência de radiação eletromagnética.

Equação 16 – Frequência.

Equação 17 – Série de Balmer.

Equação 18 – Energia potencial eletrostática.

Equação 19 – Função de onda.

Equação 20 – Densidade de probabilidade.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1 HISTÓRIA ATOMÍSTICA, MODELO ATÔMICO	16
1.1 Átomo grego	16
1.2 Modelo atômico de John Dalton.....	17
1.3 Modelo atômico de Joseph John Thomson.....	19
1.4 Modelo atômico de Ernest Rutherford.....	21
1.5 Modelo atômico de Niels Henrik David Bohr	25
1.5.1 Espectroscopia atômica	28
1.5.2 Postulados de Bohr para o átomo de hidrogênio.....	29
1.5.3 Modelo de Bohr	30
2. MATERIAIS SEMICONDUTORES.....	36
2.1 Estrutura atômica dos semicondutores	36
2.2 Corrente elétrica nos semicondutores.....	39
2.3 Semicondutores dopados tipo n e tipo p	43
2.3.1 Dopagem tipo n	43
2.3.2 Semicondutores tipo p.....	45
2.4 Junção p-n, efeito de contato entre as regiões.....	46
3 APLICAÇÕES DOS SEMICONDUTORES	48
3.1 Diodo retificador.....	49
3.2 Diodo Emissor de Luz (LED).....	50
3.3 Diodo Orgânico Emissor de Luz (OLED).....	51
3.4 Transistor de Junção Bipolar.....	52
3.5 Termistores	53
3.6 Fotocondutores.....	54
3.7 Células Fotovoltaicas.....	56
CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS.....	60

INTRODUÇÃO

O conhecimento em Física evoluiu e proporcionou melhorias na vida do homem, e este trabalho tem como objetivo mostrar a relação da Física com o cotidiano, uma vez que em sala de aula alunos que não tem compreensão desta realidade acabam por não gostar da disciplina, dificultando a aprendizagem. Para isso, apresentamos a concepção de átomo desde a Grécia até Bohr e os materiais semicondutores com suas aplicações, que podem ser utilizadas como exemplos para despertar a curiosidade dos alunos ou responder seus questionamentos.

Na filosofia grega surge a primeira ideia do átomo com os filósofos Leucipo de Mileto e Demócrito de Abdera. Para eles, o átomo seria a menor parte da matéria, que não se divide, surgindo devido à necessidade que o homem tinha de explicar a natureza. Com os vários pensamentos da época, e a não experimentação que comprovasse a ideia a fim de consolidar uma nova teoria, esse pensamento foi superado por outras ideias relevantes da época.

Somente no século XIX surge o primeiro modelo atômico com o físico inglês John Dalton. Daí em diante, essa corrida para compreender as estruturas do átomo se torna mais intensa. No final do século XIX, com o modelo denominado pudim de passas, Joseph John Thomson apresenta sua ideia de átomo, uma esfera sólida com os elétrons em sua casca, sendo, até então, o primeiro modelo atômico divisível em partes. O ex-aluno de Thomson, Ernest Rutherford revela a existência do núcleo atômico rodeado por elétrons e constituído na sua maior parte de espaços vazios. Em 1911 Rutherford realiza o famoso experimento da folha de ouro resultando em um modelo em que os elétrons giravam em torno do núcleo. Neste modelo de Rutherford, os elétrons giravam em volta do núcleo, como o sistema solar.

Porém, esse novo modelo deixava uma pergunta intrigante: como esses elétrons giravam em torno do núcleo e não colidiam com o mesmo? O modelo de Rutherford não consegue responder a essa pergunta. Niels Henrik David Bohr que trabalhou no laboratório de Rutherford se dedicou a responder o porquê de os elétrons orbitarem o núcleo atômico sem colapsar. Acreditava Bohr, que, com a teoria quântica de Max Planck, seria capaz de responder a essa pergunta e criar um novo modelo. Em 1913, Bohr apresenta seu modelo atômico para o átomo de

hidrogênio. Por meio desse modelo atômico, com os elétrons girando em torno do núcleo, Bohr determinou os níveis de energia que o átomo apresenta.

Com o modelo atômico de Bohr e a compreensão dos níveis de energia foi possível conhecer o comportamento elétrico dos materiais, dentre eles os semicondutores, com condução elétrica intermediária entre isolantes e condutores. Este tipo de material pode ser trabalhado para melhor atender determinadas finalidades. O estudo da eletrônica dos semicondutores proporcionou grandes mudanças na tecnologia. As aplicações dos dispositivos semicondutores estão presentes nas novas tecnologias, facilitando seu manuseio, economizando energia e miniaturizando suas dimensões.

Neste trabalho abordaremos, no primeiro capítulo, de forma sucinta a história atomística desde a Grécia antiga até o modelo atômico de Bohr, sendo dada uma ênfase maior neste último modelo referido, pois foi de grande contribuição para o estudo de semicondutores. No segundo serão abordados os semicondutores, sua forma de condução elétrica e sua estrutura física. E no terceiro capítulo enfocaremos os dispositivos semicondutores e suas aplicações tecnológicas.

1 HISTÓRIA ATOMÍSTICA, MODELOS ATÔMICOS

Os Químicos definem matéria como tudo que tem massa e ocupa lugar no espaço. Quando são conhecidas porções dessa matéria, suas partes menores e seu comportamento, é possível trabalhá-las em benefício do homem. Com o conhecimento mais profundo do átomo, foi possível entender seu comportamento, e com isso, manipular algumas substâncias impulsionando o avanço tecnológico. Ferreira, Bampi e Alvares (2004) concordam que o desenvolvimento tecnológico se deu através da eletrônica dos semicondutores, possibilitando, desta forma, o avanço da informática, comunicações, revolucionando o cotidiano das pessoas e os negócios.

Porém, o início da busca pelo conhecimento da natureza da matéria pode ser considerado na Grécia antiga, por volta do século V a.C., onde o átomo foi conceituado como a menor parte da matéria, o que não se divide, do grego (a = não; tomos = não divide). Nas sessões seguintes faremos uma breve revisão sobre a teoria atomística desde sua origem até o modelo atômico de Niels Henrik David Bohr em 1913, onde a partir de sua definição proporcionou grandes avanços científicos, sendo uma das mais importantes a descoberta e aplicação tecnológica dos semicondutores, Ferreira, Bampi e Alvares (2004).

1.1 Átomo grego

A ideia de átomo surge na filosofia grega, com Leucipo e Demócrito da escola atomista. Contrapondo as doutrinas dos filósofos Parmênides de Eléia, Zênon de Eléia e Melisso de Samos da escola de Eléia, afirmam que os corpos são compostos de átomos, seres indivisíveis, independentes e imutáveis, como se pode ver Reale e Antiseri (1990) afirmam que suas doutrinas e filosofias se dão pela necessidade que o homem tem de explicar o meio, os fenômenos naturais, a origem do mundo.

De acordo com Reale e Antiseri (1990) Leucipo é o fundador da escola atomista. Nascido em Mileto, mudou-se para a cidade de Eléia na Itália onde conheceu a doutrina eleática. Mais tarde, foi para Abdera onde fundou a escola atomista, da qual foi discípulo Demócrito, nascido por volta de 460 a.C. quem teria elevado a ideia do átomo.

A doutrina atomista sustenta que a realidade consiste em átomos e no vazio, os átomos se atraindo e se repelindo, e gerando com isso os fenômenos naturais e o movimento. Atração e repulsão dos átomos devem-se às suas formas geométricas, sendo que átomos de formas semelhantes se atraem e os de forma diferente se repelem. (MARCONDES, 2001, p. 34-35)

Com o advento do movimento sofista, homens, portadores de uma eloquência incomum, oradores sábios que tinham o poder da persuasão, fascinavam quem os ouviam, tendo Protágoras, homem culto como o primeiro sofista, e dos filósofos Sócrates, Platão e Aristóteles o pensamento atomístico perde espaço na filosofia grega. A filosofia atomista é retomada com Epicuro de Samos (~342-271 a.C.) e Lucrécio (Roma 100/94-55 a.C.). De acordo com Filgueiras (2004) a oposição de Aristóteles, tido como principal filósofo na Idade Média e Renascimento tornaram a teoria atômica inaceitável e herege diante da igreja ocidental.

O conceito de átomo permaneceu no campo filosófico até por volta do início do século XIX, quando John Dalton apresenta seu modelo atômico, o primeiro conceito científico de átomo.

1.2 Modelo atômico de John Dalton

John Dalton (1766-1844), Figura 1, nasceu em Eaglesfield, Inglaterra, não chegou à formação universitária, mas sempre demonstrou interesse por Matemática. De 1784 a 1794 escreveu em periódicos, estudou Zoologia e Botânica, passou a fazer observações meteorológicas e lecionar cursos de filosofia natural e química dos gases, o que o levaria ao modelo atômico. Em 1793 foi convidado a ser professor de Matemática e filosofia natural no New College, de Manchester, (FILGUEIRAS, 2004). De acordo com Viana e Porto (2007), Dalton, persuadido pela ideia corpuscular de Newton, no final do século XVIII e início do XIX, adere a esse pensamento a respeito da matéria. Ademais, sua procura por explicações para as questões relacionadas à atmosfera e aos gases o levou a especular sobre possíveis diferenças de massas entre os átomos constituintes das diferentes substâncias elementares.

Figura 1 – John Dalton.



Fonte: Só química.

Segundo Filgueiras (2004), Dalton apaixonado por meteorologia começa a estudar os gases que compõem a atmosfera. Na época, rondava os pesquisadores a dúvida de como esses gases, Oxigênio, Nitrogênio e gás Carbônico, interagiam entre si. A partir daí, ele se lança a buscar respostas por meio de experimentos advindos de bases newtonianas e acaba por descobrir uma lei importante, a lei das pressões parciais dos gases.

Com essa teoria, Dalton não para, e busca explicar a interdependência de um gás em relação ao outro, considerando se seria devida à diferença no tamanho das partículas. Assim inicia seu estudo com dissolução em água, trazendo o seu marco para a química moderna e a história do átomo, a lei das proporções múltiplas, que deu toda a origem aos cálculos de massa dos átomos (FILGUEIRAS, 2004).

Para a época, a teoria de pesos dos átomos levou um tempo até ser aceita, pois tudo que Dalton propunha era muito novo. Porém, com o passar dos anos à ideia de modelo atômico foi aceita e por muito tempo respondeu as dúvidas e questionamentos científicos da época, e perdurou até final do século XIX quando começou dar os primeiros sinais de que a teoria estivesse ultrapassada. (MELZER e AIRES, 2011).

“De fato, Dalton ressuscitou o conceito de átomo grego e foi capaz de sustentar este conceito com evidências experimentais que ele e outros obtiveram.” (RUSSELL, 1994, p. 207). Com seus trabalhos, e representado na Figura 2, Dalton conclui em 1803 que:

Toda matéria é constituída por partículas, denominadas átomos;

- Os átomos são indivisíveis, não podem ser criados nem destruídos de acordo com o princípio da conservação da matéria – Lavoisier;

- Os átomos de um mesmo elemento são idênticos e apresentam o mesmo peso;
- Esse modelo trazia o átomo como uma esfera maciça, ficando conhecido como modelo da bola de bilhar.

Figura 2 – Modelo atômico de Dalton.



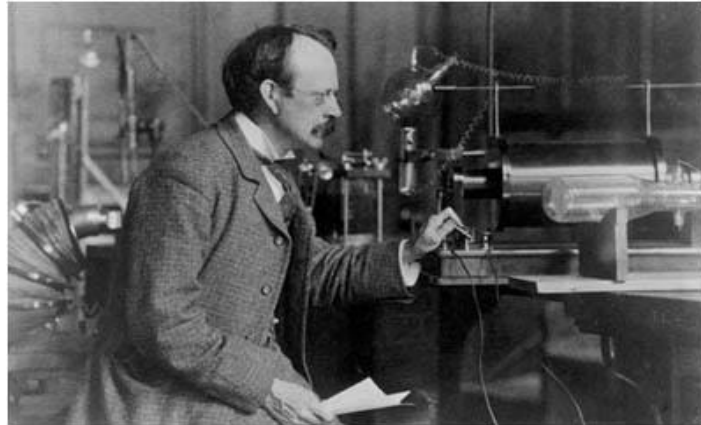
Fonte: Explicatorium.

Com o passar do tempo esse modelo deixou de responder alguns questionamentos. Na segunda metade do século XIX, experimentos realizados mostraram equívocos, como o átomo não ser uma esfera maciça, não ser indestrutível, eram divisíveis, penetráveis e as vezes diferentes em um mesmo elemento químico.

1.3 Modelo atômico de Joseph John Thomson

Joseph John Thomson, Figura 3, foi um Físico britânico que em 1897 descobriu o elétron, e posteriormente a razão entre sua carga e sua massa. De acordo com Eisberg e Resnick (1979) na primeira década do século XX já existiam muitas evidências experimentais da existência de partículas negativamente carregadas, mais tarde chamadas de elétrons, como por exemplo, o espalhamento de raios X, efeito fotoelétrico e outros. “Estas experiências davam uma estimativa para Z , o número de elétrons em um átomo, como sendo aproximadamente igual a $A/2$, onde A é o peso atômico químico do átomo considerado.” (EISBERG e RESNICK, 1979, p. 123).

Figura 3 – Joseph John Thomson.

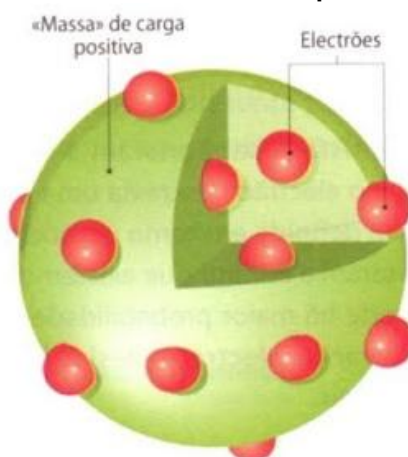


Fonte: Fermi national accelerator laboratory.

Young e Freedman (2003) relatam que essas experiências, como outras que não são citadas neste trabalho, mostraram que a carga positiva corresponde a maior parte da massa total do átomo, e não as cargas negativas, os elétrons. Portanto “o fato de que a massa do elétron é muito pequena se comparada com a de qualquer átomo, mesmo com a do mais leve, implica que a maior parte da massa do átomo deve estar associada à carga positiva” (EISBERG e RESNICK 1979, p. 123)

Segundo os autores mencionados acima, considerações sobre como seria a distribuição das cargas dentro do átomo, e a realização de experimentos como descargas elétricas em tubos de Crookes, levaram Thomson a descoberta da existência do elétron. Os tubos de Crookes são basicamente um dispositivo constituído de uma ampola de vidro conectado a uma bomba de vácuo contendo dois eletrodos nas extremidades. Este trabalho levou J. J. Thomson a propor no final do século XIX seu modelo de átomo. Neste, os elétrons, com cargas negativas, estariam no interior de uma distribuição contínua e esférica de carga positiva. O raio dessa esfera, já era conhecido e da ordem de 10^{-10} m. Esse modelo atômico ficou conhecido como pudim de passas por se parecer com um pudim recheados de passas como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Modelo atômico de Joseph John Thomson.



Fonte: Grupo química átomos.

Neste modelo, quando o átomo estivesse em seu estado fundamental, estado de menor energia, os elétrons estariam fixos em uma posição de equilíbrio, e em átomos excitados, os elétrons vibrariam em torno dessa posição de equilíbrio. De acordo com a teoria eletromagnética esse átomo emitiria radiação por ser um corpo carregado e estar em movimento acelerado. Com a teoria era possível entender a emissão de radiação eletromagnética de átomos excitados através do modelo Thomson, porém não concordava com os espectros de linhas observados experimentalmente. (EISBERG e RESNICK, 1979)

Tais informações já eram conhecidas pelos físicos naquela época, sendo o principal questionamento o comportamento dessas cargas dentro do átomo. No início do século XX, Ernest Rutherford e seus colaboradores elaboraram um novo modelo de átomo, o átomo nuclear, através dos resultados surpreendentes obtidos com o experimento de espalhamento de partículas alfa.

1.4 Modelo atômico de Ernest Rutherford

Nascido na Nova Zelândia, Ernest Rutherford (1871-1937), Figura 5, desenvolveu suas atividades profissionais na Inglaterra e no Canadá. Junto com Frederick Soddy, ganhou o prêmio Nobel de Química em 1908, por ter mostrado a radioatividade na desintegração dos átomos, Young e Freedman (2003).

Figura 5 – Ernest Rutherford.



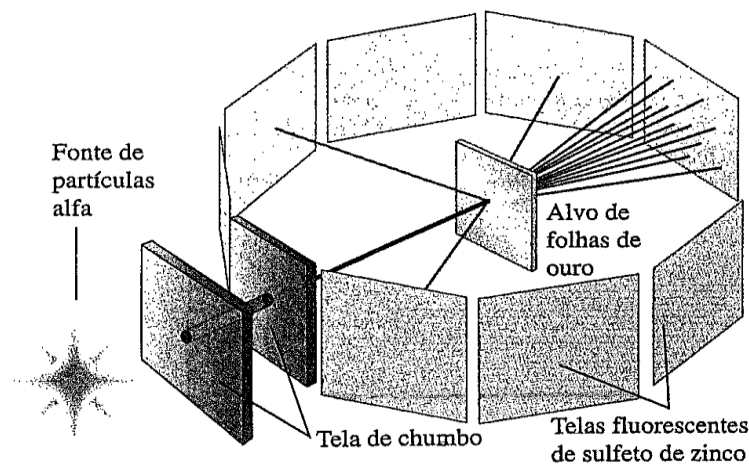
Fonte: University of Canterbury.

Segundo Russel (1994), a descoberta de elementos radioativos possibilitou a Rutherford e seus colaboradores, Johannes (Hasn) Wilhelm Geiger e Ernest Marsden, a realização de um experimento com o uso de partículas alfa, partículas de carga positiva e massa muito maior que um elétron, cerca de 7300 vezes. Hoje sabemos que as partículas alfa são, na verdade, núcleos de átomos de hélio formados por dois prótons e dois nêutrons.

O experimento de Rutherford consistia em bombardear folhas finas de diversos materiais, entre eles o ouro, observando-se o comportamento das partículas que, ora passavam, ora sofriam desvios.

As partículas eram detectadas em telas fluorescentes de sulfeto de zinco, onde um clarão se formava no local do contato, da partícula com a tela, como podemos ver na Figura 6.

Figura 6 – Experimento de Rutherford, espalhamento de partículas alfa.

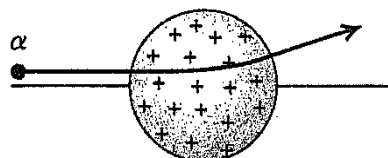


Fonte: Young e Freedman.

Uma fonte de substância radioativa emite partículas alfa, e duas telas de chumbo grossas com um orifício central colimam as partículas, em um feixe estreito (ou fino). O feixe colide com o alvo, as folhas de ouro, e observa-se que muitas partículas passam direto sofrendo pequenos ou nenhum desvio e outras são desviadas, chegando até a voltar em direção à fonte radioativa. A ideia de Rutherford era medir o desvio das partículas alfa ao passar pelos átomos do material.

Quando o experimento de Rutherford foi realizado, o modelo de átomo proposto por J. J. Thomson tinha toda a credibilidade e os elétrons estariam distribuídos em uma esfera de carga positiva, como afirma Halliday, Resnick e Walker (2011). Entretanto esse modelo não era satisfatório para explicar o que foi observado no experimento realizado por Rutherford. Explicava a passagem das partículas alfas com pequenos desvios, mas não explicava os grandes desvios das partículas, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Espalhamento de partículas alfas segundo o modelo de Thomson.

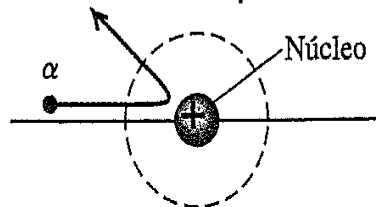


Fonte: Young e Freedman.

Pelo modelo de Thomson as partículas alfa sofreriam pequenos desvios ao atravessar o átomo, devido ao grande tamanho delas em relação aos elétrons.

“Pensando em termos do modelo de Thomson, a princípio ele [Rutherford] não foi surpreendido pelo fato de que muitas das partículas alfa atravessavam em linha reta a folha com pouca ou nenhuma deflexão” (RUSSELL, 1994, p. 215). Entretanto ficava a pergunta, e os grandes desvios? como o mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Fatos observados no espalhamento de partículas alfas.



Fonte: Young e Freedman.

Conforme vemos em Halliday, Resnick e Walker (2011), Rutherford imaginou que as partículas que sofriam grandes desvios deveriam ser submetidas a uma força muito grande, e para isso a carga positiva, ao invés de espalhada no átomo, deveria estar concentrada em um minúsculo espaço. A aproximação máxima das partículas alfas resultaria numa força de repulsão muito forte, resultando em grandes desvios, até mesmo com ângulo de 180° .

Com esse experimento Rutherford em 1911 apresenta seu modelo atômico nuclear, nele o átomo tem um pequeno núcleo, com raio nuclear da ordem de 10^{-14} m contendo aproximadamente 99,95 % da massa total e ocupando um volume cerca de 10^{-12} vezes o volume do átomo, onde concentra toda a carga positiva, com tamanho de 10^4 vezes menor do que o proposto por Thomson. Os elétrons descrevem órbitas em torno do núcleo, figura 9, análogas ao sistema planetário, distribuídos em um espaço muito grande denominado eletrosfera, como mostram os autores Eisberg e Resnick, (1979), Halliday, Resnick e Walker, (2011) e Young e Freedman, (2003).

Figura 9– Modelo atômico de Rutherford.



Fonte: Colégio militar de Fortaleza.

Rutherford ainda demonstrou em 1914 a existência de uma partícula de massa muito maior que a do elétron e carga de mesma magnitude, porém com sinal oposto, chamadas, posteriormente, de prótons. Somente os prótons não eram suficientes para explicar a constituição do núcleo, e em 1932 o físico inglês James Chadwick detecta a existência de nêutrons, partículas de mesma massa que os prótons, porém de carga elétrica nula, no núcleo do átomo. Desta forma, o átomo fica assim representado, um núcleo central composto por prótons com cargas positivas contendo a maior parte da massa e ocupando um pequeno espaço, nêutrons sem carga elétrica e os elétrons com carga negativa com orbitas que ocupam um grande volume em volta do núcleo. A carga líquida de um átomo em seu estado fundamental é nula, devido ao fato de o número de prótons serem iguais ao número de elétrons, sendo que suas cargas são de sinais opostos. Russell (1994).

1.5 Modelo atômico de Niels Henrik David Bohr

O modelo atômico de Rutherford, como já discutido anteriormente, apresentava os elétrons gravitando em torno do núcleo que ocupa um espaço bem pequeno com grande concentração de massa, todavia não dava resposta a respeito da estabilidade desse átomo.

Niels H. D. Bohr (1885-1962), Figura 10, um físico dinamarquês, propôs um modelo para o átomo de hidrogênio, sendo esse o átomo mais simples que contém um próton e um elétron. Seu modelo, apoiado pelos trabalhos de Max Planck, Albert Einstein e Rutherford, previa a posição das linhas do espectro do hidrogênio, (TIPLER e LLEWELLYN, 2010). A proposta de Bohr surge da necessidade de explicação das incoerências apresentadas entre o modelo atômico Rutherford e a teoria clássica.

Figura 10 – Niels H. D. Bohr.



Fonte: Só química.

Segundo esses autores, Bohr pensou o elétron do átomo de hidrogênio girando numa órbita circular em torno do núcleo, nesse modelo a força de interação coulombiana garante a estabilidade mecânica, pois, a resultante é uma força centrípeta, que mantém o elétron girando com velocidade v em volta do núcleo, a força é dada por

$$F = \frac{kZe^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (01)$$

onde e é a carga elementar do elétron. Por outro lado, o modelo seria eletricamente instável, uma vez que, de acordo com as leis da eletrodinâmica de Maxwell uma carga em movimento acelerado irradia energia por meio de ondas eletromagnéticas e o elétron, girando em volta do núcleo, estaria acelerado em sua direção irradiando energia a uma frequência igual à frequência de revolução. Sabemos que a frequência de revolução é dada por

$$f = \frac{v}{2\pi r} \quad (02)$$

onde r é o raio da órbita e v a velocidade do elétron. Isolando v na equação (01) e substituindo em (02), chegamos à expressão da equação para a frequência de revolução em função do raio

$$f = \left(\frac{kZe^2}{4\pi^2 m} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{r^{\frac{3}{2}}} \sim \frac{1}{r^{\frac{3}{2}}} \quad (03)$$

Sendo assim, esse elétron perderia energia continuamente. Como sabemos, a energia total do elétron é dada pela soma da sua energia cinética e potencial, como mostra a equação

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-\frac{kZe^2}{r}\right) \quad (04)$$

Entretanto, devido a perda de energia, o raio da trajetória diminuiria e o elétron descreveria uma órbita espiral até colidir com o núcleo. É possível calcular o tempo necessário para o elétron atingir o núcleo do átomo, não faremos esse cálculo, uma vez que não é o objetivo deste trabalho.

Todavia os elétrons não colapsam no núcleo, conforme a previsão teórica, uma vez que o átomo de hidrogênio é estável, bem como a matéria. Nos experimentos se observava que os átomos não irradiam energia pelo simples fato dos elétrons estarem orbitando o núcleo em movimento acelerado, mas, para isso era preciso uma ação externa, pois os átomos não irradiavam um espectro contínuo, mas apenas frequências bem definidas.

A Física clássica já não consegue fornecer uma explicação teórica para os fenômenos observados experimentalmente. Para Russell (1994) existem duas possibilidades a serem consideradas: ou ele está parado ou está em movimento. O elétron estando parado traz o seguinte dilema pelos princípios da mecânica clássica: a força de atração entre o núcleo, carregado positivamente, aproximaria o elétron carregado negativamente até estes colapsarem-se, impossibilitando a existência de qualquer tipo de matéria. Por outro lado, com o elétron em movimento, como já foi mencionado anteriormente, o fim seria o mesmo da situação anterior, e os elétrons emitiriam um espectro contínuo de radiação, diferente do conhecimento que os cientistas daquela época já tinham a respeito de espectros discretos emitidos por átomos.

Estas conclusões obtidas no início do século XX, como apresenta Russell (1994), se tornaram um dilema para os cientistas da época. As explicações dadas pela Física clássica não satisfaziam a realidade observada. Dessa forma, Bohr apresenta seu modelo atômico baseado na teoria quântica de Max Planck e no efeito fotoelétrico de Einstein.

Antes de abordarmos o modelo de Bohr, propriamente dito, faremos uma breve discussão sobre a espectroscopia atômica.

1.5.1 Espectroscopia atômica

A espectroscopia atômica é uma importante área de pesquisa, tanto na Física como na Química. Os espectros de emissão dos elementos e compostos químicos podem ser divididos em três categorias: os espectros contínuos, os espectros de bandas e os espectros de linhas, como afirmam Tipler e Llewellyn (2010).

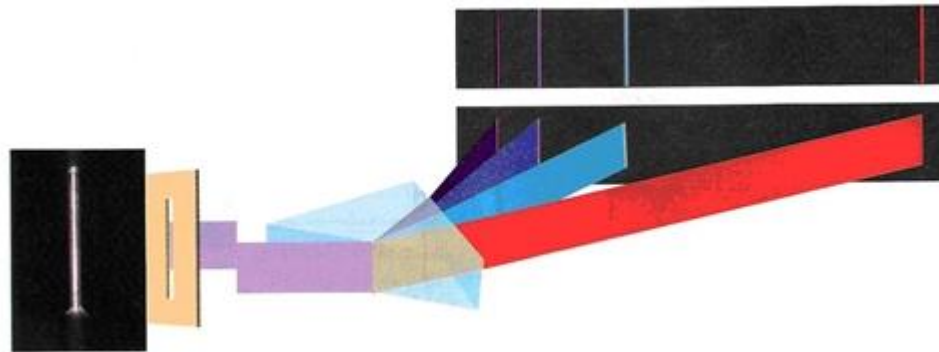
No espectro contínuo se encontram todos os comprimentos de onda e são dados por corpos em estados líquidos ou sólidos, para esse fenômeno é necessário elevar o corpo a altas temperaturas. Espectros de bandas são faixas formadas por moléculas isoladas, não por átomos como no espectro de linhas. Cada banda possui grande número de linhas muito próximas que não se pode separar uma da outra.

Os espectros de linhas são característicos de substâncias gasosas que contém apenas um tipo de elemento químico, por exemplo, o átomo de hidrogênio. Esses espectros são inerentes a cada substância, ou seja, o espectro de uma amostra determina as substâncias que compõem o material. A compreensão dos espectros de linhas do hidrogênio foi um grande passo da teoria quântica de Planck e Einstein, Id (2010).

Uma investigação dos espectros emitidos por diferentes tipos de átomos mostra que cada tipo tem seu espectro característico próprio, isto é, um conjunto característico de comprimentos de onda nos quais as linhas do espectro são encontradas. Essa característica é de grande importância prática por que faz com que a espectroscopia seja mais uma técnica muito útil a ser somada a técnicas usuais de análise química. (EISBERG e RESNICK, 1973, p. 135).

Quando um gás de hidrogênio é submetido a uma descarga elétrica ou aquecido a uma alta temperatura ele emite luz que atravessa uma rede de difração resultando em uma linha espectral, isto é, um conjunto de linhas com comprimentos de ondas discretos (RUSSELL, 1994), representado na Figura 11.

Figura 11 – Espectro do átomo de hidrogênio.



Fonte: Nota positiva.

Essas linhas possuem comprimento de onda na região da luz visível, e as regularidades das linhas fizeram com que o físico suíço Johann Jakob. Balmer obtivesse, em 1885, a equação empírica para o comprimento de onda, conhecida como série de Balmer e dada por:

$$\gamma = 364,6 \left(\frac{n^2}{n^2 - 4} \right), [nm] \quad (05)$$

onde n são números inteiros que assumem valores acima de 3. Em 1890, Rydberg obteve para essa expressão

$$\frac{1}{\gamma} = R_H \left(\frac{1}{2^2} + \frac{1}{n^2} \right), n = 3, 4, 5, \dots \quad (06)$$

$$R_H = 1,097373 \times 10^7 m^{-1}$$

em que R_H é conhecida como a constante de Rydberg para o hidrogênio.

Com base nesses conhecimentos bem difundidos, Niels Bohr propõe uma explicação para tais fenômenos introduzindo as ideias de Planck e Einstein

1.5.2 Postulados de Bohr para o átomo de hidrogênio

Na primeira década de 1900, como mostra Halliday, Resnick e Walker (2011), os cientistas já sabiam que o átomo de hidrogênio só emitia e absorvia quatro comprimentos de onda de luz visível. Porém, nenhum cientista sabia explicar porque esse fenômeno acontecia dessa maneira. As explicações para esses questionamentos vieram com Bohr, que bastante ousado, deixou de lado alguns pensamentos da Física clássica e mergulhou em novas ideias, uma vez que, a teoria clássica falhava em explicar os fenômenos do mundo microscópico.

Em 1913 Bohr apresentou um modelo atômico que concordava com os dados experimentais para o átomo de hidrogênio, seu modelo estava firmado nos seguintes postulados, como mostra Eisberg e Resnick (1979):

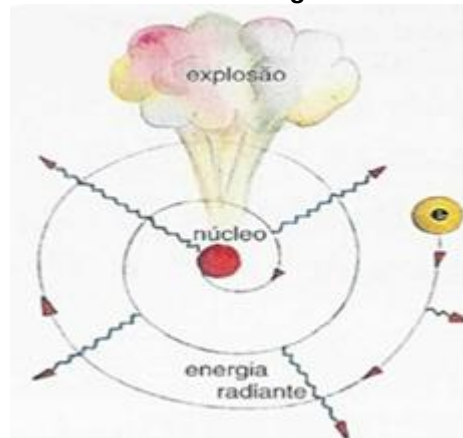
- Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo às leis da mecânica quântica;
- Em vez da infinidade de órbitas que seriam possíveis, que segundo a Mecânica Clássica era contínua e permitia as infinitas órbitas, um elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital $\vec{L}$ é um múltiplo inteiro de $\hbar$ ($\hbar = h/2\pi$);
- Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética. Portanto sua energia total E permanece constante;
- É emitida/absorvida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sob uma órbita de energia total E_i , muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em uma órbita de energia E_f . A frequência da radiação emitida ν é igual à quantidade $(E_i - E_f)$ dividida pela constante de Planck h .

Esses postulados conseguem misturar completamente a física clássica e a não clássica. Supõe-se que o elétron se movendo em uma órbita circular obedeça à mecânica clássica, e, no entanto a ideia não clássica de quantização do momento angular é incluída. Supõe-se que o elétron obedeça a uma característica da teoria eletromagnética clássica (a lei de Coulomb), e, no entanto não obedece a outra característica (a emissão de radiação por um corpo carregado acelerado). Entretanto, não devemos nos surpreender se as leis da física clássica, que se baseiam na nossa experimentação com sistemas macroscópicos, não forem completamente válidas quando lidamos com sistemas microscópicos, como o átomo. (EISBERG e RESNICK, 1979, p 139)

1.5.3 Modelo de Bohr

Como já foi mencionado anteriormente, no modelo clássico de átomo, o elétron orbitando o núcleo em movimento acelerado irradiaria energia até que este se chocaria com o núcleo, como mostra a Figura 12.

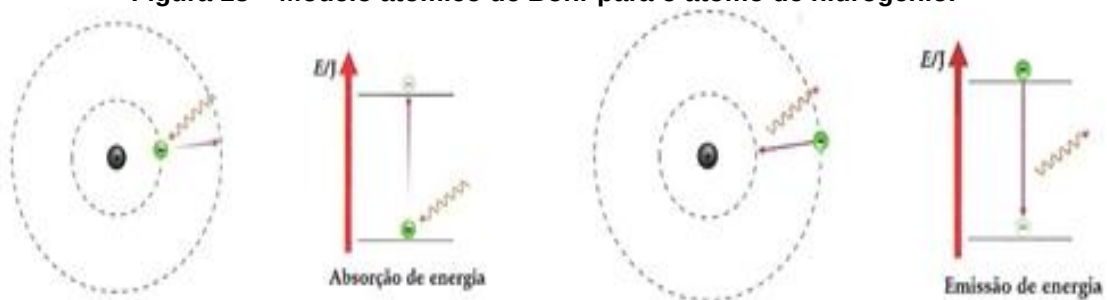
Figura 12 – Modelo atômico segundo a teoria clássica.



Fonte: Nota positiva.

Na Figura 13 Bohr apresenta seu modelo de átomo com o elétron orbitando em círculo em volta do núcleo sem emitir radiação eletromagnética de acordo com seus postulados.

Figura 13 – Modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio.



Fonte: Nota positiva.

Para isso Bohr traz um átomo, com raio orbital e energia quantizados e mudança de estados energéticos de forma discreta, como apresentada por Halliday, Resnick e Walker, (2011). De acordo com a teoria clássica, para o raio orbital a força que mantém o elétron em uma órbita de raio r é a força eletrostática que por ser uma força central, temos que

$$F_{el} = F_c \quad (07)$$

onde a força eletrostática é,

$$F_{el} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (08)$$

onde k é a constante eletrostática, $k = 1/4\pi\epsilon_0$, q_1 e q_2 são as cargas do próton e elétron. E a força centrípeta igual a

$$F_c = m \frac{v^2}{r} \quad (09)$$

A partir da expressão que iguala as forças, aplicando a quantização do momento angular $L = mrv = n\hbar$, Bohr encontra a expressão para o raio quantizado para o modelo de Bohr,

$$r = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} n^2, \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

podendo ainda ser escrito da forma,

$$r = an^2 \quad (11)$$

quando $n = 1$ o elétron se encontra no menor raio permitido, conhecido como raio de Bohr para o átomo de hidrogênio, que é

$$a = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} = 5,291722 \times 10^{-11} m \quad (12)$$

Para demonstrar que a energia do átomo de hidrogênio também é quantizada Bohr partiu do fato, de que, a energia total do átomo é igual à soma das energias cinética K e potencial U , como mostrado na equação (04), e, isolando mv^2 da expressão (07) chegamos ao final de alguns cálculos,

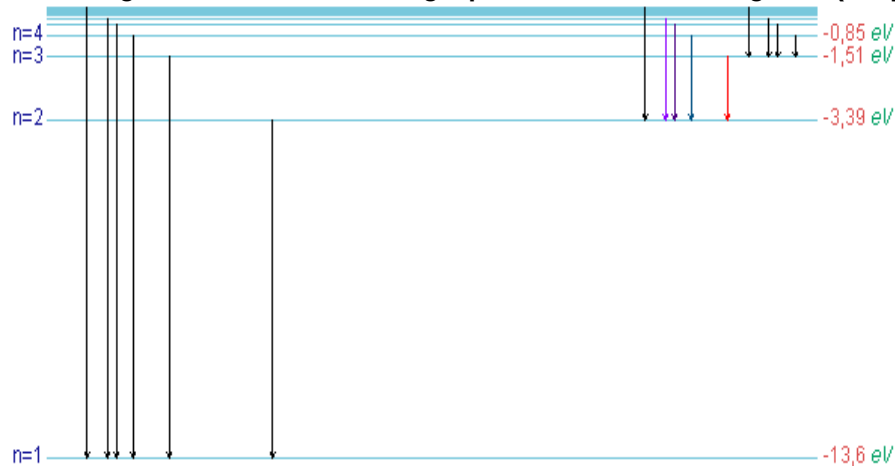
$$E = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (13)$$

Substituindo a expressão (10) em (13) obtém-se a energia quantizada do raio de Bohr,

$$E = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}, \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

Olhando para essa equação podemos ver que a quantização do momento angular orbital resultou tanto na quantização do raio quanto na quantização da energia total do elétron, e ainda, Eisberg e Resnick (1979) trazem que as informações dessa equação podem ser mostradas em um diagrama de níveis de energia. O diagrama mostra que o menor valor de energia (maior valor absoluto) é para o primeiro nível com n igual a 1. Quando n aumenta, a energia aumenta (menor valor absoluto). O diagrama mostra do lado direito a energia de cada nível em elétrons-volts e do lado esquerdo o número quântico n do nível correspondente.

Figura 14 – Diagrama de níveis de energia para o átomo de hidrogênio. (adaptada)



Fonte: Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Quando o elétron altera seu estado de energia, transitando de um nível energético E_i , para outro com energia E_f , o elétron pode emitir ou absorver energia. A frequência da radiação que ele emite é discreta e dada por

$$f = \frac{E_i - E_f}{h}, \quad (15)$$

Como sabemos, a frequência de uma onda eletromagnética é dada pela expressão:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (16)$$

onde c é velocidade da luz e λ é o comprimento de onda da onda eletromagnética. Aplicando (16) e (14) em (15) obtém a equação da série de Balmer

$$\frac{1}{\gamma} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (17)$$

que é a expressão das séries de Lyman ($n_f = 1$), Balmer ($n_f = 2$), Paschen ($n_f = 3$), Brackett ($n_f = 4$), e Pfund ($n_f = 5$), que permite calcular o comprimento de onda da radiação emitida/absorvida por um elétron ao mudar de nível de energia.

Segundo Eisberg e Resnick (1979, p. 139) “a justificativa para os postulados de Bohr, ou para qualquer conjunto de postulados, só pode ser encontrada comparando as previsões que podem ser obtidas a partir dos postulados com os resultados experimentais”. Os autores ainda trazem que segundo a antiga teoria quântica os estados de energia de um átomo só podem assumir valores

discretos de energia, uma vez que, o modelo de Bohr previa que a energia total do elétron é quantizada e a teoria da radiação de corpo negro de Planck também previa que a emissão e absorção tinham estados quantizados.

Brennan (2003, p. 150) relata que, “um dos grandes feitos de Bohr foi mostrar que não era possível descrever a estrutura do átomo unicamente segundo a Física clássica, era preciso lançar mão da teoria quântica”. De acordo com o Grupo de reelaboração do ensino de Física – GREF (2007) as descobertas feitas por cientistas foram devido as concepções de estruturas a partir da proposta de Bohr para o átomo. A compreensão de diferentes propriedades elétricas está baseada na representação atômica do átomo de Bohr.

Apresentamos até aqui de forma compacta a historia do modelo atômico desde as primeiras ideias de constituição da matéria até o modelo de Bohr, que foi um marco na Física. A partir de seu modelo, juntamente com as ideias de outros físicos como Planck e Einstein, iniciou-se a transição da Física clássica para a Física quântica. Apesar de um sucesso repentino e de curta duração, seus trabalhos contribuíram para a compreensão da Física quântica e da estrutura atômica. O modelo de Bohr, explicando o comportamento dos elétrons ao emitir e absorver energia trouxe grandes contribuições para as novas tecnologias através dos estudos dos sólidos semicondutores.

O sucesso do modelo de Bohr teve vida curta. E apesar de prever corretamente os comprimentos de onda emitidos e absorvidos pelo átomo de hidrogênio não foi possível aplicá-lo a átomos mais complexo devido ao fato do elétron se comportar como uma onda de matéria confinada num poço de potencial, como afirma Halliday, Resnick e Walker (2011).

O modelo de Bohr foi substituído pelo novo modelo atômico, atualmente em vigor, que é baseado nas teorias de Erwin Schrödinger, Louis Victor De Broglie e Werner Heisenberg. Esses novos conceitos ficaram conhecidos como mecânica quântica, estabelecendo o estudo do comportamento de sistemas microscópicos em termos de probabilidades e não mais de certezas. Sendo apenas possível determinar a região de maior probabilidade de se encontrar um elétron, representado por uma função de onda. (OLIVEIRA e GOMES, 2006)

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2011), pelo Princípio de Indeterminação de Heisenberg proposto em 1927, não é possível medir simultaneamente a posição e o momento de uma partícula, como apresentado no

modelo de Bohr, mesmo com instrumentos de alta precisão. Quando o momento é obtido com precisão, perde-se a precisão na posição.

Para obter os níveis de energia corretos do elétron é preciso resolver a equação de Schrödinger, para um poço de potencial representado por

$$U(r) = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (18)$$

Utilizando o potencial (18) na equação de Schrödinger tridimensional e normalizada, o resultado é a função de onda do estado fundamental do átomo de hidrogênio, determinada pela expressão a seguir

$$\psi(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi}a^{3/2}} e^{-r/a} \quad (19)$$

Diferentemente de outras funções, essa função de onda não tem significado físico, apenas o seu quadrado ($\psi^2(r)$) que pode ser interpretado como a probabilidade por unidade de volume de que um elétron seja encontrado em um determinado volume de distância r do centro do átomo. Considerando o volume como sendo a região entre duas cascas concêntricas e trabalhando com a densidade de probabilidade radial $P(r)$, chegamos a expressão da densidade radial do estado fundamental do átomo de hidrogênio:

$$P(r) = \frac{4}{a^3} r^2 e^{-2r/a} \quad (20)$$

A equação (20) mostra simplesmente que em um átomo de hidrogênio o elétron deve ser encontrado em algum lugar, estabelece apenas a probabilidades de ele ser encontrado naquela região, não dando a certeza da posição exata em que se encontra esse elétron.

Apesar do modelo de Bohr não ter sobrevivido por muito tempo deixou grandes contribuições científicas, a exemplo dos semicondutores, tema principal neste trabalho.

Os semicondutores serão apresentados a seguir, juntamente com suas aplicações tecnológicas muito usuais no dia-a-dia. Sendo assim, a Física tem uma relevância muito significativa na sociedade e o estudo dessa disciplina em sala de aula deve deixar claro essa relevância histórica e contemporânea na vida dos alunos que tem a disciplina como difícil e sem aplicação. Como afirma Bonadiman e

Nonenmacher (2007) o aluno chega ao ensino médio com expectativas em conhecer a Física, porém, quase sempre isso se torna uma frustração a ser carregada por toda a vida. Ainda relata que, a Física deve ser importante para o aluno e que seu ensino tenha relação significativa com o cotidiano dos estudantes. Desse modo, escolhemos falar sobre materiais semicondutores apresentando suas aplicações que são bastante intensas na sociedade atual.

2. MATERIAIS SEMICONDUTORES

Para Bogart (2001, p. 8) “os semicondutores são a base de vários dispositivos eletrônicos do dia a dia. Virtualmente, todos os dispositivos eletrônicos são constituídos à base de materiais semicondutores”. Os semicondutores não são um perfeito isolante nem um perfeito condutor elétrico. Dentre os mais usados na indústria, existem o germânio e o silício, sendo o silício mais utilizado devido sua grande quantidade na face da Terra, como afirma Peixoto (2001).

2.1 Estrutura atômica dos semicondutores

De acordo com Bogart (2001), para compreender os semicondutores, primeiramente devemos entender a estrutura atômica desse material e suas propriedades elétricas. Todos os átomos de um elemento têm a mesma estrutura, e como já vimos nos modelos atômicos, em especial no de Bohr, o átomo é composto por um núcleo contendo partículas positivas, os prótons, e partículas neutras, os nêutrons, rodeados por partículas negativas, os elétrons. O número de prótons é igual ao número de elétrons, tornando assim o átomo fundamental eletricamente neutro.

Os elétrons em um átomo são distribuídos em camadas e todas as camadas divididas em subcamadas de acordo com o Princípio de Exclusão de Pauli que determina quantidades exatas de elétrons em cada nível de energia.

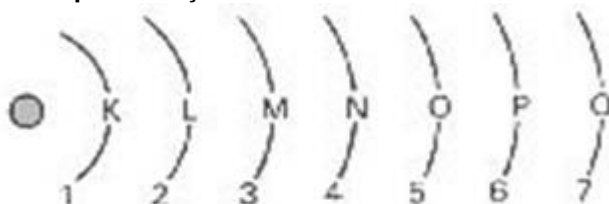
O princípio de exclusão de Pauli é um princípio da mecânica quântica que se aplica a prótons, elétrons e nêutrons. Para os elétrons, afirma que, em um mesmo átomo, não podem existir dois elétrons com todos os números quânticos idênticos. “Entre os números quânticos n, l, m_l e m_s de dois elétrons do mesmo átomo deve haver pelo menos um número diferente” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011, p 257).

Os números quânticos n, l, m_l e m_s , são respectivamente os números quânticos principal, secundário, magnético e de spin. O número quântico principal indica o nível de energia, ou camada eletrônica em que se encontra o elétron. Sendo as camadas eletrônicas K, L, M, N, O, P e Q, representado por números inteiros de 1 a 7. Número quântico secundário indica o subnível ou subcamada das camadas eletrônicas em que o elétron se encontra. As subcamadas são s, p, d, e f, e representadas por 0, 1, 2 e 3. O número quântico magnético indica a orientação das órbitas no espaço, região onde existe a máxima probabilidade de se encontrar um elétron no átomo. Cada orbital comporta no máximo dois elétrons, que são representados por setas verticais com orientação para cima ou para baixo, dependendo do número quântico de spin. O número quântico de spin é uma propriedade intrínseca do elétron e está associado ao seu momento angular. Didaticamente indica a rotação do elétron, em um mesmo orbital, onde dois elétrons giram em sentidos opostos anulando o magnetismo um do outro, garantindo assim um sistema atômico estável. Os valores de spin, para o elétron, são representados por $+1/2$ e $-1/2$, por convenção o sentido da seta, para cima ou para baixo indica o spin do elétron. (RUSSEL, 1994).

Todos os elétrons são indicados por seus quatro números quânticos que indicam a distancia do núcleo, forma da sua orbita, momento magnético e de spin. Segundo o princípio da exclusão de Pauli, em um mesmo nível energético só podem haver dois elétrons e estes deverão ter spins diferentes, (GREF, 2007).

A capacidade de elétrons em cada camada, mostrado na Figura 15, são 2 elétrons na camada K, 8 na camada L, 18 na camada M, 32 na camada N, 32 na camada O, 18 na camada P e 4 na camada Q, respeitando o princípio da exclusão de Pauli. Sendo os elétrons das camadas divididos nas subcamadas, 2 na s, 6 na p, 10 na d, e 14 na f, respectivamente. (BOGART, 2001; GREF, 2007).

Figura 15 – Representação das camadas eletrônicas de um átomo.

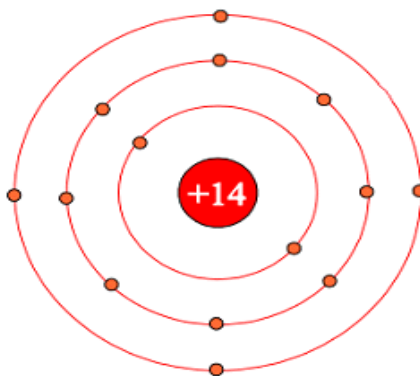


Fonte: Só química.

Vejamos o exemplo do Silício na Figura 16, material semiconductor mais

usado na fabricação de dispositivos eletrônicos. O silício compõe 27,7% da crosta terrestre, ficando atrás somente do oxigênio, porém sendo encontrado só na sua forma combinada com outros elementos. É encontrado em praticamente todas as rochas, areias, barros e solos. Podem ser encontrados ainda em águas naturais, poeira, plantas, esqueleto e fluidos orgânicos de alguns animais. Seus compostos naturais são, quartzo, asbestos (amianto), zeolita e mica. Esses compostos de silício podem ser usados na fabricação de tijolos, diferentes concretos, na fabricação de vidros, esmaltes, vernizes, cerâmicas, óleos, graxa, borrachas, fabricação de radares, isqueiros, relógios. Com importantes usos em cirurgias plásticas, próteses e construção civil. Quando o objetivo é obter o silício ultra puro, para a fabricação de semicondutores a preparação é feita pela decomposição de silano (SiH_4) ou de tetrahaletos de silício a altas temperaturas. Devido à sua estrutura eletrônica, o silício é muito importante na indústria eletrônica, como semicondutor. Os semicondutores são os materiais básicos na construção de chips de computadores, transistores, diodos de silício e muitos outros dispositivos eletrônicos, (PEIXOTO, 2001)

Figura 16 – Distribuição eletrônica do átomo de silício com quatro elétrons na ultima camada. (adaptada)



Fonte: Faculdade de engenharia de Guaratinguetá da universidade estadual paulista – FEG-UNESP.

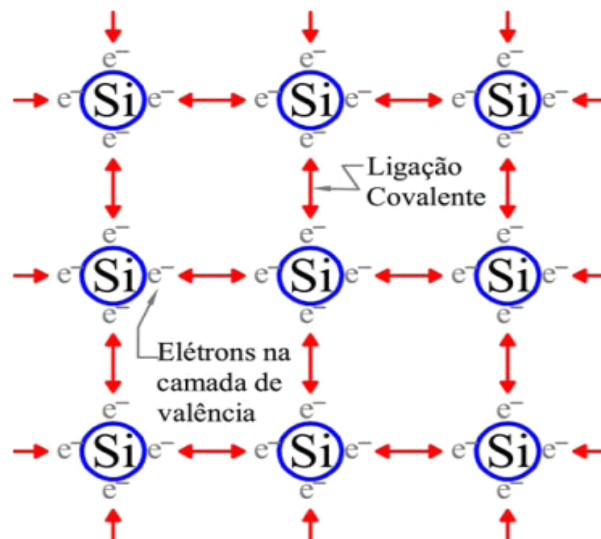
As distribuições dos elétrons de um elemento químico obedecem às soluções previstas da equação de Schrödinger e o princípio de exclusão de Pauli. No caso do silício, temos 14 elétrons orbitando o núcleo com 14 prótons e 14 nêutrons. Sendo 2 elétrons na primeira camada, 8 na segunda camada e 4 na terceira camada.

A última camada energética contendo elétrons, para um átomo no estado fundamental, é chamada de camada de valência. Nessa camada o átomo de silício

tem exatamente quatro elétrons, uma característica dos materiais semicondutores para a camada de valência.

Os átomos desses materiais formam uma estrutura monocristalina, ou seja, uma ligação firme e estável com estruturas entrelaçadas, (BOGART, 2001). Numa estrutura cristalina, seja de silício ou germânio, cada átomo contendo quatro elétrons na camada de valência irá compartilhar seus elétrons com quatro átomos vizinhos preenchendo assim sua subcamada p. O compartilhamento de elétrons numa ligação atômica, Figura 17, é chamado de ligação covalente.

Figura 17 – Ligações covalentes em um cristal de silício puro.

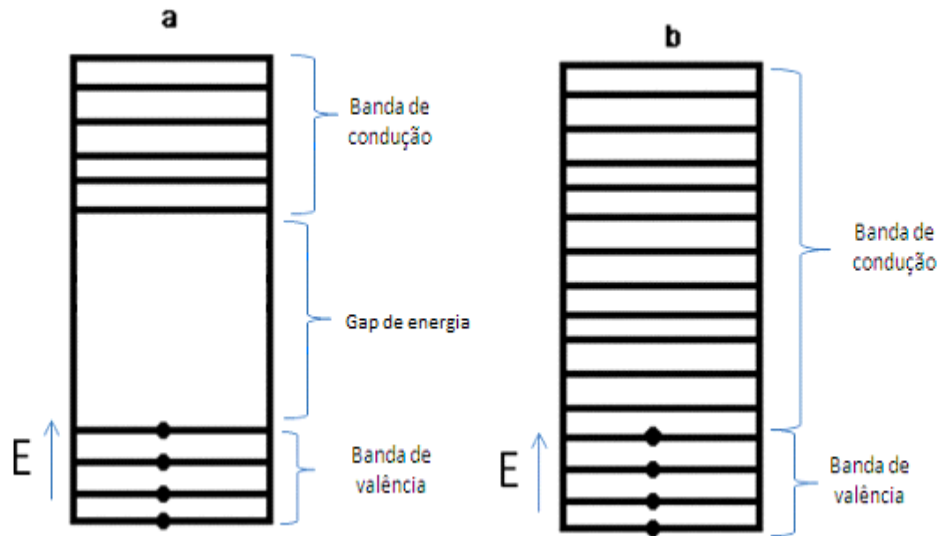


Fonte: Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE.

2.2 Corrente elétrica nos semicondutores

Como mencionado anteriormente, semicondutores são materiais intermediários entre isolantes e condutores. A diferença entre eles pode ser mostrada em diagramas de bandas energéticas na Figura 18. Uma banda de energia é o conjunto de níveis energéticos que os elétrons possuem num sólido. Sendo que em um átomo isolado os elétrons possuem níveis de energia definidos e num sólido, devido ao grande número de átomos bem próximos formando uma rede cristalina os níveis de energia se superpõem e transformam-se em bandas de energia. (EISBERG e RESNICK, 1979).

Figura 18 - a) distribuição dos níveis energéticos de material isolante. b) distribuição dos níveis energéticos de material condutor. (adaptada)



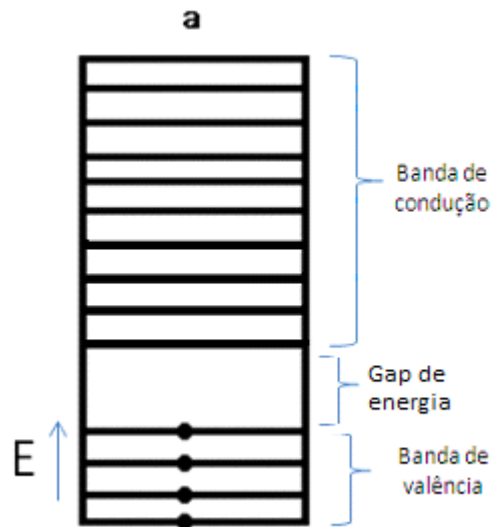
Fonte: GREF.

A largura da banda proibida, ou seja, o nível de energia intermediária que o elétron não pode assumir é chamado de gap de energia. Gap de energia é a energia mínima que os elétrons devem adquirir para passar da banda de valência para a banda de condução ou a energia que ele deve liberar para voltar à camada de valência. São considerados isolantes os materiais cuja distância que separa a banda de valência da banda de condução é muito grande, ou seja, o gap de energia. São condutores os materiais onde existe a superposição entre as bandas de valência e condução, ou onde o gap de energia é muito pequeno ou zero. (GREF, 2007).

Considerando a definição de semiconductor e a Figura 19,

"A utilização de diagramas de energia permite interpretar um terceiro grupo de substâncias cuja separação entre a banda já ocupada por elétrons e a banda livre é menor, quando comparada com isolantes. Deste modo, com uma certa quantidade de energia, tal como fóton de luz ou de energia térmica, os elétrons atingem a banda livre tornando a substância condutora. Por isso tais substâncias são denominadas semicondutores" (GREF, 2007, p. 282)

Figura 19 – Diagrama de energia para os semicondutores. (adaptada)



Fonte: GREF.

De acordo com Bogart (2001, p. 9-10):

"Os elétrons estão na banda de condução porque são portadores de cargas que contribuem para a condução de corrente. Elétrons na banda de valência possuem menos energia e são mostrados na parte de baixo do diagrama de energia. A região entre as bandas de condução e de valência é chamada de banda proibida, porque, segundo a teoria quântica, não é possível aos elétrons acumularem energia e permanecer nesses níveis de energia".

Para os semicondutores, a exemplo do silício e germânio, os gap de energia a temperatura ambiente são, 1,14 eV e 1,67 eV, respectivamente, já nos isolantes, como o diamante esse valor é de 5,5 eV, já nos condutores não existe essa diferença de energia pois as bandas se superpõem (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011). De acordo com Eisberg e Resnick (1979, p. 587), "um semicondutor é um sólido covalente que pode ser considerado isolante, pois, sua banda de valência está cheia e a banda de condução totalmente vazia, no zero absoluto [...]". Bogart (2001, p.10) nos diz que

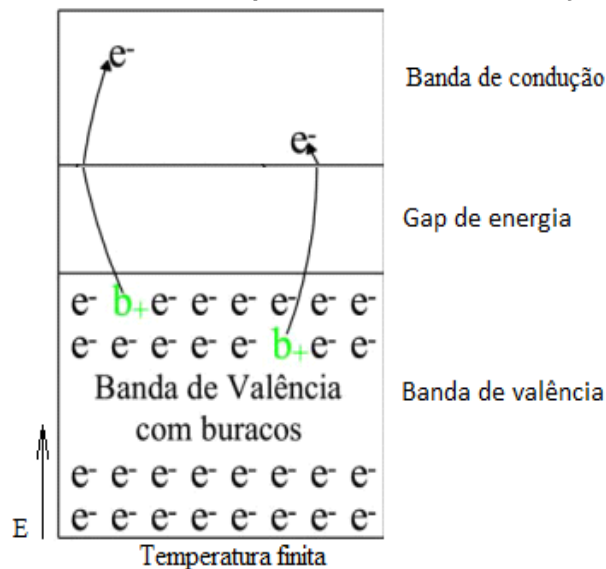
"Com o aumento da temperatura, os elétrons acumulam energia suficiente para cruzar a banda proibida e alcançar a banda de condução. Para um semicondutor, um aumento na temperatura [...] [a resistência diminui], significando que um semicondutor apresenta uma resistência com coeficiente de temperatura negativo".

Nos condutores, o aumento da temperatura faz com que a quantidade de elétrons na banda de condução aumente, porém, esse aumento é muito maior que nos semicondutores, isso provoca um aumento nas colisões entre os elétrons

difícultando a condução elétrica. O resultado é a dificuldade do fluxo de cargas em um único sentido para o condutor em alta temperatura, tornando sua resistência com coeficiente positivo de temperatura.

Nos semicondutores o efeito do aumento de temperatura faz com que o número de portadores aumente significativamente devido ao gap de energia ser pequeno. Quando os elétrons em um semicondutor recebem energia suficiente para vencer a barreira do gap de energia, esses elétrons saltam para a camada de condução deixando uma lacuna na camada de valência, que funcionam como portadores de carga positiva. Como podemos ver na Figura 20.

Figura 20 – Elétrons excitados para a camada de condução. (adaptada)



Fonte: UNIOESTE.

De acordo com Eisberg e Resnick (1979), buracos (lacunas) deixados por elétrons na banda de valência serão ocupados por outros elétrons contribuindo para a condutividade do material. "Passando para níveis energéticos da banda de condução, o elétron deixa um lugar vago na banda de valência, denominado lacuna eletrônica, que poderia ser interpretado como o surgimento de uma carga positiva local." (GREF, 2007, p. 283).

Nos semicondutores, além do movimento dos elétrons para a banda de condução, existe também o movimento dos elétrons em direção aos espaços vazios, lacunas, que conseqüentemente vão deixando outras lacunas a serem ocupadas. Tanto os elétrons que vão à banda de condução, como os que vão ocupando as lacunas têm participação na condução elétrica nos semicondutores. Dessa forma, os elétrons e lacunas formam a condução elétrica nos semicondutores, em quantidades

iguais de cargas para o caso de substâncias puras, (GREF, 2007). De acordo com Bogart (2001, p. 11) "A corrente de lacuna ocorre no nível da banda de valência, porque os elétrons na banda de valência não se tornam elétrons livres quando simplesmente se deslocam de um átomo para outro".

O mesmo autor ainda ressalta que o material semicondutor puro é chamado de intrínseco. Isso significa que a densidade de elétrons é igual a densidade de lacunas. O interessante dos materiais semicondutores puros é a possibilidade de alterar sua condutividade elétrica através da adição de impurezas. O processo que é conhecido como dopagem, (TIPLER e LLEWELLYN, 2011).

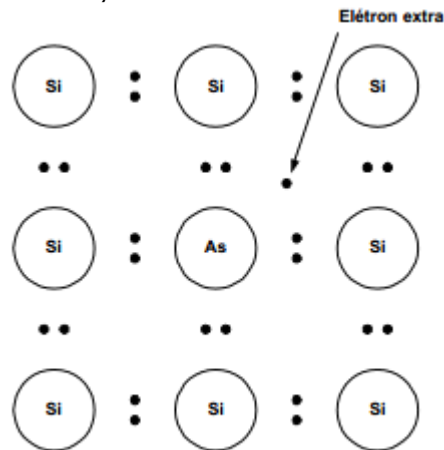
2.3 Semicondutores dopados tipo n e tipo p

"A versatilidade dos semicondutores pode ser grandemente aumentada se introduzirmos um pequeno número de átomos (chamados impurezas) na rede cristalina; este processo é chamado de dopagem." (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011, p. 289). A dopagem pode ser feita de duas maneiras, aumentando o número de portadores de cargas positivas, conhecida como dopagem tipo p e aumentando os portadores de cargas negativas, dopagem tipo n. Como vimos anteriormente, os semicondutores conduzem energia, tanto por elétrons como por lacunas. A dopagem vai exatamente aumentar um desses portadores de cargas. A dopagem de um semicondutor tipo o silício e germânio consiste basicamente em colocar uma pequena concentração de outra substância no silício ou germânio.

2.3.1 Dopagem tipo n

O átomo de silício contém quatro elétrons na camada de valência, fazendo ligações covalentes numa rede cristalina com outros átomos da mesma substância. Se um átomo de silício for retirado e em seu lugar colocado um átomo contendo cinco elétrons na camada de valência, ou seja, última camada, como por exemplo, o arsênio, fósforo, etc., dizemos que o semicondutor foi dopado com impureza tipo n, pois quatro elétrons deste último átomo farão ligações covalentes com os átomos de silício, deixando um elétron extra fracamente atraído pelo núcleo, como mostra a Figura 21 para a dopagem com o átomo de arsênio,

Figura 21 – Cristal de silício dopado com arsênio, contendo cinco elétrons na camada de valência, deixando um elétron extra.

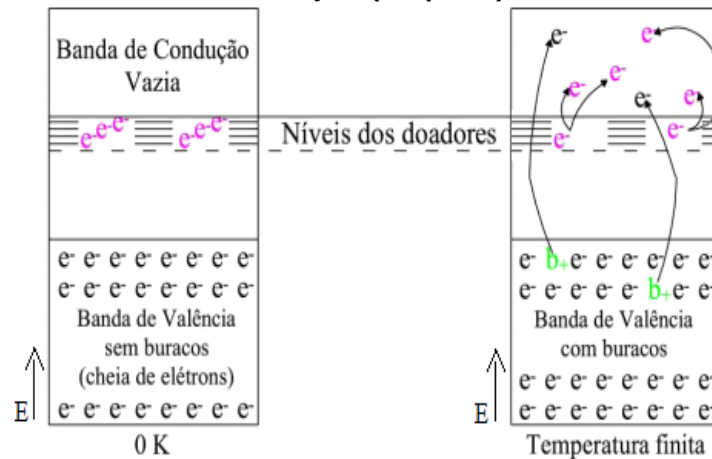


Fonte: Departamento de Engenharia de Materiais da universidade de São Paulo – DEMARUSP.

De acordo com Halliday, Resnick e Walker, (2011), numa ligação covalente de silício intrínseco, os elétrons estão na banda de valência do semiconductor, passando para a banda de condução somente quando recebem energia suficiente para serem arrancados da ligação covalente. Entretanto, em um semiconductor dopado tipo n, o elétron extra vai ocupar um nível de energia bem próximo a banda de condução, mesmo antes de uma agitação térmica ou diferença de potencial, sendo pequena a energia necessária para a transferência desse elétron para a banda de condução.

O átomo inserido na rede cristalina é chamado de doador, pois doa elétrons para a banda de condução. Os átomos doadores contem cinco elétrons na ultima camada e somente quatro vão participar da ligação covalente com os átomos de silício. A expressão semiconductor tipo n, é devido aos elétrons serem os portadores majoritários de cargas. Com a agitação térmica, alguns elétrons da banda de valência juntamente com os elétrons extras vão para a banda de condução, ao deixar a banda de valência o elétron deixa uma lacuna, buraco, Figura 22. Na banda de condução vão existir os elétrons extras do átomo inserido no silício mais os elétrons da banda de valência, por isso nos semicondutores tipo n, os elétrons são portadores em maioria e as lacunas portadoras em minoria. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011; TIPLER e LLEWELLYN, 2010).

Figura 22 - Elétrons extras do átomo doador ocupando um nível próximo a banda de condução. (adaptada)

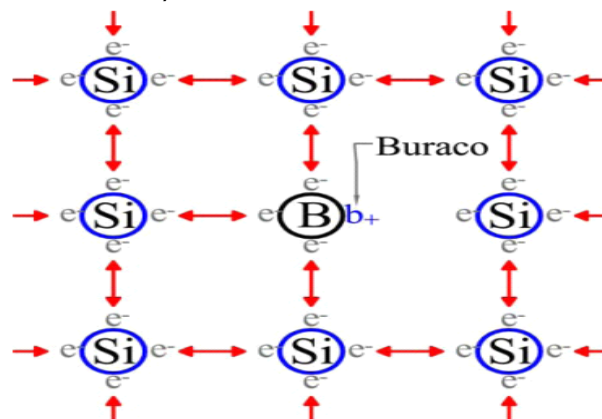


Fonte: UNIOESTE.

2.3.2 Semicondutores tipo p

Analogamente ao que vimos no caso tipo n, o material deve ter tamanho semelhante ao átomo de silício. Na dopagem tipo p átomos com três elétrons na camada de valência são inseridos na rede cristalina de silício intrínseco, por exemplo, o alumínio, índio, boro, etc. O átomo inserido no cristal de silício, o boro, mostrado na Figura 23, fará ligações covalentes com os átomos de silício. O boro possui apenas três elétrons disponíveis na camada de valência para compartilhar com a rede cristalina, deixando um espaço vazio podendo receber um elétron da rede, fazendo variar a posição de espaços vazios, configurando assim um movimento de lacunas ou buracos. Como o átomo tem um elétron a menos podendo aceitar outro, ele é chamado de aceitador.

Figura 23 – Cristal de silício dopado com um átomo contendo três elétrons na camada de valência, deixando um buraco aceitador.



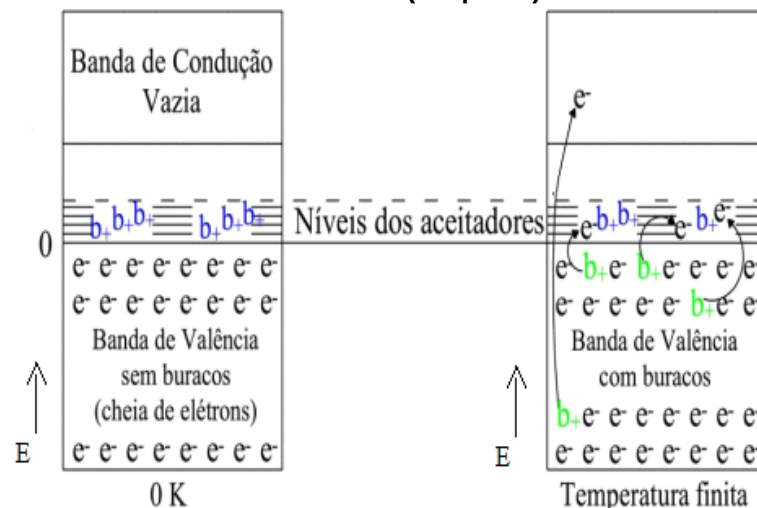
Fonte: UNIOESTE.

As lacunas, buracos, ocuparão um nível de energia entre a banda de

valência e a banda de condução, porém próximo ao limite superior da banda de valência. Como mostra a Figura 24, os elétrons da banda de valência saltam para o nível ligeiramente acima desta banda, deixando espaços vazios na banda de valência. A energia necessária para essa transferência é muito menor que a energia necessária para a transferência para a banda de condução.

Semicondutores dopados com átomos aceitadores são chamados semicondutores tipo p, para indicar portadores de cargas positivas, buracos, na banda de valência. Nos semicondutores tipo p, os buracos são portadores em maioria e os elétrons portadores em minoria. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011; TIPLER e LLEWELLYN, 2010).

Figura 24 – buracos dos átomos aceitadores ocupando um nível energético próximo a banda de valência. (adaptada)

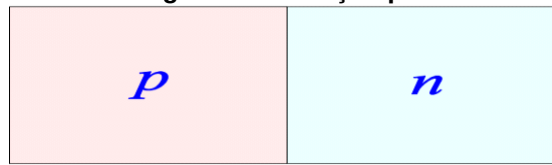


Fonte: UNIOESTE.

2.4 Junção p-n, efeito de contato entre as regiões

Considerando um semicondutor tipo n e outro tipo p, sendo colocado em contato, como mostra a Figura 25, e fazendo variar sua temperatura, temos a formação de uma junção p-n. "A junção p-n [...] é um cristal semicondutor que foi dopado em uma região com impureza doadora e na outra região com impureza aceitadora. Esse tipo de junção está presente em praticamente todos os dispositivos semicondutores." (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011, p. 292).

Figura 25 – Junção p-n.



Fonte: FEG-UNESP.

A partir do contato, Figura 26, e da variação de temperatura, portadores de cargas em maioria das duas regiões p e n começam a difundirem-se, as lacunas da região p para a n, e os elétrons da região n para a p. Esses movimentos de portadores de cargas dão origem a uma corrente de difusão, (I_{dif}). O movimento de elétrons do lado n para o lado p faz surgir concentração de cargas positivas na extremidade da junção no lado n. Quando esses elétrons se combinam com as lacunas do lado p, faz surgir concentração de cargas negativas na extremidade deste lado. (GREF, 2007; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011).

Figura 26 - Junção p-n com formação de região de depleção.



Fonte: FEG-UNESP.

Esse processo resulta na formação de uma carga espacial em ambos os lados cessando o movimento dos portadores de cargas em maioria, dando origem a uma zona de depleção. Nas extremidades da zona de depleção, devido a formação da carga espacial, há uma diferença de potencial de contato que impede a migração dos portadores de cargas de uma região para outra. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011).

Os portadores em maioria dão origem a corrente de difusão, porém temos também uma outra corrente devido ao movimento dos portadores de cargas em minoria. No lado n da junção, temos as lacunas como portadores em minoria e do lado p, os elétrons. A diferença de potencial V_0 é uma barreira que impede o movimento dos portadores em maioria, entretanto, facilita os de minoria, p ou n, proporcionando a corrente de deriva (I_{der}). O sentido da corrente de deriva (I_{der}) na junção p-n, é da direita para a esquerda, sentido contrário da corrente de difusão (I_{dif}). Em uma junção p-n não polarizada, a corrente total é zero, pois as correntes de

difusão e de deriva são em sentidos opostos.

A grande importância dos semicondutores está na possibilidade de fabricação de dispositivos a serem utilizados em equipamentos eletrônicos. O Diodo retificador, o diodo emissor de luz (LED) e o transistor, são dispositivos semicondutores amplamente utilizados em dispositivos eletrônicos que fazem parte do dia a dia das pessoas.

3 APLICAÇÕES DOS SEMICONDUCTORES

O conhecimento de novas tecnologias e o debate dessas informações em sala de aula deve ser feito frequentemente pelo professor, pois a evolução tecnológica se faz presente no meio social dos alunos. De acordo com Ferreira, Bampi e Alvares (2004) os semicondutores são a força motriz do desenvolvimento tecnológico, possibilitando o avanço da informática, comunicações e suas aplicações, assim revolucionando o dia a dia da sociedade.

O professor tem que estar preparado para passar essas informações em sala de aula, uma vez que, o conteúdo ministrado deve fazer sentido para a vida cotidiana tanto do professor como do aluno. Oliveira e Hosoume (2008) ressaltam a importância de o professor saber Física, e compreender a existência de uma construção científica que tem permitido avanços significativos para a sociedade. De acordo com os Parâmetros curriculares nacionais – PCN (2000):

“A Física é um conhecimento que permite elaborar modelos de evolução cósmica, investigar os mistérios do mundo submicroscópico, das partículas que compõem a matéria, ao mesmo tempo que permite desenvolver novas fontes de energia e criar novos materiais, produtos e tecnologias. Incorporado à cultura e integrado como instrumento tecnológico, esse conhecimento tornou-se indispensável à formação da cidadania contemporânea. Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. Para tanto, é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas. É necessário também que essa cultura em Física inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional.”

Sabendo da importância dos semicondutores no avanço tecnológico, seguem-se algumas aplicações deste material que se faz presente na sociedade.

3.1 Diodo retificador

Diodo retificador, representado na Figura 27, é um dispositivo semicondutor usado principalmente para transformar uma tensão alternada em tensão contínua. Considerando a tensão alternada da rede elétrica, o diodo retificador tem aplicação muito importante.

Figura 27 – Representação do diodo.

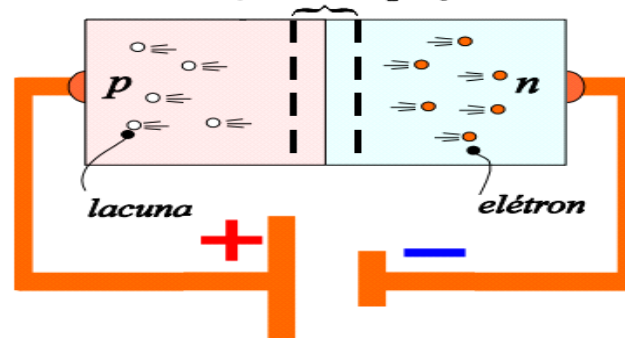


Fonte: FEG-UNESP.

Em circuito com semicondutor de junção p-n, o campo elétrico produzido pela fonte de energia e o campo elétrico da junção p-n se superpõe, se o sentido dos campos forem contrários haverá movimento de cargas através do dispositivo semicondutor, entretanto, se os campos forem de sentidos iguais a barreira existente na junção p-n (zona de depleção) aumentará, dificultando a passagem de corrente elétrica. Dessa forma o semicondutor proporcionará a passagem de corrente em um sentido, polarização direta e praticamente reterá a corrente de sentido contrário, polarização inversa. (GREF, 2007).

Na polarização direta, Figura 28, o lado p da junção se torna “mais positivo” diminuindo o número de portadores de carga negativa nesta região, o mesmo acontece com o lado n, este se torna “mais negativo” pela diminuição dos portadores de cargas positivas. O resultado deste efeito produzido pela polarização direta é uma diminuição na zona de depleção, restituindo assim a difusão de portadores de cargas em maioria. Isso significa que, a corrente de difusão se torna maior que a corrente de deriva, resultando em uma corrente direta. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011).

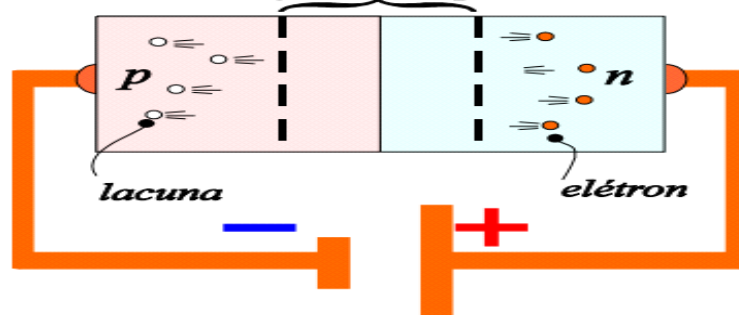
Figura 28 – Junção p-n com polarização direta. (adaptada)



Fonte: FEG-UNESP.

Na polarização inversa, Figura 29, os elétrons livres da região n se afastam da junção em direção ao pólo positivo da fonte de tensão e as lacunas do lado p em direção do pólo negativo da fonte. Com esse afastamento de elétrons e lacunas da junção, ocorre maior concentração de cargas negativas do lado p da junção e cargas positivas do lado n. Esse movimento faz com que a zona (região) de depleção aumente, causando a diminuição na corrente de difusão e um ligeiro aumento na corrente de deriva, resultando em uma pequena corrente inversa.

Figura 29 - Junção p-n com polarização inversa. (adaptada)



Fonte: FEG-UNESP.

3.2 Diodo Emissor de Luz (LED)

Quando elétrons da banda de condução ocupam lacunas na banda de valência, a diferença de energia, que é igual ao gap de energia, é liberada de alguma forma. No silício e germânio, esta energia é emitida na forma de vibrações da rede cristalina, porém, outros como o arsenieto de gálio (GaAs) ou fosteto de gálio (GaP), esta energia pode ser emitida na forma de um fóton de luz, ou seja, radiação eletromagnética. (GREF, 2007; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011).

Em um diodo retificador, a energia é liberada na forma de vibrações da rede cristalina, diferentemente dos LEDs (Light Emitting Diode), Figura 30, que são

fabricados para liberarem a energia na forma de luz e sua estrutura física lhe proporciona maior concentração da luz em uma direção específica. A grande vantagem dos LEDs sobre as lâmpadas incandescentes convencionais é a ausência de filamento, que garante maior durabilidade, além de seu tamanho, que facilitam sua inserção em circuitos eletrônicos bem menores. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2009).

Figura 30 – Diodo emissor de luz.

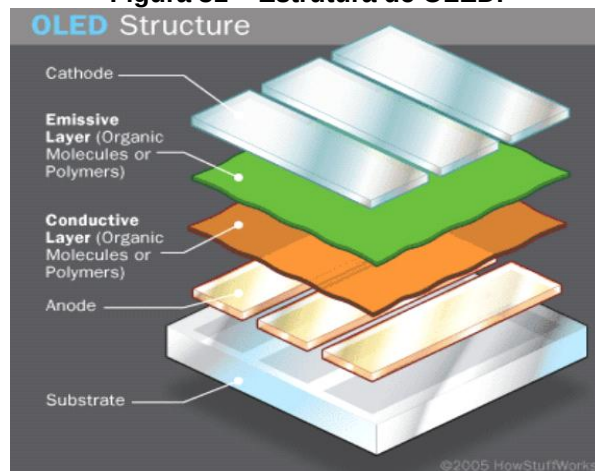


Fonte: Universidade Federal de Uberlândia.

Os LEDs são usados em televisores para formação de imagens, iluminação de tela, em relógios digitais informando o número e iluminando-o, transmitem informações em controles remotos, fornos micro-ondas, computadores, em rádios, em celulares, enfim, em uma infinidade de aparelhos eletrônicos.

3.3 Diodo Orgânico Emissor de Luz (OLED)

O OLED (Organic Light-Emitting diode) diodo orgânico emissor de luz tem basicamente a mesma estrutura dos LEDs, diferem no tipo de material utilizado, apresentando em sua construção substâncias eletroluminescentes compostas de Carbono que, ao serem excitadas por uma corrente elétrica, emitem luz em uma frequência determinada por sua composição química. Em outras palavras, são células de diodo impressas na tela que são polarizadas de acordo com a imagem. Esta técnica permite a construção de monitores muito pequenos ou grandes, resistentes à água devido à sua natureza plástica, e flexíveis ou até mesmo dobráveis, como podemos ver na Figura 31 a estrutura de um OLED e Figura 32, as aplicações desta tecnologia em telas flexíveis. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2009).

Figura 31 – Estrutura de OLED.

Fonte: Universidade Federal de Uberlândia.

Figura 32 – Tecnologias de OLED em telas de microfílm.

Fonte: Universidade Federal de Uberlândia.

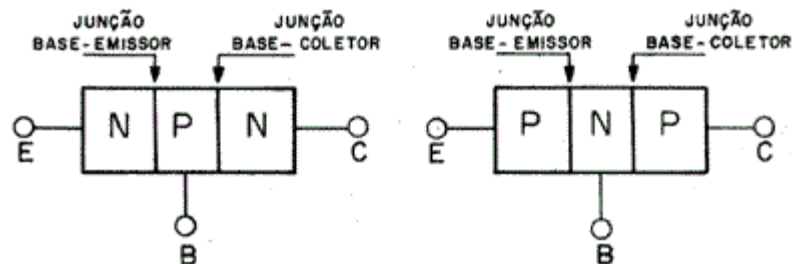
3.4 Transistor de Junção Bipolar

Em 1947, John Bardeen e Walter Brattain, supervisionados por William Shockley nos Laboratórios da Bell Telephone, Estados Unidos, construíram o transistor, que quer dizer “resistor de transferência”. A descoberta desse dispositivo foi acidental, ocorrendo enquanto estudavam o diodo de ponto de contato. Apesar da grande descoberta científica, o transistor não teve muito sucesso logo de imediato devido as dificuldades de fabricação e o alto preço do germânio, um elemento raro. Os antigos transistores eram feitos de germânio, porém logo se descobriu que o silício oferecia uma série de vantagens sobre o germânio. Em 1955 o primeiro transistor de silício já era comercializado. (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL, 2006).

O transistor vem da combinação de semicondutores dos tipos p e n, podendo apresentar uma configuração pnp ou npn. Substitui as válvulas de triodo em amplificadores e outros circuitos eletrônicos. Ao contrário da válvula, o transistor não consome energia, além de ser confeccionado em proporções microscópicas,

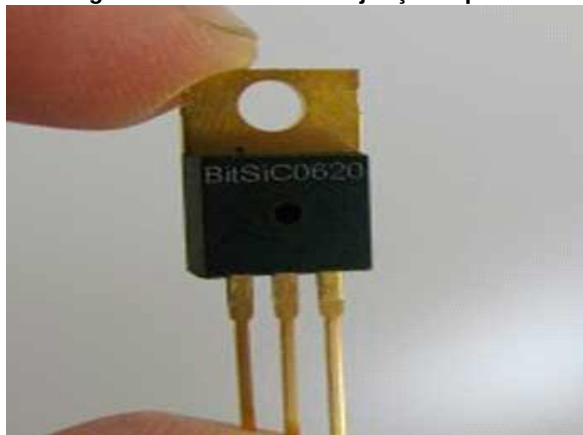
fazendo com que centenas de transistores caibam em um chip de apenas poucos milímetros. O transistor amplifica e comuta sinais, substituindo as válvulas termiônicas nas novas tecnologias, tornando-o um componente importante na Eletrônica. É um dispositivo com três terminais, como mostra sua representação na Figura 33 e o dispositivo na Figura 34, sendo possível usar a tensão entre dois dos terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2009).

Figura 33 – Representação da junção bipolar.



Fonte: Site Rádio amadores.

Figura 34 – Transistor de junção bipolar.



Fonte: Manutenção e suprimentos.

Os processadores foram os maiores beneficiados com a invenção dos transistores, sendo compostos por bilhões de transistores ligados entre si. O transistor é a base da computação moderna, pois a sua criação proporcionou-lhe um grande avanço, o que não seria possível sem os transistores. Ele é responsável pelo controle do fluxo de dados em diversos equipamentos, sendo o processador o principal usuário dessa tecnologia. (TECMUNDO, 2010).

3.5 Termistores

Os termistores, Figura 35, são resistores semicondutores, muito úteis em aparelhos eletrônicos, sensíveis à temperatura e são classificados em dois tipos, de

acordo com sua especificidade: termistor PTC (Positive Temperature Coefficient) e NTC (Negative Temperature Coefficient).

O termistor PTC tem aplicações como a medida, controle e compensação de temperatura e proteção contra superaquecimento, além de aplicações como a proteção de sobrecarga, detecção de nível de líquidos, detecção do fluxo de ar, e de temperatura constantes. Os termistores NTC são utilizados como sondas de temperatura, aparelhos médicos, eletrodomésticos, setor automobilístico, telecomunicações e outros. Em alguns casos, na medição de valores absolutos de temperaturas e outros na medição com precisão de até centésimo de graus, (MECATRÔNICA ATUAL, 2013; UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2000).

Figura 35 – Termistor NTC e PTC.



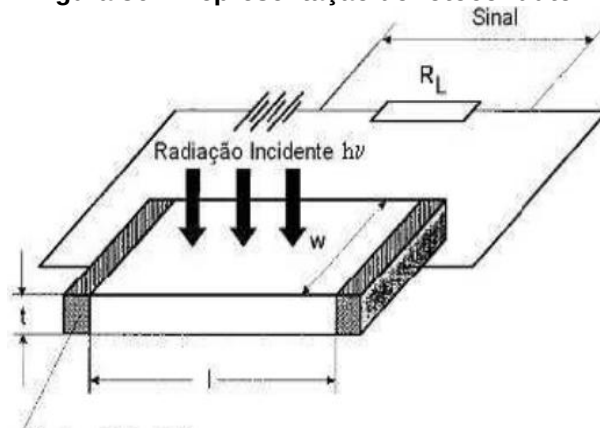
Fonte: Engineers garage.

Condicionadores de ar, refrigeradores e freezers, desumidificadores, aquecedores de hidromassagem, equipamentos terapêuticos, chocadeiras, cafeteiras, fornos e autoclave, fritadeiras, chuveiros, equipamentos odontológicos, filtro de água, encubadeiras, termostatos eletrônicos, máquinas de *fast food*, gôndolas térmicas, expositores, gerenciamentos de energia, são exemplos de equipamentos utilizados no dia a dia que fazem uso desse dispositivo semicondutor. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2009).

3.6 Fotocondutores

O fotocondutor é um dispositivo semicondutor, de junção p-n, sensível à radiação eletromagnética, e sua condutividade varia com a incidência de luz, quanto mais luz maior a capacidade de condução elétrica, como mostra a Figura 36.

Figura 36 – Representação do fotocondutor.



Fonte: Universidade Federal de Uberlândia.

Um fóton com energia, maior que a do gap da banda proibida, é absorvido pelo fotocondutor, produzindo um par de elétron-lacuna, sendo a energia luminosa convertida em energia elétrica. O exemplo de fotocondutor é o LDR (Light Dependent Resistor) Resistor dependente de luz. O fato de diminuir sua resistência elétrica possibilita a utilização deste componente para desenvolver sensores que são ativados ou desativados quando sofre ação de energia luminosa.

Com o LDR pode-se fazer o controle automático de portas, alarmes de segurança contra entrada não autorizada, controle de iluminação pública, todos estes foto controlados para a operação de um relé. Os dispositivos fotocondutores comerciais são chamados de células fotocondutivas e são utilizados para medir a quantidade de iluminação, e como um relé de luz liga-desliga, neste caso, chamados de Relé-fotocélula, ilustrado na Figura 37. Ele que é capaz de perceber a luz do sol, identificando, assim, se é dia ou noite, acendendo as lâmpadas automaticamente quando o dia escurece e desligando-as após o amanhecer, com grande aplicação em iluminação pública. Os fotocondutores são também usados utilizados em máquinas de xérox. No início da operação, acende-se uma lâmpada, que faz uma varredura em todo o documento a ser copiado, em seguida a imagem é projetada sobre a superfície de um cilindro fotossensível (de alumínio, revestido por material fotocondutor). (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2009).

Figura 37 – Relé-fotoelétrico.

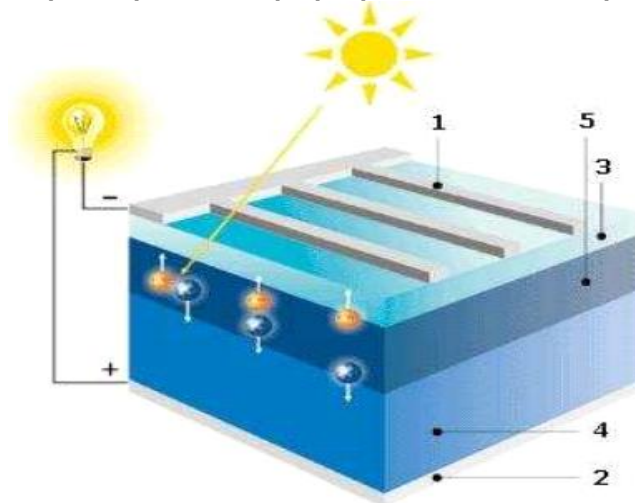


Fonte: Universidade Federal de Uberlândia.

3.7 Células Fotovoltaicas

Na Figura 38 temos a representação de uma estrutura de célula solar que capta a radiação solar, transformando-a em energia elétrica.

Figura 38 – Representação de célula fotovoltaica. 1) eletrodo negativo; 2) eletrodo positivo; 3) camada tipo n; 4) camada tipo p; 5) camada de limite (depleção).



Fonte: Universidade Federal de Uberlândia.

Quando os elétrons e lacunas atingem a junção PN, eles são separados pelo campo interno da região de depleção. O elemento fotovoltaico força a corrente a fluir no circuito externo, portanto, a energia luminosa é convertida em energia elétrica. Em outras palavras, a célula solar trabalha segundo o princípio de que os fótons incidentes, colidindo com os átomos de certos materiais, provocam um deslocamento dos elétrons, carregados negativamente, gerando uma corrente elétrica. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2009, p. 94).

O conjunto de células fotovoltaicas são chamadas de placas solares, como as da Figura 39.

Figura 39 – Placas solares.



Fonte: Energia solar.

Os elétrons de alguns materiais quando na presença de luz apresentam o efeito fotovoltaico, dentre esses materiais estão o silício e arsenieto de gálio. Para a ocorrência desse efeito não precisa do brilho do sol, pois o efeito fotovoltaico acontece também com baixa intensidade de luz solar.

Devido à reflexão da luz do Sol, dias com poucas nuvens podem resultar em mais produção de energia do que dias completamente claros. Atualmente, o Ministério de Minas e Energia desenvolve vários projetos para o aproveitamento da energia solar no Brasil, particularmente por meio de sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando ao atendimento de comunidades rurais e/ou isoladas da rede de energia elétrica e ao desenvolvimento regional. (BRASIL).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta a evolução da ideia de átomo até Bohr e o estudo de semicondutores com algumas aplicações, justamente para mostrar que a Física está inserida no dia a dia. A opção por semicondutores foi pelo fato de ser a principal força motriz do avanço tecnológico como afirma Ferreira, Bampi e Alvares (2004).

O conhecimento em física evoluiu e proporcionou melhorias na vida do homem, como foi mostrado neste trabalho com as concepções acerca do átomo e aplicações tecnológicas dos semicondutores, estes conhecimentos trouxeram benefícios grandiosos para os dias atuais.

Entretanto, o conhecimento produzido pela humanidade ensinado em sala de aula deve ser de forma dinâmica e não maçante, e como afirma Gadotti (2003, p. 47) "O professor precisa saber, contudo, que é difícil para o aluno perceber essa relação entre o que ele está aprendendo e o legado da humanidade". Como experiência vivida quando aluno de ensino médio, não via sentido nem aplicação para a Física da sala de aula, perguntas frequentes eram feitas e ouvidas pelos colegas: para que estudar Física? por que tenho que estudar Física?

A Física tem aplicações na vida das pessoas, só que muitas vezes essas aplicações não são mostradas em sala de aula. A pior resposta para a pergunta acima seria por que o aluno precisa ser aprovado. Freire (1996) afirma que o bom professor é aquele que envolve o aluno, consegue prender a atenção no conteúdo que esta sendo ministrado, ressalta ainda que o professor tem que ter curiosidade em aprender, conhecer e despertar nos alunos essa curiosidade.

Conhecendo a física que está por trás das tecnologias, não só esta física, é possível responder a questionamentos feitos pelos alunos e dar significado ao conteúdo, mostrar a eles que Física tem aplicação e sentido na vida da humanidade, mostrar que eles fazem uso da Física ensinada em sala de aula todos os dias, seja usando o celular, a televisão, tomando banho no chuveiro quente, fazendo uso de equipamentos eletroeletrônicos, mostrar que estes equipamentos evoluíram substancialmente graças a evolução da Física.

Com isso, o professor deve fazer a relação do conteúdo em sala com a vida cotidiana do aluno, deve despertar no aluno a curiosidade em compreender os fenômenos observados no dia a dia. Gadotti (2003) fala a respeito do aluno que este só quer aprender quando o que é ensinado tem sentido para a sua realidade, caso

contrário, não vai querer aprender.

Quando o aluno buscar sentido para o estudo de Física, com questionamentos, ou de qualquer outra maneira, o professor tem a opção de respondê-lo falando das novas tecnologias, abordando seus princípios de funcionamento, explicar por que os aparelhos são menores que os de antigamente, gastam menos energia. Compreendendo a eletrônica dos semicondutores o professor será capaz de despertar a curiosidade do aluno em compreender os fenômenos físicos. Porém, para tal realização, o professor tem que buscar esse conhecimento para passar adiante, porque como afirma Freire (1996, p. 37) "não posso ensinar o que não sei", que, o professor deve se preparar ao máximo para que, quando questionado, não minta ou dê qualquer resposta, ou não tenha que falar sempre que não sabe.

REFERÊNCIAS

BÍBLIA. Português. **Bíblia sagrada**. João Ferreira de Almeida. Barueri: Sociedade Bíblica do Brasil, 2003. 1536 p.

BOGART Jr., Theodore. A teoria dos semicondutores. In _____ **Dispositivos e circuitos eletrônicos**. v. 1. 3 ed. São Paulo: Pearson, 2001, cap 1, p. 5-58.

BONADIMAN, Helio; NONENMACHER, Sandra Elisabet B. **O Gostar e o Aprender no Ensino de Física**: uma proposta metodológica. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 24, p. 194-223, 2007.

BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros curriculares nacionais**: ensino médio. Disponível em: < <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>> acesso em: 20 de junho de 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Energia solar**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar>> acesso em: 19 de junho de 2014.

BRENNAN, Richard P. **Gigantes da física**: uma história da física através de oito biografias. Tradução, Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003.

COLÉGIO MILITAR DE FORTALEZA. **Modelo atômico de Rutherford**. Disponível em: <http://www.cmf.ensino.eb.br/sistemas/pipa/files/arquivos/NA/1952_08_05_2013_Arquivo.pdf> acesso em: 08 de maio de 2014.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Materiais semicondutores**. Disponível em: <<http://www.demar.eel.usp.br/eletronica/aulas/Semicondutores.pdf>> acesso em: 26 de maio de 2014.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Termistores – NTC**. 2000. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/brenno/index.html>> acesso em: 01 de julho de 2014

EISBERG, Robert; RESICK, Robert. Modelo de Bohr para o átomo. In _____ **Física quântica**. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. 29 reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979. Cap. 4, p. 121-167

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. Sólidos – condutores e semicondutores. In _____ **Física quântica**: Átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. 29 reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979. Cap. 13, p. 561-608.

ENERGIA SOLAR. **Células fotovoltaicas**. Disponível em: <<http://energiasolar2012.wordpress.com/celulas-fotovoltaicas/>> acesso em: 06 de julho de 2014.

ENGINEERS GARAGE. **Resistores.** Disponível em: <<http://www.engineersgarage.com/tutorials/resistors?page=7>> acesso em: 16 de junho de 2014.

EXPLICATÓRIUM. **Evolução do átomo:** Modelo atômico de John Dalton. Disponível em: <<http://www.explicatorium.com/CFQ9-Evolucao-atomo.php>> acesso em: 01 de maio de 2014.

FACULDADE DE ENGENHARIA DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. **Transistores.** 2006. Disponível em: <<http://www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/elobasicem/Aulas%202006%20II/Aula10/Transistor.pdf>> acesso em: 02 de julho de 2014

FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ DA UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Semicondutores.** Disponível em: <http://www.feg.unesp.br/~jmarcelo/restrito/arquivos_downloads/apostilas/eb2/semicondut_v1.pdf> acesso em: 16 de junho de 2014.

FERMI NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY. **Joseph John Thomson.** Disponível em: <<http://www.fnal.gov/pub/inquiring/timeline/02.html>> acesso em: 06 de maio de 2014.

FERREIRA, José Rincon; BAMPI, Sergio; ALVARES, Lillian. **Sistema de Informação em Semicondutores:** Importância estratégica para atração de investimentos no País. In: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior; Instituto Euvaldo Lodi/ Núcleo Central. (Org.). O futuro da indústria de semicondutores: A perspectiva do Brasil. Brasília: MDIC/STI; IEL/NC, 2004, v., p. 193-200. Disponível em: <http://www.redmercosur.org/iepcim/RED_MERCOSUR/biblioteca/ESTUDOS_BRASIL/BRA_46.pdf> acesso em: 26 de abril de 2014

FILGUEIRAS, Carlos Alberto L.. **Duzentos Anos da Teoria Atômica de Dalton.** Química Nova na Escola, São Paulo, n.20, 2004, p. 38-44.

FREIRE, Paulo. **Pedagogia da autonomia:** saberes necessários à prática educativa. 25 ed. Paz e Terra. São Paulo: 1996.

GADOTTI, Moacir. Aprender com emoção, ensinar com alegria. In _____ **Boniteza de um sonho:** ensinar-e-aprender com sentido. Feevale Rio Grande do Sul: 2003. Cap. 5, p. 45-56.

GRAF – Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. Diodo e Transistor: Materiais semicondutores. In _____ **Física 3:** eletromagnetismo. 5ed. São Paulo: USP. 2007, p. 275-297.

GRUPO QUIMICA ATOMOS. **Estrutura dos átomos:** Modelo atômico de Joseph John Thomson. Disponível em: <http://grupoquimicaatomos.blogspot.com.br/2011_04_01_archive.html> acesso em: 06 de junho de 2014.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: óptica e física moderna.** v. 4, 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Modelo de Bohr do átomo de hidrogênio.** Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/modBohr/aModBohrFrame.htm> acesso em: 28 de junho de 2014.

MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS. **Transistor de junção bipolar.** Disponível em: <<http://www.manutencaoessuprimentos.com.br/conteudo/6671-transistor-de-juncao-bipolar/>> acesso em: 16 de junho de 2014.

MARCONDES, Danilo. Os filósofos pré-socráticos. In _____ **Iniciação à história da filosofia: dos pré-socráticos a Wittgenstein.** 6ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001. Cap 2, p. 30-39.

MECRATONICA ATUAL. **Termistores** Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1055-sensores-termicos-ntc-e-ptc-parte-1>> acesso em: 17 de junho de 2014.

MELZER, Ehrick Eduardo Martins; AIRES, Aparecida Joanez. **A história do desenvolvimento da teoria atômica:** um percurso de Dalton a Bohr. In: VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (ENPEC) - I CIEC, 2011, Campinas. Anais VIII ENPE - I CIEC, 2011. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/viiienpec/resumos/R1348-1.pdf>> acesso em: 25 de abril de 2014.

NOTA POSITIVA. **Átomo de hidrogênio e estrutura atômica.** Disponível em: <http://www.notapositiva.com/pt/trbestbs/fisica/10_atomo_de_hidrogenio_e_estrutura_atomica_d.htm> acesso em: 26 de maio de 2014

OLIVEIRA, Ótom Anselmo de; GOMES, Joana D'arc Fernandes. **Arquitetura atômica e molecular.** Natal: UFRN, 2006.

OLIVEIRA, Rebeca Vilas Boas Cardoso; HOSOUKE, Yassuko. **Professores de Física e a Reelaboração da Prática.** 2008. (Apresentação de Trabalho/Congresso).

PAULO, Freire. **Pedagogia da autonomia:** saberes necessários à prática educativa. 25 ed. Paz e Terra. São Paulo: 1996.

PEIXOTO, Eduardo Motta Alves. **SILÍCIO.** Química nova na escola, nº 14, 2001. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc14/v14a12.pdf>> acesso em: 01 de julho de 2014

RADIO AMADORES. **Transistores.** Disponível em: <<http://www.radioamadores.net/transistores.htm>> acesso em: 15 de junho de 2014.

REALE, Giovanni; ANTISERI, Dário. Os “naturalistas” ou filósofos da “fysis”. In _____ **História da filosofia:** antiguidade e idade média. São Paulo: PAULUS. 1990. Cap. 2, p. 29-70.

RUSSEL, John Blair. Átomo. In _____ **Química geral**. v.1, 2 ed. São Paulo: Pearson, 1994. cap. 5, p. 205-240.

SÓ QUÍMICA. **Biografias:** John Dalton. Disponível em: <http://www.soq.com.br/biografias/john_dalton/> acesso em: 01 de maio de 2014.

SÓ QUÍMICA. **Camadas eletrônicas.** Disponível em: <<http://www.soq.com.br/conteudos/ef/introducaoconstituicao/p1.php>> acesso em 26 de junho de 2014.

SÓ QUÍMICA. **Modelos atômicos:** Niels H. D. Bohr. Disponível em: <<http://www.soq.com.br/conteudos/em/modelosatomicos/p4.php>> acesso em: 03 de junho de 2014.

TECMUNDO. **O que é um transistor e porque ele é importante para o computador?** 2013. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/o-que-e/3596-o-que-e-um-transistor-e-porque-ele-e-importante-para-o-computador-.htm>> acesso em: 19 de junho de 2014.

TIPLER, Paul Allen; LLEWELLYN, Ralpa. Física do estado sólido. In _____ **Física moderna**. 5ed. Rio de Janeiro: 2010, p. 262-303.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ. **Materiais semicondutores.** Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap15.pdf>> acesso em 25 de maio de 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Ciência e tecnologia dos materiais:** Materiais semicondutores. 2009. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAeoAYAK/semi-condutores>> acesso em: 19 de junho de 2014

UNIVERSITY OF CANTERBURY. **Ernest Rutherford.** Disponível em: <<http://www.canterbury.ac.nz/rutherford/archive.shtml>> acesso em: 06 de maio de 2014

VIANA, H. E. B.; PORTO, P. A. . **O processo de elaboração da teoria atômica de John Dalton.** Química Nova na Escola. Química Nova na Escola, v. v.7, p. 4-12, 2007.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Fótons, elétrons e átomos. In _____ **Física IV: ótica e física moderna**. 12 ed. São Paulo: Pearson, 2003. cap. 38, p. 179-216.