



Universidade Federal do Ceará - UFC
Centro de Ciências
Departamento de Física - Física Licenciatura

Francisco Etan Batista de Sousa

PRINCÍPIOS QUÂNTICOS NO ENSINO MÉDIO: ENERGIA SOLAR COMO FERRAMENTA DE ENSINO

Fortaleza

2015

Francisco Etan Batista de Sousa

PRINCÍPIOS QUÂNTICOS NO ENSINO MÉDIO: ENERGIA SOLAR COMO FERRAMENTA DE ENSINO

Monografia apresentada ao Curso de Física Licenciatura do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Licenciado em Física. Área de concentração: Ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.

Universidade Federal do Ceará - UFC
Centro de Ciências
Departamento de Física - Física Licenciatura

Orientador: Prof. Dr. Jeanlex Soares de Sousa

Fortaleza

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca do Curso de Física

-
- S696p Sousa, Francisco Etan Batista de
 Princípios quânticos no Ensino Médio: energia solar como ferramenta de ensino / Francisco
 Etan Batista de Sousa. – Fortaleza, 2015.
 46 f. : il. algumas color. enc.; 30 cm.
- Monografia (Graduação em Física) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
 Departamento de Física, Curso de Licenciatura em Física, Fortaleza, 2015.
 Orientação: Prof. Dr. Jeanlex Soares de Sousa.
 Área de concentração: Ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.
 Inclui bibliografia.
1. Física - estudo e ensino. 2. Estratégias de aprendizagem. 3. Energia solar. 4. Mecânica
 quântica. 5. Física Moderna e Contemporânea. I. Sousa, Jeanlex Soares de. II. Título.

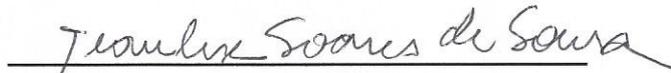
Francisco Etan Batista de Sousa

PRINCÍPIOS QUÂNTICOS NO ENSINO MÉDIO: ENERGIA SOLAR COMO FERRAMENTA DE ENSINO

Monografia apresentada ao Curso de Física Licenciatura do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Licenciado em Física. Área de concentração: Ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.

Trabalho aprovado em Fortaleza, 30 de Junho de 2015

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jeanlex Soares de Sousa
Orientador

Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Odair Pastor Ferreira
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Ascânio Dias Araújo
Universidade Federal do Ceará - UFC

Fortaleza
2015

À minha querida esposa Luciana, meu filho Miguel, minha Mãe, meu Pai e minhas irmãs.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos professores Jeanlex Soares de Sousa e Gil de Aquino Farias pela oportunidade, orientação e por acreditarem no meu trabalho.

A todos os professores que contribuíram para meu aprendizado e desenvolvimento na universidade, em especial, aos professores Nildo Loiola e Marcos Antônio, pela oportunidade de contribuir ao departamento de física como monitor e ao professor Andrey Chaves, pelas discussões, dúvidas sanadas e incentivos nas disciplinas ministradas de Introdução a Quântica I e II.

A todos do Grupo de Teoria da Matéria Condensada (GTMC) pelo acolhimento que me deram.

A minha esposa e meu filho, pelo apoio, paciência e compreensão por tantas horas de estudos que fizeram com que eu ficasse ausente em alguns momentos importantes na nossa vida.

A minha Mãe e meu Pai, que me deram uma educação que foi responsável pela minha formação como homem e, sobretudo, como um cidadão capaz de lutar pelos meus sonhos e por minha sobrevivência de maneira honesta.

Aos amigos que convivi em muitos momentos da minha vida e aos que me ajudaram em diversos momentos com palavras de motivação e discussões filosóficas, onde estas me levavam cada vez mais a acreditar na realização dos meus sonhos. Em especial aos amigos Thiago Amorim, Adailton Filho e Elissandro Mendes, pela amizade, troca de conhecimentos e por se fazerem presentes em muitos momentos marcantes durante essa trajetória.

Por fim, ao CNPq pela bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

"Devemos examinar as velhas ideias, as velhas teorias, embora pertençam ao passado, pois esse é o único meio de compreender a importância das ideias e teorias novas, bem como a extensão de sua validade." Einstein, Infeld e Rebuá (2008)

Resumo

No mundo contemporâneo em que vivemos, as informações se processam quase que instantaneamente e a evolução da ciência e tecnologia se dão em grande velocidade. Para que um indivíduo, vivente neste ambiente, possa acompanhar esta evolução é necessário que ele seja ciente e participante deste mundo. É com a preocupação em formar um cidadão com essas características que este trabalho sugere uma maneira de implementação da mecânica quântica ainda no ensino médio através da energia solar fotovoltaica. Inicialmente, fizemos um levantamento bibliográfico sobre assuntos relacionados a este tema com intensão de justificar a proposta. Percebemos que existe uma tendência para inserção da mecânica quântica e conteúdos gerais da física moderna e contemporânea ainda no ensino médio no Brasil e em outros países. Elaboramos o segundo e o terceiro capítulo de maneira que possam servir de guia para confecção de aulas a serem aplicadas no ensino médio sobre mecânica quântica. Por fim, verificamos que existe a necessidade de uma atenção maior a este tema, uma vez que os trabalhos já publicados não são capazes de nos dar uma estrutura padrão para tal implementação. Concluimos também que a energia solar fotovoltaica é uma ótima ferramenta para a aplicação dos conteúdos básicos da física desenvolvida no último século.

Palavras-chaves: Mecânica quântica, ensino médio, física moderna e contemporânea, energia solar.

Abstract

In the contemporary world where we live, the informations are processed almost instantaneously and the evolution of science and technology happen at great speed. To an individual, living in this ambient, can follow this evolution, it is necessary to be aware and participant in this world. Concerning in forming a citizen with these characteristics, I suggested a work of implementation of Quantum Physics still in the high school through the photovoltaic solar energy. In the first instance we did a bibliographic survey about topics referred to this theme with the intention of justify the proposal. We noticed that exists a tendency in insertion of Quantum Mechanics and Modern and Contemporary Physics in the high school in Brazil and in others countries. We elaborated the second and the third chapters so that they can serve as guide to elaboration of lessons to be applied in high school about Quantum Mechanics. We finally verified the necessity of a greater attention to this theme, since the works that were already published are not able to give us a pattern structure for such implementation. We also concluded that the photovoltaic solar energy is an excellent means to an application of basic contents of Physics developed in the last century.

Key-words: Quantum mechanics, high school, modern and contemporary physics, solar energy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Espectro de irradiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar, comparação com a de um corpo negro à 6000k	23
Figura 2 – Radiação solar média anual no território brasileiro.	24
Figura 3 – Matriz Energética do Brasil	25
Figura 4 – Célula solar de primeira geração	27
Figura 5 – Célula solar de segunda geração: em <i>a)</i> , uma célula de CdTe e em <i>b)</i> , uma célula de CIGS.	28
Figura 6 – Representação do modelo atômico de Bohr	30
Figura 7 – Superposição dos níveis de energia em um conjunto de 6 átomos em função da diminuição de R	32
Figura 8 – Formação de bandas de energia com o aumento do número de átomos.	33
Figura 9 – Gap de energia em condutores, isolantes e semicondutores.	34
Figura 10 – Representação bidimensional de um cristal de silício à temperatura de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, esquerda e à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, direita.	35
Figura 11 – Representação de um cristal de Si com impurezas tipo-n, <i>a)</i> e tipo-p, <i>b)</i>	36
Figura 12 – Bandas de energia em semicondutores com dopagem tipo-n e tipo-p.	37
Figura 13 – Corte transversal de uma célula solar de primeira geração.	37
Figura 14 – Corrente de difusão em uma junção-pn.	38
Figura 15 – Junção-pn sem iluminação e sem aplicação externa de uma diferença de potencial.	39
Figura 16 – Representação de excesso de portadores de cargas nos materiais tipo-p e tipo-n ao serem iluminados. Com o circuito fechado uma corrente atravessa a carga indo do material tipo-n para o tipo-p.	41
Figura 17 – Curva característica de uma célula fotovoltaica de silício.	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Número de artigos em versões eletrônicas selecionados por periódico e ano de publicação no Brasil e exterior.	17
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

FMC	Física Moderna e Contemporânea
MQ	Mecânica Quântica
EM	Ensino Médio
RR	Relatividade Restrita
RG	Relatividade Geral
LDB	Lei de diretrizes e Bases da Educação Brasileira de 1996
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PCN+	Parâmetros Curriculares Nacionais - Ensino Médio
EUA	Estados Unidos da América
ESF	Energia Solar Fotovoltaica
PNLD	Plano Nacional do Livro Didático
LHC	Large Hadron Collider
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
OPV	Organic Photovoltaic
PQ's	Pontos Quânticos

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	13
1.2	Justificativas	13
1.3	Motivações	15
1.3.1	A inserção da mecânica quântica no ensino médio do Brasil	15
1.3.2	A inserção da mecânica quântica no ensino médio em outros países	18
1.4	Metodologia	20
2	UM BOM MOTIVO PARA APRENDER MECÂNICA QUÂNTICA	21
2.1	Energia solar fotovoltaica	21
2.2	O que é energia solar?	22
2.3	O efeito fotovoltaico	25
2.4	Células solares	26
3	PRINCÍPIOS QUÂNTICOS DE UMA CÉLULA DE PRIMEIRA GERAÇÃO	29
3.1	Níveis de energia do átomo de hidrogênio	29
3.2	Estrutura de bandas	31
3.3	Materiais condutores, isolantes e semicondutores	33
3.4	Semicondutores	34
3.4.1	Condutividade intrínseca	34
3.4.2	Condutividade extrínseca	35
3.5	Princípio microscópio de funcionamento de uma célula solar de primeira geração	37
3.5.1	A junção-pn	38
3.5.2	Curva característica e eficiência	41
4	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	43
	Referências	44

1 INTRODUÇÃO

É fácil encontrarmos hoje na literatura trabalhos com intuito de inserir os conteúdos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM), os mais específicos abordam temas como Mecânica Quântica (MQ), Relatividade Restrita e Geral, Física de Partículas e Supercondutividade (LOCH; GARCIA, 2009), embora os dois últimos possam ser considerados uma extensão do primeiro. Propostas de aulas, de formação para professores, manuais didáticos e revisões bibliográficas a respeito destes já foram desenvolvidos com o intuito de melhor atender esta necessidade. É possível notar uma tendência e esforços em pesquisas concentradas nesse tema, visto que a necessidade de conceber o que está em nossa volta exige uma compreensão mais moderna da ciência e da tecnologia que estamos acostumados em nosso dia a dia. E é neste contexto que este trabalho foi desenvolvido com o tema: *Princípios Quânticos no Ensino Médio: Energia solar como ferramenta de ensino*.

1.1 Objetivo

Diante do cenário atual, onde o grau de envolvimento do desenvolvimento científico e tecnológico no cotidiano do educando é considerado alto, seremos pouco sensatos se deixarmos os assuntos da FMC de fora da educação básica. Este trabalho sugere uma opção de adaptar o ensino da MQ no EM com a intensão de dar ao aluno um maior significado ao tema através da Energia Solar Fotovoltaica (ESF). Através da elaboração de uma sequência lógica de conteúdos montamos um roteiro com o objetivo de que sirva de guia para a confecções de aulas a serem aplicadas no EM. A ESF aqui é usada como a ligação entre a realidade diária do aluno da educação básica de nível médio e a realidade abstrata da MQ, que vista de maneira independente parece algo inconcebível.

1.2 Justificativas

Embora haja uma tendência, a implantação da MQ no EM, junto a outros temas da FMC, tem evoluído de maneira ainda discreta e pouco efetiva. Um aspecto relevante que justifica a implementação de uma aprendizagem efetiva da MQ no EM é a ideia defendida por Terrazzan (1994). Ele afirma, em sua tese de doutorado, que a justificativa para a tendência da atualização do currículo de Física se faz pela crescente influência dos assuntos atuais na formação do educando e que são necessários para o entendimento do mundo criado pelo homem contemporâneo, sendo estes indispensáveis para a formação de um cidadão ciente e envolvido com esse mundo.

A Lei de Diretrizes e Base da Educação de 1996 (LDB/96) (BRASIL, 1996) e os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) (NACIONAIS, 1999; BRASIL, 2002) também fazem menção à importância dos conteúdos das ciências e tecnologias contemporâneas no ensino básico, com intuito de nortear o corpo docente enquanto desenvolvimento pedagógico, sem o caráter de obrigatoriedade. Grande parte da ciência e da tecnologia tão presente no nosso cotidiano, no celular, no Lap top, na biometria, na comunicação sem fio e em diversos outros equipamentos que fazemos uso indiretamente, foi desenvolvida no último século e tais desenvolvimentos não foram incorporados no EM e o conhecimento em relação à tecnologia usual e a intensão de formar um ser humano consciente do mundo em sua volta fica aquém do que almejam educadores e órgãos governamentais.

A LDB/96 caracteriza o Ensino Médio como a etapa final da educação básica e tem como objetivo uma maior ambição formativa no aprendizado do EM, almejando uma formação geral e não uma formação específica, que desenvolva no aluno a capacidade de pesquisar, buscar informações, analisá-las, selecioná-las e a capacidade de aprender, criar, formular ao invés de simplesmente memorizar (BRASIL, 1996). Os PCN's, por sua vez, baseados na LDB/96, propõem que o sentido do aprendizado na área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias . . .

. . . efetivamente propicie um aprendizado útil à vida e ao trabalho, no qual as informações, o conhecimento, as competências, as habilidades e os valores desenvolvidos sejam instrumentos reais de percepção, satisfação, interpretação, julgamento, atuação, desenvolvimento pessoal ou de aprendizado permanente . . . (NACIONAIS, 1999; BRASIL, 2002).

De maneira específica, sobre a disciplina de Física, os PCN's se manifestam da seguinte maneira:

O Ensino Médio meramente propedêutico atual, disciplinas científicas como a Física, têm omitido os desenvolvimentos realizados durante o século XX e tratam de maneira enciclopédica e excessivamente dedutiva os conteúdos tradicionais. Para uma educação com o sentido que se deseja imprimir, só uma permanente revisão do que será tratado nas disciplinas garantirá atualização com o avanço do conhecimento científico e, em parte, com sua incorporação tecnológica. Como cada ciência, que dá nome a cada disciplina, deve também tratar das dimensões tecnológicas a ela correlatas, isso exigirá uma atualização de conteúdos ainda mais ágil, pois as aplicações práticas têm um ritmo de transformação ainda maior que da produção científica (NACIONAIS, 1999; BRASIL, 2002).

Para atendermos a proposta defendida pelos PCN's, o conteúdo de Física Moderna, mais especificamente a MQ, deve ser parte integrante do currículo da disciplina de Física no Ensino Médio e para que o ensino desse conteúdo não se torne apenas propedêutico, ou seja, que não sirva apenas como preparatório para o ingresso no ensino

superior, ele deve contribuir para a formação humana do aluno e para uma conscientização de responsabilidade social em um sentido geral, incorporando o dia a dia do aluno e seu desenvolvimento pessoal. Para isso, é necessário, primeiro, uma força tarefa no sentido de conscientização por parte do corpo docente e pesquisadores, o que já vem sendo feito, da necessidade da incorporação da ciência desenvolvida no século XX nos conteúdos didáticos do EM e, segundo, contextualizar esse conteúdo de forma que a compreensão do tema tenha um sentido para o seu aprendizado, que não seja apenas um conjunto de leis e fórmulas que o aluno deve memorizar.

1.3 Motivações

1.3.1 A inserção da mecânica quântica no ensino médio do Brasil

No Brasil, vemos um avanço considerável no que diz respeito às pesquisas e é possível ver algum esforço por partes governamentais no sentido de incentivar o ensino dos conteúdos de FMC no EM, embora seja importante frisar que tanto em pesquisas quanto em incentivos governamentais é necessário um envolvimento ainda maior de maneira a se fazer com que o ensino da MQ no EM se torne efetivo no país.

É importante ressaltar que o conteúdo de MQ faz parte de uma área mais geral da física que chamamos de FMC e a tentativa de se implementá-lo no EM se dá ao mesmo passo que esta. Assim, pesquisas e divulgações sobre diferentes temas da FMC tem sido desenvolvido, dentre elas, a MQ. De maneira geral, os trabalhos que envolvem a implementação da FMC no EM são divididos em Relatividade (Restrita e Geral), Supercondutividade, Física de Partículas e Mecânica Quântica. Embora os processos fundamentais estudados e que servem de base para a Supercondutividade e a Física de Partículas seja a MQ, estes temas são abordados de maneira independente segundo [Loch e Garcia \(2009\)](#). Destacaremos aqui alguns trabalhos que demonstram os esforços para tal implementação referentes a Relatividade (Restrita e Geral), Supercondutividade e Física de Partículas.

Muitos trabalhos sobre relatividade no EM foram desenvolvidos na última década. Propostas, muitas vezes específicas como a de [Ostermann e Ricci \(2004\)](#), que trata do erro conceitual de massa relativística nos livros didáticos do EM, tem sido desenvolvidas na tentativa de se conseguir uma abordagem adequada para o ensino médio da Relatividade Restrita. O trabalho aponta ainda que o assunto tem constantemente ganhado espaço no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), uma iniciativa do governo brasileiro.

Uma outra alternativa à inclusão da RR no EM é vista na proposta de [Köhnlein e Peduzzi \(2005\)](#), onde o conteúdo é apresentado ao aluno respeitando a seguinte ordem:

problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. O trabalho sugere a introdução dos conteúdos de RR primeiro fazendo uma abordagem histórico-filosófica, diferenciando-a da empírica-indutivista, que ainda são difundidas nos livros didáticos (KÖHNLEIN; PEDUZZI, 2005). Nesta mesma linha de pensamento, encontramos na proposta de Guerra, Braga e Reis (2007), outra alternativa que enriquece esta discussão. A inserção da RR e RG neste, também, são expostas em uma abordagem histórico-filosófica, que começa com a apresentação de um filme, *O Nome da Rosa*, que continua com uma apresentação de cinco imagens de gravura que foram pintadas da Idade Média até o século XX. Com isso, o autor introduz os conceitos de RR e RG sem a preocupação de que a proposta fosse vista como um modelo a seguir, se preocupando apenas com a atenção dada pelos estudantes ao assunto, suas concepções e seus questionamentos.

Em Supercondutividade, Spohr (2008) apresenta, em sua dissertação de mestrado, um material hipermédia como recurso pedagógico para a implantação do tema no nível médio e a avaliação da aprendizagem dos alunos. Discute-se no mesmo, as ideias convergentes de epistemólogos relevantes no ensino de Física como Popper, Lakatos, Kuhn e Laudan, embora este não tenha sido a principal ênfase do trabalho. Depois de análise dos resultados do questionário inicial e do interesse que os alunos mostraram durante as aulas, o autor afirma que considera válida a tentativa de implementar conteúdos de FMC, neste caso a supercondutividade, através do material hipermédia desenvolvido (SPOHR, 2008).

A Física de Partículas é considerado um dos assuntos mais instigantes da FMC, talvez isso seja justificado pela crescente notoriedade que a mídia televisiva e outros meios de comunicação em massa tem dado ao tema. Recentemente, a descoberta do *Bóson de Higgs* no *Large Hadron Collider (LHC)*, foi enormemente noticiado em diversos desses meios de comunicação, aumentando cada vez mais o interesse de leigos e, até mesmo, de estudiosos de outras áreas, afim de entenderem mais sobre esta área.

Ostermann e Cavalcanti (1999), elaboraram um poster com o objetivo de divulgá-lo, mostrando o grande potencial que o mesmo contém como recurso didático para o ensino de Física de Altas Energias. Embora o material não tenha sido desenvolvido exclusivamente para o EM, a autora acredita que, com o devido cuidado para que o assunto não seja mal interpretado pelos alunos, pode ser implantado na escola média. O poster é bem completo e contém informações sobre massa de repouso, carga elétrica e spin das partículas (OSTERMANN; CAVALCANTI, 1999).

Outro trabalho, mais recente, a dissertação de mestrado de Balthazar e Oliveira (2010), trás uma proposta especificamente para professores. Com o objetivo de inserir os conteúdos da física do século XX, especialmente Partículas Elementares, no currículo de Física do EM através de uma abordagem que tem o LHC como tema gerador do

trabalho. Neste trabalho, foram elaborados um texto de apoio para o professor, slides para apresentação do tema e sugestões ou descrição de atividades (vídeos, textos, trabalhos e debates) para sala de aula. O trabalho não foi aplicado em sala de aula, porém a intenção do autor era propor um material de ensino que permitisse que esse tema seja apresentado às escolas de nível médio, mesmo que não faça parte do currículo de Física.

Como parte integrante da FMC a MQ também tem sido inserida, ainda que de forma tímida, na escola média brasileira. As propostas encontradas em artigos, dissertações e livros didáticos mostram o relevante esforço para incorporar os conteúdos da MQ no EM no Brasil e no exterior. Uma análise detalhada foi realizada por [Silva e Almeida \(2011\)](#) sobre publicações em periódicos com tema de MQ no EM. A *Tabela 1*, reproduzida deste trabalho, mostra uma grande evolução no que se refere a implantação dos conhecimentos científicos do último século na escola secundária.

Tabela 1 – Número de artigos em versões eletrônicas selecionados por periódico e ano de publicação no Brasil e exterior.

PERIÓDICOS	NÚMERO DE ARTIGOS SELECIONADOS	ANO DE PUBLICAÇÃO DOS ARTIGOS SELECIONADOS
A física na escola	1	2007
Caderno Brasileiro/Catarinense de Ensino de Física	3	1999, 2007, 2007
Ciência & Educação	2	2005, 2009
International Journal of Science Education	1	2002
Investigações em Ensino de Ciências	6	2000, 2001, 2005 2009, 2009, 2009
Physics Education	3	1997, 1999, 2008
Revista Brasileira de Ensino de Física	1	2008
Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	2	2004, 2009
Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias	1	2009
Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias	2	2008, 2009
Science & Education	1	2007
<i>TOTAL</i>	<i>23</i>	<i>De 1997 até 2009</i>

Fonte: [Silva e Almeida \(2011\)](#)

A pesquisa de [Silva e Almeida \(2011\)](#) foi realizada em consulta à alguns dos principais periódicos da área de Ensino em Ciências e foram selecionados os artigos publicados no período entre os anos de 1997 à 2009, embora os periódicos publicados terem sido revisados desde o primeiro número até agosto de 2010. Este artigo foi publicado em setembro de 2011 no *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* e constatou-se nele que a maior parte dos trabalhos foram desenvolvidos entre 2000 e 2009, o que indica uma tendência em implementar no currículo do EM os conteúdos de MQ no Brasil e no exterior. O processo de busca foi feito priorizando artigos com propostas de ensino e, em seguida, por artigos voltados para capacitação de professores, sempre com o foco em temas relacionados ao ensino de MQ no EM.

1.3.2 A inserção da mecânica quântica no ensino médio em outros países

A implantação da MQ no currículo do EM não é apenas uma preocupação brasileira ([LOBATO; GRECA, 2005](#)), é possível observar em alguns países a tendência em fazer com que o indivíduo seja mais consciente e participativo no meio em que vive, tendo uma noção da ciência e da tecnologia tão influente no seu dia a dia.

Em um mundo tão diversificado como o atual, desenvolver um conceito geral de fatos específicos para a escola média à nível mundial pode não ser tão trivial. Apesar da globalização e da alta velocidade com que as informações são transmitidas hoje, cada país vive, de maneira quase independente, as suas próprias realidades, construídas em uma base ancorada em sua cultura e regionalidade, onde cada proposta de intervenção na sociedade é baseada na necessidade e especificidades das mesmas.

Apesar disso, uma ideia geral parece ser comum a muitos países, a necessidade da inserção da MQ no EM. Assuntos relacionados com o desenvolvimento atual da ciência e suas aplicações na sociedade parecem obedecer uma regra natural, a de que é preciso que cidadãos sejam cientes do mundo que está em sua volta e para isso é necessário acompanhar o desenvolvimento científico e tecnológico ainda na escola média, embora isso esteja distante de ser alcançado ([OSTERMANN; MOREIRA, 2000](#)). E, a partir de então, ter condições de expandir seus conhecimentos a fronteiras ainda não exploradas em um curso superior.

O artigo *Análise da inserção de conteúdos de Teoria Quântica nos currículos de Física do Ensino Médio* de [Lobato e Greca \(2005\)](#), faz um levantamento a respeito da inserção da MQ em alguns países da Europa, Canadá e Austrália. A pesquisa mostra uma tendência de esforços para tal implementação. Nela podemos ver uma divisão entre ensino tradicional e um novo tipo de ensino, onde se defende que o conteúdo de MQ no ensino médio não precisa estar relacionado em uma ordem cronológica de acontecimentos, não

precisando ser abordado apenas no final de um curso de física na maneira de como os conteúdos são apresentados aos alunos do EM.

O ensino tradicional ainda é visto nos currículos de Portugal, Itália, Espanha e Finlândia. Este tipo de ensino tem uma abordagem baseada em uma visão histórica e também às suas práticas, montando, assim, um sistema cronológico dos fatos e desenvolvimentos científicos. A inserção dos conteúdos de MQ seguem uma linha de raciocínio que vai da Mecânica, passando pelo Eletromagnetismo e, por fim, Física Moderna, onde são abordados. Dentro da área de Física Moderna são lecionados assuntos sobre Relatividade e MQ. No conteúdo deste, os conceitos são apresentados a partir da hipótese de Plank e do efeito fotoelétrico, a partir de então se faz referências as propriedades ondulatórias das partículas (LOBATO; GRECA, 2005).

No Reino Unido, o currículo de física está organizado de maneira a atrair cada vez mais estudantes para a área. Os assuntos tradicionais não são excluídos, mas se apresentam de forma diferente. No primeiro e no segundo ano são implementados temas como *Ondas e Comportamento Quântico*, *Espaço e Tempo* e *Campos e Partículas Fundamentais da Matéria*. Outros países não se utilizam do ensino tradicional em seu currículo, são os casos de Canadá, Austrália, Dinamarca e Suécia. Nestes, a abordagem é praticamente idêntica, estão preocupados com a relação que se estabelece entre prática experimental e modulação teórica, bem como suas consequências para a sociedade e o meio em que vivem. O currículo é preparado levando-se em conta que o tema será abordado em duas ocasiões distintas, no EM e posteriormente no curso de graduação, onde o assunto se apresenta com um grau de dificuldade maior (LOBATO; GRECA, 2005).

Nos Estados Unidos da América (EUA) a educação do ensino médio (High School) não é regida por uma lei a nível nacional. Cada Estado possui um Departamento de Educação próprio e é dos Estados a maior parte dos investimentos na escola média americana, com o governo federal trabalhando apenas como apoio, embora esse papel do governo tenha aumentado ultimamente, bem como sua intervenção na política de educação (FOUNDATION, 2014). A preocupação com o ensino de MQ no EM e nos cursos de graduação introdutórios dos EUA começaram com a *Conferência sobre o Ensino de Física Moderna*, realizada no Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois, no mês de abril de 1986. Nesta ocasião, um debate com intuito de promover os conteúdos de FMC, em especial assuntos como Física de Partículas e Cosmologia, no EM e em cursos de graduação foi realizado entre professores e físicos (OSTERMANN; MOREIRA, 2000). Reflexos desse debate podem ser vistos em alguns currículos de física dos distritos de educação do país. No Estado de Nova York, no currículo de 2009/2010, o conteúdo de MQ é abordado no final do curso de física, oferecido no último ano do ensino médio, correspondendo ao período que se estende do final do mês de maio e durante todo o mês de

junho, quando o ano letivo americano termina. Os conteúdos abordados são divididos em quatro capítulos, com um tema geral *Quantum Theory of Light and Matter*. Os capítulos estão divididos da seguinte maneira: 1º capítulo - *Discovery of the Atomic Nucleus*; 2º capítulo - *Quantum Theory Model of the Atom*; 3º capítulo - *The Atomic Nucleus* e 4º capítulo - *Particle Physics* (DISTRICT, 2009).

1.4 Metodologia

Relacionar os conteúdos de MQ as concepções existentes nos alunos se faz necessário e é de extrema importância no processo de aprendizagem. Não ligar o conteúdo a ser aprendido à algo já conhecido é o que Ausubel, psicólogo Norte-Americano que propôs a *Aprendizagem Significativa*, chama de aprendizagem mecânica, ou seja, o aluno aprende novas informações sem interagir com estruturas cognitivas já existentes, fazendo com que essa nova informação seja decorada e após avaliação esquecida (PELIZZARI et al., 2002). Segundo Ausubel, para que haja uma aprendizagem significativa é necessário dois elementos, a disposição para aprender e um conteúdo escolar lógico e significativo. Foi baseado nesta ideia que desenvolvemos os próximos capítulos deste trabalho com o intuito de atingir o nosso objetivo, que é o de implementar conteúdos de MQ no EM utilizando a ESF. O trabalho foi organizado em uma sequência em que acreditamos que pode despertar no aluno uma disposição para aprender e dar significado à aprendizagem da MQ.

No segundo capítulo explicamos o que significa energia solar desde suas origens e motivações até suas perspectivas para o futuro. Mostramos também sua importância no atual cenário energético, bem como o incrível potencial brasileiro para essa tecnologia. Explicamos ainda o efeito fotovoltaico e as gerações de células solares desenvolvidas desde seu início. No terceiro capítulo, apresentamos uma descrição detalhada dos princípios fundamentais quânticos de uma célula solar de primeira geração. O segundo e o terceiro capítulo deste trabalho tem como objetivo servirem essencialmente de sugestão de um guia para a orientação na elaboração de roteiros de aula, adaptando a MQ de maneira adequada no EM. No quarto e último capítulo é feita uma avaliação conclusiva da proposta sugerida.

2 UM BOM MOTIVO PARA APRENDER MECÂNICA QUÂN- TICA

2.1 Energia solar fotovoltaica

A mecânica quântica é um tema considerado de difícil entendimento entre a maioria de estudiosos do assunto. A respeito disso, Niels Bohr afirmou que, *"quem não fica confuso com a mecânica quântica é porque realmente não a entendeu"*. Richard Feynman foi além disso e disse, *"Eu acho que posso dizer com segurança que ninguém entende a mecânica quântica"* (GRIFFITHS; HARRIS, 1995). Diante de afirmações como essas, vindas de importantes mentes que contribuíram enormemente para o desenvolvimento da física no último século, não é tão fácil contra-argumentar. Porém, sabemos que diversos temas da ciência contemporânea tem sido adaptados para que o entendimento dos mesmos seja possível para maior parte da população leiga, que não é especialista no assunto. Um caso particular remete ao autor da primeira frase, Niels Bohr. O conceito de Bohr do átomo de hidrogênio é conteúdo obrigatório nos currículos do ensino médio. Alguns desses conceitos são apresentados aos alunos ainda no ensino fundamental. Isso indica que, mesmo Bohr e Feynman estando certos em suas afirmações, isso não impede de que, com uma adequada adaptação, os conteúdos mais avançados da MQ não possam ser abordados na sala de aula do EM.

Outros fatores também nos encorajam na tarefa de implementar os elementos da MQ no EM, como, por exemplo, a corrida por novas fontes de energia limpa, que está a todo vapor no mundo inteiro. Diariamente as mídias mundiais noticiam crises energéticas e alertam para o fim, não muito distante, dos combustíveis fósseis e para os danos causados por fontes alternativas que não sejam de origem renovável. Os governos estão investindo, ou pelo menos sabem que têm de investir, cada vez mais em pesquisas para que se possa ter um desenvolvimento maior dessas fontes de energia limpa. E uma delas é a Energia Solar Fotovoltaica, onde os avanços nas pesquisas dos semicondutores tem contribuído muito para o seu desenvolvimento.

Juntando à isso as justificativas de Terrazzan, da LDB/96 e dos PCN's somados a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, utilizaremos a energia solar fotovoltaica como um objeto de estudo para uma adaptação da MQ ao EM.

2.2 O que é energia solar?

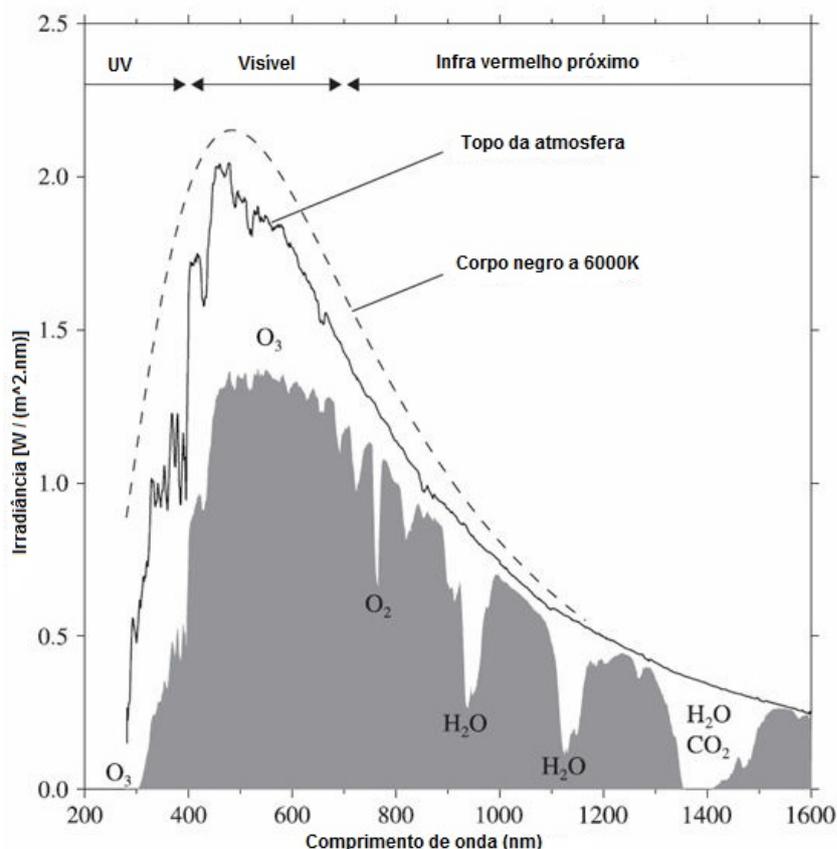
Há pouco mais de cento e cinquenta anos, Maxwell desvendava alguns dos mais elegantes segredos da física, ele unificava a eletricidade e o magnetismo em uma única ciência, o eletromagnetismo. As consequências do seu trabalho levaram a conclusão de que a luz visível é uma onda eletromagnética. As ondas eletromagnéticas, não só a luz no espectro visível, mas todo o espectro de comprimentos de ondas, carregam energia para onde elas viajam. Energia essa que pode ser aproveitada para inúmeras aplicações e uma delas é a sua transformação direta em eletricidade. No entanto, a natureza da luz vai além das características eletromagnéticas apontadas por Maxwell. Em 1905, Albert Einstein publicou um artigo que explicava o efeito fotoelétrico, com a hipótese dos quantas de luz. O argumento de Einstein teve como base a quantização da energia do corpo negro, formulada anos antes por Max Planck, e sugere que um feixe de luz viaje em pacotes bem definidos de energia, de acordo com a equação 2.1, onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz e λ é o comprimento de onda da luz. O trabalho de Einstein sobre a característica corpuscular da luz lhe concedeu o prêmio Nobel.

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

Muito antes mesmo dos esclarecimentos de Maxwell e Einstein sobre a natureza da luz, a energia que a luz solar carrega já era utilizada de diversas formas, diretas e indiretas, ao longo de toda a evolução do universo até os dias de hoje. A própria vida se adaptou de maneira a aproveitar a energia luminosa de forma bem efetiva, como por exemplo na fotossíntese. Os gregos e romanos utilizaram os raios luminosos em diversas construções de suas épocas, tanto para iluminar ambientes escuros como também para aquecer salões frios em suas construções arquitetônicas (CARVALHO; CALVETE, 2010).

Se toda a irradiação solar que chega à superfície da Terra fosse aproveitada seria suficiente para atender a demanda energética anual do mundo por milhares de vezes (BRASIL, 2008). O Sol irradia ondas eletromagnéticas em diversos comprimentos de onda e em sua maioria na estreita faixa do visível, como mostra a figura 1. Podemos ver que a intensidade de irradiação na atmosfera terrestre é bem maior do que ao nível do mar. Isso se deve ao fato de grande parte da radiação que penetra a atmosfera ser absorvida por moléculas de gases como O_3 , O_2 , H_2O e outros constituintes atmosféricos.

Figura 1 – Espectro de irradiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar, comparação com a de um corpo negro à 6000k



Fonte: [Figueiredo, Alves e Vecchia \(2012\)](#)

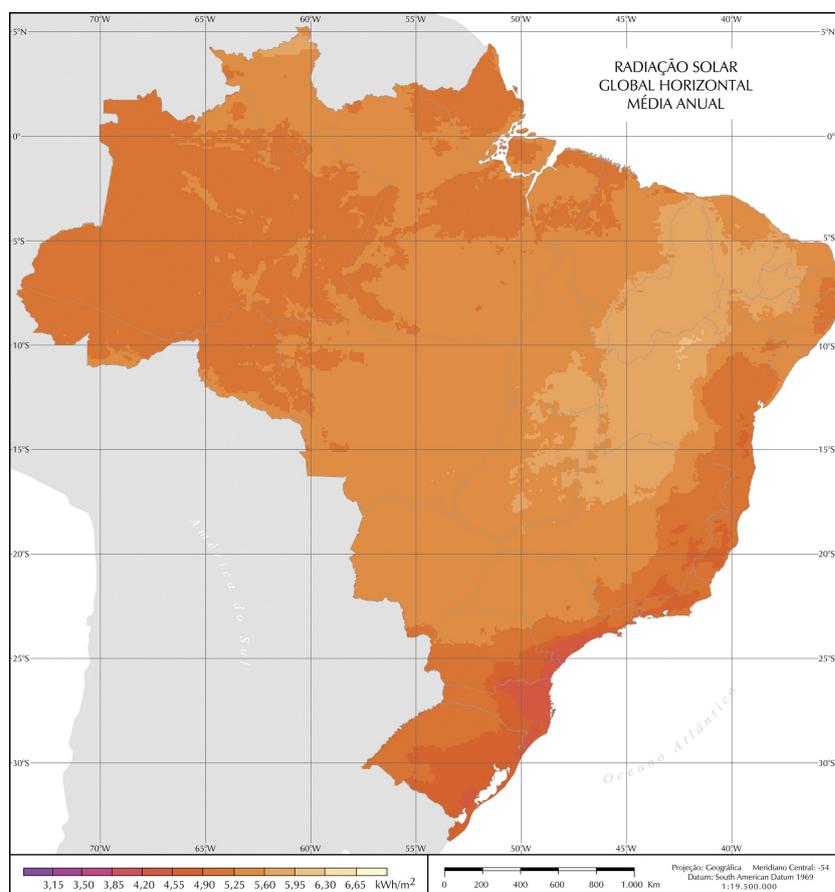
No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) há alguns anos mapeia a radiação solar em todo território nacional. Os estudos mostram o grande potencial brasileiro para o aproveitamento na produção de energia elétrica. As regiões mais próximas à linha do Equador carregam os maiores índices de irradiação. Porém, a radiação solar não atinge de maneira uniforme a crosta terrestre e depende de outros fatores, como condições atmosféricas, estações do ano e outros, para que se possa ter um elevado índice de irradiação.

Nos dias de hoje, são inúmeras as aplicações da energia solar, sendo estas divididas em duas grandes áreas de concentração, o seu aproveitamento para aquecimento térmico e a conversão direta em energia elétrica ([ATLAS, 2012](#)), sendo esta a mais difundida, tanto no meio científico como em comercialização.

Os incentivos governamentais e investimentos privados tem aumentado a cada ano, embora de forma tímida. A maior parte das universidades públicas possuem linhas de

pesquisas em energias renováveis e a pesquisa em energia solar como um dos braços mais promissores. O potencial brasileiro para a exploração da energia solar é muito maior do que em países europeus, como Alemanha, França, Espanha e Portugal, que apresentam os seus maiores índices de irradiação na faixa dos menores que encontramos em território nacional. Porém, os investimentos em projetos para o aproveitamento da energia solar no Brasil são muito inferiores aos desses países. A figura 2 mostra a média anual de radiação no território brasileiro, apresentando os maiores índices, em kWh/m^2 , na região do semiárido.

Figura 2 – Radiação solar média anual no território brasileiro

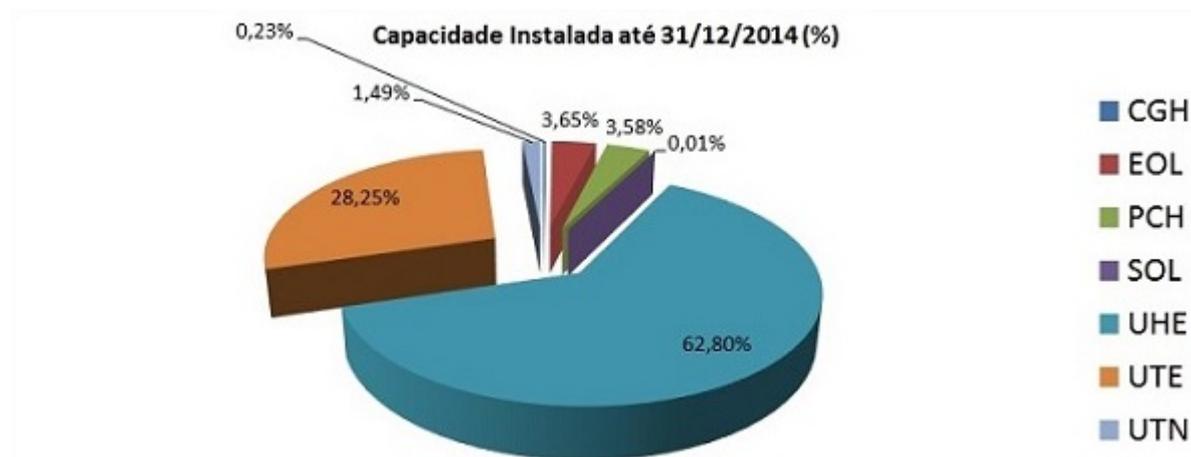


Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar [Pereira et al. \(2006\)](#)

A matriz energética do nosso país não é tão homogênea como em outros. Não impressiona que um país com dimensões territoriais como o nosso e com um imenso potencial hídrico tenha como principal matriz energética a energia de origem hidráulica. Quase 63% da nossa matriz energética é hídrica e os 37% restantes se dividem em outras fontes de energia, renováveis e não-renováveis, como mostra a figura 3. A insignificância da atual produção de eletricidade através da energia solar no nosso país não representa a sua

devida importância para a matriz energética. A baixa produção de energia fotovoltaica pode ser devido aos obstáculos impostos pela falta de reconhecimento dessa importância e consequentemente de investimento neste setor, tanto por parte governamental como por parte da iniciativa privada.

Figura 3 – Matriz Energética do Brasil: CGH - Central Geradora Hidrelétrica; EOL - Usinas Eolielétricas; PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas; SOL - Fontes Alternativas de Energia; UHE - Usinas Hidrelétricas; UTE - Usinas Termelétricas; UTN - Usinas Termonucleares



Fonte: Brasil (2008)

Atualmente, vivemos em tempos de crise energética. Recentemente vimos uma crise hídrica em nosso país, a mesma que assolou o nordeste a tempos resolveu expandir seus limites territoriais, atingindo o sudeste e sul, onde os reservatórios hídricos permanecem abaixo da média. Pesquisas apontam um fim, não muito distante, para os combustíveis fósseis e a sociedade está cada vez mais consciente de que há a necessidade de um desenvolvimento energético sustentável, tornando a produção de energia elétrica por fontes que possam acarretar problemas ambientais evitadas. Diante dessa realidade, a produção de energia elétrica por fontes renováveis ganham destaque, entre essas desponta a solar fotovoltaica, que é a transformação direta da energia proveniente do sol em energia elétrica.

2.3 O efeito fotovoltaico

A definição de efeito fotovoltaico pode ser dado da seguinte maneira: "Surge, em um determinado material, uma diferença de potencial quando ele é exposto à luz". A primeira descoberta sobre o efeito fotovoltaico remontam ao século XIX, quando Edmund Becquerel observou a passagem de correntes elétricas em eletrodos imersos em solução ácida iluminados por luz, em 1839. Anos mais tarde, por volta de 1870, o Professor William

Grylls Adams e seu estudante, Richard Evans Day, fizeram diversos experimentos sobre a influência da luz no surgimento de uma diferença de potencial em alguns materiais. Devido aos trabalhos de Adams e Day a descoberta do efeito fotovoltaico é creditada a eles (PERLIN, 1999). Desde então, a busca pelo entendimento completo da transformação da energia luminosa em energia elétrica nunca mais cessaram.

Com os trabalhos de Maxwell e Einstein sobre a natureza da luz e, posteriormente, com a mecânica quântica de Erwin Schrödinger aplicada em sólidos, uma análise mais completa pôde ser dada ao estudo da absorção da luz sobre a matéria e o surgimento de correntes elétricas em alguns materiais. As pesquisas por busca de materiais que fossem capazes de transformar energia solar em energia elétrica com a maior eficiência se intensificaram e o estudo aprofundado na estrutura da matéria nos possibilitou identificar e moldar tais materiais para este fim.

2.4 Células solares

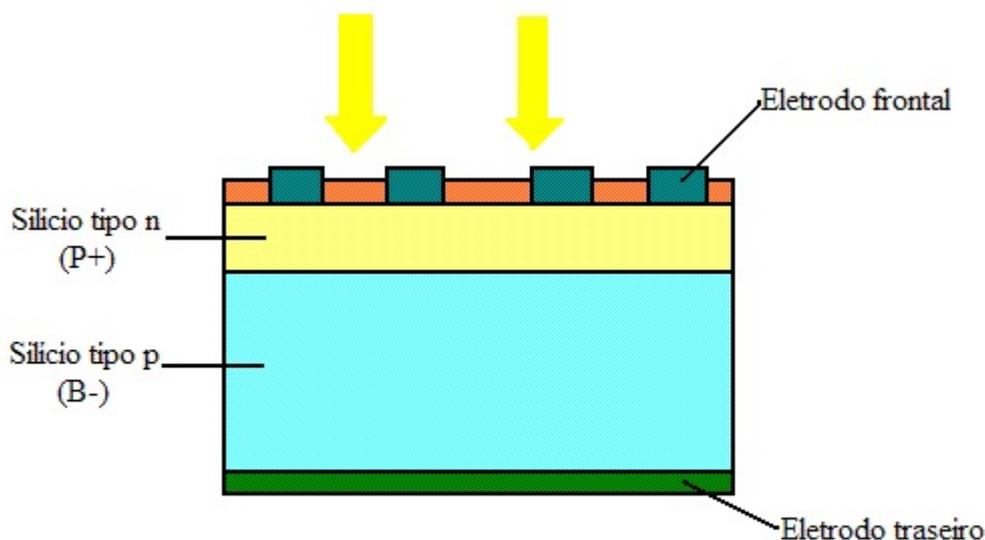
Os primeiros materiais feitos para o uso exclusivo para converter energia solar em eletricidade foram desenvolvidos por volta de 1883, e sua eficiência chegava apenas a 0,5%. Em 1931, outros avanços neste sentido foram dados e novas células solares foram produzidas atingindo eficiências de 1% (PERLIN, 1999), o que ainda era muito pouco para o que esperavam. Acreditava-se, desde a descoberta do efeito fotovoltaico, que num futuro não muito distante a energia solar seria capaz de competir com outras fontes de eletricidade como a hidroelétrica e a termoelétrica, mas esses resultados foram decepcionantes para época. No entanto, apesar das adversidades encontradas, a procura e a produção de materiais para transformação de energia solar em energia elétrica continuou a se desenvolver, mesmo que com muitas oscilações no decorrer do tempo devido aos interesses e as economias globais existentes na época, marcando períodos de avanços, como no período da corrida espacial, como também momentos de estagnação, no período de expansão das energias geradas por combustíveis fósseis que mantinham o preço baixo comparado a energia gerada por células solares (CARNEIRO, 2010). Foi com esses altos e baixos que se formou a indústria das células solares.

A evolução dessa indústria segue uma linha que se inicia com a fabricação da primeira célula solar, feita por Calvin Fuller e Gerald Pearson em 1954, apresentada na reunião anual da *National Academy of Sciences*, em Washington e publicada no *Journal Applied Physics*. Em março de 1953, nos *Bells Laboratories (Bell Labs)*, Calvin e Pearson iniciava o processo de dopagem e controle de propriedades elétricas em cristais de silício, produzindo a junção p-n, responsável pelo surgimento de um campo elétrico permanente nestes materiais (VALLÊRA; BRITO, 2006). Desde então, o desenvolvimento deferiu-se

com algumas oscilações até os dias de hoje, onde laboratórios e universidades de todo o mundo possuem linhas exclusivas de pesquisas nesta área.

O processo de produção e desenvolvimento de células solares permite dividi-las em três gerações, como mostra [Carvalho e Calvete \(2010\)](#). As células solares de primeira geração, apesar de ainda alto custo em relação à células das gerações posteriores, são responsáveis pela maioria dos modelos comerciais existentes hoje. O custo elevado e a baixa eficiência, chegando, num limite teórico à 33%, sendo essa considerada significativamente alta, a torna pouco competitiva no mercado energético ([CARVALHO; CALVETE, 2010](#)). Elas são feitas geralmente de Silício (Si) cristalino acrescido de outras substâncias, chamadas de materiais dopantes, como Boro (B) e Fósforo (P), formando um material tipo n e tipo p, respectivamente ([CASTRO, 2007](#)). Este tipo de células são o objeto de estudo do nosso trabalho. Através da explicação do funcionamento da célula solar de primeira geração é que tentaremos fazer com que o aluno do ensino médio consiga estabelecer uma ligação de uma aplicação prática a mecânica quântica. Por isso, separamos um capítulo para falar sobre os princípios quânticos de uma célula solar de primeira geração.

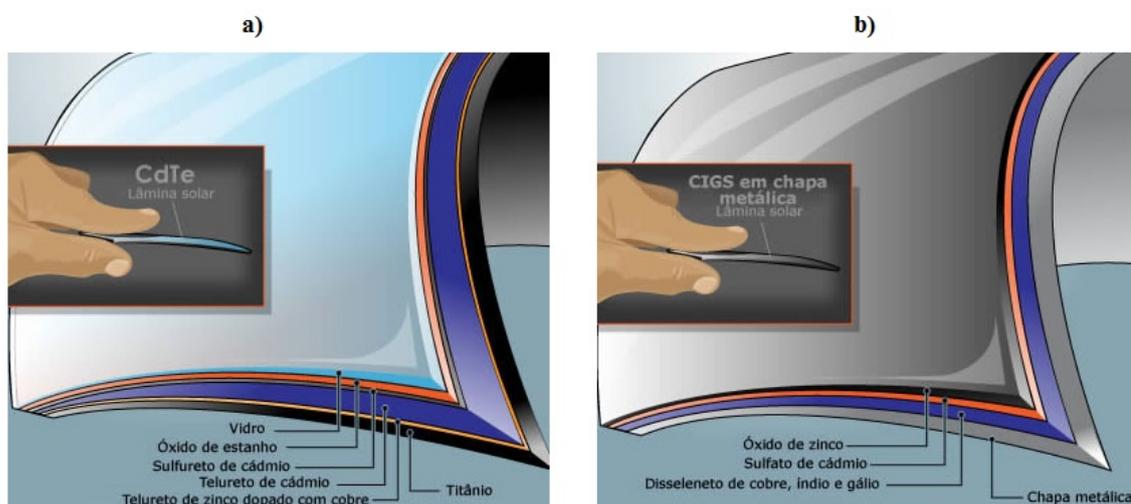
Figura 4 – Célula solar de primeira geração



Fonte: [Carvalho e Calvete \(2010\)](#)

No intuito de diminuir o elevado custo das células de primeira geração, surgiram as de segunda geração. Elas são produzidas com base em filmes finos inorgânicos de silício amorfo (a-Si), policristalino ou microcristalino, telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). Apesar de um custo menor na fabricação deste tipo de células, um problema surge com relação a sua eficiência, que é menor em relação a células de silício cristalino. No entanto, quando comparamos custo de produção e eficiência juntos, as células de segunda geração são vantajosas com relação as primeiras (ENERGIA, 2015). A eficiência desse tipo de célula é menor e seu limite teórico chega 29,7%, no entanto, a eficiência atingida em laboratório é de 16,5% (FALCÃO, 2005).

Figura 5 – Célula solar de segunda geração: em a), uma célula de CdTe e em b), uma célula de CIGS.



Fonte: Harris (2009)

A terceira geração de células solares vieram para superar as dificuldades encontradas nas duas gerações anteriores, baseadas em filmes finos e em silício cristalino adicionado de dopantes tipo n e p. Como uma tendência natural, elas devem possuir custos menos elevado e alta eficiência para superar estas. E é exatamente isso que o futuro promissor das células de terceira geração indicam.

Estas células podem ser divididas em dois tipos: as feitas de materiais orgânicos (OPV, *do inglês organic photovoltaic*) e as baseadas em pontos quânticos (PQs). Elas apresentam grande potencial e muitas vantagens sobre as gerações anteriores. As principais são baixo custo por área empregada, baixo peso, grande flexibilidade mecânica e semitransparência considerável (ELY, 2014).

3 PRINCÍPIOS QUÂNTICOS DE UMA CÉLULA SOLAR DE PRIMEIRA GERAÇÃO

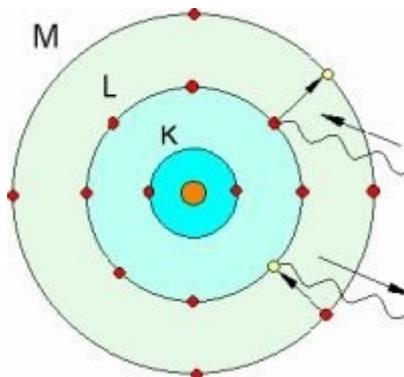
Para falarmos sobre semicondutores e o princípio de funcionamento de células solares, é necessário antes entendermos um pouco da estrutura da matéria e as diferenças entre condutores, isolantes e semicondutores, compreendendo a física que os envolve. A estrutura atômica, conhecida atualmente e muito bem estabelecida pela nova mecânica quântica, nos dá um aparato enorme no sentido de entendermos o que acontece microscopicamente em uma célula solar.

3.1 Níveis de energia do átomo de hidrogênio

Os modelos atômicos evoluíram de forma que podemos generalizar aplicações teóricas de um só átomo, a um conjunto deles, como um cristal de silício, por exemplo. O resultado obtido para o átomo de Hidrogênio (H) é considerado um dos mais importantes de toda mecânica quântica (GRIFFITHS; FREITAS, 2011). O modelo atômico atualmente aceito para o átomo de H é descrito pela mecânica quântica de Erwin Schrödinger, entretanto, utilizaremos o modelo de Borh, que nos permite fazer uma abordagem mais didática, para explicar as diferenças entre materiais condutores, isolantes e semicondutores na próxima seção.

De acordo com o modelo de Borh, os elétrons giram ao redor do núcleo em orbitas circulares, com momentos angulares (L) quantizados, ou seja, com valores discretos de L . Através das regras de quantização deste modelo, as órbitas possíveis para um elétron são aquelas onde a circunferência da órbita deve possuir exatamente um número inteiro de comprimentos de onda de de Broglie (EISBERG; RESNICK, 1985). Pelo princípio da exclusão de Pauli, cada órbita só pode conter dois elétrons. Dependendo de onde o elétron se encontra, ele pode saltar para uma órbita acima, se ganhar energia ou para uma abaixo, se perder. Os resultados teóricos do modelo de Bohr confirmam os experimentais observados antes. Lembrando que nos limitamos ao modelo de Bohr em nome da didática, uma vez que o mais correto seria abordar o conceito de orbitais do elétron, já que este depende de quatro números quânticos, (n, l, m, m_s) e não só de um, como no modelo de Bohr. Neste caso, a posição do elétron depende do número quântico principal (n), do número quântico azimutal (l), do número quântico magnético (m) e do número quântico de spin (m_s).

Figura 6 – Representação do modelo atômico de Bohr



Fonte: UFRGS (2015)

Bohr utilizou princípios clássicos e a ideia de quantização do momento angular para chegar a uma equação que confirmasse valores para energias do elétron no átomo de H que estivessem de acordo com a experiência. A equação 3.1 mostra a quantização do momento angular idealizada por Bohr e, com algumas manipulações algébricas triviais aplicadas com conceitos clássicos de forças que agem no elétron, chegaremos na a 3.2, que nos dá os valores das energias do elétron nos diferentes níveis. Vale aqui destacar que a quantização do momento angular proposto por Bohr para o átomo de H é a principal diferença entre os modelos clássico e o modelo quântico. A partir desta hipótese foi possível verificar que os valores para as energia do elétron em volta do núcleo era quantizada, ou seja, apenas valores discretos da energia eram permitidos para o elétron. Esta ideia como apresentada se tornou um divisor de águas na física do último século.

$$L = mrv = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

$$E_n = \frac{-13,6}{n^2} eV, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.2)$$

Após as explicações de Bohr, Sommerfeld apresentou alguns trabalhos complementares que obtiveram sucesso na intensão de explicar a degenerescência de níveis com o mesmo valor de n , ou seja, várias órbitas com um mesmo valor total de energia, mas foi a mecânica quântica de Erwin Schrödinger que mais revolucionou a maneira com que tratamos o comportamento de estruturas microscópicas como átomos, elétrons, prótons, fótons e outros.

Em 1926, Schrödinger apresentou um trabalho que continha as ideias e uma

equação, que juntas revolucionaram a MQ. A ideia de Schrödinger é uma extensão do trabalho de de Broglie sobre o movimento de uma partícula que ele diz ser comandada por uma onda associada, o postulado propõe a dualidade onda-partícula. No entanto, ela é mais geral do que isso e mostra exatamente como essa onda governa a partícula (EISBERG; RESNICK, 1985). A equação 3.3 descreve a evolução de uma partícula por análise probabilística de seu comportamento ondulatório e é umas das mais famosas da física, é a chamada *equação de Schrödinger*.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x, t) + V(x, t) \psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) \quad (3.3)$$

O sucesso da teoria de Schrödinger se deve ao fato de que os resultados experimentais têm confirmado inúmeras previsões teóricas no decorrer do tempo. Com uma análise probabilística, trabalhando a problemática da energia com um tratamento de autovalores das funções de onda, a teoria tem dado os mais importantes resultados científicos, a respeito da estrutura microscópica da matéria, em toda a história da ciência.

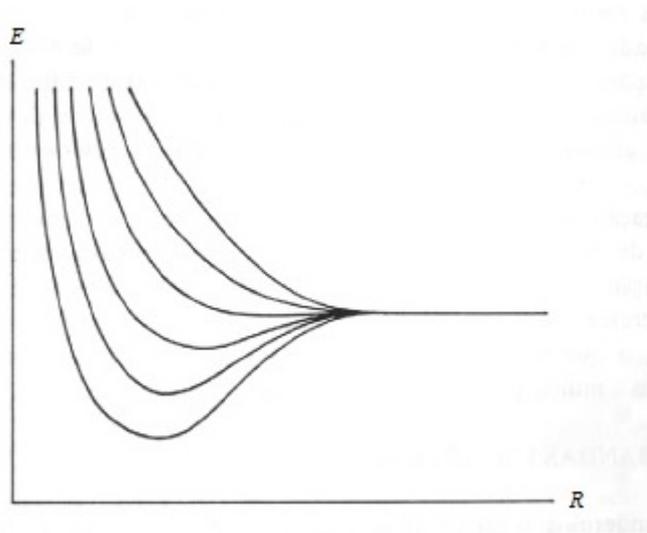
3.2 Estrutura de bandas

Com esses conceitos básicos sobre um átomo individual e seus níveis de energia, somos capazes de entendermos um pouco do que acontece quando esses mesmos átomos se unem formando um componente sólido. Os elétrons preenchem as órbitas de um átomo individual de acordo com o princípio da exclusão de Pauli e em função dos números quânticos (n , l , m e m_s), respeitando a degenerescência de cada nível de energia.

Em um átomo eletricamente neutro, os elétrons ficam dispostos em cada um de acordo com o seu número atômico e como consequência do princípio da exclusão se organizam nas órbitas de maneira a preenchê-las pela ordem de nível de menor para maior energia, até o último elétron se acomodar. A camada que recebe os últimos elétrons do átomo é chamada de *camada de valência ou banda de valência*.

Em um conjunto de átomos, como um sólido por exemplo, os elétrons também se posicionam desta maneira, porém, neste caso, as órbitas individuais do nível mais externo de cada um se sobrepõem a medida em que os seus centros se aproximam, formando o que chamamos de estrutura de bandas.

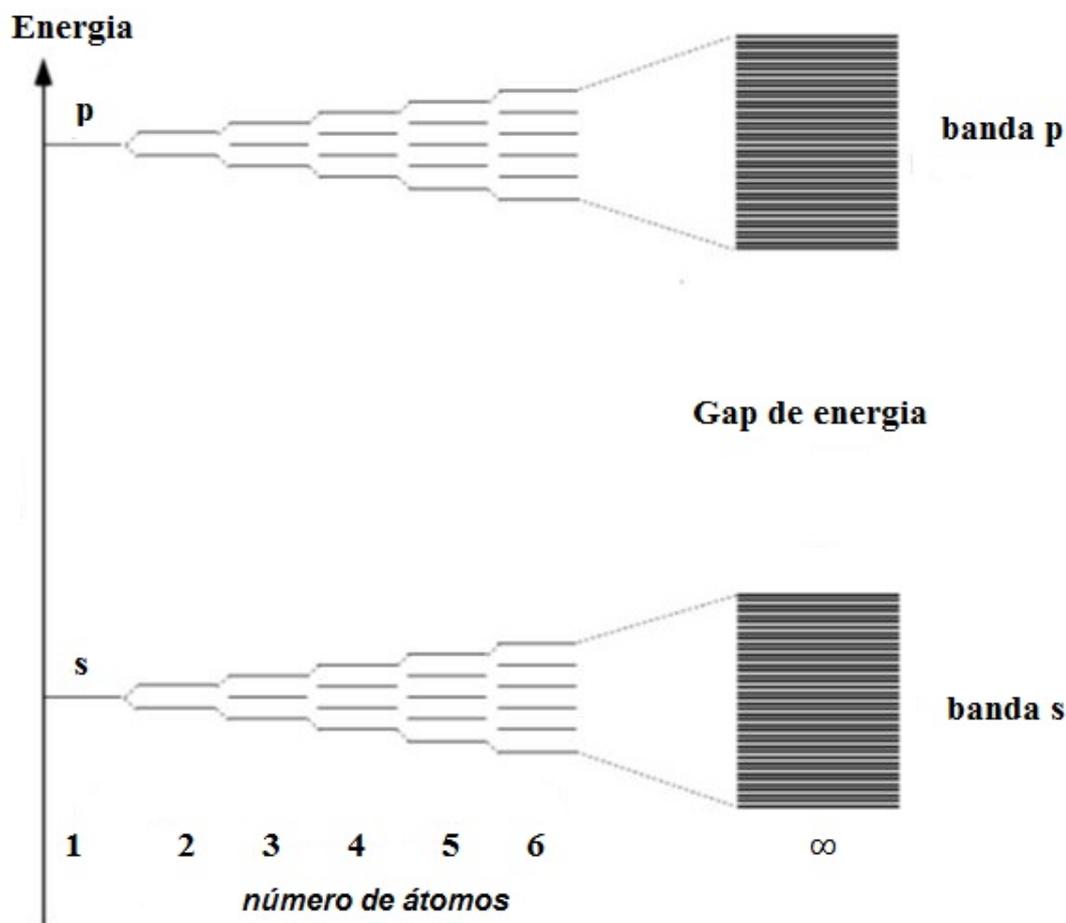
Figura 7 – Superposição dos níveis de energia em um conjunto de 6 átomos em função da diminuição da distância entre seus núcleos.



Fonte: [Eisberg e Resnick \(1985\)](#)

A figura 7 mostra a superposição dos níveis de energia de um conjunto de seis átomos em função da distância R entre os seus centros ([EISBERG; RESNICK, 1985](#)). A medida que R diminui, os níveis se desdobram em torno de uma energia média. A figura 8 mostra uma sequência de uma possível formação de bandas em um conjunto átomos a medida em que se aumenta o número de núcleos. Para que o elétron salte da banda de valência, banda s na figura, para a banda de condução, banda p na figura, é necessário que ele ganhe energia na mesma quantidade da banda proibida ou energia de gap. Vale ressaltar que as órbitas individuais mais internas de cada átomo permanecem inalteradas, uma vez que as ligações entre os átomos são covalentes.

Figura 8 – Formação de bandas de energia com o aumento do número de átomos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

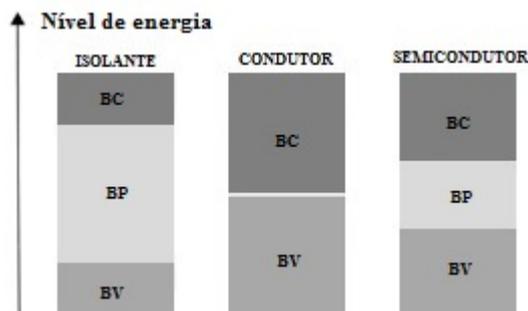
3.3 Materiais condutores, isolantes e semicondutores

Podemos, agora, tentar entender o que torna os materiais condutores, semicondutores e isolantes. Embora tentemos dar uma resposta correta sobre a natureza dessas estruturas, a explicação mais completa para esses materiais está além da intensão deste trabalho, por isso, nos manteremos com o intuito de fazer uma análise qualitativa do tema.

Partiremos do seguinte ponto: imagine um sólido que possui uma banda de energia totalmente ocupada e a próxima banda com energia maior totalmente vazia. Em temperaturas acima do zero absoluto, um elétron pode passar da banda que está cheia para que está vazia se ele adquirir energia térmica devido ao movimento do cristal. A banda que estava totalmente vazia, agora está parcialmente vazia e a banda que estava totalmente preenchida agora está parcialmente preenchida. A energia necessária para que o elétron salte de uma banda para outra depende da temperatura do material e da largura

entre elas, ou seja, da energia entre elas. As bandas que ficam parcialmente vazias é dado o nome de *banda de valência* e as bandas que ficaram parcialmente preenchidas é dado o nome de *banda de condução*.

Figura 9 – Gap de energia em condutores, isolantes e semicondutores.



Fonte: Adaptado de [Educação \(2015\)](#).

A figura 9 nos mostra as larguras do gap de energia ou banda proibida (BP) entre as bandas energéticas de um isolante, de um condutor e de um semicondutor. No material isolante, a energia que o elétron deve ganhar para que salte até banda de condução (BC) é muita alta, sendo muitas vezes essa maior do que a própria energia de ligação entre os átomos. No condutor, existem elétrons livres na banda de condução, é como se não houvesse uma zona proibida entre as bandas de valência (BV) e condução. No semicondutor, a largura entre as bandas é bem pequena. No silício, por exemplo, o valor da energia para o elétron saltar da banda de valência para a banda de condução é de aproximadamente 1 eV. Isso torna o silício um condutor razoável em temperatura ambiente ([EISBERG; RESNICK, 1985](#)).

3.4 Semicondutores

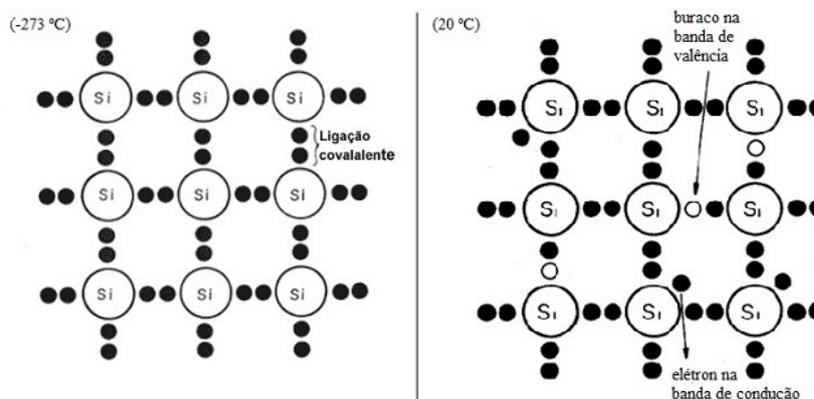
3.4.1 Condutividade intrínseca

Como vimos antes, as primeiras células solares comerciais consideradas de primeira geração foram construídas por volta de 1954, devido a pesquisa de Calvin e Pearson. Na ocasião, eles construíram a primeira célula de silício de junção-pn. Apesar de ser a primeira de uma série de protótipos construídos antes de uma produção em larga escala, o princípio fundamental de funcionamento é o mesmo das que são comercializadas hoje, que chega a 90 % das células comerciais ([FIGUEIREDO; ALVES; VECCHIA, 2012](#)), independente das técnicas de fabricação. Apresentaremos aqui o princípio físico de natureza quântica do funcionamento de uma célula solar de silício de junção-pn.

O silício é um semicondutor de número atômico $Z = 14$, portanto, possui 14

elétrons distribuídos em seus níveis de energia. Um semiconductor intrínseco é um cristal de silício puro. Teoricamente, no zero da temperatura absoluta, o silício cristalino se comporta como um isolante, tendo todos os seus elétrons mais externos na banda de valência e uma energia de gap no valor de aproximadamente 1,1 eV. No entanto, a temperatura ambiente, em 20 graus Celsius, um elétron pode receber energia oriunda da agitação térmica sólido e com isso saltar para a banda de condução deixando um espaço vazio, um "buraco", na banda de valência (CARNEIRO, 2010).

Figura 10 – Representação bidimensional de um cristal de silício à temperatura de -273 °C, esquerda e à 20 °C, direita.



Fonte: Adaptado de Carneiro (2010).

Além disso, a energia de gap no silício é comparável a energia dos fótons na região do vermelho no espectro eletromagnético, com isso, um elétron na banda de valência pode absorver um fóton e passar para a banda de condução, caracterizando-o como um fotocondutor. Os elétrons na banda de condução e os buracos na banda de valência são chamados de portadores de carga, com o buraco se comportando como uma carga positiva. Se o sólido for submetido a um campo elétrico, uma corrente elétrica surgirá no mesmo. Esse tipo de condução elétrica é chamada de condutividade intrínseca.

3.4.2 Condutividade extrínseca

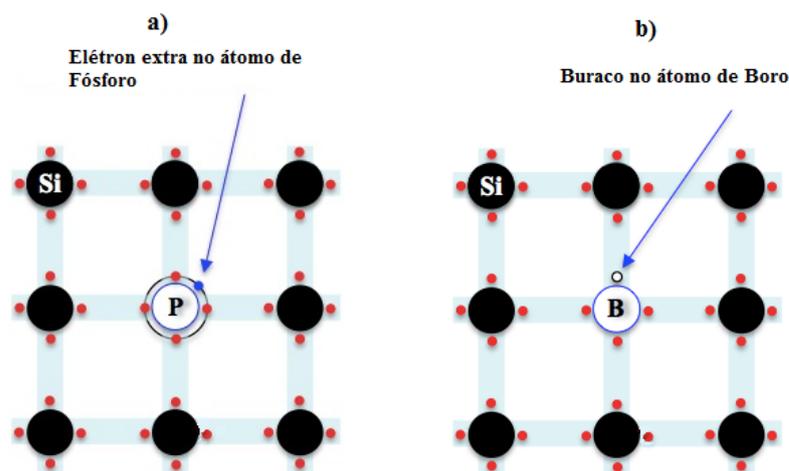
O aumento na condutividade de um semiconductor também pode ser feito pela inserção de impurezas. Esse processo é conhecido como *dopagem* e um semiconductor dopado é chamado de semiconductor extrínseco. O processo de dopagem consiste em acrescentar átomos de outros elementos em um cristal semiconductor puro, que sejam de características elétricas parecidas.

De acordo com a nova nomenclatura da tabela periódica, o fósforo (P) é um elemento que faz parte do grupo 15 da tabela periódica, possuindo cinco elétrons na sua banda de valência. O silício (Si) possui quatro elétrons na sua última camada e faz parte do grupo 14 (IUPAC, 2013). Ao acrescentarmos um átomo de fósforo no cristal de silício a

ligação formada entre eles obedece a regra do octeto, então os quatro elétrons do átomo de Si serão compartilhados com quatro elétrons do P na formação da ligação covalente. Como o P é um elemento pentavalente, ou seja, possui cinco elétrons em sua última camada, o seu quinto elétron fica fracamente ligado a ele, mas a energia que o separa da banda de condução é baixa de modo que uma pequena energia (térmica ou luminosa) adquirida pelo elétron faz com que o mesmo salte para a banda de condução. Como o P forneceu um elétron para banda de condução ele é denominado de impureza doadora, no processo que é chamado de *dopagem tipo-n*.

Ao realizar o mesmo processo, só que agora com um elemento do grupo 13 da tabela periódica, aparecerá na formação da ligação entre os átomos um buraco pela ausência de um elétron, uma vez que a regra do octeto não é completada. O buraco se comporta como uma carga positiva, sendo o elemento que o originou chamado de impureza aceitadora e o processo para sua formação é denominado de *dopagem tipo-p*.

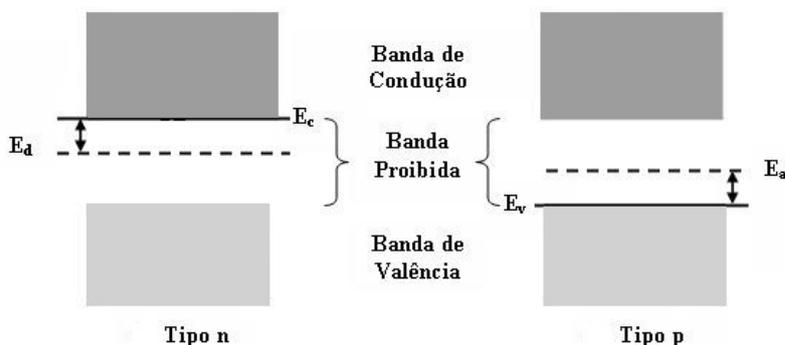
Figura 11 – Representação de um cristal de Si com impurezas tipo-n, a) e tipo-p, b).



Fonte: Adaptado de [Carneiro \(2010\)](#)

No semiconductor com dopagem tipo-n, o elétron ocupará um nível de energia que está situado dentro da banda proibida e logo abaixo da banda de condução, com uma diferença energética entre essas de aproximadamente 0,01eV. Já no semiconductor tipo-p, as impurezas que originam um buraco no conjunto, são também responsáveis pelo surgimento de níveis de energia dentro da banda proibida logo após a banda de valência, com uma diferença energética entre elas de também aproximadamente 0,01 eV. Neste caso, as energias E_a e E_d na *Figura 13* são aproximadamente 0,01eV, mas poderiam ser diferentes se as impurezas e o cristal fossem outros.

Figura 12 – Bandas de energia dos semicondutores tipo-n e tipo-p.

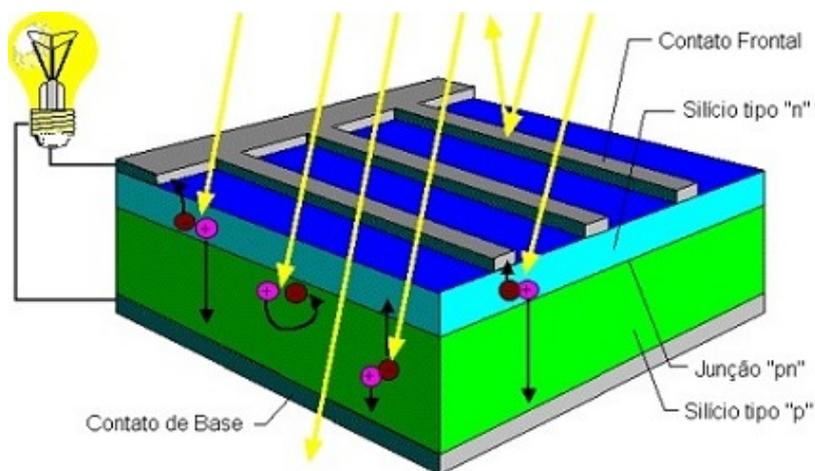


Fonte: Adaptado de [UFRGS \(2015\)](#)

3.5 Princípio microscópico de funcionamento de uma célula solar de primeira geração

A figura 13 mostra o corte transversal de uma célula solar de primeira geração. Os contatos frontais, no material tipo-n, fecham um circuito com os contatos da base, no material tipo-p. Esta é a figura típica de uma célula solar de primeira geração, que detalharemos melhor o princípio de funcionamento daqui em diante.

Figura 13 – Corte transversal de uma célula solar de primeira geração.

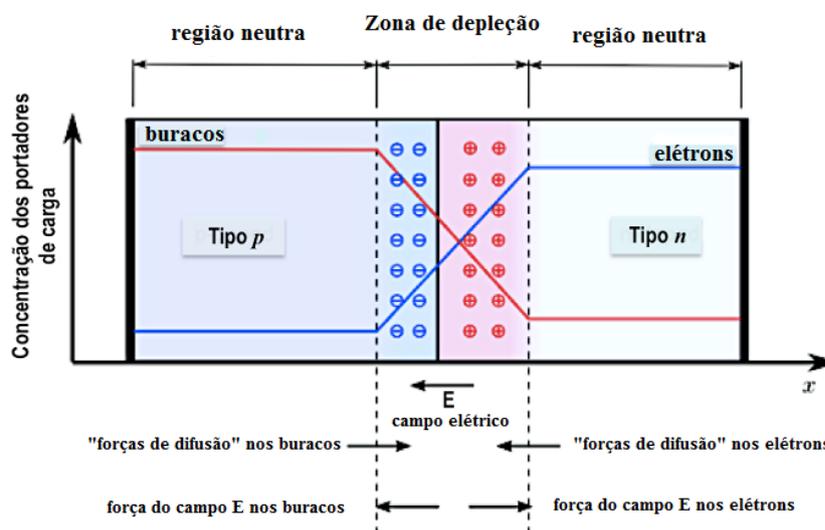


Fonte: [CRESESB \(2015\)](#)

3.5.1 A junção-pn

Ao unir o silício de dopagem tipo-p ao do tipo-n, através de processo em laboratório, é possível conseguir controlar a condutividade deste material resultante dependendo da quantidade de impurezas em cada um deles. Na área onde separa os dois materiais, ocorre a formação de um campo elétrico permanente devido as forças de difusão do movimento natural dos elétrons e buracos na tentativa de manter o equilíbrio elétrico no material, a essa região que é dada o nome de *zona de depleção*. A figura 14 mostra a atuação das forças de difusão e do campo elétrico em uma junção-pn, assim como os níveis de energia dos portadores de cargas majoritários e minoritários em cada material.

Figura 14 – Corrente de difusão em uma junção-pn.



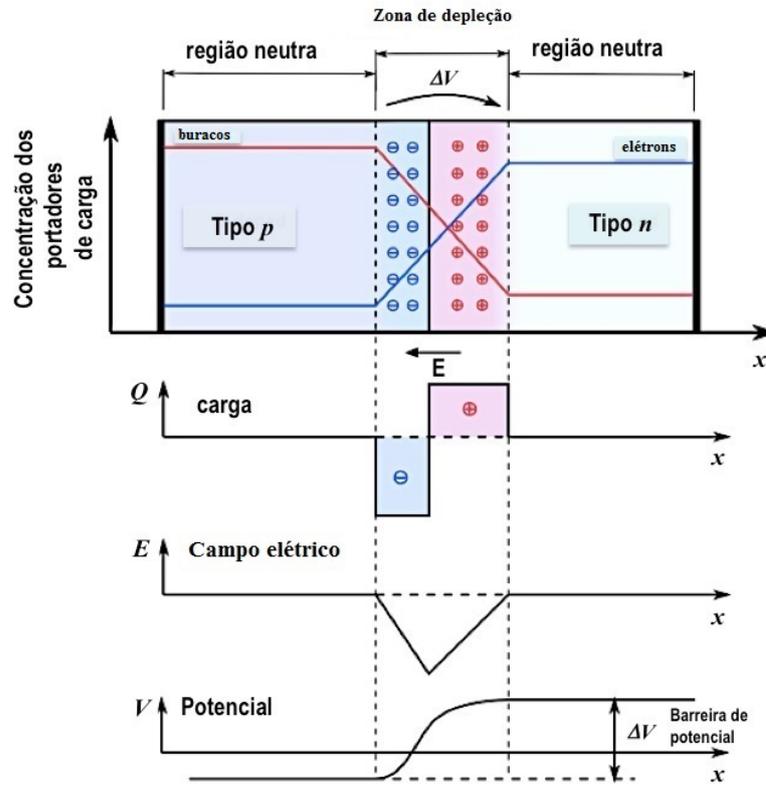
Fonte: Carneiro (2010)

Após o contato entre as duas partes, elétrons em excesso no material tipo-n são atraídos para o tipo-p e os buracos em excesso no material tipo-p são atraídos para o tipo-n, na tentativa de restabelecer o equilíbrio de cargas. Esses portadores de carga majoritários se acumulam na região de contato, os elétrons no material tipo-p e os buracos no material tipo-n, formando um campo elétrico na região de contato. Esse fluxo de portadores majoritários é chamado de *corrente de recombinação* (I_r). Como os níveis de energia da banda de valência são próximos da banda de condução, um elétron pode adquirir energia térmica saltar para a banda de condução, formando pares elétron-buraco que podem ser atraídos pelo campo elétrico da zona de depleção atravessando-o. Esse fluxo de portadores minoritários é chamado de *corrente de geração térmica* (I_g). A corrente no sistema sem iluminação (I_s) é dada pela equação 3.4.

$$I_s = I_g - I_r \quad (3.4)$$

A figura 15 mostra a representação gráfica da distribuição de cargas, o campo elétrico e a barreira de potencial da zona de depleção de uma junção-pn.

Figura 15 – Junção-pn sem iluminação e sem aplicação externa de uma diferença de potencial.



Fonte: Adaptado de Carneiro (2010)

A corrente de geração I_g é calculada através da estatística de Fermi, levando em conta o número de estados ocupados pelos elétrons na banda de condução e a temperatura do sistema. A corrente de recombinação I_r é relacionada com a corrente I_g de acordo com a equação 3.5. Assim, a corrente total de uma junção-pn sem iluminação é dada pela equação 3.6.

$$I_r = I_g \exp\left(\frac{V}{mU_t}\right) \quad (3.5)$$

$$I_s = I_g \left[\exp\left(\frac{V}{mU_t}\right) - 1 \right] \quad (3.6)$$

Onde I_g é a corrente de geração, V a diferença de potencial elétrico aplicada nos terminais, m o fator de idealidade de uma junção-pn (ideal: $m = 1$; real: $m > 1$) e U_t o potencial

térmico dado pela equação 3.7, sendo k_B a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta e q a carga do elétron.

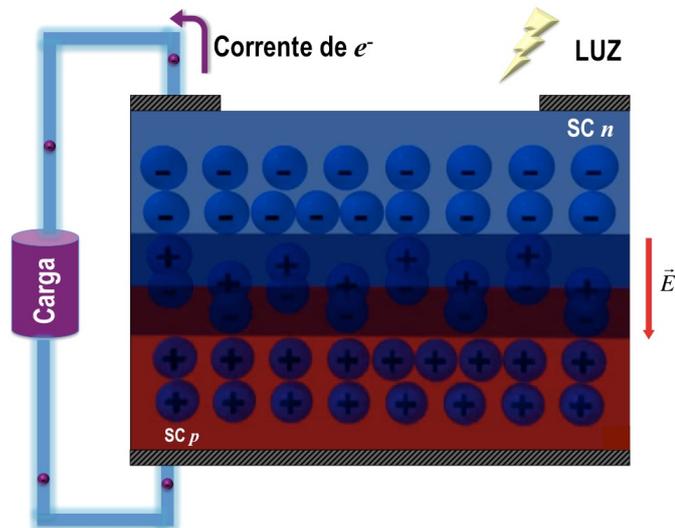
$$U_t = \frac{k_B T}{q} \quad (3.7)$$

Ao iluminar uma célula solar, os fótons de luz com energias aproximadas as energias das bandas proibidas do material são absorvidos pelos elétrons que, com isso, saltam da banda de valência, deslocadas por causa das impurezas, para a banda de condução, formando pares elétron-buraco.

Na região tipo-p, os elétrons gerados na formação de pares elétron-buraco é atraído pelo campo elétrico da região de depleção, interagindo com os buracos gerados na região tipo-n pela formação de pares elétron-buraco na mesma. Com isso, a região tipo-p fica com excessos de buracos e a região tipo-n fica com excessos de elétrons. Dessa forma, se o material tipo-p é ligado ao do tipo-n por um fio condutor, fechando o circuito, os elétrons em excesso no material tipo-n percorreram o fio até o material tipo-p, formando assim a fotocorrente do circuito I_f . A figura 16 mostra a representação de uma célula solar iluminada e com circuito fechado. Assim, em células solares a corrente total I_T do sistema que circula no circuito externo, é dado pela equação ??.

$$I_T = I_f - I_g \left[\exp\left(\frac{V}{mU_t}\right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

Figura 16 – Representação de excesso de portadores de cargas nos materiais tipo-p e tipo-n ao serem iluminados. Com o circuito fechado uma corrente atravessa a carga indo do material tipo-n para o tipo-p.

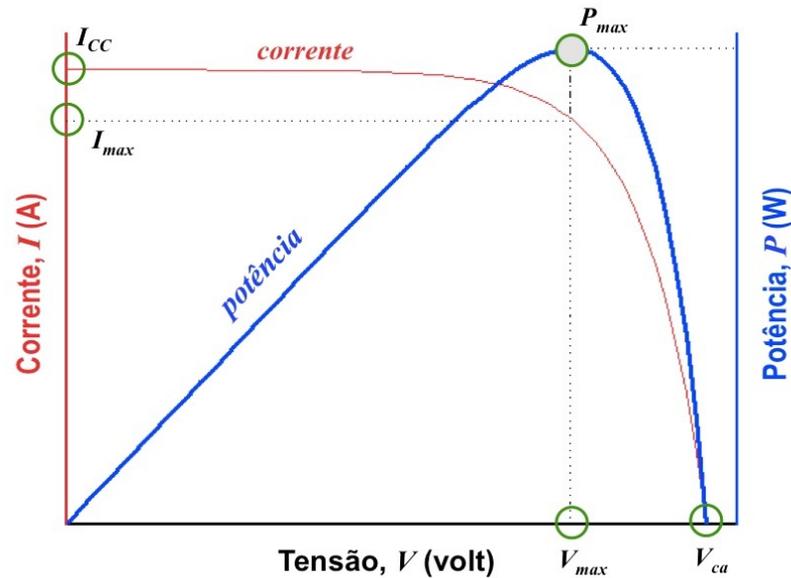


Fonte: Carneiro (2010)

3.5.2 Curva característica e eficiência

Ao calcularmos a corrente de uma célula solar podemos também inferir a diferença de potencial entre os terminais ligados no semicondutor tipo-p e o tipo-n. A curva característica da corrente I em função da tensão V , nos permite calcular a eficiência de uma célula solar, ou seja, nos dá a condição de saber de quanto a célula transformou energia solar em energia elétrica. Podemos também encontrar a potência relacionada a esse conjunto de corrente e tensão e com isso traçar o gráfico de P como função de V , como podemos ver na figura 17. No ponto onde a potência é máxima teremos os valores máximos para a tensão e corrente.

Figura 17 – Curva característica de uma célula fotovoltaica de silício.



Fonte: Carneiro (2010)

Um fator importante para analisar uma célula solar é o fator de preenchimento (*FF* do inglês *Fill Factor*), que indica o quanto o retângulo no gráfico de $I \times V$ se aproxima do valor máximo. O fator FF é dado pela equação 3.9.

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{ca} I_{cc}} \quad (3.9)$$

Onde V_{max} é a tensão máxima, I_{max} a corrente máxima, V_{ca} a tensão de circuito aberto e I_{cc} a corrente de curto circuito.

A eficiência de uma célula solar é calculada através da relação entre a potência máxima elétrica produzida pela célula e a potência máxima da radiação solar que incide sobre a mesma, equação 3.10.

$$\eta = \frac{P_m}{AG} \quad (3.10)$$

Onde P_m é a potência máxima da célula, A é a área exposta da célula à luz e G é a irradiação solar incidente.

Existem pesquisas que mostram métodos para calcular a eficiência quântica de células solares, no entanto, esse conteúdo está além dos objetivos deste trabalho e o que foi abordado até aqui é suficiente para o que desejamos.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Com base no levantamento bibliográfico na introdução do trabalho é possível notar que, de fato, existe uma tendência de implementar os conteúdos da física moderna e contemporânea no ensino médio no Brasil e em outros países. A mecânica quântica pode ser considerada como um subtema desta área, possuindo diversos trabalhos específicos encontrados na literatura. Nota-se também um esforço governamental neste mesmo sentido. No Brasil, a LDB (BRASIL, 1996) e os PCNs (NACIONAIS, 1999; BRASIL, 2002) possuem objetivos ousados, porém, neste último as informações são mais no sentido de orientar o corpo docente e não possuem carácter de obrigatoriedade. Acreditamos que deveria haver, por parte destes, uma política mais enérgica em relação a isso, investindo e dando subsídios para a criação de um ambiente propício para o desenvolvimento e uma implementação efetiva, uma vez que há a necessidade de formar um cidadão ciente e participativo no meio em que vive.

Podemos concluir também que a energia solar é uma ótima ferramenta para o ensino da mecânica quântica. Ela se mostrou uma área muito rica neste sentido, onde a ligação com o cotidiano do educando pode ser feita através de uma abordagem a respeito do atual cenário energético mundial, em que está surgindo como uma alternativa para as crises energéticas que estão em evidência. Após isso, com uma incursão nos princípios de funcionamento de uma célula solar de primeira geração, é possível fazer uma primeira aproximação do aluno com a mecânica quântica ainda no ensino médio, abordando temas específicos, como, por exemplo, os modelos atômicos para o átomo de hidrogênio ou gerais, como o processo microscópico de transformação de energia solar em energia elétrica na célula solar de primeira geração.

Algumas ideias surgiram no decorrer da elaboração deste trabalho e pretendemos estendê-lo com isso. Temos a intenção de fazer um levantamento bibliográfico mais detalhado para que possamos entender a real necessidade de implementação de conteúdos da física moderna e contemporânea na escola média. Uma proposta de aula para aplicação à alunos do terceiro ano do ensino médio usando simuladores computacionais encontrados no site de *Simulações Interativas PhET* da Universidade do Colorado (EUA) também está entre as nossas intenções futuras, além de várias outras que podem surgir destas.

Referências

- ATLAS, D. E. E. D. B. *Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008*. 2012. Citado na página 23.
- BALTHAZAR, W. F.; OLIVEIRA, A. L. D. Partículas elementares no ensino médio: uma abordagem a partir do lhc. *São Paulo: Editora Livraria da Física: Rio de Janeiro: CBPF–Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (Coleção Tópicos em Física)*, 2010. Citado na página 16.
- BRASIL, A. de energia elétrica do. Agência nacional de energia elétrica. *Brasília: Aneel, 2008*. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 25.
- BRASIL, L. d. D. Bases da educação nacional-ldb.(1996). *Lei nº*, v. 9, p. 20, 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9394.htm>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 43.
- BRASIL, M. Pcn+ do ensino médio: orientações educacionais complementares aos pcn. *Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias.. Brasília: MEC*, p. 87–111, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 43.
- CARNEIRO, J. A. Semicondutores: modelo matemático da célula fotovoltaica. 2010. Citado 7 vezes nas páginas 26, 35, 36, 38, 39, 41 e 42.
- CARVALHO, E. F.; CALVETE, M. J. F. Energia solar: Um passado, um presente... um futuro auspicioso. *Revista Virtual de Química*, v. 2, n. 3, p. 192–203, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.
- CASTRO, R. M. Introdução à energia fotovoltaica. *DEEC/Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, 2007. Citado na página 27.
- CRESESB, C. d. R. p. E. S. e. E. S. B. *Tutorial de energia solar fotovoltaica*. [s.n.], 2015. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>. Citado na página 37.
- DISTRICT, M. V. C. S. Physics curriculum guide. 2009. Disponível em: <http://www.mtvernoncsd.org/userfiles/servers/server_87286/file/migrate/physics_curriculum_guide_2009-10.pdf>. Citado na página 20.
- EDUCAÇÃO, M. *Semicondutores*. [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/fismed/bohr.htm>>. Citado na página 34.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L.; REBUÁ, G. *A evolução da física*. [S.l.]: Jorge Zahar, 2008. Citado na página 6.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *Quantum physics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1985. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 32 e 34.
- ELY, J. W. S. F. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. 2014. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>>. Citado na página 28.
- ENERGIA, C., 2015. Disponível em: <<http://www.cbbs-energia.pt/formacao-tecnica/solar-fotovoltaico/celulas-fotovoltaicas>>. Citado na página 28.

- FALCÃO, V. D. *Fabricação de células solares de CdS/CdTe*. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, 2005. Citado na página 28.
- FIGUEIREDO, M. A. G.; ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. A história do co2 nos processos de mudanças climáticas globais. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, v. 3, n. 2, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 34.
- FOUNDATION, N. A. Federal, state, and local k-12 school finance overview. 2014. Disponível em: <<http://febp.newamerica.net/background-analysis/school-finance>>. Citado na página 19.
- GRIFFITHS, D. J.; FREITAS, L. *Mecânica quântica*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011. Citado na página 29.
- GRIFFITHS, D. J.; HARRIS, E. G. *Introduction to quantum mechanics*. [S.l.]: Prentice Hall New Jersey, 1995. Citado na página 21.
- GUERRA, A.; BRAGA, M.; REIS, J. C. Teoria da relatividade restrita e geral no programa de mecânica do ensino médio: uma possível abordagem. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 29, n. 4, p. 575–583, 2007. Citado na página 16.
- HARRIS, W. Como funcionam as células solares de película fina. *How Stuff Works*, 2009. Citado na página 28.
- IUPAC. *International Union of Pure and Applied Chemistry*. [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.iupac.org/fileadmin/user_upload/news/IUPAC_Periodic_Table-1May13.pdf>. Citado na página 35.
- KÖHNLEIN, J. F. K.; PEDUZZI, L. O. de Q. Uma discussão sobre a natureza da ciência no ensino médio: um exemplo com a teoria da relatividade restrita. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 1, p. 36–70, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- LOBATO, T.; GRECA, I. M. Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio quantum theory contents insertion in high school curricula. *Ciência & Educação*, SciELO Brasil, v. 11, n. 1, p. 119–132, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- LOCH, J.; GARCIA, N. M. D. Física moderna e contemporânea na sala de aula do ensino médio modern and contemporary physics in the high school classroom. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- NACIONAIS, P. C. ensino médio. *Brasília: Ministério da Educação*, p. 538–545, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 43.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. d. H. Física moderna e contemporânea no ensino médio: elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. *Caderno catarinense de ensino de física. Florianópolis. Vol. 16, n. 3 (dez. 1999), p. 267-286*, 1999. Citado na página 16.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. *Investigações em ensino de ciências*, v. 5, n. 1, p. 23–48, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. d. S. F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de física. *Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 21, n. 1 (abr. 2004), p. 83-102*, 2004. Citado na página 15.

PELIZZARI, A. et al. Teoria da aprendizagem significativa segundo ausubel. *Revista PEC*, v. 2, n. 1, p. 37–42, 2002. Citado na página 20.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. [S.l.]: INPE, 2006. Citado na página 24.

PERLIN, J. *From space to earth: the story of solar electricity*. [S.l.]: Earthscan, 1999. Citado na página 26.

SILVA, A. C. da; ALMEIDA, M. J. P. M. de. Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 3, p. 624–652, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

SPOHR, C. beatriz. *O tema da supercondutividade no nível médio: desenvolvimento de material hiperfísica fundamentado em epistemologias contemporâneas*. Mestrado Profissional, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/14953>>. Citado na página 16.

TERRAZZAN, E. A. Perspectivas para a inserção da física moderna na escola média. *São Paulo: curso de pós-graduação em educação-USP*, 1994. Citado na página 13.

UFRGS, U. F. d. R. G. d. S. *Niels Henrik David Bohr (1885 - 1962)*. [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/fismed/bohr.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 37.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. *Gazeta da física*, v. 29, 2006. Citado na página 26.