



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGreste
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EMERSON LEANDRO DA SILVA

**ESTUDO DA DINÂMICA DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELÉTRICA:
Método Fotovoltaico**

Caruaru

2023

EMERSON LEANDRO DA SILVA

ESTUDO DA DINÂMICA DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELÉTRICA:
Método Fotovoltaico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Física

Subárea de concentração: Conversão de Energia

Orientador: Prof. Dr. Washington de Lima

Caruaru

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela ajuda em todos os momentos do curso, o qual tornou possível essa trajetória de desafios e obstáculos que foram fundamentais para a formação do conhecimento.

A minha mãe, Luzinete, que batalhou durante toda vida para possibilitar uma educação de qualidade e esteve sempre ao meu lado em todos os momentos.

A minha noiva, Mariana, que sempre me motivou a continuar e evoluir diante dos desafios propostos pela vida.

Agradeço ao meu orientador e amigo, Washington de Lima, que durante a trajetória acadêmica foi imprescindível na minha formação e crescimento como estudante, profissional e pessoa.

Estudo da dinâmica de conversão de energia solar em elétrica: método fotovoltaico

Study of the dynamics of conversion of solar energy into electric: photovoltaic method

Emerson Leandro da Silva¹

RESUMO

Neste trabalho foi abordado a conversão de energia solar em energia elétrica. A ideia inicial consistiu em construir um conjunto de equipamentos, com a finalidade de transformar a energia oriunda do sol em eletricidade. No primeiro momento, foi feito um estudo bibliográfico a respeito da evolução histórica dos modelos atômicos, bem como dos materiais que compõem as placas fotovoltaicas, visando à compreensão da importância do processo científico no desenvolvimento de tecnologias, e com o intuito de obter o conhecimento teórico necessário para o entendimento e execução dos métodos de transformação de energia solar em energia elétrica. Na segunda parte, realizou-se a utilização de um aparato experimental para utilização da luz solar direta para gerar eletricidade, através de painéis solares policristalino de silício. O experimento se baseou na construção de protótipos, utilizando diversos tipos de associações para as células solares, com o objetivo de analisar seu comportamento quando expostas aos comprimentos de ondas de diferentes cores, foram utilizados a luz solar e lâmpadas artificiais. Sendo possível observar os diferentes valores de tensão provenientes de cada espectro de luz. Para a análise dos comprimentos de ondas fornecidos pela iluminação artificial utilizou-se um espectrofômetro. Com a ajuda deste foi possível observar os comprimentos de onda das diversas lâmpadas utilizadas no experimento. Posteriormente foi feita uma análise na influência da temperatura na eficiência de produção de tensão nos sistemas com células fotovoltaicas. Na qual foi possível a observação da diminuição desta na produção de tensão conforme a temperatura variava de maneira exagerada. Com o entendimento dos assuntos abordados e análise dos dados obtidos foi possível a compreensão da importância do método científico no desenvolvimento de novas tecnologias. Por fim, observou-se as condições privilegiadas de incidência solar da região nordeste do Brasil, assim como a necessidade do estudo de fontes renováveis de energia.

Palavras-chave: Eletricidade. Modelos Atômicos. Energia Solar. Fontes de Energia Renováveis. Conversão de Energia.

¹Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: emerson.leandro@ufpe.br

ABSTRACT

In this work the conversion of solar energy into electrical energy was achieved. The initial idea consisted of building a set of equipment, with the purpose of transforming the energy coming from the sun into electricity. At first, a bibliographical study was carried out regarding the historical evolution of atomic models, as well as the materials that make up the photovoltaic panels, aiming at understanding the importance of the scientific process in the development of technologies, and with the aim of obtaining theoretical knowledge necessary for the understanding and execution of the methods of transforming solar energy into electrical energy. In the second part, an experimental apparatus was used to use direct sunlight to generate electricity through polycrystalline silicon solar panels. The experiment is based on the construction of prototypes, using different types of associations for solar cells, with the objective of analyzing their behavior when exposed to wavelengths of waves from different nuclei, sunlight and artificial lamps were used. It is possible to observe the different voltage values from each light spectrum. For the analysis of the wavelengths provided by the artificial use, use a spectrophotometer. With the help of this it was possible to observe the wavelengths of the different lamps used in the experiment. subsequently, an analysis was made of the influence of temperature on the efficiency of voltage production in systems with photovoltaic cells. In which it was possible to observe the decrease in voltage production as the temperature varied in an exaggerated way. With the understanding of the subjects examined and analysis of the data obtained, it was possible to understand the importance of the scientific method in the development of new technologies. Finally, the privileged conditions of solar incidence in the northeast region of Brazil were observed, as well as the need to study renewable energy sources.

Keywords: Electricity. Atomic Models. Solar energy. Renewable Energy Sources. Energy Conversion.

DATA DE APROVAÇÃO: 08 de maio de 2023.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o planeta enfrenta mudanças climáticas de forma acentuada. Por consequência disso, observa-se o aumento da temperatura, de maneira global. Segundo a Organização das Nações Unidas, ONU (2021), a temperatura da superfície terrestre continuará aumentando até

meados deste século, caso as emissões de gases, que contribuem para o agravamento do efeito estufa, continuem nas mesmas proporções.

De maneira análoga, no Brasil, existem consequências das mudanças climáticas. Conforme Tolmasquim (2016), a hidreletricidade tem sido a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro por várias décadas, tanto pela sua competitividade econômica quanto pela abundância deste recurso energético a nível nacional. Visto que a energia elétrica proveniente de hidroelétricas é a mais utilizada no país, e que essas alterações no clima prejudicam, de maneira ambiental, a produção de energia elétrica nestas usinas. É necessário o desenvolvimento de novas fontes de energias para suprir essa demanda.

Segundo Capriglione (2006), os recursos naturais são normalmente categorizados como renováveis ou não-renováveis (exauríveis). Os recursos renováveis se autorregeneram, ou seja, são repostos pela natureza (energia solar, eólica, hidroelétrica, biomassa e outras). Recursos não renováveis são aqueles que, depois de esgotados não podem ser produzidos (combustíveis fósseis, urânio enriquecido, carvão mineral, gás natural e outros).

Sendo o Brasil um país tropical com alta incidência solar, abundância eólica em diversas regiões e vasta produção de matéria prima utilizada na produção de energia através de biomassa, como a cana-de-açúcar, que tem uma importância histórica na formação do país, torna-se viável o estudo no campo de energias renováveis.

Com o avanço da Física e seus estudos nas áreas de Física Quântica, Eletromagnetismo e Termodinâmica foi possível compreender e transformar os raios solares em energia elétrica. Seja por processos fotovoltaicos ou termodinâmicos.

Segundo Tolmasquim (2016), as duas principais tecnologias de geração de energia utilizando o processo solar como fonte direta para produção de eletricidade são: a fotovoltaica, que consiste na conversão direta da luz em eletricidade; e a heliotérmica, que é uma forma de geração termelétrica, na qual um fluido é aquecido a partir da energia solar para produzir vapor.

Tendo em vista as condições climáticas atuais e a alta demanda energética crescente no país, faz-se necessário o entendimento dos processos dinâmicos de energias renováveis a fim de otimizar a produção de energia elétrica para a criação de novos métodos e tecnologias.

O objetivo principal deste trabalho é estudar a relação da metodologia científica na produção de novas tecnologias, aplicando-a à construção e a análise do comportamento de protótipos utilizando células fotovoltaicas expostas a diversas fontes de luminosidade. Sendo analisado as alterações na tensão, corrente elétrica e temperatura dos sistemas fotovoltaicos.

Na seção 2, veremos a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento e entendimento da fenomenologia que acontece na transformação de energia solar em elétrica, tal

como a composição e comportamento dos materiais utilizados na construção das células fotovoltaicas. Na seção 3, será abordada a metodologia utilizada na produção dos protótipos e dispositivos utilizados durante a experimentação. Na seção 4, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos experimentos. Na seção 5, serão discutidas as conclusões referentes ao estudo feito durante o artigo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Modelos Atômicos

Durante o tempo o conceito de átomo tem evoluído de forma dinâmica. Inicialmente acreditava-se que o mesmo era composto por partículas minúsculas e indivisíveis. Este conceito, que era filosófico, foi corroborado por John Dalton, a partir de seus estudos experimentais sobre a natureza de conservação da massa (PERUZZO; CANTO, 2006).

Contudo, o modelo proposto por ele tornou-se insustentável após a observação das propriedades elétricas da matéria. Podendo ser citados os estudos da eletrólise feitos por Faraday (SANTOS; PORTO; KIOURANIS, 2020).

Segundo Peruzzo e Canto (2006), posteriormente aos experimentos executados por Faraday no estudo da eletrólise, realizados no século XIX, percebeu-se que existia uma dependência entre a massa e a quantidade de eletricidade “carga”.

Conforme Kondratyev (1967), já se sabia também que a natureza da eletricidade se manifestava sob duas formas, uma eletricidade positiva (carga positiva) e outra negativa (carga negativa). Isto sugere que o átomo não era indivisível, mas que era subdividido em partes menores que conteriam a natureza elétrica da matéria.

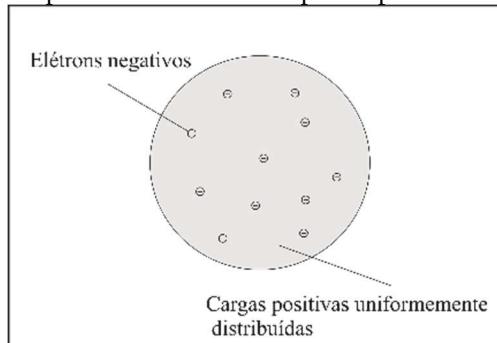
2.1.2 Modelo de Thomson

De acordo com Brown (2016), ainda durante o século XIX, os experimentos para entender a natureza elétrica da matéria continuaram inclusive, utilizando-se de aparelho que analisava descargas elétricas num tubo com gás em baixa pressão (SILVA; SANTOS; DIAS, 2011).

A partir desses experimentos, J. J. Thomson, na tentativa de explicar a estrutura atômica da matéria sem abandonar completamente o modelo de Dalton, sugeriu que o átomo seria uma esfera uniforme contínua de carga positiva, a qual continha minúsculas partículas de carga negativa (Figura 1). Estas partículas foram denominadas de elétrons (EISBERG; RESNICK, 1979; KONDRATYEV, 1967).

Devido a repulsão eletrostática entre os elétrons, estes estão distribuídos uniformemente ao longo da esfera, a qual está positivamente carregada. Neste modelo, percebe-se que no átomo em seu estado natural, os elétrons estariam em equilíbrio estático dentro da esfera positiva e vibrariam ao receber uma quantidade externa de energia (EISBERG; RESNICK, 1979).

Figura 1-Modelo proposto por Thomson ao átomo para explicar a natureza elétrica da matéria.



Fonte: Autor (2023)

Concordantemente com a lei de Coulomb, observa-se que estes elétrons, contidos na esfera atômica, vão sofrer o fenômeno de repulsão eletrostática, o qual pode ser sintetizado na equação.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q||Q|}{r^2} \quad (1)$$

No entanto, esta modelagem proposta por Thomson apresentava um sério problema, ao observar a distância entre as cargas positivas e negativas, nota-se que esta é nula. Então, de acordo com a Lei de Coulomb, a qual é vista na equação (1), a intensidade da força divergeria ao infinito, impossibilitando a saída de elétrons do átomo quando este fosse excitado, o que iria em contradição com o experimento de descarga elétrica em baixa pressão, que pode ser citado como exemplo.

Outro experimento que pode ser mencionado é o do efeito termiônico, o qual mostra que um metal quando tem sua superfície aquecida em determinadas temperaturas, apresenta um fenômeno de emissão de elétrons (ANDRADE *et al*, 2013).

2.1.3 Modelo de Rutherford

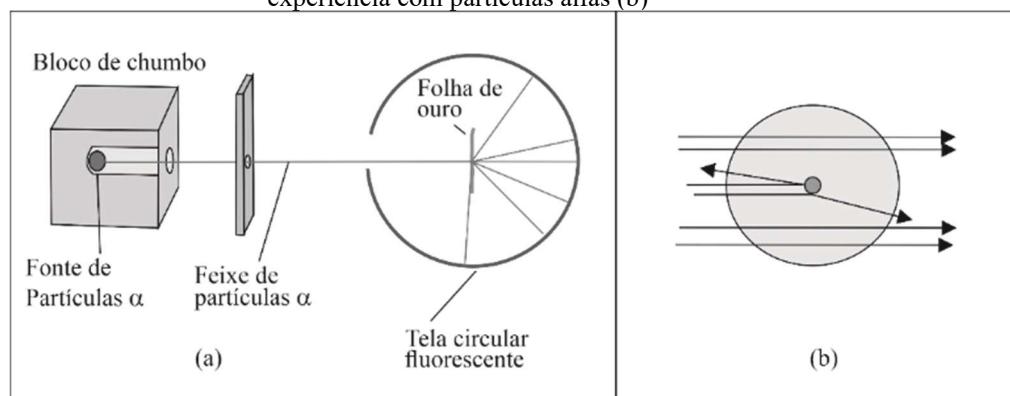
Conforme Brown (2016), somado aos problemas apresentados no modelo de Thomson, ainda no século XIX iniciou-se vários estudos para compreender melhor a natureza da radioatividade. O que possibilitou posteriormente o estudo de Ernest Rutherford, que descobriu três tipos de radiação. As radiações alfa, beta e gama tal como seus comportamentos, quando

estas eram expostas a um campo elétrico em diferentes direções.

Utilizando-se das propriedades de radioatividade das partículas alfa, foi feito um experimento com bombardeamento dessas partículas em placas de folha metálicas de ouro, sendo possível observar um comportamento que não era condizente com o modelo proposto por Thomson.

Ao bombardear as placas, pôde-se notar que a maioria das partículas alfa atravessava a folha metálica sem haver desvios. Uma pequena parcela dessas partículas sofria um pequeno desvio na orientação de sua trajetória ao colidir com a placa. Conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2-Experimento com Lâminas Metálicas sob Ação de Partículas Alfa (a). Desvios observados na experiência com partículas alfas (b)

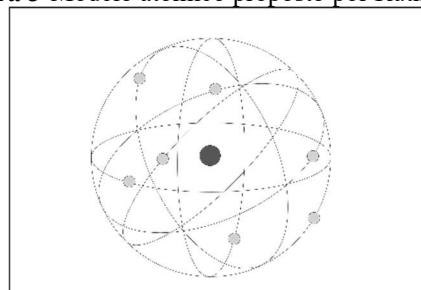


Fonte: Autor (2023)

Esse fato sugeriu que o átomo era constituído em grande parte por um vazio e em seu interior havia algo muito denso, que foi nomeado de núcleo. O mesmo possuiria a maior parte da massa do átomo e teria carga positiva tendo em vista que já era conhecido pelos experimentos anteriores que os elétrons possuíam carga negativa e eram muito leves (FELTRE, 2004).

O modelo atômico de Rutherford propõe, de maneira comparativa, que o átomo se comporta semelhantemente a um sistema planetário (RUSSEL, 1994). Abaixo, na Figura 3, pode se observar uma representação para este modelo.

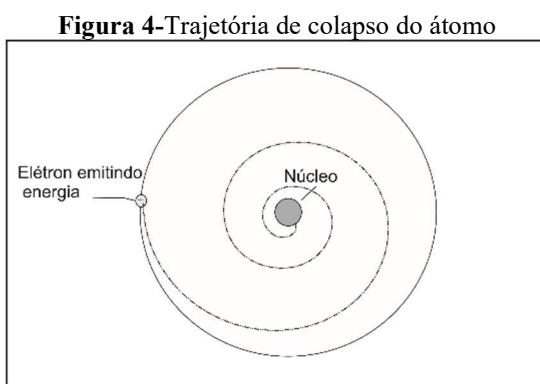
Figura 3-Modelo atômico proposto por Rutherford



Fonte: Autor (2023)

Apesar do modelo proposto por Rutherford descrever o átomo de acordo com as suas observações, um fato importante a ser destacado é a conservação da energia (MACHADO, 2006), onde observa-se que o elétron possuiria energia mecânica (movimento) e eletromagnética. Quando a carga estiver em movimento uma parte da energia será emitida na forma de radiação (REITZ; MILFORD, 1962) e desta forma o elétron passa a ocupar uma órbita mais próxima do núcleo atômico.

Mantendo-se este processo continuamente, o elétron ocuparia órbitas cada vez mais interiores, ocasionando o colapso da partícula no núcleo (Figura 4)



Fonte: Autor (2023)

Isso levou a observar considerações importantes:

- O elétron colapsando no núcleo, teríamos uma força eletrostática suficientemente grande ao ponto de impossibilitar a remoção de elétrons do átomo.
- Segundo Feynman (2005), o tamanho médio do átomo é da ordem de alguns Å (10^{-10} m), enquanto que o raio nuclear é da ordem de (10^{-13} m). Este é observado a partir de dados experimentais que revelam a relação entre energia e número de nucleons (elementos contidos no núcleo) (COHEN- TANNOUDJI; DIU; LALOË, 1977).

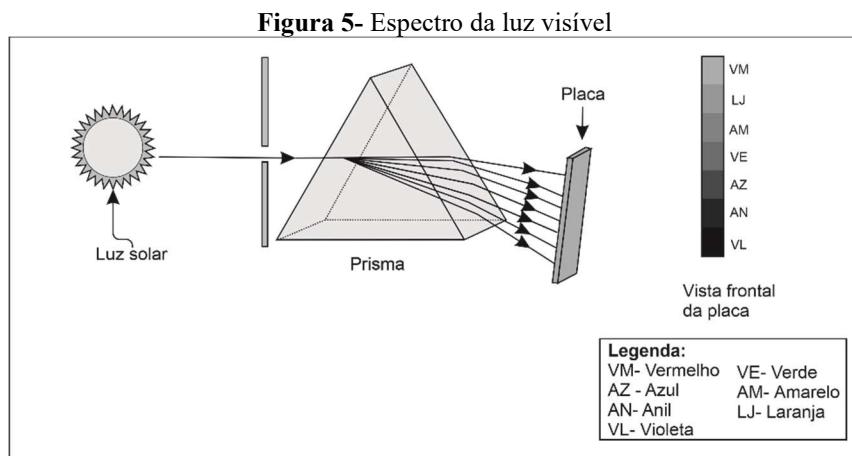
Um colapso do elétron no núcleo, significa uma redução de volume atômico da ordem de (10^9) vezes (levando-se em consideração um volume esférico). Consequentemente ter-se-ia uma redução significativa no volume do universo.

2.1.4 Modelo de Bohr

Diante dos fatos apresentados ao final da seção anterior, do ponto de vista da eletrosfera, o modelo atômico proposto não era autossustentável, além disso, ele não conseguia explicar a decomposição espectral que surgia com alguns gases submetidos a uma diferença de potencial.

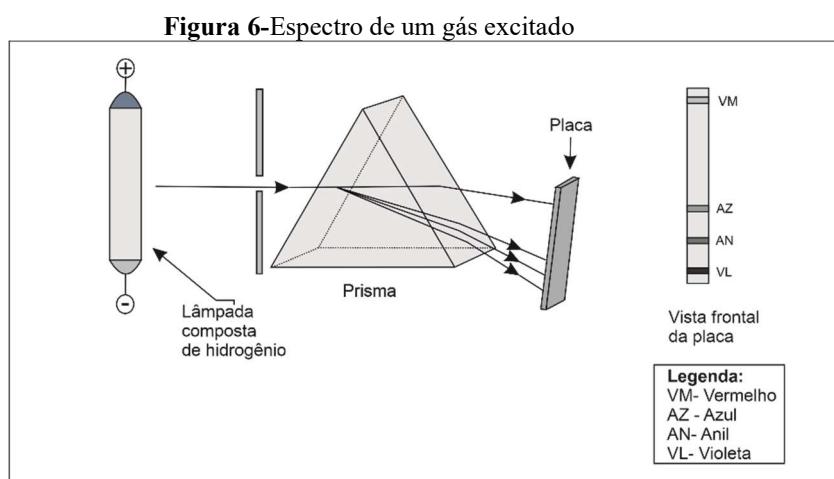
Podemos observar que ao fazer passar luz natural (solar) pela face de um prisma (Figura 5),

percebe-se que a partir da outra face emerge um conjunto de luz com espectro colorido semelhante às cores do arco-íris que pode ser observado sob um anteparo.



Fonte: Autor (2023)

Essa decomposição é contínua e é chamado de espectro da luz visível. Contudo, quando essa experiência é feita utilizando a iluminação proveniente da exposição de um gás a uma diferença de potencial, pode-se notar que apenas algumas linhas aparecerão, tendo assim uma distribuição discreta (Figura 6). Essas linhas são chamadas de bandas do espectro. Percebe-se que ao invés de haver uma emissão contínua de energia, há na verdade uma emissão discreta (FELTRE, 2004).



Fonte: Autor (2023)

Este fato não podia ser explicado pela Física Clássica, tendo em vista que, nesta, a energia deve ser emitida continuamente. No entanto, pode-se entender esse comportamento se aceitarmos que a energia emitida ou absorvida é quantizada, isto é, ela só pode assumir valores

discretos. A emissão ou absorção de um fóton pelo átomo é acompanhado pelo “salto” de energia de um valor permitido para outro. (COHEN- TANNOUDJI; DIU; LALOË, 1977).

Apoiado nessas descobertas, Bohr sugeriu que um átomo teria certos níveis de energia, os quais comportariam uma determinada quantidade de elétrons. Ao absorver energia, alguns elétrons passariam de um nível para outro. Processo no qual o átomo é tido como excitado.

Tendo em vista concordantemente com estes experimentos, Bohr, conforme Brown (2016), fundamentou o seu modelo em três postulados:

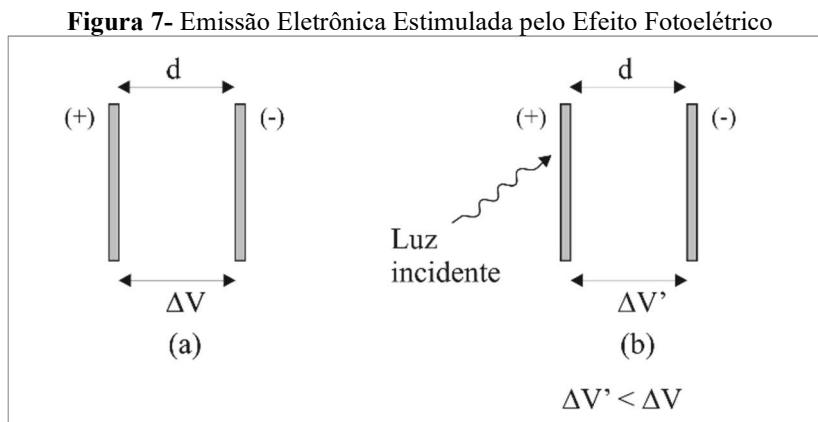
- (I) O átomo possui órbitas com certos raios, os quais possuem energias específicas, sendo as órbitas denominadas de órbitas estacionárias.
- (II) Os elétrons que estão em uma órbita encontram-se em um determinado estado de energia, não podendo irradiar sua energia.
- (III) Quando o elétron muda de estado de energia, o mesmo emite ou absorve quantidades bem definidas de energia.

2.1.5 O Efeito Fotoelétrico

A hipótese quântica provou ser frutífera na interpretação de um número de outros fenômenos, incluindo o efeito fotoelétrico, que consiste na emissão de elétrons por metais (e outros corpos) quando estes são irradiados com luz de comprimento de onda suficientemente curto.

Já em 1887, Hertz percebeu que quando os eletrodos de um centelhador são irradiados com luz ultravioleta a descarga ocorre em uma tensão mais baixa. Conforme estabelecido por Hallwachs em 1888, uma queda na tensão de descarga se deve ao aparecimento de partículas eletricamente carregadas emitidas pelo cátodo como resultado da iluminação. Este fenômeno foi submetido a um estudo quantitativo por Stoletov (1888-1890), que descobriu que a magnitude da corrente fotoelétrica é estritamente proporcional à intensidade da luz absorvida pelo cátodo.

O próximo passo no estudo do efeito fotoelétrico foi feito por Lenard, o qual mostrou que as partículas carregadas emitidas pelo cátodo sobre a iluminação são elétrons (1899)(Figura 7). Além disso Lenard descobriu, em 1902, que a emissão de elétrons do metal só é possível quando a frequência da luz excede um certo valor mínimo v_0 , e a energia dos elétrons ejetados (fotoelétrons) aumenta com a diferença $v - v_0$ e é independente da intensidade da luz que, de acordo com a lei estabelecida por Stoletov, determina somente o número de fotoelétrons, ou seja, a magnitude da corrente fotoelétrica.



Fonte: Autor (2023)

A interpretação dessas regularidades com base na teoria ondulatória da luz encontra dificuldades insuperáveis. De fato, se nós considerarmos o efeito fotoelétrico como o resultado do efeito do campo de ondas eletromagnéticas nos elétrons no metal, é impossível explicar a existência de uma frequência limite ou o fato de que a energia dos fotoelétrons é independente da intensidade da luz. Todas as regularidades envolvidas no efeito fotoelétrico foram interpretadas quantitativamente com base na teoria quântica formulada por Einstein em 1905.

Einstein, de certa forma, reviveu a teoria corpuscular da luz e procedeu do conceito de luz como um fluxo de quanta de luz, ou fôtons em que cada um tem uma energia hv . Quando a luz é absorvida por um metal, cada quantum interage com somente um elétron, com base no raciocínio, a lei de conservação da energia tão bem aplicada a um único evento fotoelétrico elementar é expressa na forma:

$$hv = hv_0 + m \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

hv_0 é a energia limitante (mínima) do fôton que corresponde ao limiar do fotoelétron e é o trabalho feito na ejeção de um elétron no metal e $m \frac{v^2}{2}$ é a energia cinética de um fotoelétron. A equação (2) expressa a lei fotoelétrica de Einstein.

2.1.6 A relação de De Broglie

Paralelo à descoberta dos fôtons, o estudo do espectro de emissão e absorção atômica revelou um fato fundamental, que a Física Clássica foi incapaz de explicar: os espectros são compostos de linhas estreitas. Em outras palavras, um dado átomo emite ou absorve somente fôtons tendo frequências bem determinadas, isto é, energias. Este fato pode ser interpretado se aceitarmos que a energia do átomo é quantizada, ou seja, esta pode somente assumir certos valores discretos E_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). A emissão ou absorção de um fôton é então acompanhada por um “salto”

na energia do átomo de um valor permitido E_i para um outro E_j . A conservação da energia implica que o fóton tem uma frequência v_{ij} tal que:

$$hv_{ij} = |E_i - E_j| \quad (3)$$

Somente frequências que obedecem a esta relação podem, portanto, ser emitida ou absorvida pelo átomo.

A existência de tais níveis de energia discretos foi confirmada independentemente pelo experimento de Franck-Hertz. Bohr interpretou isto em termos de orbitais eletrônicos privilegiados e afirmou, com Sommerfeld, uma regra empírica que permitiu o cálculo dessas órbitas para o átomo de hidrogênio. Mas a origem dessas regras de quantização permanece um mistério.

Em 1923, no entanto, de Broglie apresentou a seguinte hipótese: as partículas materiais, assim como os fótons, podem ter um aspecto ondulatório.

2.1.7 Estudo dos materiais

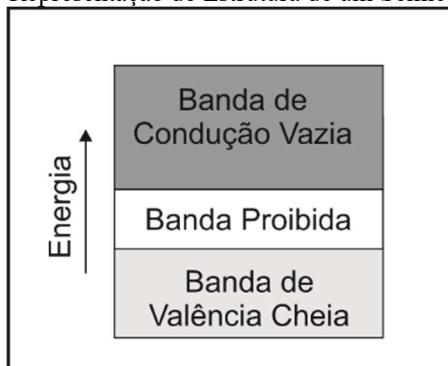
Para estudar a composição das células fotovoltaicas é imprescindível entender a ligação Interatômica na qual as mesmas são feitas.

Para a descrição de um sólido cristalino ideal é considerado a utilização de um agrupamento de átomos com características fixas, os quais recebem o nome de célula primitiva e estas vão se agrupar de maneira invariantemente translacional, constituindo o que se chama de rede cristalina. Dependendo da configuração dessa rede cristalina a mesma conferirá propriedades específicas para o sólido. Uma propriedade que pode ser citada é a classe dos semicondutores. Nesses sólidos, quando estão em temperatura do zero absoluto, se comportam como isolante elétrico, porém quando estes estão em temperatura ambiente apresentam uma resistividade elétrica na faixa de (10^{-2} a 10^9) $\Omega \cdot \text{cm}$ (KITTEL, 2006).

De acordo com Callister (2012), a magnitude da condutividade elétrica depende do número de elétrons disponíveis. Este está relacionado com o arranjo dos estados de energia. Quando em um material, conforme os átomos ficam mais próximos uns dos outros acontece um fenômeno de perturbação nos elétrons. Devido a essa influência há a formação de estados eletrônicos que são denominados banda de energia eletrônica. A estrutura da banda eletrônica de um material sólido é que vai definir as propriedades elétricas do mesmo.

Na estrutura de um semicondutor temos uma banda de valência, que está totalmente preenchida por elétrons, e está separada por um espaçamento, estreito, de outra banda, chamada de banda de condução, que se encontra vazia. Conforme representado na Figura 8.

Figura 8- Representação de Estrutura de um Semicondutor



Fonte: Autor (2023)

Segundo Kittel (2006), existem dois tipos de semicondutores: os intrínsecos e os extrínsecos. Onde o primeiro é de alta pureza e o segundo depende da concentração de impurezas dos materiais.

Os semicondutores intrínsecos tem como características, uma banda de valência preenchida, separada por um espaço estreito, e de uma banda de condução vazia. Além disso, nesses materiais é levado em consideração um par de portadores de carga: elétrons livres e buracos, os buracos são resultado da excitação do elétron para a banda de condução (CALLISTER, 2012).

Já os semicondutores extrínsecos têm seu comportamento determinado pelas impurezas adicionadas ao mesmo. Sendo esses de dois tipos de ocorrência, tipo n ou p.

Os semicondutores do tipo n funcionam com impurezas que doam elétrons. Diferentemente do semicondutor intrínseco, o extrínseco do tipo n, não deixa um buraco na camada de valência, pois o átomo de impureza é adicionado no espaço entre a banda de valência e a banda de condução, sendo os portadores majoritários os elétrons e os portadores minoritários os buracos. Os semicondutores do tipo p funcionam de maneira oposta, pois, funcionam com impurezas receptoras de elétrons, sendo os portadores majoritários os buracos e o minoritários os elétrons. A partir desses conceitos é possível controlar as impurezas do semicondutor por meio de um processo chamado de dopagem (CALLISTER, 2012).

De acordo com Luiz (2013), quando semicondutores do tipo n e p estão separados, os mesmos não possuem muitas aplicações práticas. Contudo, quando feita a junção desses dois tipos de semicondutores é possível obter um dispositivo chamado diodo de junção, o qual possui diversas aplicações.

Uma aplicação prática importante desses semicondutores são as células fotovoltaicas, as quais são construídas para se obter energia elétrica. Neste contexto, pode ser citado as células de silício, que na atualidade apresentam-se em sua maioria construída sob dois tipos de cristais o mono e o policristalino. Uma diferença que cabe salientar é que na produção com silício

policristalino o custo é menor, entretanto a eficiência também diminui.

A célula solar fotovoltaica funciona da seguinte maneira: Os fótons provenientes da luz solar são absorvidos pelo semicondutor do tipo p, provocando o movimento de elétrons para a banda de condução. É necessário que os fótons absorvidos pela célula possuam uma energia suficiente maior do que a largura da banda proibida.

2.1.8 Energias Renováveis no Brasil

Diante da crescente demanda energética e da necessidade de limitar o aumento de temperatura no planeta, surge a necessidade de investir no desenvolvimento sustentável a fim de fomentar uma indústria parceira do meio ambiente. Em primeiro lugar, é preciso depender menos do combustível fóssil e descentralizar a geração energia elétrica, majoritariamente hidrelétrico, que atua como limitador da adoção e ampliação da utilização de formas alternativas de energia como a eólica e a solar. Essa expansão aumentaria o crescimento econômico do país, possibilitando um papel de liderança e melhor concorrência com países desenvolvidos (PAO; FU, 2013; BONDARICK; PALATTI; HORST, 2018).

A diversificação da matriz energética brasileira possui grande potencial renovável, devido aos excelentes níveis de irradiação solar, a disponibilidade eólica, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, graças a influência da latitude, longitude e proximidade do mar, e ainda a capacidade de produção de biomassa graças a existência de mão de obra barata e da grande disponibilidade de resíduos (OLIVEIRA *et al*, 2018).

Perante a esse cenário, uma possibilidade interessante para a transição energética, com o intuito de diminuir a emissão de gases de efeitos estufa e descarbonizar a economia, é a substituição dos combustíveis fósseis pelo uso de hidrogênio verde como combustível e em processos industriais, já utilizado em países desenvolvidos como Estados Unidos e Alemanha. No Brasil, essa utilização já iniciada nos estados do Rio de Janeiro, Ceará e Pernambuco, mostra-se promissora em razão de ser um dos países com menor custo marginal de energias renováveis, fator fundamental para o barateamento do processo de eletrólise (BEZERRA, 2021).

Para a produção do hidrogênio verde é necessário a utilização de outras energias renováveis, como exemplos, pode ser citada a energia eólica e a solar. A partir dessas, é possível o processo de eletrólise da água. A qual produz o gás hidrogênio sem a emissão de gases poluentes. Portanto, é importante o entendimento do funcionamento dos métodos de energia fotovoltaica, visto que esse tipo de energia também pode ser utilizado na produção de hidrogênio verde.

2.2.1 Aplicação Fotovoltaica

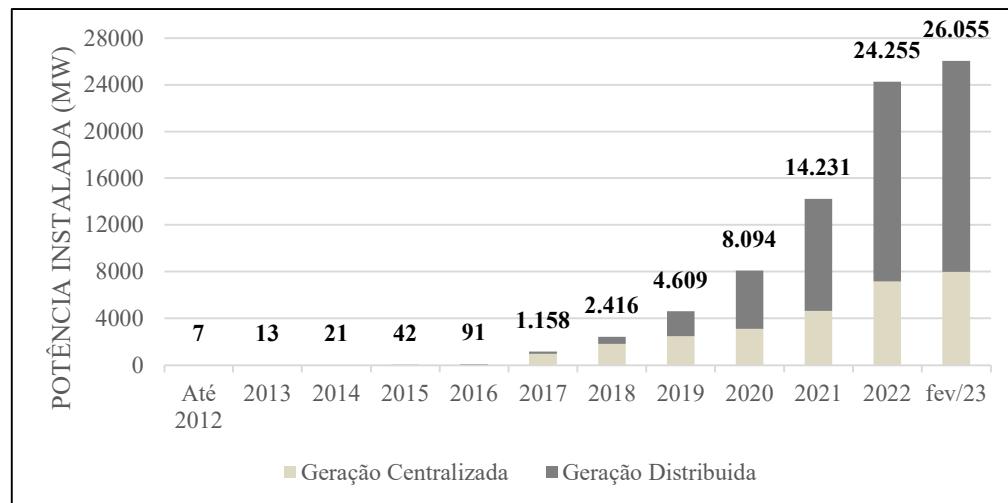
Conforme foi abordado durante o trabalho é notória a importância do entendimento do efeito fotoelétrico no funcionamento da conversão de energia solar em energia elétrica, visto que as células fotovoltaicas, a partir deste efeito, passam a apresentar uma diferença de potencial e torna possível esta conversão.

2.2.2 Incidência Solar no Brasil

De acordo com Luiz (2013), o Brasil se encontra em uma posição privilegiada em relação à disponibilidade de radiação solar. Sendo o país que mais possui potencial de aproveitamento para energia solar, principalmente em sua Região Nordeste.

Atualmente, a instalação de energia solar tem tido uma grande popularização no país. Esse fato ocorre devido aos investimentos na área, associado aos aumentos nas tarifas de energia elétrica proveniente das crises hídricas que o país enfrenta. Podemos observar esse aumento expressivo na Figura 9, que nos mostra a evolução da utilização de energia fotovoltaica no Brasil a partir da análise da potência instalada.

Figura 9- Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: ANEEL/ABSOLAR (2023)

A Figura 9 nos mostra uma grande evolução na geração de energia elétrica utilizando a transformação de energia solar. Esse avanço começou a ser notado expressivamente no ano de 2017 e tem aumentado a cada ano. Fato esse que resultou no avanço da energia solar para a segunda posição de utilização em nossa matriz energética, ultrapassando a utilização de energia eólica. Abaixo, na Tabela 1, podemos observar a distribuição da matriz energética brasileira

atualmente.

Tabela 1- Matriz Energética Brasileira

Fonte de Energia	Valor Energético Utilizado	Porcentagem de Utilização
Hídrica	109.844 MW	50,6%
Solar Fotovoltaica	26.055 MW	12,0%
Eólica	24.904 MW	11,4%
Gás Natural	17.464 MW	8,0%
Biomassa + Biogás	16.725 MW	7,7%
Petróleo e outros Fósseis	8.672 MW	4,0%
Carvão Mineral	3.466 MW	1,6%
Nuclear	1.990 MW	0,9%
Importação	8.170 MW	3,8%

Fonte: ANEEL/ABSOLAR (2023)

2.2.3 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são diferenciados pela maneira na qual estão montados. Podendo ser conectados às redes elétricas, os quais se chamam “On-Grid”. Isolado da rede elétrica, “Off-Grid”. E a junção de vários sistemas são denominados “Híbridos”.

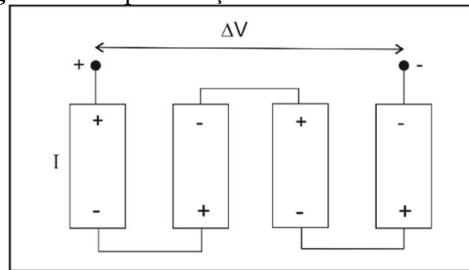
Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica funcionam em conjunto com a rede elétrica. A energia produzida pelas placas solares é utilizada e o seu excedente, caso haja, é absorvido pela rede elétrica da concessionária.

Os sistemas fotovoltaicos isolados, necessitam de uma forma de armazenamento de energia, geralmente são utilizados um conjunto de baterias, que armazena o excedente de energia para ser utilizado em momentos em que se tenha uma baixa irradiação solar.

2.2.4 Tipos de Associações

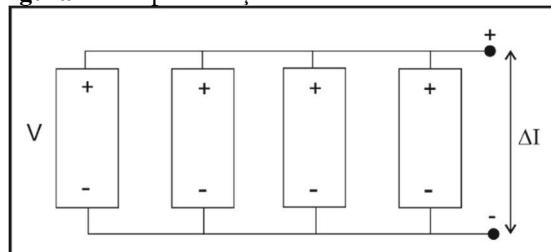
A associação das células pode ser feita com a finalidade de otimizar a necessidade de uma maior corrente ou tensão.

As células podem ser conectadas em série, quando o objetivo for aumentar a tensão total do sistema de células. A tensão total, denominada líquida, é calculada considerando a soma das tensões do sistema. Neste tipo de associação a diferença de potencial é otimizada, enquanto a corrente permanece com seu valor constante (BOYLESTAD, 2012). Abaixo, na Figura 10, podemos ver um esquema que representa uma associação em série.

Figura 10- Representação de Circuito em Série

Fonte: Autor (2023)

Quando a finalidade é obter correntes mais elevadas, a associação de células utilizadas é a em paralelo. Onde a corrente produzida por cada célula será somada, resultando em uma corrente líquida total. Neste tipo de associação a diferença de potencial permanece constante. (BOYLESTAD, 2012). Abaixo, na Figura 11, podemos observar uma representação para uma associação em paralelo.

Figura 11- Representação de Circuito em Paralelo

Fonte: Autor (2023)

Ainda é possível a utilização de uma combinação de associações para atender determinada demanda. Essa configuração é chamada de série-paralelo (BOYLESTAD, 2012).

3 METODOLOGIA

Empregando os conceitos teóricos, estudados na primeira parte do trabalho, foi feito uma análise prática utilizando dois tipos de células solares juntamente com materiais reutilizáveis.

Para a medição dos valores foram utilizados multímetros, com precisão de 1 mV, e termômetro, com precisão de 0,1 °C. Além destes, será utilizado um espectrofotômetro que consegue detectar uma faixa de comprimento de onda entre 350 nm e 1000 nm.

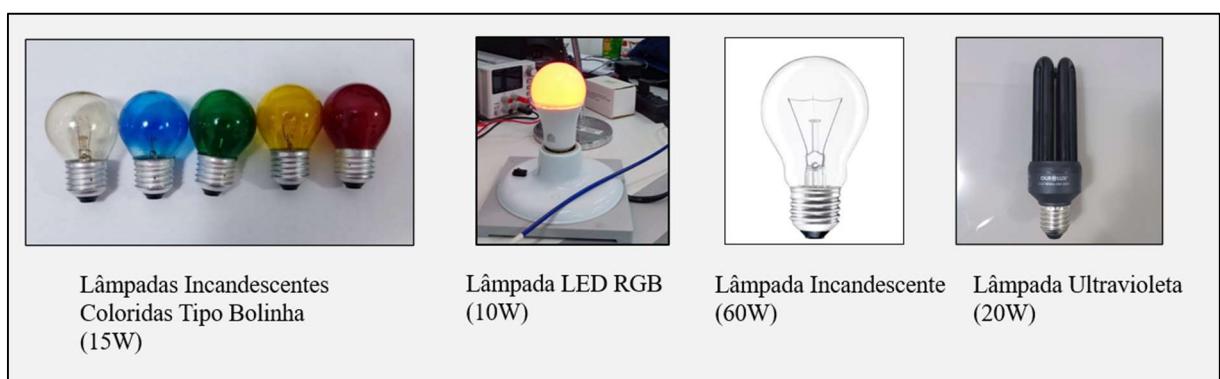
As células solares, segundo o fornecedor, possuem as seguintes especificações vistas abaixo na Tabela 2.

Tabela 2- Tipos de Células Utilizadas

	Célula 01	Célula 02
Material	Silício policristalino	Silício policristalino
Tamanho	(78x26) mm	(78x39) mm
Potência Máxima	0.079W	0.11W
Tensão Nominal	0.500V	0.500V
Corrente de Curto Circuito	0,158A	0,220A

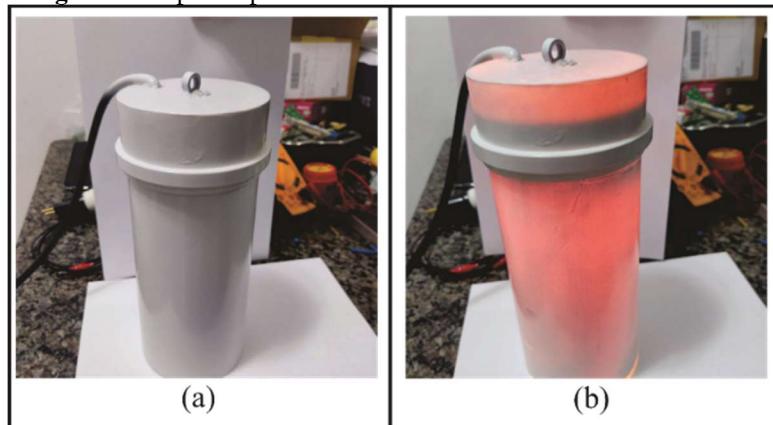
A parte experimental foi iniciada com o estudo dos comportamentos das células solares quando expostas a alguma forma de luz. A fim de facilitar o estudo, o experimento foi dividido em vários protótipos. Nesta parte do trabalho será abordado a transformação direta de luz em corrente elétrica, fazendo uso do efeito fotoelétrico (EISENBERG, 1979; KONDRATYEV, 1968; DAVYDOV, 1965; REZENDE, 2004).

Além da iluminação solar, foi utilizado o auxílio de iluminação artificial com a finalidade de observar o comportamento das células fotovoltaicas quando expostas a esta. Foram utilizadas lâmpadas dos tipos: incandescente, LED e ultravioleta (Figura 12).

Figura 12- Lâmpadas Utilizadas no Experimento

Fonte: Autor (2023)

Para minimizar a perda de luminosidade para o ambiente, além de isolar uma possível interferência da luz externa, foi construído um dispositivo (Figura 13), no qual foi possível a utilização de lâmpadas que tinha a sua luz produzida direcionadas diretamente sobre as células fotovoltaicas.

Figura 13- Aparato para Direcionar a Luz nas Células Fotovoltaicas

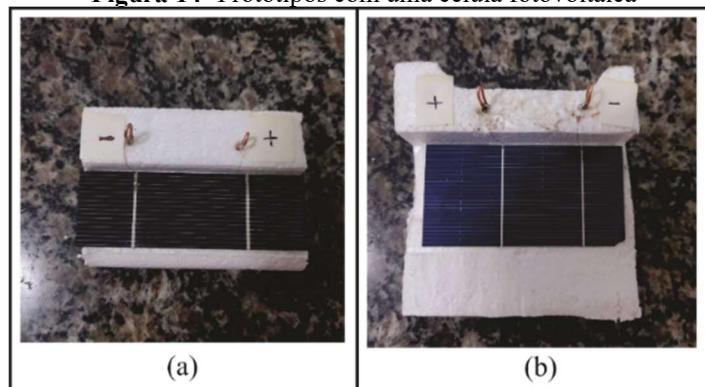
Fonte: Autor (2023)

A partir da utilização do dispositivo foi possível a análise dos diferentes comportamentos provenientes das células fotovoltaicas sob iluminação artificial, tal como a produção de tensão, corrente elétrica e as influências do aumento de temperatura no sistema.

Posteriormente utilizou-se uma associação em paralelo, para estudar o comportamento da corrente elétrica no sistema, a partir de um sistema híbrido. Por fim foi feita uma associação em série para uma maior geração de tensão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira análise foi feita com apenas uma célula fotovoltaica (Figura 14), na qual pôde-se observar que apenas com a iluminação artificial do ambiente a mesma apresentou uma diferença de potencial, portanto, a luz artificial analisada teve uma frequência necessária para fazer com que a célula funcionasse. Contudo, a eficiência apresentada foi muito abaixo das especificações máximas da mesma.

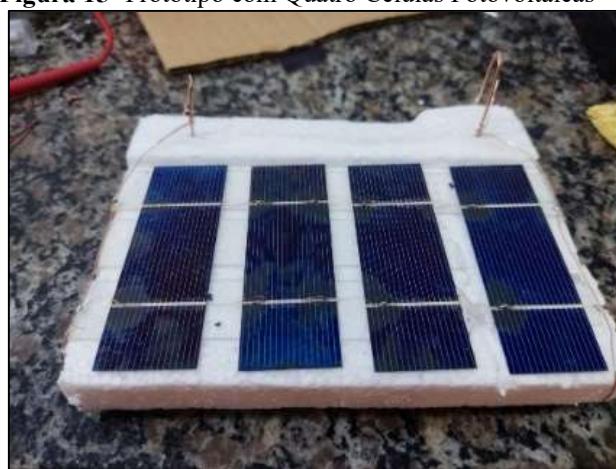
Figura 14- Protótipos com uma célula fotovoltaica

Fonte: Autor (2023)

Posteriormente foi analisado o comportamento da célula quando sob efeito de uma lâmpada incandescente com uma potência de 60 W. O resultado, embora ainda abaixo das especificações máximas, foi superior ao da lâmpada LED utilizada anteriormente. Por fim, a célula foi posta a prova com a iluminação solar, conseguindo assim sua tensão máxima que foi maior do que a que a dita pelo fornecedor (Tabela 2).

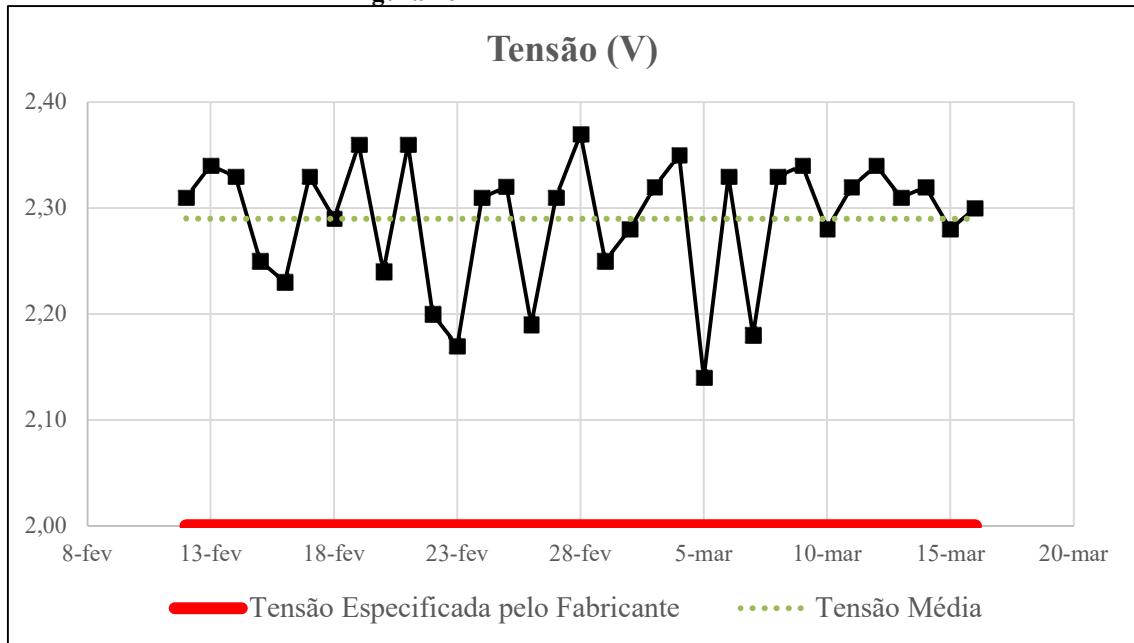
O segundo protótipo analisado foi constituído por um sistema com quatro células ligadas em série (Figura 15), tendo a intenção de aumentar a tensão observada. Dessa forma foi repetido os testes utilizando as lâmpadas e a iluminação solar.

Figura 15- Protótipo com Quatro Células Fotovoltaicas



Fonte: Autor (2023)

Além dos testes iniciais, foi analisado o comportamento desse protótipo durante o mês de fevereiro de 2023. As medidas foram realizadas considerando o ponto de máxima incidência solar na cidade de Caruaru, no estado de Pernambuco. As medições foram feitas no horário das 12 horas durante trinta e três dias corridos. Os pontos obtidos podem ser observados abaixo na Figura 16.

Figura 16- Tensão Medida no Período

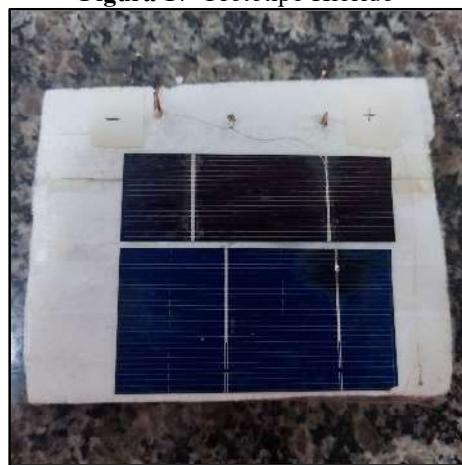
Fonte: Autor (2023)

Analizando o gráfico podemos observar que durante os dias observados o protótipo obteve resultados nos valores de tensão fornecida acima das especificações fornecidas pelo fabricante, que neste caso seria de 2V. Este resultado nos mostra que embora alguns dos dias estivessem nublados ou chuvosos, a região onde foi feita o experimento possui uma boa localização geográfica, sendo privilegiada no quesito de radiação solar. Sendo proveitoso a utilização da energia fotovoltaica mesmo nos dias de baixa luminosidade.

Durante a experimentação foi observado o aquecimento das células fotovoltaicas quando expostas a luz solar isso acontece devido a radiação incidente sobre a placa, pois, possui vários espectros e não só a frequência característica de remoção dos elétrons. Causando em sua maioria a vibração da estrutura cristalina e dos elétrons.

De acordo com Luiz (2013), cerca de 50% da energia solar produzida por uma célula fotovoltaica feita de silício é perdida na forma de calor, tendo assim só a outra metade disponível no processo. Além das perdas por calor, existem outras perdas que fazem com que o rendimento de uma célula fotovoltaica bem produzida fique em torno de 25%.

Para o estudo da influência da iluminação artificial e os efeitos da temperatura foi feito um protótipo utilizando o conceito de sistema híbrido para sua construção, no qual foi utilizada uma célula de cada tipo (Figura 17).

Figura 17- Protótipo Híbrido

Fonte: Autor (2023)

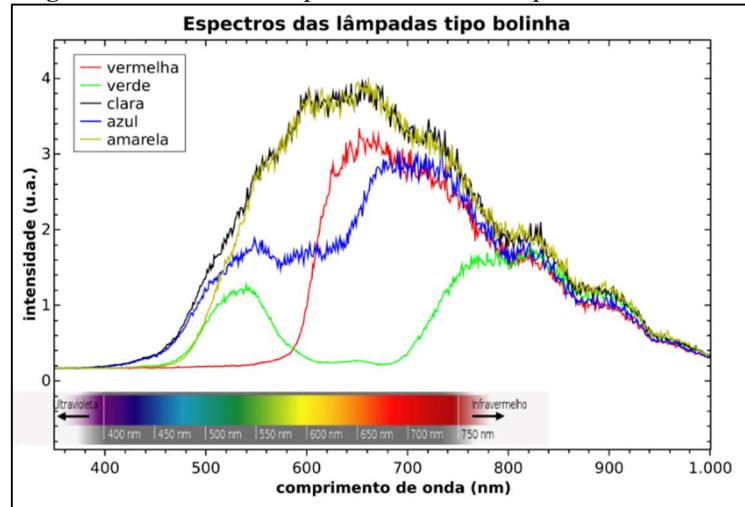
A partir da utilização do dispositivo associado com as células fotovoltaicas, foi possível o estudo da influência do espectro de cor de diversas lâmpadas. Iniciou-se a análise com o estudo das lâmpadas incandescentes do tipo bolinha. Com o experimento, o objetivo era observar que embora tendo a mesma potência as cores influenciaram na diferença de potencial apresentada pelo sistema. Abaixo, na Tabela 3, podemos ver os dados obtidos.

Tabela 3- Resultados Obtidos Após o Teste com Lâmpadas Incandescentes

Cor da Lâmpada	Voltagem (V)
Branca	1,04
Azul	1,05
Verde	1,02
Amarela	1,05
Vermelha	1,03

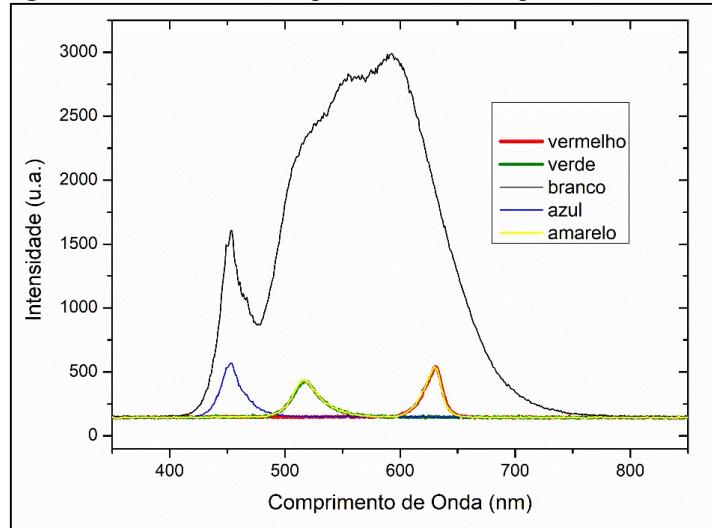
Fonte: Autor (2023)

Esse fenômeno ocorre devido a influência do espectro de cores, que quanto mais próximo da frequência característica, maior será a eficiência na produção de tensão e corrente elétrica. Contudo, com o resultado observado foi possível notar que não houve uma variação significativa na tensão registrada. Para analisar a possível causa desta situação, foi feito um teste com as lâmpadas em um espectrofotômetro com a finalidade de obter os comprimentos de ondas produzidos pelas lâmpadas. Abaixo podemos observar, na Figura 18, que houve uma discrepância na produção de cor em algumas lâmpadas. Fato esse que pode ser justificado pela maneira que as lâmpadas foram produzidas, na qual para conseguir a tonalidade desejada foi utilizada uma tinta específica para vidros.

Figura 18- Teste das Lâmpadas Bolinhas no Espectrofotômetro

Fonte: Autor (2023)

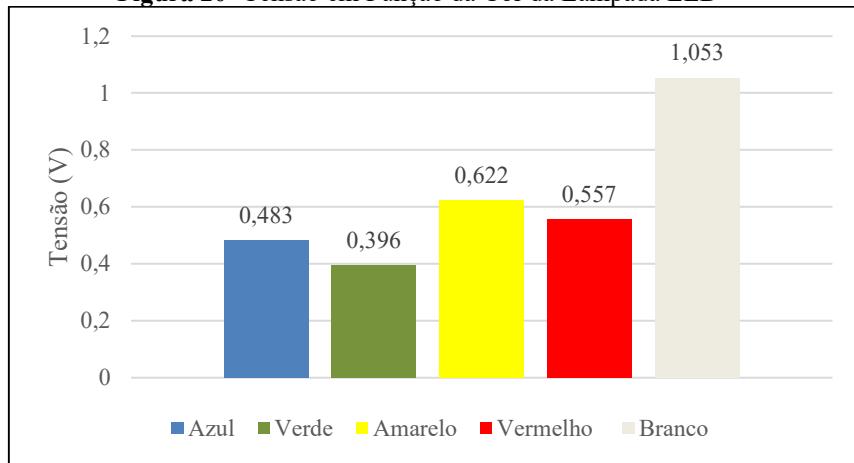
Em um segundo momento foi utilizado uma lâmpada de LED, com a finalidade de obter resultados melhores para o espectro de cores. Com o experimento, foi possível observar uma melhor representação dos comprimentos de onda das cores desejadas. Podemos observar abaixo, na Figura 19, as curvas obtidas com a lâmpada de LED.

Figura 19- Teste com a Lâmpada de LED no Espectrofotômetro

Fonte: Autor (2023)

No Experimento, notou-se que para produzir a cor amarela havia o acionamento dos LED's verde e vermelho. Este fato pode ser revelado quando se observa na Figura 19, os dois picos de intensidade que são apresentados para a tonalidade amarela.

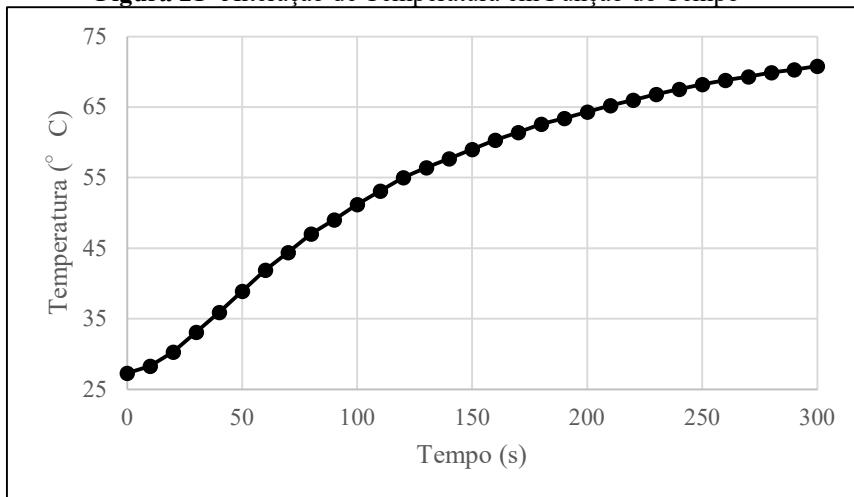
Utilizou-se, também, a lâmpada de LED para observar as diferenças de potencial em função das diferentes cores produzidas. Podemos observar os valores na Figura 20.

Figura 20- Tensão em Função da Cor da Lâmpada LED

Fonte: Autor (2023)

O resultado do experimento demonstra como a célula responde aos diferentes tipos de cor, incluindo a resposta da mistura de frequências.

Após notar-se um aquecimento razoável nos protótipos, durante os testes sob luz solar, tornou-se necessário efetivar uma análise da influência da temperatura das células fotovoltaicas. A fim de simular tais condições, foi utilizada uma lâmpada incandescente e em conjunto com um termômetro em contato com o sistema. Observou-se que a fenomenologia de aquecimento era semelhante. O termômetro possui uma haste metálica cuja área cobre cerca de 5% da área total das células do protótipo, o que não causou uma diferença significável na produção de energia das células. Abaixo, na Figura 21, podemos observar o aquecimento das células do protótipo em função do tempo.

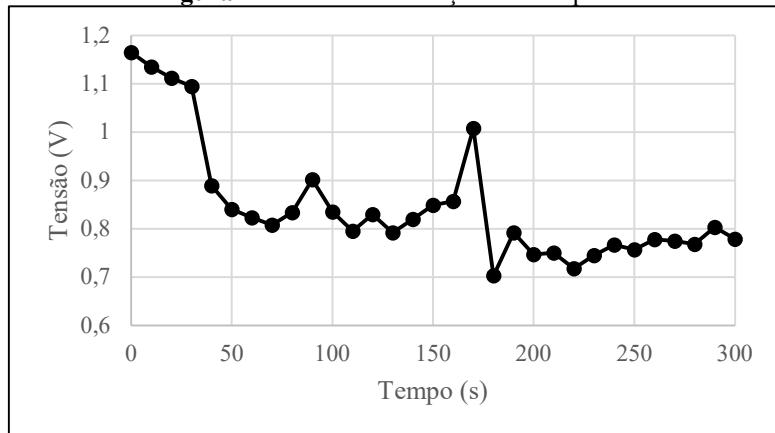
Figura 21- Alteração de Temperatura em Função do Tempo

Fonte: Autor (2023)

Analizando o gráfico, podemos notar que houve uma variação expressiva da temperatura do

sistema de células fotovoltaicas. Isto se deve ao fato da contribuição da radiação infravermelha, sobre cada célula, oriunda da própria lâmpada. Esse aumento de temperatura afetou a tensão produzida pela mesma, conforme podemos ver na Figura 22, o qual conduz a uma tensão de saturação entre 0,7V e 0,8V.

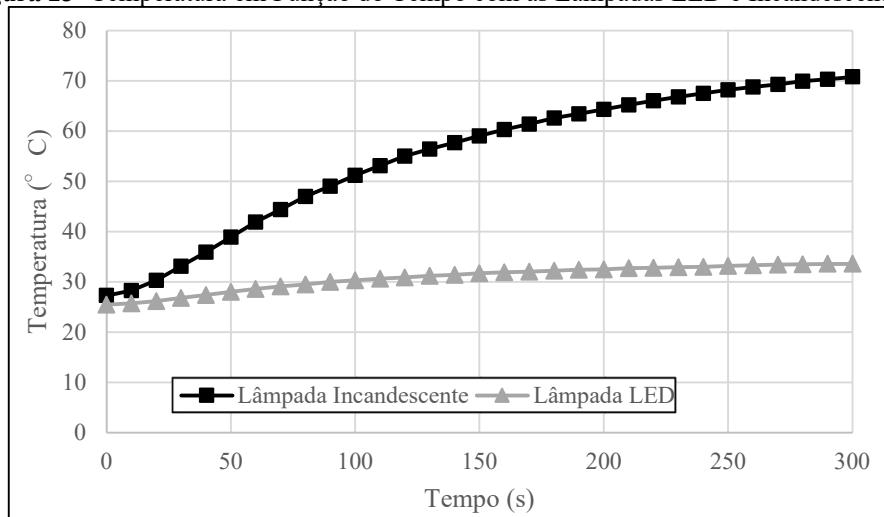
Figura 22- Tensão em Função do Tempo



Fonte: Autor (2023)

Com a finalidade de observar a temperatura das células fotovoltaicas sob os diferentes tipos de radiação emitida, utilizou-se uma lâmpada de LED, onde foi possível notar uma grande diferença em relação ao resultado da lâmpada incandescente. Constatou-se uma variação menor de temperatura. Isso acontece devido ao fato da lâmpada LED não produzir excessivamente o espectro infravermelho. Podemos observar a comparação destes resultados na Figura 23.

Figura 23- Temperatura em Função do Tempo com as Lâmpadas LED e Incandescente

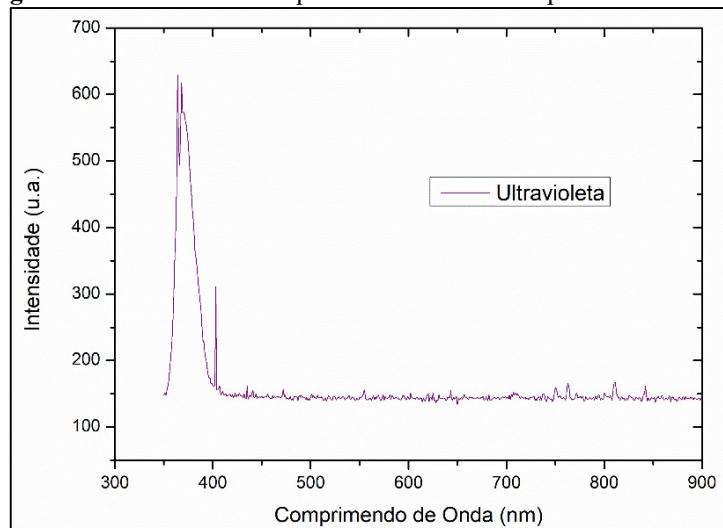


Fonte: Autor (2023)

Por fim, foi utilizado uma lâmpada ultravioleta para verificar a tensão produzida no sistema. Com a finalidade de avaliar o espectro produzido pela lâmpada foi feito um teste no

espectrofotômetro (Figura 24). Observa-se que o pico de intensidade ocorre na região do ultravioleta.

Figura 24- Teste com a Lâmpada Ultravioleta no Espectrofotômetro



Fonte: Autor (2023)

Analizando o comportamento do protótipo, quando exposto a luz ultra violeta, foi obtido os valores relacionados na Tabela 4. Nos quais pode ser observado que houve uma eficiência abaixo das especificações máximas das células fotovoltaicas.

Tabela 4- Resultados Obtidos com a Lâmpada Ultravioleta

Tipo de Lâmpada	Potência da Lâmpada	Tensão Obtida
Ultravioleta	20W	0,781V

Fonte: Autor (2023)

O próximo passo foi estudar a produção da tensão contínua em um sistema com células fotovoltaicas em paralelo. Foi construído um protótipo utilizando seis células fotovoltaicas de cada tipo constituindo assim dois módulos de 3V, onde aos mesmos foram associados (Figura 25). Durante o experimento, observou-se que acontece uma queda de tensão entre os módulos, este fenômeno acontece devido a recombinação de corrente que acontece entre os mesmos. Para minimizar este efeito foram utilizados diodos, permitindo que a corrente flua em um só sentido. Após sua utilização, foi observado uma normalização na tensão produzida pelo sistema.

Figura 25- Protótipo Híbrido Utilizando Diodo para Direcionar a Corrente Elétrica



Fonte: Autor (2023)

Para a finalização do estudo, foi construído um painel utilizando vinte e quatro células fotovoltaicas, tendo a finalidade de obter a tensão de 12 V (Figura 26).

Figura 26- Protótipo Final com Tensão Fornecida de 12V

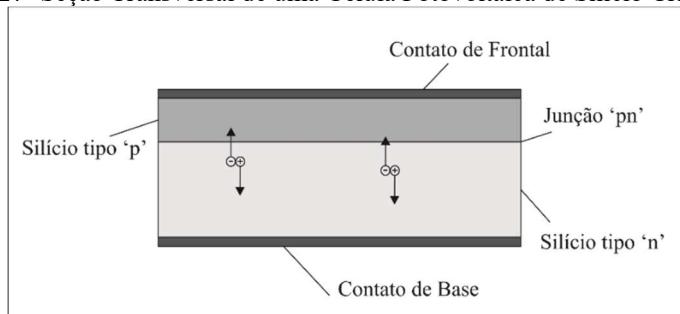


Fonte: Autor (2023)

Durante o processo de fabricação dos protótipos, houve uma grande dificuldade no manuseio das células fotovoltaicas, devido a sua baixa resistência mecânica. A utilização de fios condutores de pequenas espessuras ajudou a minimizar as tensões mecânicas sobre a placa, diminuindo assim o rompimento ou aparecimento de fraturas na estrutura da célula.

Entretanto, o funcionamento das células fraturadas não é comprometido completamente. As células danificadas possuem uma eficiência menor, contudo ainda possuem a capacidade de gerar energia. Isso acontece devido a maneira com que são confeccionadas as células fotovoltaicas. Para elucidar esse fato podemos observar, na Figura 27, uma representação simples de sua construção.

Figura 27- Seção Transversal de uma Célula Fotovoltaica de Silício Cristalizado



Fonte: Autor (2023)

4 CONCLUSÕES

Com o início do estudo, percebeu-se que havia uma dificuldade na conexão entre o mundo atômico e sua aplicabilidade na construção de sistemas fotovoltaicos, sendo de imprescindível importância o entendimento dos conceitos físicos necessários para tal.

Diante de tal necessidade, o trabalho buscou aliar os conhecimentos físicos com os procedimentos práticos na construção do entendimento científico. Com base no estudo realizado da evolução científica do conhecimento atômico, foi possível entender a importância do método científico. Possibilitou-se observar que a ciência evolui ao passar do tempo com as contribuições dos pesquisadores, com a utilização de conceitos previamente estabelecidos e aplicados a problemas atuais.

Com a utilização do conhecimento teórico abordado durante a análise bibliográfica foi factível a construção de sistemas de conversão de energia solar em elétrica, possibilitando o estudo da dinâmica dessa conversão, além da observação de características intrínsecas deste tipo de transformação.

Os objetivos de estudar e aplicar os conceitos em protótipos foram atingidos, contudo, a construção de um regulador de tensão para o sistema não foi possível, podendo este ser construído e estudado a posteriori.

Com a discussão abordada durante o trabalho também foi constatado formas de otimizar a instalação desses sistemas quando aplicados na construção civil. Podem ser citadas as diversas associações possíveis com o intuito de maximizar a produção de tensão e corrente, além das inclinações dos módulos que podem buscar a maior eficiência na captação de incidência solar ao longo do dia.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR; ANEEL. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo.** Nº 54, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 20/02/2023

ANDRADE, N.S.; ANDRADE-NETO, A.V.; LEMAIRE, T.; CRUZ, J.A. Investigação teórica e experimental do efeito termiônico. **Rev Bras Ensino Fís.**, v.35, n.1, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172013000100008>. Acesso em 21/01/2023.

ASHCROFT, Neil W. e Nermin, N. David. **Solid State Physics**. 1.ed. New York: Brooks/Cole, 1976.

ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente.** 7^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

BEZERRA, F.D. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Caderno Setorial ETENE**. Ano 6, n.212, 2021. Disponível em <https://bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1109>. Acesso em 26/04/2023.

BONDARICK, R.; PALATTI, L.A.; HORST, D.J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciencia**. v. 43, n.10, p. 680-688, 2018. Disponível em <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33957861002>. Acesso em 26/04/2023.

BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BROWN, T.L.; LEMAY-JR, H. E.; BURSTEN, B.E.; MURPHY, C.J.; WOODWARD, P.M.; STOLTZFUS, M.W. **Química: a ciência central**. 13^a ed. São Paulo: Pearson, 2016.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais**, 8^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAPRIGLIONE, P. S. **A Energia Renovável na Matriz Energética Brasileira**. Dissertação de mestrado- FGV -EESP, São Paulo, 2006.

COHEN- TANNOUDJI, C.; DIU, B.; LALOË, F. **Quantum Mechanics**. Vol. 1 Wiley - Interscience, 1977.

DAVYDOV, A.S. **Quantum Mechanics**. 1.ed. USA: Pergamom Press, 1965.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

FELTRE, R. **Química**. 6^a ed. São Paulo: Moderna, 2004.

FEYNMAN, R.P. **Física Nuclear Teórica**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

JACKSON, J. D. **Classical Electrodynamics**. Third edition. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999.

KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

- KONDRATYEV, V. **The Structure of Atoms and Molecules.** 1.ed. Moscou: Foreign Languages Publishing House, 1968.
- LEVY, R. A. **Principles of solid state physics.** 1.ed. New York: Academic Press, 1968.
- LUIZ, A.M. **Energia solar e preservação do meio ambiente.** 1^a ed. São Paulo: Livraria da Física, 2013.
- MACHADO, K.D. **Teoria do eletromagnetismo,** Vol. 1. Ponta Grossa: UEPG, 2000.
- MACHADO, K.D. **Teoria do eletromagnetismo,** Vol. 2. Ponta Grossa: UEPG, 2002.
- MACHADO, K.D. **Teoria do eletromagnetismo,** Vol. 3. Ponta Grossa: UEPG, 2006.
- OKIA, W. M. **Relatório Especial do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas.** IPCC, Suíça, 2018.
- OLIVEIRA, A.P.M.; FUGANHOLI, N.S.; CUNHA, P.H.S.; BARELLI, V.A.; BUNEL, M.P.M.; NOVAZZI, L.F. Análise técnica e econômica de fontes de energia renováveis. **The Journal of Engineering and Exact Sciences.** v. 4, n.1, 2018. Disponível em doi: <https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0163-0169>. Acesso em 25/04/2023.
- PAO, H.; FU, H. Energia renovável, energia não renovável e crescimento econômico no Brasil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v.25, p. 381-392, 2013. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.004>. Acesso em 25/04/2023.
- PERUZZO, F.N.; CANTO, E.L. **Química na abordagem do cotidiano.** 4^a ed. São Paulo: Moderna, 2016.
- REITZ, J.R.; MILFORD, F.J. **Foundations of electromagnetic theory.** London: Addison - Wesley Publishing Company, 1962.
- REZENDE, S. M. **Materiais e Dispositivo Eletrônicos.** 2.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.
- RUSSEL, J.B. **Química Geral,** Vol.1. 2^aed. São Paulo: Makron Books, 1994.
- TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2016.
- SANTOS, M. C. G.; PORTO, P. A.; KIOURANIS, N. M. M. Michael Faraday rumo às Leis da Eletrólise: alguns experimentos. **Quím. nova esc.** v.42, n.4, p. 330-336, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160215>. Acesso em: 26/04/2023.
- SILVA, L. C. M.; SANTOS, W. M. S.; DIAS, P. M. C. A carga específica do elétron. Um enfoque histórico e experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física,** v.33, n.1, 1601, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100023>. Acesso em: 26/04/2023.

EMERSON LEANDRO DA SILVA

**ESTUDO DA DINÂMICA DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELÉTRICA:
Método Fotovoltaico**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada de forma híbrida.

Área de concentração: Física

Subárea de concentração: Conversão de Energia

Aprovado em 08 de maio de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Washington de Lima (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Camelo Neto (Avaliador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gilson Lima da Silva (Avaliador)
Universidade Federal de Pernambuco