

SOBRE AS PERDAS DE POTÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: Uma abordagem à luz das teorias físicas dos semicondutores

ABOUT POWER LOSSES IN PHOTOVOLTAIC PANELS: An approach in light of the physical theories of semiconductors

Veronica Alves Teixeira

vat@discente.ifpe.edu.br

Oberlan da Silva

oberlan.silva@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Neste trabalho discutimos sobre um fenômeno comum em painéis fotovoltaicos durante o seu processo de geração de energia. Trata-se da perda de eficiência devido a ocorrência da *termalização*. Esta pesquisa iniciou-se com a realização de um projeto de iniciação científica PIBIC, desenvolvido no âmbito do curso de engenharia elétrica do Instituto Federal de Pernambuco. Com o intuito de explicarmos como efetivamente este fenômeno ocorre, resolvemos com este trabalho de conclusão de curso aprofundarmos os estudos sobre ele, contribuindo para sua explicação à luz das teorias físicas que regem os semicondutores. Apresentamos também os resultados do monitoramento de um painel fotovoltaico que serviu de suporte para o estudo da perda de potência pelo aumento de sua temperatura. Finalmente, destacamos as contribuições para o ensino de Física, sobretudo, dos semicondutores, através do estudo de suas características, interação com a radiação solar e suas aplicações tecnológicas.

Palavras-chave: Semicondutores. Energia solar. Ensino de física.

ABSTRACT

In this work we discuss about a common phenomenon in photovoltaic panels during their energy generation process. It is the loss of efficiency due to the occurrence of thermalization. This research began with the realization of a scientific initiation project PIBIC, developed within the scope of the electrical engineering course at the Federal Institute of Pernambuco. In order to explain how this phenomenon effectively occurs, we decided with this course conclusion work to deepen the studies on it, contributing to its explanation in light of the physical theories that govern semiconductors. We also present the results of monitoring a photovoltaic panel that served as support for the study of power loss due to the increase in its temperature. Finally, we highlight the contributions to the teaching of Physics, especially of semiconductors, through the study of their characteristics, interaction with solar radiation and their technological applications.

Keywords: Semiconductors. Solar energy. Teaching. Physics.

1. INTRODUÇÃO

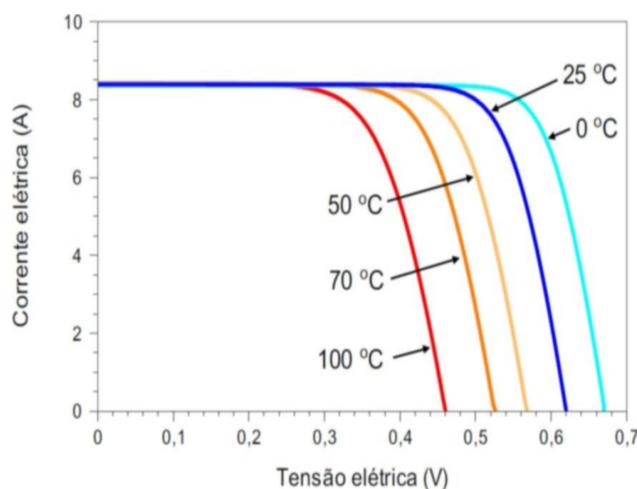
O aumento da demanda energética mundial e a preocupação com a diminuição da dependência do sistema hídrico de geração de energia, além das preocupações com a preservação do meio ambiente, está impulsionando o desenvolvimento e implantação de tecnologias alternativas de energia menos poluentes, renováveis e com pouco impacto ambiental. Neste cenário podemos destacar a energia solar, que no Brasil, por suas características geográficas tem se destacado por seu potencial de aproveitamento durante todo o ano (PEREIRA et al., 2006).

O desafio da busca de fontes alternativas de energia, sobretudo, as consideradas renováveis têm desafiado a comunidade científica na busca de soluções que tornem esse processo viável e de uso coletivo.

Uma das questões que tem preocupado os especialistas em materiais semicondutores são as perdas de potência em painéis fotovoltaicos, devido ao aumento de sua temperatura durante o processo de conversão de energia solar em elétrica.

Esses materiais têm sua condutividade dependente criticamente da temperatura, pois, quanto mais alta a temperatura, maior ela se torna (CHEN, 2011), e por consequência a resistividade do material diminui, no entanto, esse fato não demonstra alteração significativa no fluxo de elétrons, ou seja, na corrente elétrica, mas podemos perceber queda bem acentuada na tensão do painel solar, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Influência da temperatura na queda de tensão na célula fotovoltaica



Fonte: PINHO E GALDINO (2014)

Segundo Simioni (2017) esse efeito é mais expressivo em locais com alta temperatura ambiente, mas depende também de condições operacionais como a irradiância e o vento¹ (SKOPLAKI et al., 2008), (SINGH & RAVINDRA, 2012). Além disso, a temperatura de operação das células será sempre maior que a temperatura ambiente devido aos fenômenos de trocas térmicas entre os módulos, seus componentes e o ambiente (SIMIONI, 2017). O fenômeno físico responsável pela queda de tensão no painel é denominado *termalização* (STAMBUK, 2017).

Nosso objetivo principal, a partir das discussões aqui já levantadas, bem como da situação problema mencionada, é entendermos como efetivamente este fenômeno ocorre durante o funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Para tanto, revisitaremos os estudos sobre os semicondutores, apontando suas características e aplicações tecnológicas, focando principalmente em como a *termalização* ocorre durante a incidência da radiação solar nesses materiais.

Esses procedimentos contribuirão para o ensino de física, através do estudo sobre os semicondutores e mais especificamente sobre a ocorrência da *termalização* nesses materiais. Além disso, este trabalho traz soluções para o entendimento de como este fenômeno ocorre, facilitando a construção de propostas que possam minimizar ou erradicar a ocorrência deste fenômeno.

As ações de estudo ou de pesquisa efetuadas por este trabalho não serão aplicadas em sala de aula, nem passará por verificações de situações de aprendizagem, pois, trata-se de um estudo exploratório sobre uma situação que acomete a geração de energia em usinas solares, contudo, os resultados e os estudos aqui apresentados contribuem para o ensino da Física, na medida, em que poderá servir de fonte de pesquisa para profissionais da educação e ou pesquisadores ligados a estas áreas.

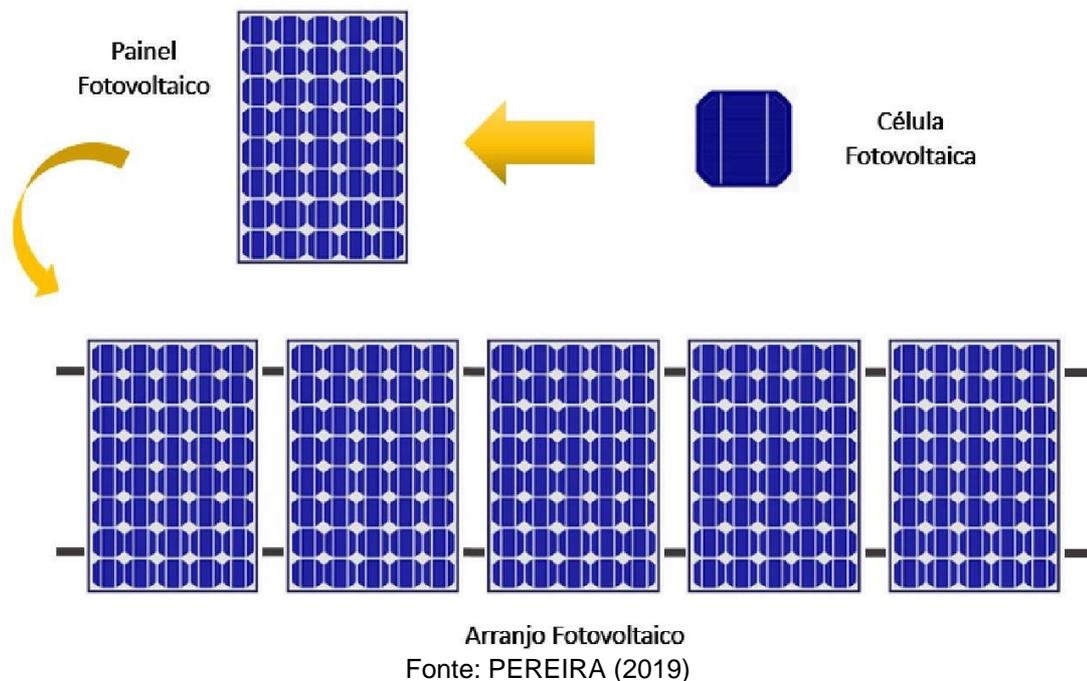
¹ De acordo com esses autores a incidência de ventos amenizam este fenômeno, na medida em que ajudam a refrigerar os painéis fotovoltaicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os sistemas de geração de energia fotovoltaicos foram desenvolvidos com o intuito de diminuir a dependência do mercado de petróleo, reduzindo a emissão de gases poluentes na atmosfera e tornar o país menos vulnerável à instabilidade dos recursos hídricos, visto que atualmente mais de 60% da energia elétrica gerada no Brasil é proveniente das usinas hidrelétricas (MACHADO; CORREA, 2015).

A energia fotovoltaica consiste na transformação direta da energia solar em energia elétrica através de um fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico a partir da incidência de luz num material semicondutor do qual é composta a célula solar. Um sistema fotovoltaico é composto por células e o conjunto de células é um módulo, bem como o conjunto de módulos é chamado de arranjo como observado na Figura 1.

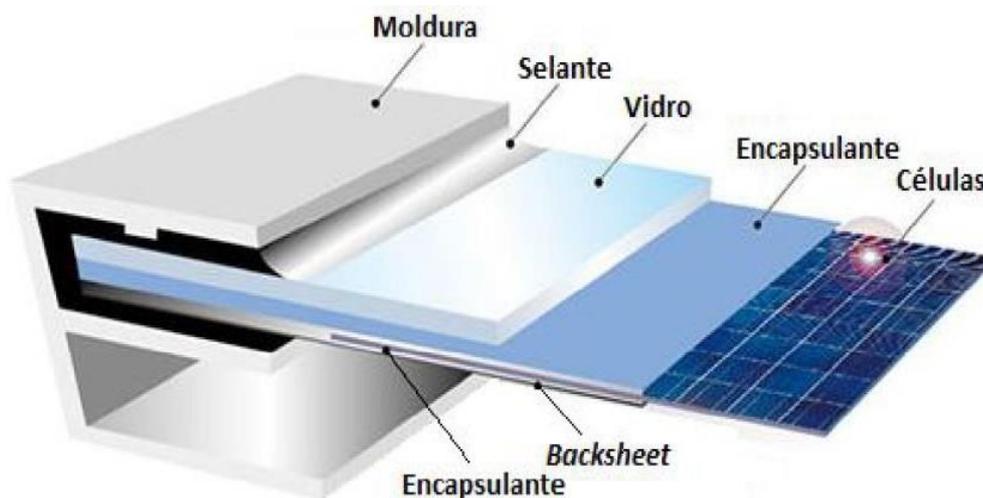
Figura 2: Elementos do sistema fotovoltaico



O efeito fotovoltaico ocorre no interior da célula solar sendo responsável por converter luz solar em eletricidade. A luz solar é composta de fótons, ou partículas de energia. Estas partículas (fótons) contêm grande quantidade de energia, correspondente aos diferentes comprimentos de onda do espectro solar, que ao incidir numa célula fotovoltaica, geram eletricidade. Quando isto acontece, é transferida a energia do fóton a um elétron em um átomo da célula (que é um semicondutor).

Com essa nova energia, o elétron sai de sua posição original no átomo para se tornar parte da corrente, em um circuito elétrico. Deixando sua posição inicial, o elétron deixa uma "lacuna" para que outro elétron a ocupe. As propriedades especiais das células fotovoltaicas fazem com que a corrente produza uma diferença de potencial (tensão), de modo que o circuito vai gerar uma corrente contínua (CC), que posteriormente é armazenada em baterias no caso de um sistema fotovoltaico *off grid*, ou em um sistema *on grid*, que é o caso em que a energia é mandada direto para a rede elétrica, depois de convertida para corrente alternada através de um inversor.

Figura 3: Camadas de um módulo fotovoltaico



Fonte: Tomasquim (2016)

O elemento principal da geração de energia solar é o painel fotovoltaico. Sua estrutura física é composta pela moldura que é a parte externa do painel, responsável pela fixação do módulo, em geral feita de alumínio. Temos o selante, que é um adesivo usado para unir as camadas internas do módulo com a moldura, além disso deve impedir a entrada de gases e umidade, bem como proteger o interior de vibrações e choques mecânicos. O vidro do painel é uma camada rígida externa que protege as células e condutores do ambiente, ao mesmo tempo em que permite a entrada de luz para ser convertida em eletricidade. Este vidro é especial, com baixo teor de ferro, com uma camada antirreflexiva, e com superfície texturizada, que evitam a reflexão da luz que atinge o vidro.

Temos também o encapsulante que é um filme que envolve as células, protegendo-as da umidade e dos materiais externos, além de otimizar a condução elétrica. As Células fotovoltaicas que é o componente eletrônico responsável pela conversão direta da radiação eletromagnética em energia elétrica, e por fim temos Backsheet na parte inferior do módulo que previne a entrada de umidade e protege as células de elementos externos. Além disso, oferece isolamento elétrico adicional (TOMASQUIM, 2016).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão (PINHO e GALDINO, 2014). O funcionamento dos dispositivos eletrônicos no interior da célula solar é responsável pelo estudo do fenômeno que causa perdas de potência por aumento da temperatura nas células. A partir do estudo dos dispositivos semicondutores presentes no interior das células solares podemos explicar como se dá as perdas de tensão devido ao aumento da temperatura no painelfotovoltaico.

Segundo Pinho e Galdino, as perdas de tensão na célula de silício cristalino com um aumento de 100°C na temperatura, produz variação de $-0,2 \text{ V}$ (-30 %) em V_{oc}^2 e

² Tensão de circuito aberto: é a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando, sendo a máxima tensão que uma célula pode produzir.

de + 0,2 em I_{sc} ³.

Os estudos de laboratório comprovam que quando o painel solar alcança uma temperatura superior a 25 °C (temperatura do painel em condições de laboratório - condições padrão de teste - STC) o painel perde eficiência. A partir do estudo entre as interações da matéria e a radiação solar pode-se definir as causas de tais perdas na geração de energia. O estudo está direcionado às características dos semicondutores presentes em grande parte das células solares e como ocorrem tais interações entre as partículas a nível atômico.

2.1 SEMICONDUTORES

Durante o século XIX Michael Faraday percebeu que os semicondutores apresentavam comportamento diferenciado dos metais no que se refere à dependência da condutividade com a temperatura. Enquanto a condutividade diminui com o aumento da temperatura para os metais, ela aumenta para os semicondutores. De acordo com Young e Freedman (2016);

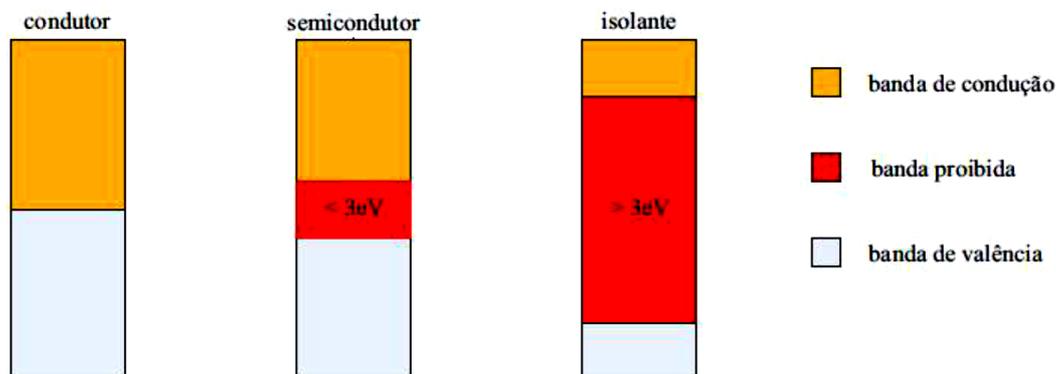
Um semicondutor possui uma resistividade elétrica intermediária entre a de um bom condutor e a de um bom isolante. A extraordinária importância dos semicondutores na eletrônica moderna decorre do fato de que suas propriedades elétricas são muito sensíveis a pequenas variações de impurezas (YOUNG E FREEDMAN, 2016).

Os semicondutores são materiais com condutividade elétrica mensurável, que ao contrário dos condutores metálicos, aumentam com a temperatura (Gutz, 2018). O semicondutor é formado de níveis de energia entre o orbital que liga o nível de menor energia e o orbital antiligante de maior energia, a chamada banda. Quanto maior a força de interação entre os átomos vizinhos, maior é a diferença de energia entre esses níveis e, portanto, mais larga é a banda.

Na Figura 4, o esquema representativo dos níveis de energias de metais, semicondutores e isolantes são divididas em três bandas: banda de condução (parte superior), banda de energia ou banda proibida (parte intermediária) e banda de valência (parte inferior). Cada banda pode ser classificada de acordo com o tipo de orbital atômico que a constitui. À medida que a distância entre os átomos diminui, os níveis de energia se espalham, formando as bandas de energias, e estas determinam se um material é condutor, semicondutor ou isolante, a partir da extensão da banda proibida (YOUNG E FREEDMAN, 2016).

³ Corrente de curto-circuito: máxima corrente que se pode obter, sendo medida na célula solar quando a tensão em seus terminais é zero.

Figura 4: Diferenças entre metal, semicondutor e isolante



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

A banda de condução é completamente vazia e não existem elétrons em seus estados, exceto em condutores, já a banda de valência é completamente preenchida de elétrons, a banda proibida é o espaço por meio do qual os elétrons livres da banda de valência devem se deslocar para chegar à banda de condução. De acordo com Gutz (2018), a diferença de energia delimitada pela sua largura é chamada de Band Gap (banda proibida). A existência da Band Gap está condicionada à largura das bandas consecutivas e à separação energética dos tipos de orbitais envolvidos na formação de cada uma.

A Figura 4 ainda denota que estão diferenciados os tipos de materiais de acordo com a extensão da banda proibida. Para um condutor (metal) existe uma sobreposição das bandas adjacentes (ausência de band Gap), além disso a banda de condução é parcialmente preenchida. Para os semicondutores a banda de condução é vazia, a banda de energia tem uma pequena extensão sendo responsável por uma condução parcial dos elétrons, além disso é necessário evidenciar o nível de Fermi que passa no centro da band Gap do material.

O nível de Fermi não corresponde necessariamente a um nível real, podendo se localizar no meio da banda proibida onde não há orbitais. O nível de Fermi é um parâmetro de suma importância na caracterização de materiais, pois, juntamente com a estrutura, possibilita prever seu comportamento elétrico (GUTZ, 2018).

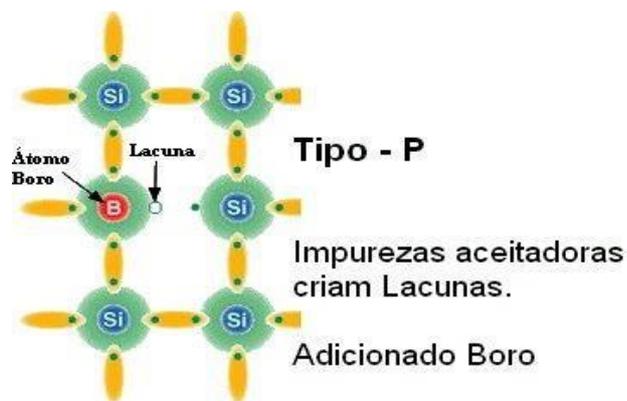
No caso do material isolante percebe-se a mesma configuração dos semicondutores, no entanto, a banda de energia é mais extensa, dificultando a passagem dos elétrons da banda de valência para a banda de condução. Para que um elétron de um material semicondutor possa sair da sua camada de valência, é necessária uma determinada absorção de energia, levando-o a atingir um nível mais alto de energia de condução. Essa quantidade de energia é chamada de energia de banda de zona proibida ou Band Gap (PINHO E GALDINO, 2014 apud STAMBUK, 2017).

As células solares são compostas pela junção de dois semicondutores de silício dopado. A dopagem consiste na perturbação da estrutura cristalina de um material. Isso é feito adicionando-se elementos químicos que atrapalharão a ligação atômica do semicondutor. Com esse processo, é possível controlar a concentração de portadores de cargas e assim modificar as propriedades elétricas do material. No painel solar observa-se a junção de dois semicondutores de silício dopados um do

tipo P e outra de tipo N.

O silício possui quatro elétrons de valência e necessita de mais quatro átomos vizinhos para formar uma ligação covalente⁴. Para a obtenção do semiconductor do tipo P adiciona-se ao cristal de silício impurezas ou dopantes com três elétrons na camada de valência de modo que ficará faltando um elétron (lacuna) na estrutura cristalina. No caso do semiconductor tipo P (Figura 5) é adicionado dopantes do Boro(B) da família A3 na tabela periódica, que quando exposto a temperatura ambiente fica positivamente carregado.

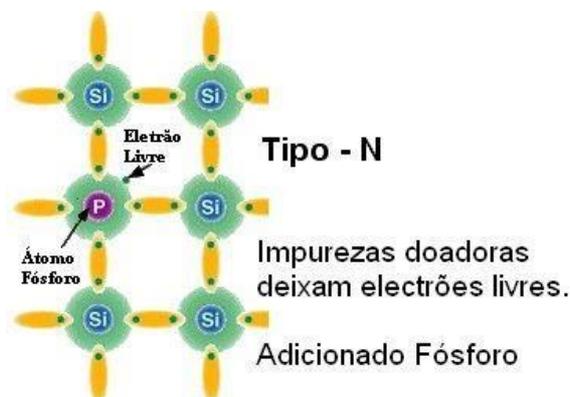
Figura 5: Estrutura cristalina do semiconductor de silício dopado do tipo P



Fonte: UNICAMP (2021)

Para o semiconductor de tipo N é inserido um elemento com cinco elétrons na camada de valência, (fósforo ou arsênio) o quinto elétron ficará fracamente ligado ao átomo de origem. Quando o semiconductor estiver à temperatura ambiente, esse elétron ficará livre, fazendo com que o cristal de silício dopado com esse material fique negativamente carregado. No caso da Figura 6 a dopagem foi realizada com elementos do fósforo(P) da família A5.

Figura 6: Estrutura cristalina do semiconductor de silício dopado do tipo N



Fonte: UNICAMP (2021)

⁴ Ligação covalente é uma ligação química caracterizada pelo compartilhamento de um ou mais pares de elétrons entre átomos.

Segundo Chen (2011), quando um semicondutor do tipo P e um semicondutor do tipo N são reunidos, um potencial embutido é estabelecido. O nível de Fermi de um semicondutor do tipo P é perto do topo da banda de valência e o nível de Fermi de um semicondutor tipo N está perto da parte inferior da banda de condução, há uma diferença entre os níveis dos dois lados. Quando as duas peças são combinadas para formar um único sistema, os níveis de Fermi devem estar alinhados. Como resultado, os níveis de energia dos dois lados devem sofrer uma mudança com um potencial V_0 , de modo que pode ser calculado o potencial embutido (V_0) pela Equação 1 com E_{cp} sendo a energia no semicondutor P e E_{cn} a energia no semicondutor N.

$$qV_0 = E_{cp} - E_{cn} \quad (1)$$

Um silício tipo N altamente dopado, com uma espessura de uma fração de um micrômetro foi gerado por dopagem com fósforo de concentração muito maior. Por causa do potencial embutido (V_0) da junção PN (Figura 7), os elétrons migram para a região do tipo P, e gerar energia elétrica semelhante a uma bateria eletroquímica.

Figura 7: Junção PN de uma célula solar



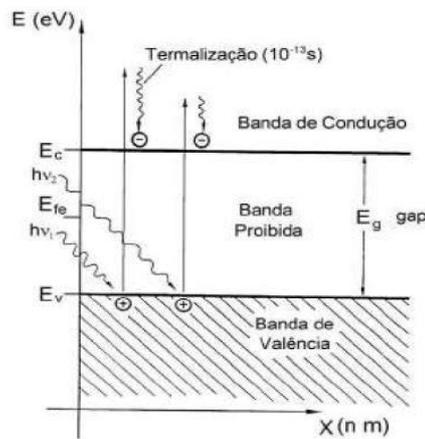
Fonte: GreenPro (2019)

2.2 TERMALIZAÇÃO

Durante o processo de geração de energia no painel fotovoltaico pode ocorrer um fenômeno comum ao material semicondutor devido a sensibilidade a altas temperaturas, conhecido como termalização. Esse fenômeno físico consiste na absorção de fótons com energia superior ao band Gap que resulta em dissipação de energia em forma de calor no material. De acordo com STAMBUK (2017), isto ocorre porque o espectro de luz é formado por diversos níveis de energia, nem todos os comprimentos de onda poderão ser aproveitados no efeito fotocondutivo⁵. Dessa forma, fótons com menos energia que o bandgap passarão direto pela célula solar, exemplo disso, são as ondas de rádio que não possuem energia suficiente e logo não desempenham nenhum papel na conversão fóton-elétron. A absorção de fótons com energia superior ao bandgap resulta em dissipação de energia em excesso na forma calor no material, dando origem a termalização como pode ser observado na Figura 8.

⁵ Fenômeno que provoca aumento na condutividade pela produção de pares elétrons-lacunas através da incidência de radiação.

Figura 8: Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semicondutor, chamado efeito fotocondutivo



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Como resultado dessas perdas de energia pode-se observar na curva I-V (Figura 3) a queda de tensão no painel fotovoltaico diretamente proporcional ao aumento da temperatura. Segundo DALTROZO et al. (2018) todos os painéis solares perdem eficiência quando aquecem. O coeficiente de temperatura de P_{max} (potência máxima) demonstra o quanto de energia o painel perde para cada °C acima de 25°C (25°C é a temperatura do painel em condições de laboratório – condições padrão de teste – STC). O coeficiente P_{max} é uma especificação do fabricante. O cálculo do coeficiente de perda é dado pela Equação 2:

$$Perdas\ do\ painel = (1 - (Temp - 25^\circ C)) \times \%P_{max} \quad (2)$$

A partir da Equação 2 podemos determinar qual a queda de potencial no painel fotovoltaico quando a temperatura varia para valores superiores a 25 °C, e conseqüentemente a eficiência do painel.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho fundamentam-se em aspectos que estão baseados em análises bibliográficas de diversos trabalhos relacionados ao funcionamento dos painéis solares e suas perdas de eficiência devido ao aumento da temperatura. Aqui utilizamos os qualitativos e quantitativos da pesquisa científica.

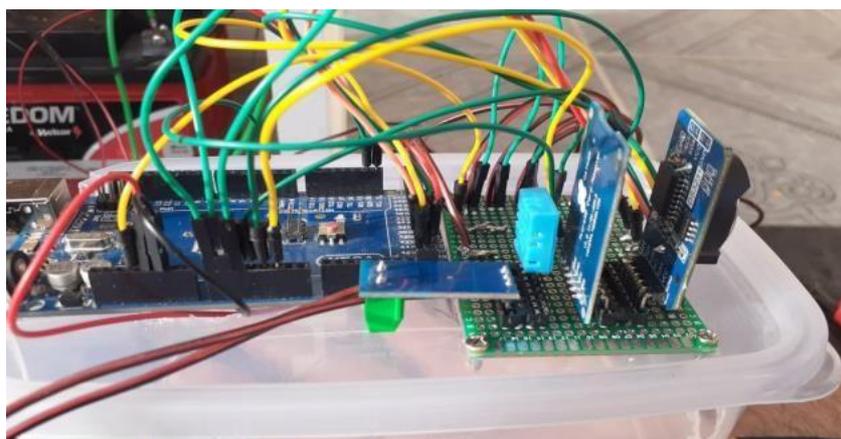
A partir da pesquisa qualitativa pôde ser definido conceitos iniciais como a composição de painéis fotovoltaicos, a fim de construir uma base para a discussão principal, que trata das perdas de potência no painel solar quando alcança altas temperaturas. O trabalho está fundamentado em estudos de diversas bibliografias que aprofundam a discussão sobre os fenômenos físicos envolvidos na queda de eficiência no painel fotovoltaico.

Os aspectos quantitativos estão presentes na montagem dos equipamentos que serviram de base para a comprovação do fenômeno estudado, bem como nos dados obtidos através de uma linguagem de programação baseada na plataforma Arduino.

Para a montagem do circuito utilizamos o ACS712 de 20A que é um sensor de corrente invasivo para baixas e médias correntes com alta sensibilidade, capaz de medir valores de corrente contínua e alternada a partir do efeito Hall, que gera uma saída de tensão proporcional a corrente que flui entre os pinos. No sistema este sensor foi responsável por fazer a leitura da corrente e potência circulando no painel solar, além disso, o RTC 3231, adicionado com o objetivo de ter segurança de data e hora que as informações foram recebidas.

O Real Time Clock (RTC) DS3231 é um relógio de tempo real de alta precisão e baixo consumo de energia, este módulo é capaz de fornecer informações como segundos, minutos, dia, mês, ano. O circuito utilizado no sistema contou também com um Dht11, sensor de temperatura e umidade, que ficou responsável pelas medidas desses parâmetros para efeito de comparação, bem como, o uso de cinco sensores Im35 que foram colados na parte de trás do painel fotovoltaico com intuito fazer a medição das temperaturas em quatro extremidades e no centro do painel, de modo que o software calculasse a média global do parâmetro no módulo solar. O microcontrolador destinado ao projeto foi o *Arduino mega*, que recebeu os dados dos sensores e os enviou para o módulo microSD, que faz o papel do nosso banco de dados.

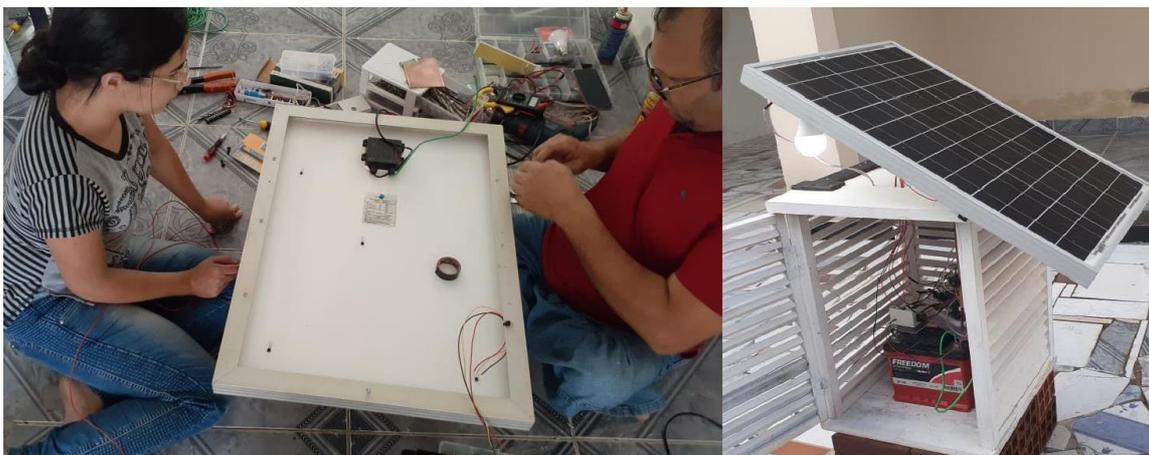
Figura 9: circuito utilizado no projeto



Fonte: elaborado pela autora

Na montagem do dispositivo utilizamos um painel fotovoltaico monocristalino de 50 W (potência máxima), 17,74V (tensão nominal), modelo HG 50, objeto de estudo do projeto. Montamos um sistema off grid, ou seja, com armazenamento de energia em uma bateria de 12V. A energia armazenada na bateria serviu como fonte de alimentação para o circuito, além de uma lâmpada que serviu de carga para sistema.

Figura 10: montagem e execução do projeto



Fonte: elaborado pela autora

Na Figura 10 temos o sistema montado e em funcionamento de modo que podemos ligar uma lâmpada mostrando que a bateria está carregada e alimentando todo o sistema. Além de todos os componentes eletrônicos citados anteriormente acrescentamos ao sistema um divisor de tensão para o Arduino ser alimentado com 9 V e não 12V que é a tensão da bateria.

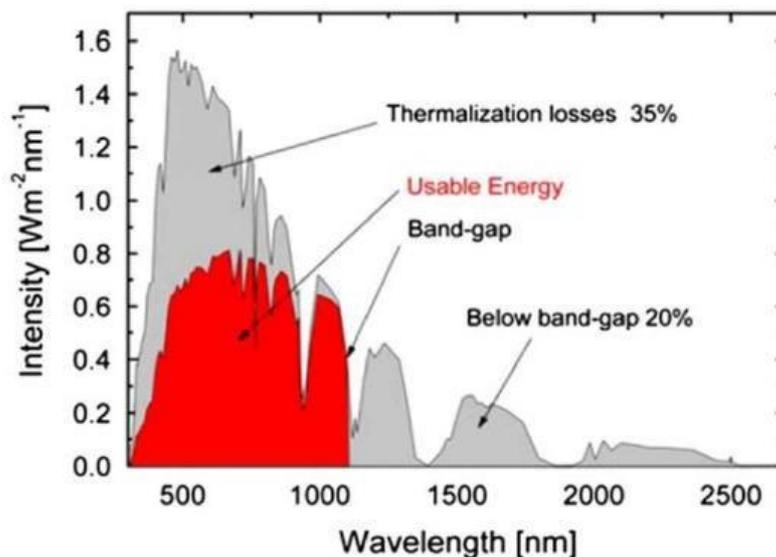
4. RESULTADOS E ANÁLISES

Segundo Stambuk (2017), a energia necessária para um elétron deslocar-se da Banda de Valência à Banda de Condução é denominada de Energia de Gap ou somente pelo termo Bandgap. Essa energia varia de material para material, onde em materiais condutores esse valor é zero. Para os materiais isolantes é necessária a energia de pelo menos 3eV, e para os materiais semicondutores, o valor de energia varia de zero a 3eV. No entanto, quando a energia do elétron é superior a energia de Gap ocorre as perdas de energia na forma de calor no painel fotovoltaico definida como termalização.

O estudo da termalização tem grande contribuição para o aprimoramento da energia fotovoltaica. O fenômeno físico estudado é responsável pelas perdas de eficiência no painel solar quando alcança altas temperaturas, a partir da dissipação de energia na forma de calor. A causa de tais perdas ocorre porque os semicondutores têm grande sensibilidade a temperatura, e quando isso acontece o material absorve fótons com energia superior a energia da banda proibida, resultando no aquecimento do painel.

As pesquisas de Goldschmidt (2009) demonstraram que mais de 55% da energia perdida no painel fotovoltaico se dá através da termalização ou falta de energia para a conversão fóton-elétron. Na Figura 11, a cor vermelha indica os fótons que podem ser absorvidos e geram eletricidade em células fotovoltaicas.

Figura 11: Comprimento de onda x Energia



Fonte: Goldschmidt (2009) apud STAMBUK (2017).

A termalização está sendo representada no gráfico com uma porcentagem de 35% das perdas. Portanto, o fenômeno descrito tem grande influência na eficiência energética e na geração de energia solar.

O aumento da temperatura provoca dois efeitos na saída elétrica da célula. O principal efeito é uma diminuição da tensão de forma diretamente proporcional ao aumento da temperatura. Um segundo efeito de menor repercussão é um pequeno incremento da corrente para valores baixos de tensão (BELTRÃO,2008).

Na figura 11, que trata da curva *corrente e tensão*, podem ser observados os efeitos descritos por Beltrão. Esses efeitos resultam nas perdas de eficiência no painel fotovoltaico, e foi com base nas observações da redução exacerbada de tensão que as pesquisas relativas a esse fator de perdas iniciaram.

Segundo Teixeira e Silva (2019), o efeito de altas temperaturas na geração de energia solar pode comprometer a eficiência energética dos sistemas fotovoltaicos. Isso foi comprovado pelo dispositivo microcontrolado que detectou quedas acentuadas na tensão final gerada no painel fotovoltaico.

Os problemas de perdas de eficiência por termalização são mais comuns em painéis de silício cristalino, que também são os mais usados e mais estudados, responsáveis pela maior parte das pesquisas citadas até então.

O painel de estudo, modelo HG 50 perde potência com coeficiente de temperatura de 0,39% por grau acima de 25 °C. Com base nesse coeficiente podemos calcular as perdas de energia no painel fotovoltaico durante os dias mais quentes do mês utilizando a Equação 3, onde T_{pp} é a temperatura do painel, 25°C a temperatura

padrão de laboratório e 0,0039 é o coeficiente de temperatura determinado pelo fabricante.

$$\text{Perdas do painel} = (1 - (\text{Temp}_p - 25^\circ\text{C})) \times 0,0039 \quad (3)$$

Após a montagem do protótipo foi possível obter os dados de temperatura, potência, corrente e umidade, para que a análise desses parâmetros fosse iniciada. O monitoramento da geração de energia do painel foi feito durante os meses de maio, junho e julho, as informações coletadas foram armazenadas com um intervalo de tempo de cinco minutos, de modo que a perda de dados não fosse significativa para os resultados desejados.

Com base nas análises feitas durante o período de funcionamento do dispositivo, percebeu-se que o quantitativo de dados era muito grande e repetitivo, por isso resolvemos utilizar os dias mais quentes do mês que represente o estudo das perdas nesse período. No primeiro mês, já podemos observar temperaturas no painel entre 38°C e 59°C. A partir desses parâmetros determinamos as perdas percentuais de potência no painel durante o dia mais quente do mês, em determinados horários, a fim de obtermos o máximo de perdas ocasionadas pelo superaquecimento do painel fotovoltaico.

Tabela 1: Dados dos horários de pico no mês de maio

Data	Hora	Temp _p (°C)	Pot(W)	Cor(A)	Perdas/mês (%)
27/05/2020	11:50	51,91	31	1,78	
27/05/2020	11:55	49,86	33	1,8	
27/05/2020	12:00	53,37	35	1,99	
27/05/2020	12:05	54,57	33	1,9	-9%
27/05/2020	12:10	55,13	35	1,88	
27/05/2020	12:15	52,76	35	1,98	
27/05/2020	12:20	53,15	34	1,9	

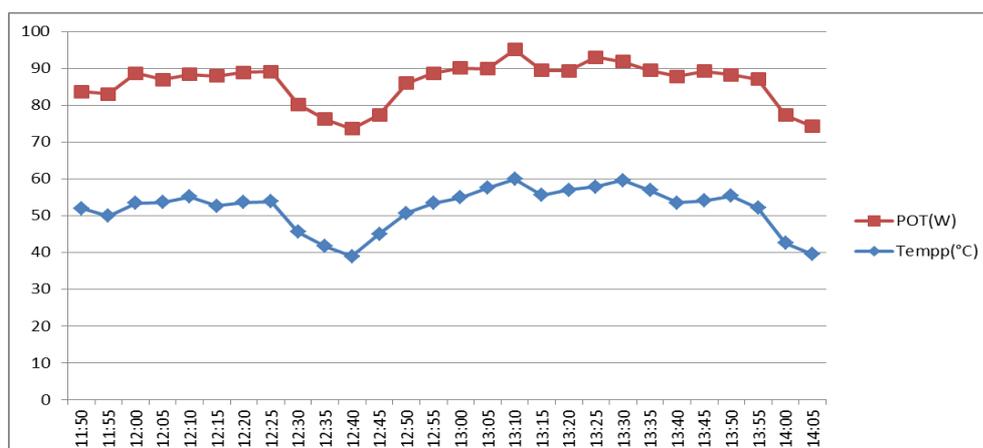
Fonte: elaborado pela autora

As variáveis Temp_p (temperatura do painel), POT (potência do painel e COR (corrente circulando no painel) foram obtidas a partir do funcionamento do sistema microcontrolado, com o intuito de determinar as perdas de potência do painel exposto a altas temperaturas.

O dia 27/05/2020 foi selecionado para a discussão do trabalho, pois conta com as temperaturas de maior pico de maio, e por consequência a maior perda de potência, que estar entre 5% e 13% nos horários descritos, além disso, obtemos a perda total no mês de maio de 9%.

A cada 5 minutos as informações de perdas sofrem modificação de acordo com a queda ou aumento em Temp_p. Utilizando as informações da tabela acima traçamos as curvas de comparativas entre a temperatura do painel (Temp_p) e potência (POT), em seus respectivos horários.

Figura 12: curvas comparativas Temp x POT do mês de maio



Fonte: elaborado pela autora

Ao comparar as curvas é possível perceber alguns pontos onde a temperatura do painel aumenta e a potência também, esses são os pontos que representam menor taxa de queda de potência e, portanto, maior geração de energia, do mesmo modo, os pontos que representam o aumento de temperatura e uma leve queda na potência expõem as maiores taxas de perdas.

No mês de junho, temos as taxas de perda mensal distintas do mês anterior. Utilizamos dados de dias e horários diferentes do anterior por se tratar dos dias de maiores temperaturas do mês de junho.

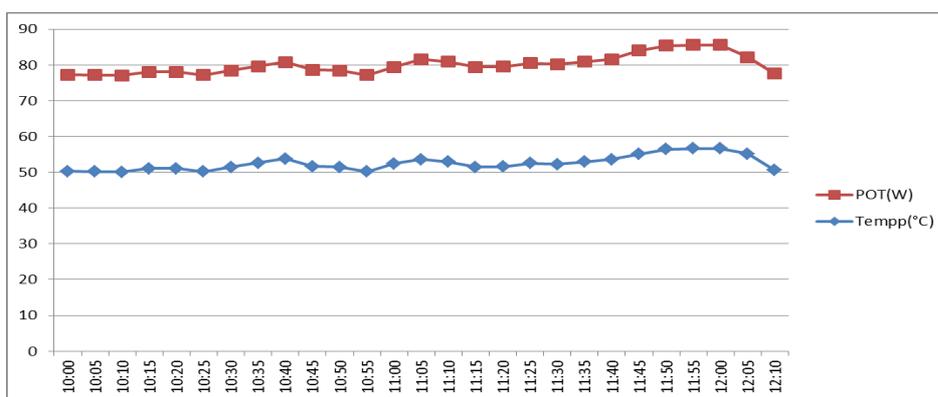
Tabela 2: Dados dos horários de pico do mês de junho

Data	Hora	Temp(°C)	Pot(W)	Cor(A)	Perdas/mês (%)
02/06/2020	10:00	50,24	32	1,81	-11%
02/06/2020	10:05	50,15	32	1,8	
02/06/2020	10:10	50,05	33	1,8	
02/06/2020	10:15	51,03	33	1,8	
02/06/2020	10:20	50,15	32	1,88	
27/05/2020	12:15	52,76	35	1,98	
27/05/2020	12:20	53,15	34	1,9	

Fonte: elaborado pela autora

Podemos perceber um aumento significativo na perda de potência no mês de junho. Tivemos uma elevação nas perdas por superaquecimento de 2% em relação ao mês anterior, apesar de uma potência superior a 33 W, os cálculos determinaram uma perda mensal de 11% o que significa que a eficiência energética do painel está em 89%.

Figura 13: curvas comparativas Temp x POT do mês de junho



Fonte: elaborado pela autora.

O gráfico de potência do mês de junho tem curvas mais acentuadas sem muita variação, temos um percentual de perdas por mês maior que no período anterior. O percentual da perda mensal alto, como esse, causa grande preocupação, pois significa que o painel está com sua eficiência muito baixa em relação ao esperado.

Em julho, registramos o percentual de perdas inferior aos demais meses tratados neste trabalho. A partir das leituras realizadas pelos sensores e armazenadas no microSD, observamos temperaturas inferiores aos parâmetros mencionados anteriormente e conseqüentemente perdas de potência menores, de modo que podemos perceber um bom rendimento na geração de energia.

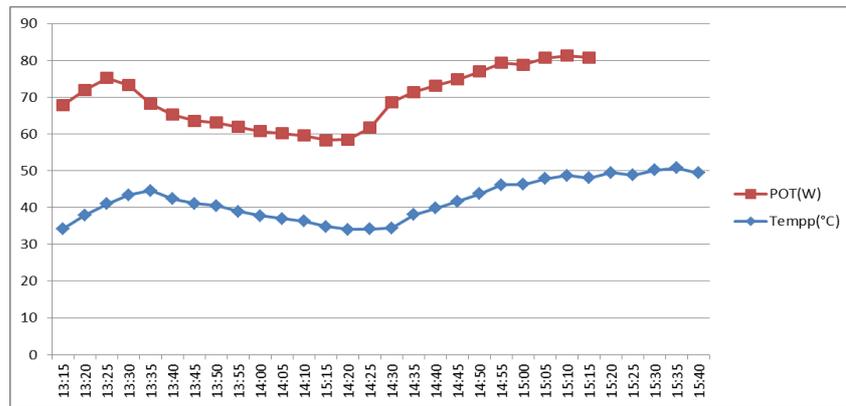
Tabela 3: Dados dos horários de pico do mês de julho

Data	Hora	Temp(°C)	Pot(W)	Cor(A)	Perdas/mês (%)
08/07/2020	13:15	34,21	33	1,81	-7%
08/07/2020	13:20	37,9	34	1,8	
08/07/2020	13:25	40,9	34	1,8	
08/07/2020	13:30	43,4	29	1,8	
08/07/2020	13:35	44,57	23	1,88	
08/07/2020	13:40	42,3	22	1,98	
08/07/2020	13:45	41,06	23	1,9	

Fonte: elaborado pela autora

Abaixo podemos observar o gráfico comparativo da Temp e POT, com característica crescente, resultado dos dias menos quentes, de modo que o painel perde menos potência resultando numa melhor eficiência energética do painel, de acordo com a literatura estudada para a realização deste trabalho.

Figura 14: curvas comparativas Temp_p x POT do mês de julho



Fonte: elaborado pela autora.

O problema da termalização no painel fotovoltaico é uma constante no sistema de geração de energia solar. No entanto, existem alternativas para amenizar tais danos causados por esse fenômeno de perdas de eficiência no sistema fotovoltaico, como o uso da água e ar como meio refrigerante em sistemas fotovoltaicos híbridos.

Segundo STAMBUK (2017), a maioria dos estudos sugerem soluções para dispersar o calor no painel através do design, características de montagem, materiais a serem utilizados na fabricação dos painéis ou até soluções mais criativas, como por exemplo, a utilização de um filme fino de água fluindo na frente do painel fotovoltaico que garanta o resfriamento e a limpeza dos painéis. Dentre as soluções mais utilizadas pode-se citar a circulação natural de ar, circulação de ar forçada e o resfriamento hidráulico.

Figura 15: sistema híbrido de resfriamento de painel solar



Fonte: PORTAL ENERGIA (2021)

Os dados coletados e analisados durante os três meses comprovam a carência de tecnologias capazes de amenizar tais perdas, pois para grandes sistemas de geração de energia fotovoltaica, quedas de potência como as obtidas neste trabalho causam grandes prejuízos em usinas ou até mesmo residências que desejam utilizar

uma energia limpa e rentável. É de suma importância que tecnologias de resfriamento de painéis solares sejam desenvolvidas e aplicadas, pois sistemas como esses podem fazer grande diferença no rendimento do sistema de painéis fotovoltaicos, principalmente em grandes empreendimentos como usinas solares.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu um estudo sobre a perda de potência no painel fotovoltaico relacionado ao aumento da temperatura. Foram realizadas análises em diversos trabalhos que serviu como base para o desenvolvimento de conteúdos relacionados ao funcionamento dos painéis fotovoltaicos, composição, e fatores de perdas.

A discussão sobre o funcionamento do painel foi de grande importância para a compreensão dos fatores causadores das perdas de potência em decorrência do aumento da temperatura e a influência da relação entre radiação e matéria a nível atômico

O estudo sobre a relação entre radiação e matéria foi realizada de forma minuciosa ao abordar os conteúdos dos semicondutores, e suas principais características quando submetidos à uma radiação. Além disso, as análises e discussões desenvolvidas com a finalidade de melhorar a compreensão acerca do assunto tratado, aponta para soluções que possam reduzir as perdas no painel.

O presente trabalho também discutiu como o fenômeno de perda de potência em painéis fotovoltaicos podem impactar a produção de uma energia limpa e sustentável. Buscar alternativas que possam ser simples e de baixo custo, se faz necessário para que este problema possa ser atenuado, otimizando assim, todo o processo de produção que engloba, desde a produção dos módulos fotovoltaicos ao próprio processo de geração de energia.

Painéis mais eficiente terão seu custo reduzido, pois, poderá para uma mesma demanda poderá ter menores dimensões, ocasionando uma demanda menor por matéria-prima, culminando num processo de preservação ambiental mais acentuado.

As discussões e os resultados aqui apresentados, bem como a exposição teórica sobre o comportamento dos semicondutores quando expostos à radiações, ajudam a entender como efetivamente este fenômeno ocorre, o que contribui para o entendimento destes conteúdos.

6. REFERÊNCIAS

Beltrão, Ricardo Esberard de Albuquerque. **Efeito na geração de energia de módulos fotovoltaicos submetidos a condições climáticas distintas. Estudo de caso para as localidades de Recife e Arapiraca.** UFPE, 2008.

Chen, C. Julian. **Physics of Solar Energy.** Department of Applied Physics and Applied Mathematics Columbia University, 2011.

Cassiano, Giovanna Bertoldo. **ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO EM UM SUPERMERCADO NO MATO**

GROSSO DO SUL. UFMS- Campo Grande MS, 2020.

DALTROZO, Jenifer Godoy. e GARLET, Liége. e LOURENÇO, William Magalhães de. e RUVIARO, Raiana Spat. e SANTOS Ísis Portolan dos. **ANÁLISE DA VARIÇÃO DA EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.** VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

GUTZ, Alexandre L. B. Baccaro e Ivano G. R. **FOTOELETROCATÁLISE EM SEMICONDUTORES: DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS ATÉ SUA CONFORMAÇÃO À NANOESCALA.** Quim. Nova, Vol. 41. 2018.

MACHADO, Karla Suzane Van-dall. CORREA, Nicoli. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA EM CURITIBA.** Curitiba, 2015.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Fundamentos de metodologia científica.** 7 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

PINHO, GALDINO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos,** 2014.

Souza, José Ricardo Patrício da Silva. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitose Aplicações para o Ensino Médio** -Pará :UFPA / IF, 2016.

SIMIONI, Tássio. **O impacto da temperatura para o aproveitamento dopotencial solar fotovoltaico do Brasil/Tássio Simioni** –Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

STAMBUK, Richard Heinrich. **Influência da temperatura no desempenho de sistemas fotovoltaicos.** 2017. 57 páginas. Monografia de Especialização em Energias Renováveis - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba,2017.

PEREIRA, Stephanie Carolina Maia. **projeto de microgeração fotovoltaica conectada à rede de distribuição com análise econômico-financeira para a comunidade do quilombo do campinho da independência em paraty – RJ.**

Rio de Janeiro, 2019. Disponível em:
<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10028053.pdf>> Acesso em 11 de abril de 2021.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). – EPE: Rio de Janeiro, 2016.

Teixeira, Veronica Alves. Silva, Oberlan da. **Desenvolvimento de dispositivo microcontrolado de baixo custo para medição e armazenamento de dadosde umidade do ar e temperaturas em painéis solar através de um sistemaGRID.** ANAIS ELETRÔNICOS DO XIV CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – CONIC. RECIFE- IFPE, 2019.

YOUNG, HUGH D. FREEDMAN, Roger A. Física IV: **ótica e física moderna** - 14. ed. - São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.