



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA GERADA POR PLACAS FOTOVOLTAICAS.

GABRIEL OZORIO LINHARES DE MELLO

Outubro de 2021

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE
ENERGIA GERADA POR PLACAS FOTOVOLTAICAS.**

GABRIEL OZORIO LINHARES DE MELLO

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Ciência dos Materiais pela UFMS.
Área de concentração: Dispositivos.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Aristone

Outubro de 2021

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PRODUÇÃO DE
ENERGIA GERADA POR PLACAS FOTOVOLTAICAS.**

GABRIEL OZORIO LINHARES DE MELLO

BANCA EXAMINADORA

Campo Grande, 01 de outubro de 2021.

Prof. Dr Flavio Aristone
INFI - UFMS

Profa. Dra. Andrea Teresa Riccio Barbosa
FAENG - UFMS

Prof. Dr. Thiago Rangel Rodrigues
INFI - UFMS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de adição de impurezas em cristal de silício	13
Figura 2 - Célula fotovoltaica de silício e as regiões tipo <i>n</i> , tipo <i>p</i> e junção <i>pn</i>	13
Figura 3 - Tipos de células fotovoltaicas comerciais	14
Figura 4 - Estrutura poli e mono cristalinas de silício.....	15
Figura 5 – Associação de módulos fotovoltaicos em série.....	17
Figura 6 - Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo.....	18
Figura 7 - Esquema de um sistema fotovoltaico isolado.....	19
Figura 8 - Esquema de ligação do controlador de cargas.....	20
Figura 9 - Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede.....	21
Figura 10 – Resistências elétricas em uma célula PV	23
Figura 11 - Influência da irradiação solar em célula fotovoltaica de silício	25
Figura 12 – (a) irradiação versus eficiência (b) temperatura versus eficiência.....	26
Figura 13 - Influência da temperatura em células fotovoltaicas.....	28
Figura 14 – Módulos fotovoltaicos em condições normais.....	33
Figura 15 - Lâmpadas de 60 W alimentadas pelos MFs.....	33
Figura 16 – Posição das placas com o ventilador.....	34
Figura 17 – Medição da temperatura na placa, com e sem o ventilador	35
Figura 18 – Detalhe da posição do ventilador	35
Figura 19 – Detalhe da placa Peltier e do dissipador de calor.....	36
Figura 20 - Bomba instalada no reservatório para resfriar a superfície do MF.....	37
Figura 21 – Arranjo dos multímetros para medições	38
Figura 22 – Esquema da medição de corrente e tensão.....	38
Figura 23 – Gráfico de potência de saída dos módulos em condições idênticas.....	40
Figura 24 - Somatório da energia das placas ao longo do dia.....	41
Figura 25 - Potência comparativa do MF resfriado pelo ventilador.....	42
Figura 26 – Somatório das energias geradas pelos MFs ao longo do dia	42
Figura 27 – Tensão gerada nos MFs ao longo do dia.....	43
Figura 28 – Temperatura dos MFs ao longo do dia.....	43
Figura 29 – Potência comparativa do MF resfriado com Peltier.....	44
Figura 30 – Temperatura e tensão comparativas do MF resfriado via Peltier.....	45
Figura 31 – Energia comparativa do MF resfriado com placa Peltier.....	46
Figura 32 – Desempenho do MF considerando o resfriamento com água	47
Figura 33 – Temperatura e tensão do MF com a água	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações do fabricante do módulo fotovoltaico.....	32
Tabela 2 - Somatório de energia gerada pelos MFs	41
Tabela 3 - Somatório de energia das MFs, com ventilação	42
Tabela 4 - Energia comparativa gerada pelos MFs com Peltier	46
Tabela 5 - Somatório de energia dos MFs, com água.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. EFEITO FOTOVOLTAICO (PV)	10
2.2. CÉLULAS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	15
2.3. EFICIÊNCIA DAS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	21
2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE ENERGIA	24
2.5. CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E GERAÇÃO DE ENERGIA	29
3. METODOLOGIA	31
3.1. MONTAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	32
3.2. RESFRIAMENTO COM VENTILAÇÃO FORÇADA	34
3.3. RESFRIAMENTO COM PELTIER	36
3.4. RESFRIAMENTO COM FLUXO LAMINAR	37
3.5. MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA	37
4. RESULTADOS	40
4.1. PLACA RESFRIADA POR VENTILAÇÃO	41
4.2. PLACA RESFRIADA COM PELTIER	44
4.3. PLACA RESFRIADA COM ÁGUA	47
5. CONCLUSÃO	49
6. REFERÊNCIAS	51

RESUMO

A matriz energética mundial é composta por várias fontes primárias, dentre as quais os combustíveis fósseis, como o petróleo, prevalecem sobre as demais. No entanto, devido ao crescimento populacional, às crises humanitárias, e ao desenvolvimento industrial e tecnológico, haverá demandas cada vez maiores por energias renováveis. Dentre essas destaca-se a energia solar fotovoltaica (PV), por possibilitar a geração de forma limpa e descentralizada. O Brasil tem a vantagem de estar localizado em uma zona intertropical que registra altos índices de radiação solar durante todo o ano, diferente de outros países em que essa tecnologia está mais consolidada. Do mesmo modo, os estudos da conversão de energia solar em elétrica mostram que há fatores que diminuem a produção de energia de painéis fotovoltaicos, dentre eles a temperatura. Assim, com o intuito de contribuir para a melhoria da produção de energia dos módulos fotovoltaicos, foi realizado neste trabalho, um estudo comparativo para analisar o desempenho de potência de saída de um sistema fotovoltaico sendo resfriado por um sistema externo. Nos experimentos foram instalados dois painéis de silício policristalino de 51 *Watts*, independentes entre eles; sendo uma placa de controle e uma placa de teste. O módulo de controle é aquele de referência, sujeito à temperatura ambiente e sem nenhum sistema de refrigeração. No módulo testado foram instalados, separadamente, três diferentes sistemas para refrigeração. Esses módulos foram comparados nas mesmas condições de trabalho, para verificar a produção de energia dentro dos valores estabelecidos pelo fabricante, garantindo que os estudos comparativos em campo sejam confiáveis. Para a retirada do calor, os sistemas usados foram: um ventilador, ora atuando na superfície e ora na parte traseira da placa; um módulo termoelétrico Peltier na parte traseira da placa; e bombeamento d'água na superfície do módulo. Os resultados mostram que a produção de energia dos módulos com resfriado por ventilação, pela placa Peltier, e por escoamento d'água na superfície foram 2,11%, 2,30%, e 4,06% maiores do que a energia produzida pela placa de controle, respectivamente. Logo, foi possível identificar que há possibilidades de maximizar a eficiência das placas instalando sistemas que possam resfriá-las, gerando mais energia com a mesma irradiação recebida.

Palavras chave: Placas fotovoltaicas, Influência, Temperatura e Produção de energia.

ABSTRACT

The world energy matrix is composed of several primary sources, among which the fossil fuels, such as oil, prevail over the others. However, due to population growth, humanitarian crises, and industrial and technological development, there will be increasing demands for renewable energy. Among these, the photovoltaic (PV) solar energy stands out, as it enables power generation in a clean and decentralized manner. Brazil has the advantage of being located in an intertropical zone that registers high levels of solar radiation throughout the year, unlike other countries where this technology is more consolidated. Likewise, studies on the conversion of solar energy into electrical power have shown the energy production of the PV board is reduced by external factors, including high temperatures. Thus, in order to contribute to the improvement of photovoltaic modules, a comparative study was carried out in this work to analyze the output power performance of a photovoltaic system being cooled by external systems. In the experiment, two 51 Watt polycrystalline silicon panels have been used independent of each other. One is a control board; the other is a test board. The control module is the reference module, subject to ambient temperature and without any refrigeration system. In the tested module, three different cooling systems were installed separately. Initially, these modules were compared for the same working conditions and verified that they present energy production within the values established by the manufacturer, ensuring that the comparative studies in the field are reliable. To remove the heat, the following systems have been used: a fan, acting on the surface and tested on the back of the plate; a Peltier thermoelectric module on the back of the board; and pumping water on the module surface. The results show that the energy output of the modules with ventilation, Peltier, and surface water were 2.11%, 2.30%, and 4.06% higher than the control board, respectively. Therefore, it is possible to identify that there are possibilities to maximize the efficiency of the board by installing systems that can cool the board without damaging the power generation.

Keywords: Photovoltaic modules, Influence, Temperature, Energy production.

1. INTRODUÇÃO

Frente à relevante busca de energias renováveis, visando suplementar a crescente demanda de energia e minimizar o uso de fontes esgotáveis e poluentes, o emprego da energia fotovoltaica (PV) como uma alternativa economicamente viável e acessível tem sido amplamente disseminada. Vale notar que vários países apresentam grandes potenciais no que se refere ao uso da energia solar PV, seja em termos de capacidade de instalação ou em potencial solar, embora essa ainda seja uma parcela pequena no consumo energético total atual. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável, a China lidera o ranking de países com maior capacidade instalada desde 2015, com aproximadamente 131 GW instalados em 2017, o que representa 6 vezes a capacidade da usina hidrelétrica de 3 Gargantas, e com um crescimento médio de 10 GW a cada ano. Os Estados Unidos apresentam uma capacidade instalada de 51 GW, também estando entre os 5 primeiros do mundo [1].

Desde 2010 observa-se que a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica mundial cresceu mais do que nas quatro décadas anteriores. No Brasil, no ano de 2014, aconteceu o primeiro leilão em que foi contratada a energia proveniente de plantas fotovoltaicas centralizadas. O resultado desse leilão pode ser observado no PDE 2024 com a entrada em 2017 de 891 MW no Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do país. As áreas de maior incidência de Irradiação Global Horizontal (IGH) estão localizadas, principalmente, no interior da Bahia e na parte central da região Nordeste do país, além de estarem presentes em praticamente todo o Centro-Oeste, grande parte do interior do Sudeste, assim como algumas áreas da região Norte [2].

Entre as tecnologias utilizadas em geração distribuída a partir de fontes renováveis, o emprego da geração solar por painéis fotovoltaicos tem auferido grande espaço nos sistemas elétricos ao redor do mundo. No Brasil observa-se um cenário favorável para o aumento significativo da implantação de sistemas fotovoltaicos, devido principalmente a dois fatores fundamentais: *i)* os elevados índices de irradiação solar que chegam ao território brasileiro; e *ii)* a resolução normativa 482/2012 publicada pela ANEEL, regulando a conexão de micro e minigeração à rede elétrica [3].

Com relação ao desempenho elétrico das placas, sua influência está ligada, principalmente, pelo tipo de placa usada. Um módulo fotovoltaico (MF) típico converte entre 6 a 20% da radiação solar incidente em eletricidade, dependendo do tipo de células solares e das condições climáticas. O resto da radiação solar incidente é refletido ou

convertido em calor, o que aumenta significativamente a temperatura do módulo fotovoltaico e reduz a eficiência energética do módulo. Esse calor pode ser extraído por diferentes técnicas, como por exemplo, pelo fluxo de água ou de ar sobre o módulo PV.

Da mesma forma, o rendimento dos sistemas de geração solar fotovoltaica ainda é considerado baixo, fazendo-se necessário buscar tecnologias de otimização dos painéis solares, tornando, dessa forma, a fonte solar mais eficiente e consequentemente competitiva frente a outras fontes renováveis de energia. Nesse sentido, a eficiência energética de um painel solar fotovoltaico pode ser melhorada usando sistemas de resfriar a superfície da placa.

O objetivo deste trabalho visa realizar uma comparação entre MFs que recebam a mesma quantidade de radiação solar, porém um desses módulos sujeitos a sistemas que resfriam a superfície ou a parte de trás da placa. Assim será possível analisar a influência que a temperatura tem sobre a potência de saída dos módulos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para um melhor entendimento dos conceitos que serão apresentados neste trabalho, será apresentada uma revisão bibliográfica detalhada sobre a questão do uso de MFs, suas aplicações, sua eficiência, e os principais fatores que influenciam a eficiência da geração de energia. O foco do estudo é analisar a influência da temperatura ambiente na conversão de energia PV para os painéis. Inicialmente, descreve-se o comportamento das células solares que geram energia fotovoltaica. A seguir descreve-se as diferentes formas de uso, ou acoplamento, da energia solar, conhecido como *on-grid* e *off-grid*. Em seguida, discute-se a questão da eficiência dos MFs com relação à irradiação solar. Finalmente, os fatores que influenciam a potência de saída, com relação a temperatura são analisados.

2.1. EFEITO FOTOVOLTAICO (PV)

A maior parte das ondas eletromagnéticas produzidas pelo Sol encontra-se no intervalo da radiação infravermelha – cerca de 50%. Os outros 50% restantes são 40% de luz visível e cerca de 10% de radiação ultravioleta, respectivamente. É importante saber que a incidência da radiação solar na atmosfera terrestre sofre um conjunto de reflexões, dispersão, e absorção ao longo do percurso até o solo, devido às condições climáticas [1].

A energia solar é considerada a principal fonte da maioria das formas de energia renovável. Por exemplo, a energia eólica se deve às diferenças de temperatura na atmosfera

da Terra, que se deve principalmente à posição do Sol no céu. Consequentemente, a utilização direta da energia do Sol é considerada um fator chave nos sistemas de energia verde [4].

O Sol tem capacidade de fornecer anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \cdot 10^{18} \text{ kW.h}$ de energia. Esse valor corresponde a aproximadamente 10000 vezes o consumo mundial de energia no mesmo período. Com isso, a radiação solar constitui-se em uma fonte energética que pode ser considerada inesgotável, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energias [5]: térmica, elétrica, etc. O Sol é a principal fonte de energia da Terra para os oceanos, a atmosfera, a terra e a biosfera. A média anual é de aproximadamente 342 *Watts* em cada metro quadrado da superfície terrestre [6].

É possível obter geração de energia elétrica convencional a partir do efeito fotovoltaico que ocorre nos materiais quando submetidos à radiação solar. Os mais propícios para essa finalidade são aqueles classificados como semicondutores, que possuem bandas de valência preenchidas e bandas de condução vazias à temperatura de 0 K, mas que podem ser dopados com impurezas específicas, alterando sua condutividade elétrica [3].

As células solares são feitas desses materiais, semicondutores dopados, que têm elétrons fracamente ligados às suas impurezas. Quando a energia incidente excede esse valor da energia de ligação, chamada de energia de gap, o elétron que estava entre a banda de valência e a banda de condução fica “livre” para se mover através do material, ou seja, ele pode então conduzir eletricidade. Essa energia necessária para liberar o elétron pode ser fornecida por fótons, que são pacotes de energia luminosa [7].

Os elétrons promovidos para a banda de condução, por absorção da energia luminosa, se comportam como elétrons livres e estão energeticamente separados da banda de valência pelo intervalo de energia definido como *gap*, que é medido em unidades de elétron-volts ou *eV*. Esses elétrons podem conduzir energia, se houver uma diferença de potencial elétrico que os faça se mover através da estrutura, mas eles também são atraídos de volta para seu estado de mais baixa energia, pois o material agora se comporta como se estivesse positivamente carregado. Dá-se o nome de recombinação ao processo do elétron voltar a ocupar o mesmo nível de energia no qual estava anteriormente. A energia fotovoltaica só leva em conta os elétrons que conduzem eletricidade, aqueles que sofrem processo de recombinação não entram no resultado [8].

Os átomos de silício têm como propriedades possuírem quatro elétrons na última camada, e formam uma rede cristalina do tipo cúbica de corpo centrada. Esses quatro elétrons da camada de valência formam ligações covalentes com os átomos vizinhos. O silício em seu estado puro, denominado intrínseco, é, portanto, um isolante elétrico. Para atingir o aproveitamento de corrente e tensão nesse material é necessário a introdução de forma controlada de impurezas na rede cristalina do silício. Essas impurezas são chamadas de dopantes, cujo processo consiste em adicionar pequenas quantidades de outros elementos que mudam as propriedades elétricas do material [9].

Esses dopantes têm características diferentes do silício. Por exemplo, um dos dopantes mais utilizados é o fósforo (P), pois é um átomo pentavalente que tem somente um elétron ligado na última camada. Quando inserido como substituinte a um átomo de silício, esse último elétron fica fracamente ligado ao fósforo, fazendo com que o mesmo seja facilmente conduzido, energeticamente falando, para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e, portanto, é denominado dopante tipo *n* [3]. De acordo com Luque [9], ao adicionar átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, há o “excesso” de um elétron, que fica fracamente ligado ao seu átomo de origem, algo semelhante a um átomo de hidrogênio com massa diferente.

Por outro lado, é possível introduzir na malha cristalina do silício átomos que tenham somente três elétrons de ligações, como é o caso do boro, onde haverá a falta de um elétron para satisfazer as ligações com o silício. Essa falta de elétron é denominada vacância, buraco ou lacuna. Diz-se, portanto, que o boro é um dopante tipo *p* [9]. Essa falta de um elétron faz com que um elétron de um sítio vizinho possa vir a ocupar a posição vacante, principalmente se houver uma diferença de potencial elétrico entre as posições. Essa movimentação de cargas, decorrente do deslocamento do buraco, pode ser interpretada como uma corrente elétrica de cargas positivas, ou seja, no sentido contrário ao da movimentação dos elétrons [8].

Na Figura 01 estão representados esquematicamente os dois processos de dopagem do silício, tanto para a geração de elétrons quase livres, dopante tipo *n*, quanto para a geração de lacunas, ou buracos, a partir de dopantes tipo *p*. Baixas concentrações de dopagem são da ordem de 10^{15} e altas concentrações são da ordem de 10^{17} , ou seja, um átomo de dopagem a cada 100 milhões de átomos de silício e um a cada 1 milhão, respectivamente.

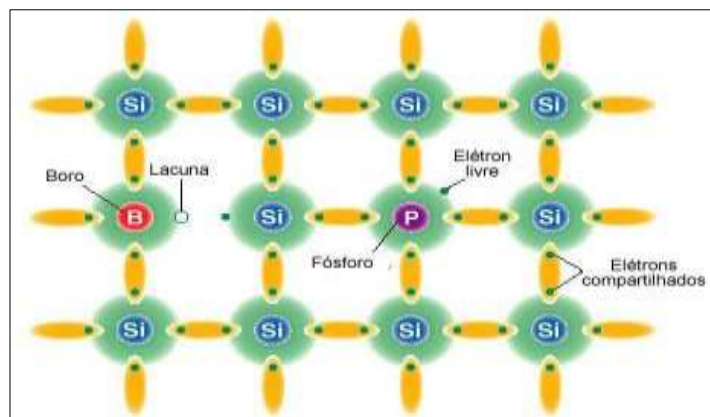


Figura 1 - Exemplo de adição de impurezas em cristal de silício

Fonte: Fadigas, 2012.

Assim, quando uma junção pn é exposta a fótons com energia maior que o gap, termo que neste texto se refere à energia de ionização da impureza, ocorre a geração de pares elétron-buraco, ou seja, os elétrons e as vacâncias serão separadas. A célula solar é, portanto, uma junção pn , ou seja, um diodo, com contatos metálicos nas partes inferior e posterior, e uma fina camada de material anti-reflexivo onde a luz incide, como representado esquematicamente na Figura 02 [3].

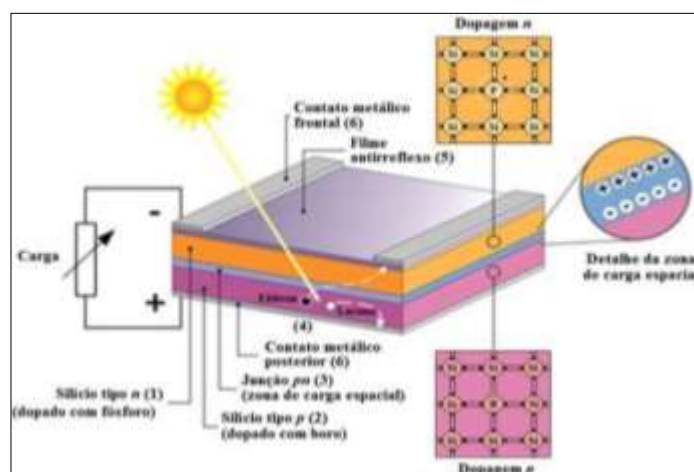


Figura 2 - Célula fotovoltaica de silício e as regiões tipo n , tipo p e junção pn

Fonte: Pinho & Galdino, 2014

Quando a célula fotovoltaica é exposta à luz solar, os fótons passam pela camada antirreflexiva e atingem a região dopada do silício, sendo eventualmente absorvidos e gerando pares elétron-buraco, que são lançados nas respectivas bandas de condução. Nas extremidades superior e inferior desse diodo são colocados contatos metálicos, com o único objetivo de capturar essas cargas geradas pela incidência de luz. O objetivo é capturar as cargas geradas antes que elas possam se recombinar.

Quando as cargas são capturadas, elas são conduzidas para o circuito externo, podendo ser usadas para fornecer energia para a realização de trabalho como, por exemplo, bombear água, girar um ventilador, alimentar um motor de máquina de costura, acender uma lâmpada, ou fazer funcionar um computador. Eles são restaurados para a célula solar pelo loop de retorno do circuito através de um segundo contato seletivo, que os retorna para a banda de valência onde eles começaram [9].

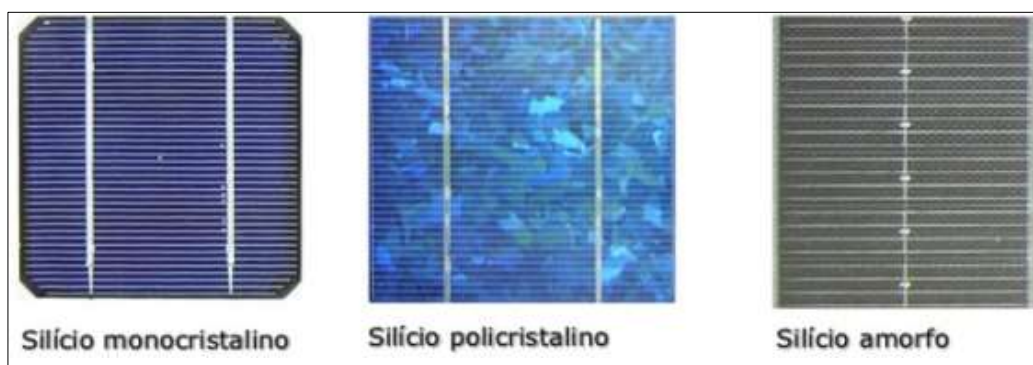


Figura 3 - Tipos de células fotovoltaicas comerciais

Fonte: Fadigas, 2012

Quando as cargas geradas graças à presença da energia luminosa se recombinam antes de gerarem trabalho externo, elas liberam a energia que havia ganhado na forma de calor [3]. É evidente que o interesse é conseguir fazer com que essas cargas realizem o máximo de trabalho que se possa extrair, reduzindo o nível de recombinação. A razão entre a quantidade de energia obtida pela realização de trabalho e a energia incidente no sistema é chamada de eficiência energética. Atualmente, as células de silício comerciais apresentam eficiências típicas da ordem de 15 a 18%. Em laboratórios de pesquisas, esses valores podem chegar a 25%, enquanto outras formas de células solares, como as perovskitas, chegam a atingir 40% de eficiência, mas, no entanto, ainda não são comercialmente viáveis [10].

O movimento desses elétrons no circuito externo, passando pelos contatos ôhmicos, é a corrente elétrica do sistema. O potencial em que os elétrons são entregues ao sistema externo é um pouco menor do que a energia limiar que excita os elétrons; isto é, o *band gap*. Assim, em um material com uma lacuna de banda de 1 eV, os elétrons excitados por um fóton de 2 eV ou por um fóton de 3 eV ainda terão um potencial de pouco menos de 1 V, isto é, os elétrons são entregues com uma energia de 1 eV. A potência elétrica produzida é o produto da corrente pela tensão, ou seja, a energia é a medida do número de elétrons livres multiplicado pelo seu potencial em ultrapassar o gap [9].

2.2. CÉLULAS E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Para a produção das células fotovoltaicas o semicondutor mais utilizado é o silício. Segundo Simioni [11], tecnologias de silício cristalino (c-Si) são as mais utilizadas no mundo, correspondendo a, aproximadamente, 80% das células produzidas. Apenas o silício cristalino alcançou um nível próximo às tensões e correntes teoricamente previstas. As células de silício fornecem um bom equilíbrio entre custo-benefício, com elevada confiabilidade e eficiência razoável. Elas podem ser classificadas em três tipos: monocristalinas (mono-Si ou m-Si), multicristalinas, também chamado policristalinas (poli-Si), e amorfas (a-Si).

A indústria do silício é amplamente dominante, e as tecnologias envolvidas no processo de sua obtenção e de fabricação de dispositivos tornam esse material um líder incontestado da atualidade e de muitas décadas ainda por vir. Ademais, o silício abundante na superfície da Terra, perdendo somente para o oxigênio, o que o torna economicamente muito mais atrativo que outros semicondutores convencionais [12]. Para Juric [13] alguns dos fatores que contribuem para o silício ser o material mais utilizado, na produção de módulos fotovoltaicos, é que este, além de não ser tóxico, é o segundo elemento mais abundante da Terra, responsável por 28% da massa da crosta terrestre.

A Figura 04 mostra que o silício purificado (a) é geralmente policristalino: é feito de vários grãos de cristal único e áreas eletricamente não homogêneas entre elas, chamadas de limites de grão. O silício de cristal único (b) é estruturalmente uniforme (monocristalino) e seu comportamento elétrico é bem compreendido.

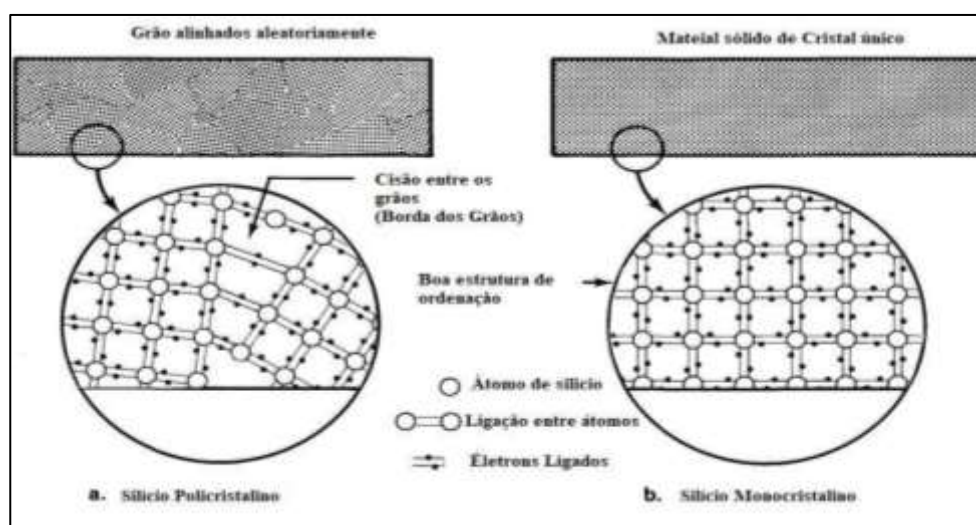


Figura 4 - Estrutura poli e mono cristalinas de silício

Fonte: Hersch adaptado, 1982

SILÍCIO MONOCRISTALINO

A maioria dos módulos fotovoltaicos de silício monocristalino são obtidos a partir de fatias de um único grande cristal. A obtenção desse cristal é feita a partir de uma semente mergulhada em silício fundido e retirada lentamente, dando origem ao termo de crescimento cristalino. Nesse processo, o cristal recebe pequenas quantidades de boro formando um semicondutor dopado do tipo *p*. A esse semicondutor, após seu corte, são introduzidas impurezas do tipo *n*, expondo-as a vapor de fósforo em fornos de altas temperaturas, garantindo confiabilidade e eficiência aos produtos [14].

O silício monocristalino (mono-Si) é um material utilizado na fabricação de circuitos integrados para microeletrônica [3]. As células feitas com esse material são historicamente as mais utilizadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade. Painéis solares são facilmente reconhecíveis, pois possuem uma cor uniforme, normalmente azulado escuro, indicando silício de alta pureza e cantos tipicamente arredondados.

Da mesma forma, Simioni [11] destaca que o monocristalino é formado por um cristal único e uniforme, diferente do policristalino que é produzido a partir de cristais multifacetados. Estas diferenças são provenientes do processo de fabricação dos *wafers*, lâminas de lingotes de silício, que após os processos de dopagem, polimento e acoplamento de condutores dão origem às células. As células monocristalinas possuem aparência homogênea.

POLICRISTALINO

De acordo com Seraphim *et al* [15], essas células são fabricadas a partir do mesmo material que, ao invés de formarem um único grande cristal, é solidificado em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais. A partir desse bloco são obtidas fatias e fabricadas as células. A presença de interfaces entre os vários cristais reduz um pouco a eficiência das células solares. Na prática, os produtos disponíveis alcançam eficiências muito próximas das oferecidas em células monocristalinas.

As células fotovoltaicas policristalinas são feitas de silício puro, mas não são formadas por uma única estrutura cristalina. Elas são menos eficientes do que as células de cristal único. No entanto, o silício policristalino é mais fácil de produzir e, portanto, mais barato: sua eficiência é apenas ligeiramente menor do que para uma célula de cristal único [16].

AMORFO

Muitas pesquisas são realizadas para que possam ser usados cada vez menos materiais semicondutores, obtidos de forma passível e em larga escala, o que traria uma diminuição nos custos operacionais de produção e consequentemente uma redução do valor final do produto. O silício amorfo é um dos mais estudados. O material amorfo difere de um material cristalino pelo fato de não apresentar qualquer ordenamento no arranjo estrutural dos átomos. As células feitas com esse material possuem eficiências inferiores às das células de silício cristalino. A eficiência desse tipo de célula já atingiu 13% em laboratório. Porém, as células comerciais apresentam eficiências em torno de 9%. É a célula mais pesquisada atualmente, e que possui um preço mais baixo devido ao seu processo mais simples de fabricação [3].

ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS

As células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores capazes de converter diretamente a energia solar incidente em energia elétrica. Tradicionalmente uma célula fotovoltaica mede entre 100 cm^2 e 200 cm^2 , sendo capaz de gerar aproximadamente 0,6 V de tensão para uma potência entre 1 W e 3 W. Por este motivo, as células fotovoltaicas são normalmente agrupadas umas às outras, ou seja, ligadas em série, de forma a formar módulos fotovoltaicos [17].

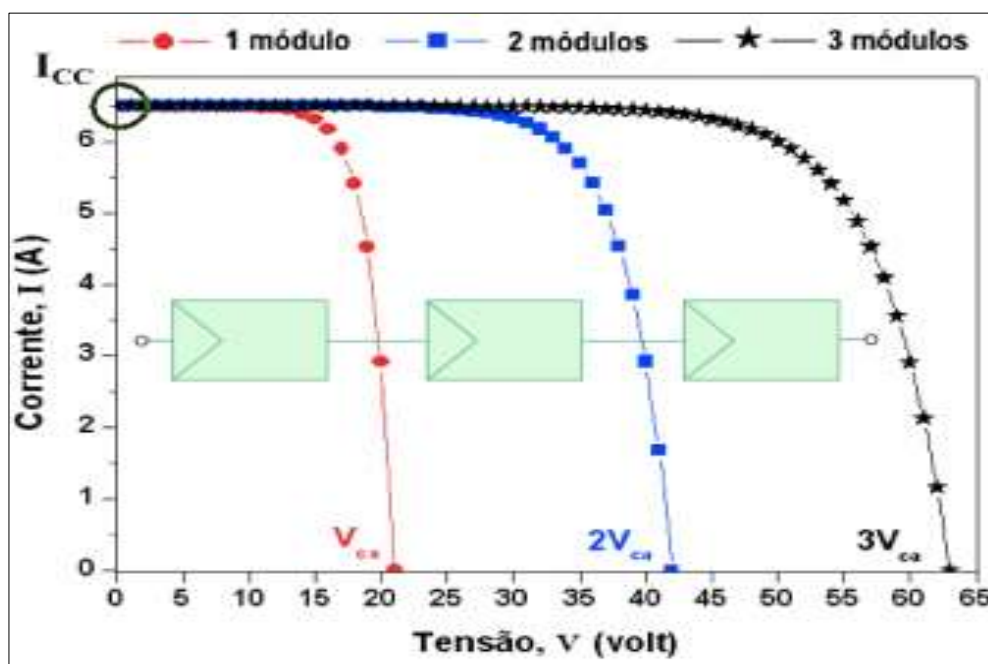


Figura 5 – Associação de módulos fotovoltaicos em série

Fonte: Carneiro, 2010.

Existem dois modos de se associar os módulos fotovoltaicos: em série ou em paralelo. Essa associação vai depender da finalidade que o projeto necessita, assim é possível determinar qual modo é o que atende o sistema. Na conexão das associações em série, o terminal positivo de um módulo fotovoltaico é conectado ao terminal negativo do outro módulo e assim por diante. Para dispositivos com mesma capacidade e submetidos à mesma radiação solar, as tensões são somadas e a corrente elétrica não é afetada, conforme Figura 05.

Por meio da curva característica I - V , se os dispositivos possuem e encontram-se sob as mesmas condições de radiação e temperatura, as correntes elétricas individuais são iguais. No caso de se associarem os dispositivos em série com diferentes correntes de curto circuito, a corrente elétrica da associação será limitada pela menor corrente. Entretanto, a associação de módulos de corrente diferentes não é recomendada na prática, pois pode causar superaquecimento.

A associação em paralelo é onde os terminais positivos dos painéis fotovoltaicos são interligados entre si, assim como os terminais negativos. A Figura 06 mostra o resultado da soma das correntes elétricas em células conectadas em paralelo. As correntes elétricas são somadas e a tensão é mantida.

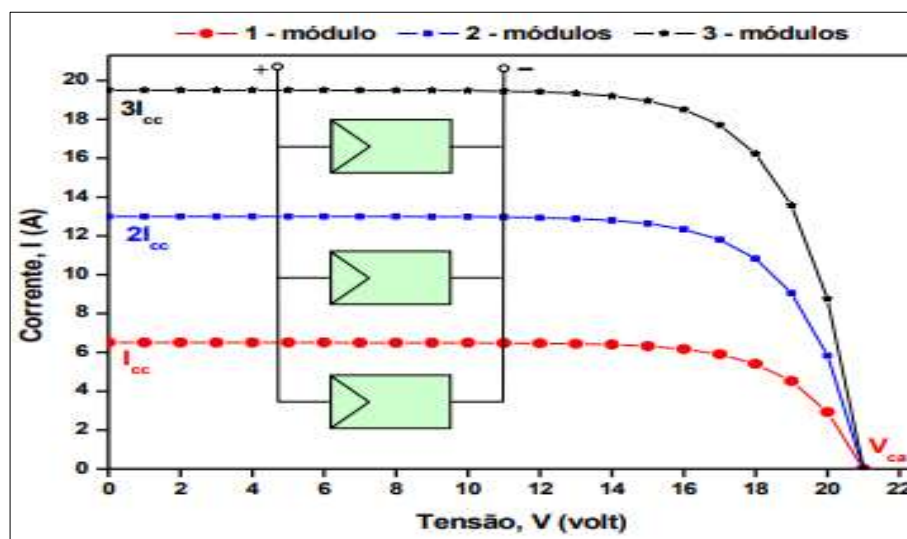


Figura 6 - Associação de módulos fotovoltaicos em paralelo

Fonte: Carneiro, 2010

Para utilizar o resultado da conversão de energia solar em energia elétrica da forma convencional, é necessário montar um conjunto de elementos apropriados para facilitar o

processo. Esse conjunto leva o nome de sistema fotovoltaico. Usando os nomes definidos pela ABNT NBR 11704:2008 [18], os principais componentes são:

- Os painéis fotovoltaicos - que servem para converter a energia solar em diferença de potencial contínua, tipicamente 12 *Volts*;
- Os controladores de carga - que servem para estabilizar o nível de saída de energia dos painéis, evitando sobrecargas no sistema;
- Os inversores de frequência - que servem para transformar a diferença de potencial contínua proveniente dos painéis em alguma forma de diferença de potencial alternada;
- Estrutura metálica de sustentação, fiação e em alguns casos dispositivos que podem armazenar energia, cujo melhor exemplo são baterias de acúmulo de cargas.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser separados em dois tipos de utilização distintas, os sistemas isolados e os sistemas conectados à rede [18], ou *off-grid* e *on-grid*, respectivamente, como são mais popularmente referenciados. Os sistemas isolados são independentes e servem como única fonte de energia para os equipamentos que alimenta, enquanto os conectados à rede fornecem energia à concessionária.

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS (SFI)

Os sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) foram as primeiras aplicações comerciais que auxiliariam com o fornecimento de energia elétrica para uma vasta gama de aplicações. Alguns exemplos de utilização são: refrigeração, telecomunicações, bombeamento d'água, entre outros, onde o sistema de energia convencional não é acessível. Assim, os SFI tornam essas aplicações comercialmente viáveis e competitivas [18].

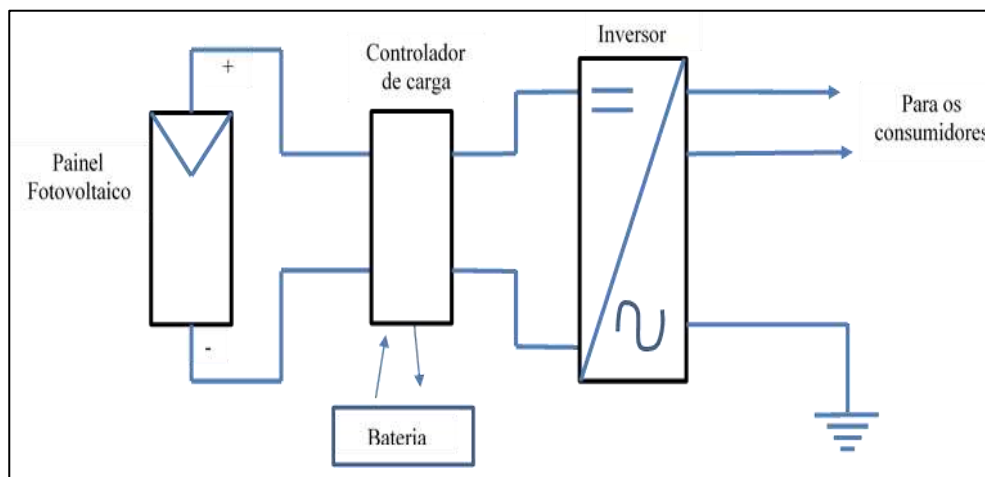


Figura 7 - Esquema de um sistema fotovoltaico isolado

O controlador de carga é responsável por monitor a carga e/ou descarga do banco de baterias. Já o inversor de frequência é responsável por converter a corrente contínua (CC) proveniente do painel fotovoltaico, ou banco de baterias, em corrente alternada (CA) com características adequadas para a alimentação de aparelhos, como mostrado na Figura 07.

Para proteger essas baterias contra sobrecorrente, subtensão, e sobretensão, é necessário o emprego de um controlador. O controlador possui seis pontos de conexão, sendo dois para a entrada dos painéis, dois para a conexão da bateria e dois para conexão da carga a ser utilizada. O esquema de ligação pode ser visto na Figura 08 [19].

O controlador possui proteção de sobrecorrente na carga tipo fusível, de fácil reposição. Possui também uma proteção que desconecta a carga caso a tensão da bateria fique abaixo do seu limite inferior (11,1 V). No caso de a tensão na bateria ultrapassar seu limite superior (14,1 V) o controlador também atua desconectando o módulo fotovoltaico [19].

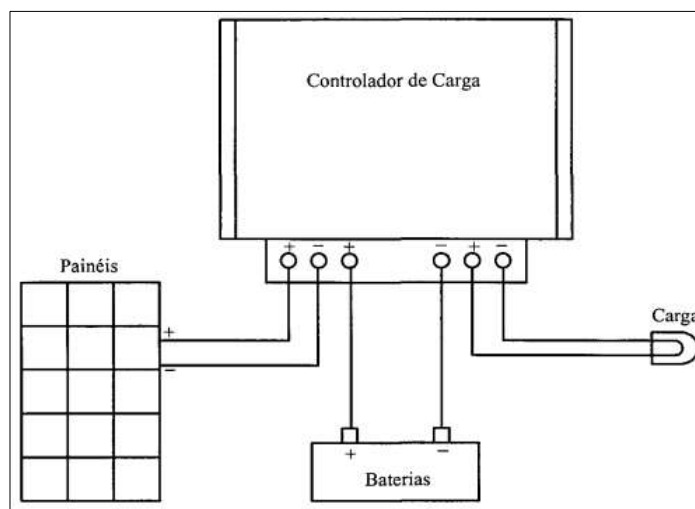


Figura 8 - Esquema de ligação do controlador de cargas

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

São considerados sistemas fotovoltaicos conectados à rede aqueles que fazem o acoplamento da energia elétrica proveniente dos painéis à rede elétrica convencional das companhias de energia elétrica locais. Nesse caso ocorre um aproveitamento indireto da energia produzida pelos painéis, pois nos momentos de alta produção de energia, ou seja, de altas radiações solares, a rede externa é alimentada, e nos momentos de baixa radiação, a rede alimenta os equipamentos [20], como mostrado na Figura 09.

Esse tipo de sistema tem como principal vantagem a dispensa do uso de dispositivos de armazenamento de energia, como as baterias. Logo, é necessário o sistema ser constituído apenas pelas placas fotovoltaicas e inversor de frequência, além dos componentes de proteção, fusíveis e disjuntores. Nesse caso, o sistema de medição de energia elétrica fornecido pela companhia precisa ser bidirecional, ou seja, precisa considerar tanto a energia que entra como a que sai do sistema, leia-se residência, ou a energia utilizada e a fornecida para a rede, respectivamente [20].

A legislação brasileira atual permite que uma residência possa ser compensada em até 95% da energia total consumida, ou seja, o consumidor só pagará 5% do total, ou a taxa mínima convencionada, aquela que for maior. Mesmo que o consumidor produza mais energia do que ele consome, ele pagará 5% dessa energia, mais o serviço de distribuição. Em havendo excesso de produção, ele, o consumidor, ficará com o crédito junto à concessionária por até 60 meses, para descontos futuros em eventuais aumentos de consumo [21].

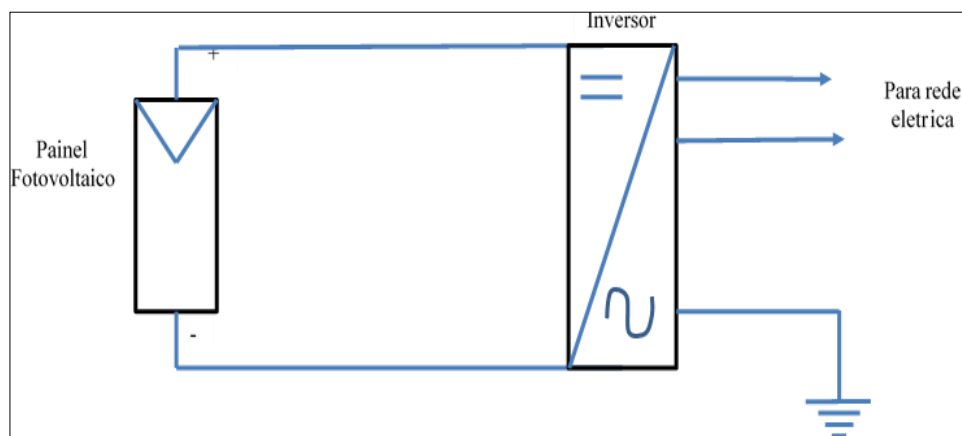


Figura 9 - Esquema de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

2.3. EFICIÊNCIA DAS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

O efeito da temperatura na eficiência elétrica de um módulo fotovoltaico pode ser determinado pela influência da corrente, I , e a tensão, V , já que a potência máxima é dada pela Equação (1):

$$P_m = V_m I_m = (FF) V_{oc} I_{sc} \quad (1)$$

Nesta expressão fundamental, que também serve como uma definição do fator de preenchimento, FF , o índice m se refere ao ponto de potência máxima na curva $I - V$ do módulo, enquanto os subscritos oc e sc denotam valores de circuito aberto e curto-circuito,

respectivamente. Acontece que tanto a tensão de circuito aberto quanto o fator de preenchimento diminuem substancialmente com a temperatura (conforme os elétrons termicamente excitados começam a dominar as propriedades elétricas do semicondutor), enquanto a corrente de curto-circuito aumenta, mas apenas ligeiramente [22].

A eficiência máxima que se extraia do silício monocristalino era de apenas 15% até a década de 1950. Esse valor foi gradativamente aumentando até atingir 28%, recentemente. O silício amorfo é considerado um tipo de filme fino. A eficiência do silício amorfo está abaixo de 10%, mas é mais barato e melhor na absorção de luz, em comparação com o silício monocristalino. O local de operação do MF é definitivamente ao ar livre e exposto ao Sol, portanto, o calor que se acumula nos módulos afeta a sua eficiência. Nas condições de teste padrão (CTP), espera-se que os módulos tenham os melhores desempenhos. Essas condições, em geral, só ocorrem em ambiente controlado, ou seja, em configuração de laboratório [23].

RESISTÊNCIA NOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A resistência à passagem de corrente elétrica está sempre presente na maioria dos elementos elétricos, onde o fluxo de corrente é acompanhado por colisões entre os portadores de carga e o material através do qual as cargas estão fluindo. A resistência elétrica pode ser tão grande que pode ser usada para fornecer calor (fogões) ou luz (lâmpadas). Assim, as perdas de resistência nas células são equivalentes às perdas de energia; tudo o que uma célula solar perde por causa da resistência degrada sua eficiência [22].

Nas células solares de Si, o processo de recombinação dentro do semicondutor ocorre entre os portadores de cargas, ou seja, entre os pares elétrons-buracos. As perdas por recombinação liberam calor e podem ser representadas no circuito interno das células [24]. As perdas de resistência em células solares ocorrem predominantemente em quatro lugares:

1. Na maior parte do material de base;
2. Na camada estreita da superfície superior típica de muitas células;
3. Na interface entre a célula e os contatos elétricos que conduzem a um circuito externo
4. Bem menos comum, na junção dos portadores.

A maioria das células de junção *pn* tem uma camada superior muito fina. A Figura 10 (a) mostra que a resistência no fluxo de corrente na lateral para as cargas elétricas nesta fina camada superior é grande, assim como em uma tubulação de água, onde em um tubo estreito há uma grande resistência para um fluxo grande. Da mesma forma, as perdas de resistência ocorrem no contato elétrico, por causa da interface pobre entre os materiais, onde há rupturas na estrutura atômica que obstruem o movimento dos portadores de carga, Figura 10 (b). Há até mesmo alguma (mas muito pouca) perda de resistência na junção onde os portadores, embora acelerados, podem perder alguma energia, Figura 10 (c). A maior parte do material também possui uma resistência [22], Figura 10 (d).

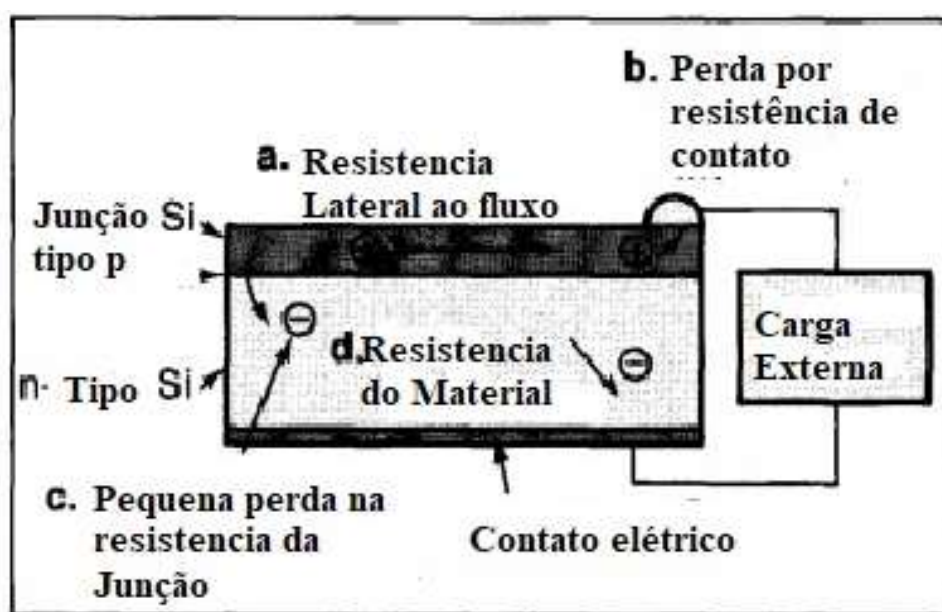


Figura 10 – Resistências elétricas em uma célula PV

As perdas por resistência diminuem a tensão e aumentam as chances de recombinação de cargas, reduzindo a corrente. Uma alternativa para melhorar a resistência é aumentar a dopagem do silício. O silício altamente dopado tem vários portadores livres para conduzir a corrente. No entanto, existem limitações associadas à dopagem, já destacadas por Callister [25], que podem prejudicar a eficiência da célula fotovoltaica, limitando a mobilidade dos portadores livres com o aumento da concentração de dopantes [24].

Para Callister [25], a condutividade de um material semicondutor depende da facilidade que os elétrons e os buracos têm em se movimentar através do silício. Essa mobilidade é influenciada pela presença da quantidade de impurezas. Considerando uma concentração limite de 10^{20} m^{-3} de dopantes, a mobilidade tanto dos elétrons quanto dos

buracos diminui de acordo com o aumento da temperatura. Esse efeito se deve ao maior espalhamento térmico provocado pelas impurezas ao silício reduzindo a eficiência de mobilidade dos elétrons. Em uma célula fotovoltaica a concentração de impurezas é em torno $10^{14} m^{-3}$ assim há melhor mobilidade dos elétrons e menos influência da temperatura.

2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE ENERGIA

A produção de energia dos módulos fotovoltaicos varia devido a vários fatores externos, dentre os quais os principais são: a intensidade e a direção da radiação incidente; a inclinação dos painéis; o sombreamento local; e a temperatura das células fotovoltaicas. Identificar e quantificar essas interferências na produção de energia através dos painéis solares é necessário para buscar a otimização do desempenho do sistema como um todo.

Ainda segundo Callister [25], a produção energética de um painel fotovoltaico depende de dois fatores ambientais: a temperatura do módulo fotovoltaico, e a radiação solar que ele vai receber. Esses dois fatores provocam efeitos nas curvas características do painel, que serão discutidos a seguir.

RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar faz aumentar a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto. A intensidade da radiação solar muda a cada instante em função da rotação da Terra e sua translação ao redor do Sol. Ao nível do mar, ao meio-dia e com céu limpo, ou seja, sem nuvens, a intensidade da radiação solar atinge um valor próximo de $1000 W/m^2$ com o Sol no zênite. Quando se adquire um módulo fotovoltaico de, por exemplo, $58 Wp$, significa que este módulo disponibilizará $58 Watts$ quando incidir na superfície da Terra $1000 W/m^2$. Portanto, a corrente gerada pelo módulo será máxima na incidência de radiação máxima.

O gráfico representado na Figura 11 mostra como a irradiância solar incidente afeta a curva $I-V$ de uma célula fotovoltaica de silício, mantida à temperatura de $25 ^\circ C$. A corrente elétrica gerada por essa célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto (V_{ca}) aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura [7].

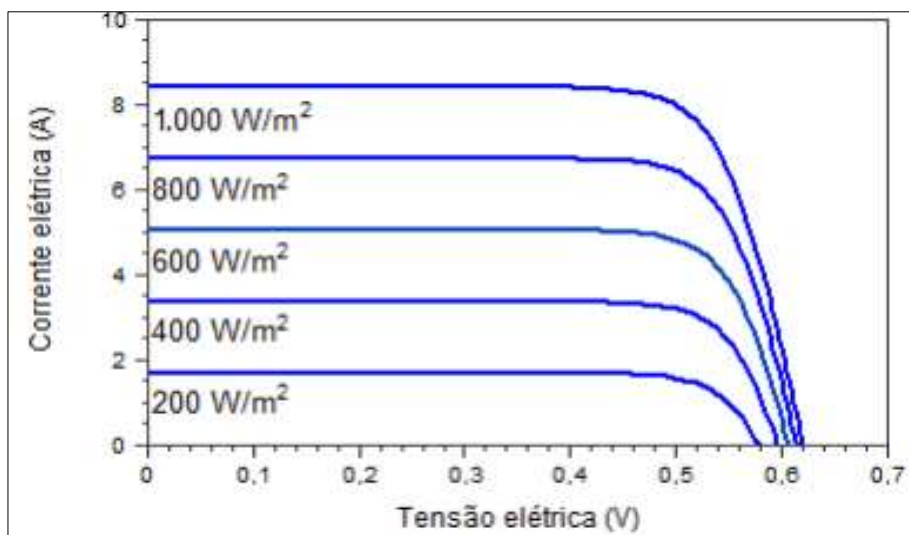


Figura 11 - Influência da irradiação solar em célula fotovoltaica de silício
Fonte: Luque & Hegedus, 2011

A corrente de curto circuito (I_{SC}) de uma célula pode ser relacionada pela irradiância incidente através da Equação 1.

$$I_{SC} = I_{SC}^{STC} \times \frac{G}{1000} \quad (2)$$

onde $I_{SC} (A)$ é a corrente de curto-circuito do módulo; $I_{SC}^{STC} (A)$ é a corrente de curto circuito do módulo em condições padrões de teste (CTP); e $G (\frac{W}{m^2})$ é a irradiância incidente sobre o módulo.

Se a irradiação solar direta for alta, a eficiência fotovoltaica solar deve ser alta. Esta abordagem é verdadeira para a geração de eletricidade, mas incompleta para estudar a eficiência de geração. A quantidade de irradiação solar direta recebida na área total assume o papel mais importante. Em outras palavras, o sistema fotovoltaico não aumenta sua taxa de eficiência com a alta irradiação solar direta ou difusa. Se o sistema fotovoltaico tiver essa capacidade, a eletricidade gerada deve ser duas ou três vezes maior do que a situação atual [26].

TEMPERATURA

Outro parâmetro importante para o sistema de painéis fotovoltaicos é a temperatura da célula, pois valores elevados de temperatura causam perdas de calor e como resultado a eficiência do sistema diminui. Quando ocorre o aumento da irradiação solar, há um aumento da temperatura, logo há perdas de energia, causadas pelo calor [11].

Quando a intensidade da radiação aumenta, tanto a potência de entrada quanto a de saída do painel solar aumentam. Por outro lado, o aumento da temperatura do painel solar

reduzirá a potência de saída. Portanto, a potência de saída não terá muita alteração. Isso resulta na proporção inversa da eficiência do painel solar para a irradiância. Devido ao fato de que o painel solar só pode aproveitar uma quantidade limitada de energia da irradiação do Sol, a radiação excessiva só contribuirá para aquecer o painel solar, o que, por sua vez, causa a queda de eficiência do painel solar. Isso pode ser visto claramente na Figura 11, que mostra a relação entre a temperatura média e a eficiência do painel solar. Quando a temperatura do painel é mais alta, a eficiência é menor. Da mesma forma, quando a irradiação aumenta, a eficiência do painel não acompanha na mesma proporção [27].

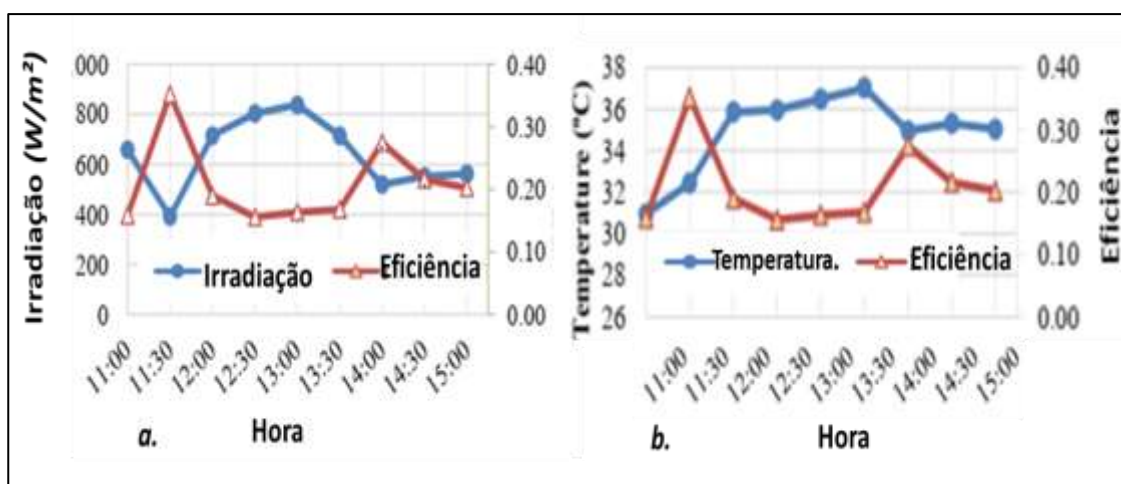


Figura 12 – (a) irradiação versus eficiência (b) temperatura versus eficiência

Fonte: Guiping, 2017

Em seu livro *Basic Photovoltaic Principles and methods*, Hersch [22] explica que os efeitos físicos que determinam a relação da eficiência com a temperatura são bastante complexos, mas em sua maioria, dois efeitos predominam em fazer com que a eficiência caia à medida que a temperatura aumenta:

- À medida que a energia térmica aumenta, as vibrações da rede interferem na passagem livre dos portadores de carga e;
- A junção começa a perder seu poder de separar as cargas.

O primeiro efeito degrada gravemente o desempenho do silício, mesmo em temperatura ambiente. O segundo efeito não ocorre até que as temperaturas de cerca de 300 °C sejam atingidas. Em tais temperaturas, grande número de elétrons em ligações normais de silício são empurrados termicamente de suas posições; no lado do tipo n, eles se juntam e superam em muito os elétrons livres doados pelo dopante tipo n. Ao mesmo tempo, buracos são formados no lado do tipo p, deixados para trás pelos elétrons liberados

termicamente; o silício tipo n começa a perder seu caráter de doador à medida que o número de elétrons livres e lacunas torna-se semelhante. O mesmo processo ocorre no lado do tipo p, que está perdendo seu caráter de receptor. Isso leva a dois efeitos [22]:

- Os portadores de carga agitados termicamente têm tanta energia que cruzam a junção em ambas as direções quase como se o campo de barreira não estivesse lá.
- No final das contas, a própria junção desaparece porque não há mais lados do tipo *n* e *p* para induzi-la. Todos esses efeitos se acumulam para corroer a atividade da célula e a eficiência diminui para quase zero.

Uma vez que as células solares são sensíveis aos aumentos de temperatura, e uma vez que grande parte da energia da luz incidente nas células se torna calor, devido a ineficiências, é frequentemente necessário combinar o material da célula com a temperatura de operação ou resfriá-lo continuamente, removendo o calor extra, indesejado. Às vezes, este último método pode levar a resultados positivos, aumentando a eficiência geral de uma instalação solar se o calor for aplicado para fins úteis.

Difícilmente sistemas fotovoltaicos operam em condições perfeitas e nominais. A temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos se relaciona com a variação da irradiação e a temperatura incidente. A corrente gerada pelo sistema é diretamente relacionada com a irradiação e é muito pouco influenciada pela temperatura, em contrapartida, a tensão e, conseqüentemente, a potência elétrica é reduzida com o aumento da temperatura.

Um semicondutor fotovoltaico só absorve os fótons com energia maior que o band-gap do material, a redução desse limite mínimo levaria à elevação da corrente produzida. No entanto, os elétrons produzidos por fótons com energia maior que a band-gap dissipam sua energia através da produção de calor e se estabilizam em um nível de energia igual ao band-gap. Esse efeito, por consequência, resulta na redução da tensão da célula, neutralizando a elevação da corrente. Portanto, a amplitude do espectro solar, composto por fótons de distintos níveis energéticos, limita a capacidade de conversão máxima de uma célula fotovoltaica [11].

Por sua vez, a temperatura dos painéis, ao aumentar, faz com que a tensão de circuito aberto diminua e a corrente de curto-circuito aumente ligeiramente. Em linhas gerais é possível afirmar que o aumento da temperatura provoca, em primeira ordem, o aumento da recombinação dos pares elétron-buraco, o que diminui a eficiência dos painéis. Esse mesmo aumento da temperatura também provoca a diminuição do gap pelo

alargamento dos níveis de energia, que é a causa da diminuição da tensão de circuito aberto. Por outro lado, o aumento observado na corrente de curto-circuito vem do ligeiro aumento da quantidade de portadores quando a temperatura aumenta e que conduzem antes de se recombinar [13].

Já de acordo com Fadigas [3], quando as células fotovoltaicas, que compõem o módulo, estão em operação, sofrem variações de temperatura que se alteram em função do nível de radiação solar incidente e da temperatura ambiente. Quando há um aumento da temperatura da célula, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) aumenta enquanto a tensão de circuito aberto (V_{ca}) diminui, o que provoca uma alteração na potência entregue pelo módulo.

A Figura 12 mostra a curva I - V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica submetida a irradiação de 1.000 W/m^2 . A temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos está relacionada com a variação da irradiação e a temperatura ambiente. A corrente gerada pelo sistema está diretamente relacionada com a irradiação e é muito pouco influenciada pela temperatura, diferente da tensão que diminui com o aumento da temperatura. Consequentemente, a potência elétrica é reduzida. Isso se deve à tensão da célula diminuir com o aumento da temperatura, pois os elétrons encontram resistência e não passam para as bandas de condução [7].

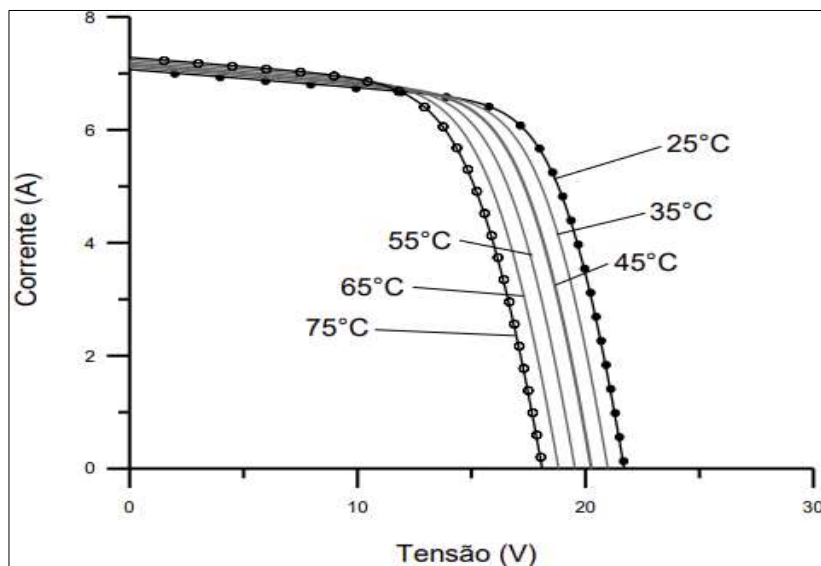


Figura 13 - Influência da temperatura em células fotovoltaicas.

Fonte: Pinho & Galdino, 2014

O ambiente térmico que estabelece o valor instantâneo da temperatura operacional do MF é bastante complexo. Como resultado dos processos internos que ocorrem dentro

do material semicondutor durante sua exposição aos fótons, uma grande parte do fluxo de radiação solar incidente é degradada e liberada como calor. Assim, entender os mecanismos de transferência de calor, como convecção e radiação, devem ser levados em consideração no balanço de energia adequado do módulo, ou seja, no procedimento que leva à previsão de temperatura. Na maioria dos casos, esses mecanismos afetam tanto a parte frontal quanto a posterior do módulo, pois, em instalações típicas, geralmente é feita uma providência para facilitar a remoção do calor rejeitado para que o módulo possa operar da forma mais eficiente possível [22].

Já as perdas de energia devido à baixa temperatura são, no mínimo, mais complexas e menos compreendidas. No entanto, elas são importantes apenas para aplicações fotovoltaicas no espaço. Dois efeitos são considerados importantes: com a queda de temperatura, a energia térmica é menos capaz de liberar cargas de átomos dopantes ou do silício intrínseco. A mobilidade dos portadores de carga gerados pela luz cai porque eles colidem com mais frequência com doadores ou aceitadores ionizados em regiões do tipo n e p , respectivamente. Os doadores e aceitadores não são protegidos por nuvens de portadores de carga termicamente ativados. Em temperaturas muito baixas há tão pouca energia térmica que até mesmo os dopantes se comportam como se fossem átomos de silício normais [22].

Por exemplo, no material do tipo n , os átomos doadores retêm seus elétrons extras; no material do tipo p , os buracos permanecem fixos no lugar porque os elétrons são menos propensos a saltar de suas posições normais para preenchê-los. Uma vez que os lados do tipo n e p não exibem mais seu caráter dopado, a junção desaparece, lembrando que uma junção se forma apenas em resposta a concentrações desequilibradas de doador / aceitador [22].

2.5. CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E GERAÇÃO DE ENERGIA

Para realizar os testes de performance e funcionamento dos módulos solares, podem ser definidas várias condições de operação, variando os parâmetros para simular situações reais do dia a dia. A condição principal é chamada de Condições Padrão de Teste (CPT), ou *Standard Test Conditions* em inglês, cuja sigla fica STC. A condição de células sujeitas a temperatura nominal (SCTN), ou NOCT da sigla em inglês para *Nominal Operating Cell Temperature*, também é bastante utilizada pelos fabricantes, e normalmente também é disponibilizada no datasheet dos módulos fotovoltaicos, pois se aproxima bastante das condições reais de funcionamento das placas [23].

O desempenho dos módulos fotovoltaicos geralmente é especificado para as condições de padrão de teste, que são: incidência de radiação de 1000 W/m^2 , 1.5 AM (massa de ar), e 25°C . No entanto, o desempenho em condições reais de campo difere do que é sugerido, e seu conhecimento é de grande importância para a seleção correta de produtos. Conhecer a eficiência e o rendimento energético de forma mais precisa é fundamental [28].

Segundo estudos de Souza *et al* [28], há uma correlação entre a potência de saída dos módulos fotovoltaicos e a temperatura dos módulos. Nesse estudo foi possível concluir que para as usinas instaladas no estado de Mato Grosso do Sul (MS), a potência de saída gerada não atingiu o nível desejado. Isso ocorre porque o dimensionamento foi feito considerando os dados fornecidos pelos fabricantes, sendo que eles foram obtidos em condições de teste padrão (CTP).

De Souza *et al* [28] realizaram análises estatísticas que mostraram as diferenças entre o que foi determinado em laboratório e as condições em campo. Foi observado que a correlação entre a eficiência média dos módulos em relação à velocidade dos ventos, tem uma correlação negativa. Ou seja, o vento não tem influência significativa. Mas a correlação positiva é entre a temperatura ambiente que influencia na temperatura dos módulos.

Em seu estudo de correlação entre eficiência e energia, Skoplaki [29] mostrou que, do ponto de vista do projetista do sistema fotovoltaico, o interesse final é o dimensionamento adequado da instalação para um determinado serviço e, portanto, o rendimento real de energia da matriz relevante. A fim de estimar a energia, o projetista começa com o desempenho relatado do fabricante do módulo PV de seus módulos em condições de teste padrão (CTP). Mas tais valores de energia/potência são úteis apenas para comparar o desempenho de pico de diferentes marcas e tipos de módulo. Ou seja, a classificação CTP não é capaz de prever exatamente quanta energia um módulo irá produzir no campo, ou seja, quando ele opera em condições reais. Logo, conclui-se que, tanto a eficiência elétrica quanto a potência de saída de um módulo fotovoltaico dependem linearmente da temperatura de operação.

Segundo Suwapaet e Boonla [23], foi realizado um experimento com células fotovoltaicas para identificar a influência de temperaturas elevadas, entre 47°C e 57°C , sobre a potência de saída. Os resultados, em comparação com as especificações do módulo estudado CTP (40 Wp a 25°C), mostram que os MFs produzem menor potência de saída com as temperaturas elevadas, cerca de 23% a 33% de redução.

As várias correlações que foram propostas na literatura representam equações de trabalho simplificadas que se aplicam a módulos fotovoltaicos ou arranjos fotovoltaicos montados em estruturas independentes, para coletores fotovoltaicos/térmicos. Eles envolvem variáveis ambientais básicas, enquanto os parâmetros numéricos não são apenas dependentes do material, mas também do sistema. Assim, deve-se ter cuidado ao aplicar uma expressão particular para a eficiência elétrica ou a potência de saída de um módulo ou matriz fotovoltaica, uma vez que cada equação foi desenvolvida para uma geometria de estrutura de montagem específica ou nível de integração do edifício. O mesmo se aplica à escolha de um método de classificação de um MF, cujos detalhes e limitações devem ser muito claros para o usuário em potencial [30].

Com o levantamento bibliográfico do comportamento das placas fotovoltaicas fica claro que a conversão de energia solar em energia elétrica apresenta fatores que possibilitam realizar melhorias na produção de energia, sendo possível maximizar a potência de saída dos módulos. Dentre os fatores que mais influenciam essa produção está a temperatura.

Muitos autores apresentaram métodos e fórmulas que padronizam o comportamento dos módulos de silício com relação a temperatura. Porém, como foi apresentado, cada módulo tem suas características típicas. Assim, com a intenção de realizar um estudo experimental para quantificar a produção de energia e maximizar sua potência, foram utilizados, neste projeto, sistemas que proporcionem um resfriamento das placas e consequentemente um incremento da potência de saída. Desta forma é necessário realizar testes comparativos entre módulos para identificar se houve uma melhora na produção de potência de saída.

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve as etapas que foram realizadas durante o desenvolvimento do projeto, procurando detalhar os passos intermediários. O objetivo principal é retirar calor de um dos Módulos Fotovoltaicos (MF), denominado doravante como placa de teste, para analisar e comparar a energia produzida com outro módulo idêntico, denominado módulo de controle, ambos mantido nas condições ambientes. Foram testadas diferentes maneiras para resfriar a placa de teste, sendo elas:

- Com um ventilador, aplicado ora na superfície, ora na parte de trás da placa;
- Resfriando o módulo com uma pastilha Peltier e;
- Bombeando água na superfície do MF.

3.1. MONTAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico do projeto é constituído por dois módulos fotovoltaicos (MFs) de 51 *Wp*, de silício policristalino, conectados de forma independente aos sistemas de medidas. A melhor condição de obtenção da radiação solar máxima no local é colocar o painel solar voltado para o norte geográfico, com ângulo de inclinação igual a 33°, que é o valor da latitude local +10°. Os módulos utilizados são da fabricante KYOCERA, com área de 0,5 *m*², de dimensões de 1,00 *m* por 0,5 *m*. A Tabela 01 mostra as especificações desses módulos fotovoltaicos.

Os módulos fotovoltaicos possuem as mesmas características elétricas informadas pelo fabricante. Porém, como foi analisado por de Souza *et al* [28], os dados disponibilizados podem apresentar diferenças das medidas reais. Com isso, é importante que sejam feitas medições de tensão de circuito aberto e corrente de ambos os MFs para analisar as similaridades entre as placas com relação a potência de saída.

Tabela 1 - Informações do fabricante do módulo fotovoltaico

Marca / modelo	Kyocera LA361G51S
Dimensões do módulo (<i>m</i>)	1,00 x 0,5
Área do módulo (<i>m</i> ²)	0,50
Potência Máxima (<i>W</i>)	51
Corrente Máxima I_{max} (<i>A</i>)	3,25
Tensão de circuito aberto V_{co} (<i>V</i>)	21,2

A Figura 14 mostra como as placas foram posicionadas para receber a mesma quantidade de radiação solar. Dessa forma é possível analisar a influência da temperatura quando são instalados os sistemas que retirem o calor dos módulos.

Todo equipamento elétrico consome potência para funcionar, em geral expressa em *Watts* (*W*). Sabendo da quantidade de energia informada pelo fabricante, é necessário especificar a carga que será alimentada pelos módulos. Assim, para calcular o consumo de um equipamento basta multiplicar sua potência pelo tempo de funcionamento em horas no dia. O resultado final será dado em *Wh/dia*, conforme a Equação (3):

$$C = P_{aparelho} \times h \quad (3)$$

onde *C* é o consumo; *P* a potência do aparelho em *Watts* (*W*); e *h* são as horas de funcionamento



Figura 14 – Módulos fotovoltaicos em condições normais.

Cada módulo irá alimentar duas lâmpadas de corrente contínua com 60 W, como mostra a Figura 15. Logo, essas cargas já atendem à demanda produzida pelas placas PV. As lâmpadas foram as cargas usadas para todas as medições realizadas nesse projeto.

Como são dois painéis solares no experimento, um foi classificado como módulo de controle (MF1) e o outro é o módulo de teste (MF2). O módulo de controle é a placa solar que funcionou em condições normais, e a placa testada foi a que recebeu os sistemas de resfriamento descritos a seguir.



Figura 15 - Lâmpadas de 60 W alimentadas pelos MFs.

3.2. RESFRIAMENTO COM VENTILAÇÃO FORÇADA

Com o objetivo de diminuir a temperatura operacional e maximizar a produção de energia da placa de teste, foi instalado um ventilador com a intenção de retirar o calor da superfície de um dos módulos. Em seguida foram realizadas medições de tensão e de corrente para comparar se há ganhos de potência na saída da placa, com relação à placa de controle.



Figura 16 – Posição das placas com o ventilador.

O ventilador foi colocado em uma região onde o mesmo possa retirar a temperatura da placa de forma uniforme, pensando nisso o modulo que tem sua parte de baixo, mais próxima do solo foi instalado o ventilador. Desta forma por convecção, já que o ar quente faz um movimento ascendente, a ventilação de baixo para cima facilitaria na retirada do calor da superfície da placa.

O ventilador usado é de 12 V e tem potência de 21 W. O mesmo estava ligado a uma terceira placa fotovoltaica independente. Foram tomados todos os cuidados para que o ventilador não fizesse sombra na placa e não interferisse na medição. Quando necessário, foram feitas mudanças de posição do ventilador ao longo do dia, ou seja, ora estava no lado esquerdo ora estava no lado direito da placa como mostra na Figura 16.

Para determinar a temperatura das placas fotovoltaicas foi utilizado um termômetro infravermelho do tipo Hi8us[®], modelo HG01, versão V2. Com o termômetro foi possível medir a temperatura da superfície dos módulos. O termômetro foi utilizado em todas as etapas do projeto.

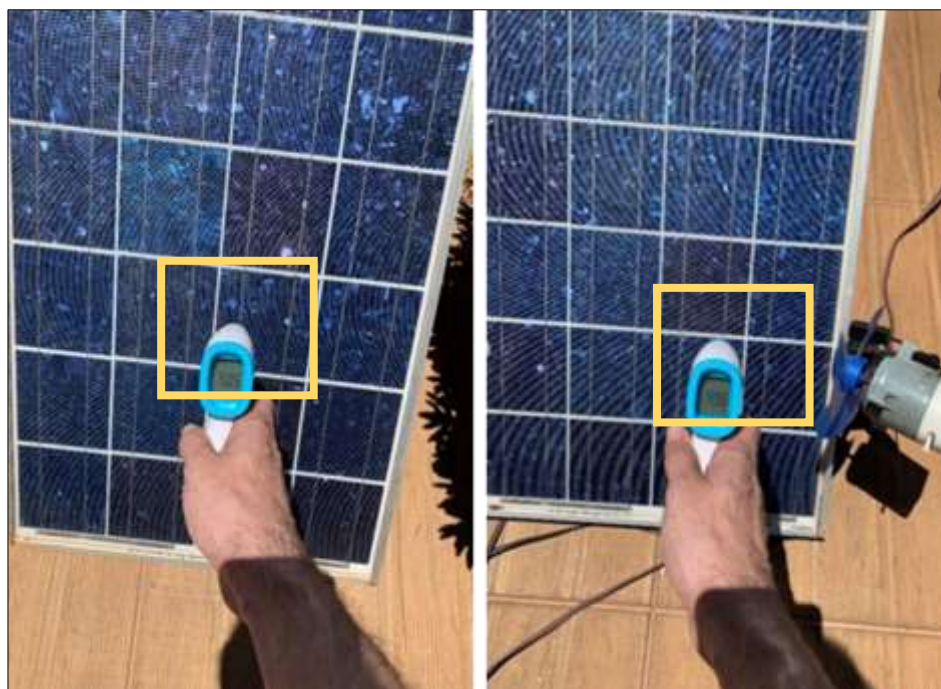


Figura 17 – Medição da temperatura na placa, com e sem o ventilador.

O termômetro foi utilizado, a uma distância padrão de todas as medidas, em torno de 5 cm da superfície das placas e sempre no mesmo ponto em relação às duas placas, como indicado na Figura 17. Preferencialmente foi aferida a temperatura dos módulos onde o ventilador mais influenciava na retirada de calor, sendo a mesma região para a outra placa.

A posição do ventilador não era mantida constante ao longo do dia, pois a mudança da orientação dos raios solares poderia acarretar sombreamento nas placas. para evitar esse problema, era necessário fazer mudanças em sua posição.



Figura 18 – Detalhe da posição do ventilador.

Com o objetivo de realizar medições sem nenhuma forma de possível interferência de sombreamentos na placa, o ventilador também foi colocado na parte traseira do módulo. A ventilação traseira, representada na Figura 18, no entanto, não acarretou nenhuma alteração na temperatura do módulo PV, resultando em total equivalência da produção de energia nesse caso. A parte traseira dos módulos solares são compostas por uma grossa e resistente camada de material do tipo lona plástica, que funciona como isolante térmico. Assim, a ventilação traseira não apresenta interesse tecnológico.

3.3. RESFRIAMENTO COM PELTIER

A pastilha termoelétrica Peltier é constituída por duas chapas de material isolante, com uma malha de material condutor na superfície interna de cada chapa. Entre as malhas do material condutor estão localizados diversos semicondutores do tipo n e p . Em função da ordenação do material semiconductor e o fluxo contínuo de corrente gerada por uma fonte de corrente contínua, acontece o efeito Peltier, resfriando um lado da placa e esquentando o outro, transformando assim energia elétrica em térmica.

A Peltier pode ser usada tanto para esquentar como resfriar a região onde se deseja controlar a temperatura. Neste projeto foi realizado o estudo do resfriamento. Entre as vantagens do uso dos módulos termoelétricos, podemos destacar: leveza, precisão no controle de temperatura, baixo ruído, ausência de vibração e de gás, e menor manutenção [31].



Figura 19 – Detalhe da placa Peltier e do dissipador de calor.

Pela característica da pastilha Peltier de resfriar um de seus lados, e consequentemente aquecer o outro, a face que resfria foi colocada na parte de trás no MF2. A superfície a ser resfriada é, nesse caso, a parte de trás do MF, pois claramente se o Peltier fosse instalado na frente, as células PV não receberam luz do Sol.

Em contato com a superfície que foi aquecida coloca-se um dissipador de calor, como mostra a Figura 19. Esse item é de fundamental importância a fim de evitar que o calor gerado influencie a face do Peltier a ser resfriada. Para otimizar a dissipação de calor, foi colocado um ventilador para arrefecer a face aquecida.

3.4. RESFRIAMENTO COM FLUXO LAMINAR

Nesta parte do projeto foi montado uma estrutura com uma bomba de corrente contínua que retira água de um reservatório e joga na superfície de uma das placas PV. A bomba d'água utilizada é do tipo submersa com características elétricas: 12V e corrente de 0,380mA, tendo uma potência de 5W. Essa bomba tem capacidade de bombear até 280l/h. Trabalha abaixo do nível da água, e é alimentada por outra placa fotovoltaica independente. Para a realização das medidas, a bomba ficava ligada durante 1 minuto resfriando a superfície do módulo, como mostra a Figura 20. Esse tempo era suficiente para equilibrar a temperatura da placa, e em seguida era realizada a medição dos MFs.

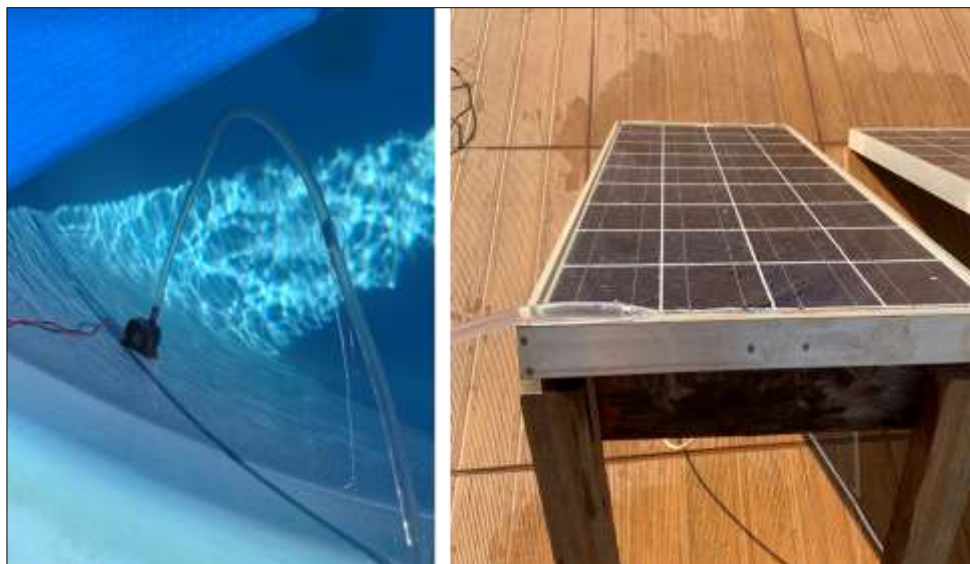


Figura 20 - Bomba instalada no reservatório para resfriar a superfície do MF.

3.5. MEDIÇÃO DA POTÊNCIA DE SAÍDA

Para obtenção dos dados foram utilizados multímetros colocados de forma a mostrar a tensão de circuito aberto e corrente de circuito fechado das placas, que em seguida foram inseridos em planilhas, para determinar as potências de saída dos módulos

de controle (MF1) e de teste (MF2). Para calcular a potência gerada pelo sistema é utilizada a Equação (4):

$$P = V \cdot i \quad (4)$$

onde V (Volts) é a tensão elétrica gerada e i (Ampère) é a corrente elétrica.



Figura 21 – Arranjo dos multímetros para medições.

Foram utilizados 4 multímetros sendo dois convencionais para a medição da corrente de circuito fechado, e dois da marca Keithley para a medição da tensão de circuito aberto (V_{ca}) das placas, como mostra a Figura 21. Para o cálculo da potência gerada de cada dia de experimento, foram utilizadas todas as medidas de tensão e corrente coletadas de 15 em 15 minutos no período das 9:00 h até as 16:00 h, considerando que nesse período há maior incidência de radiação solar. A temperatura na superfície (vidro) dos módulos foi considerada como a temperatura da célula, em $^{\circ}\text{C}$

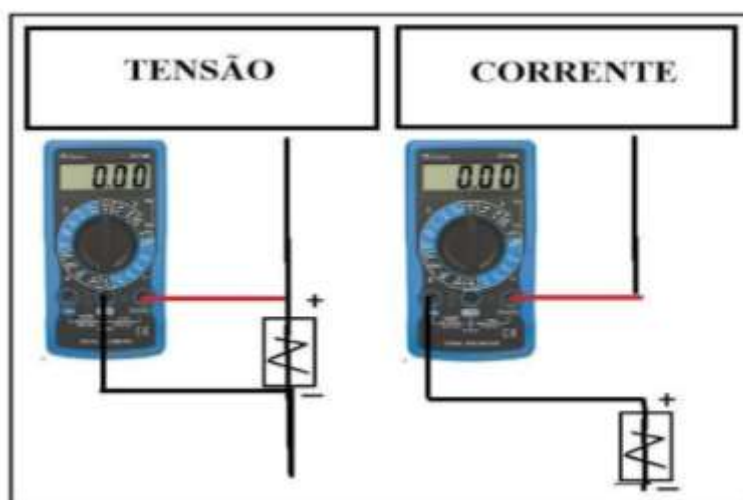


Figura 22 – Esquema da medição de corrente e tensão.

Para medir a corrente do circuito elétrico, foi ligado um multímetro de modo que meça a amperagem do circuito. As medidas de voltagem foram feitas utilizando-se o multímetro de modo que possa medir a tensão de circuito aberto. A diferença de potencial foi obtida entre as extremidades dos módulos. A Figura 22 mostra o arranjo dos fios nos multímetros.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos estão descritos individualmente neste capítulo, de acordo com os objetivos iniciais propostos, e são relacionados à utilização de sistemas que visam melhorar a potência de saída de módulos fotovoltaicos. Os sistemas estudados para resfriar o módulo são: um ventilador, uma placa de efeito Peltier; e bombeamento d'água, cada um deles estudado separadamente.

As primeiras medições foram feitas para monitorar a potência de saída dos MFs em condições normais, com o objetivo de verificar suas características em operação e analisar se elas possuem similaridades na potência de saída. Assim, foi considerado que essa medição é uma amostra branca. Consequentemente, foi possível escolher os MFs que não tinham grandes diferenças e em seguida foram realizadas as análises dos dados nas outras etapas do projeto.

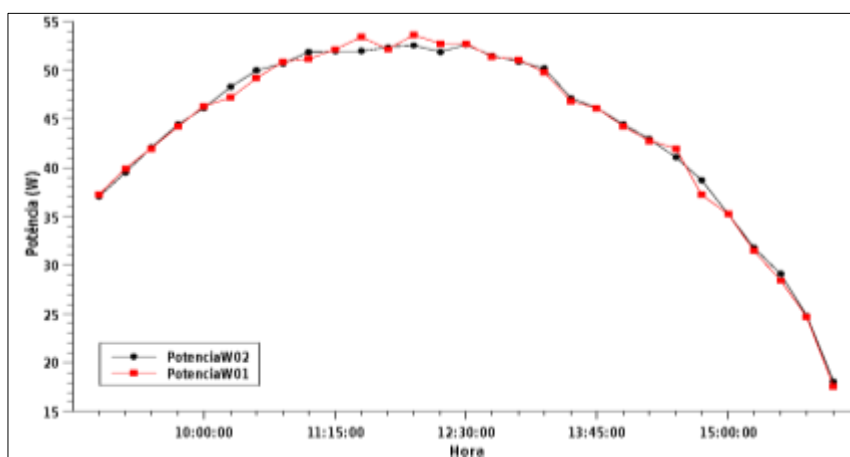


Figura 23 – Gráfico de potência de saída dos módulos em condições idênticas.

A Figura 23 mostra o gráfico da medição das potências dos módulos sem nenhuma interferência de sistemas de resfriamento. Esse resultado mostra duas curvas características de MFs idênticos. A conversão de energia aumenta durante o período da manhã até alcançar seu ponto máximo de potência nos períodos entre 11h00m até 14h00m, pois aproveita a energia solar nos ângulos de azimute em que a radiação solar é perpendicular aos módulos, até decair com a diminuição da radiação ao final do dia.

Para calcular a energia produzida foi aplicada a integral para as potências de saída dos MFs a cada 15 minutos, como pode ser visto na Equação 5. Com os valores obtidos nessa integral, foi feito o comparativo das produções de energia e demais análises de produção de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.

$$E_{Placas} = \left(\frac{(Pot_{01} + Pot_{02}) \times 15}{2 \times 60} \right) + \left(\frac{(Pot_{02} + Pot_{03}) \times 15}{2 \times 60} \right) + \left(\frac{(Pot_{n-1} + Pot_n) \times 15}{2 \times 60} \right) \quad (5)$$

Analisando a Figura 24 foi plotado o gráfico da produção de energia foi gerada pelos MFs ao longo das 7 horas de medição, ou seja, é o somatório das potências de saída registrados pelos módulos ao longo do dia. Pode-se observar que as placas produziram a mesma quantidade de energia tendo uma diferença mínima residual de somente 0,15% na energia total de saída da placa 02 com relação à placa 01.

Tabela 2 - Somatório de energia gerada pelos MFs.

SOMATÓRIO DE ENERGIA	MF1	MF2	Diferença
	314,12 Wh/dia	313,66 Wh/dia	0,15%

Na Tabela 02 observa-se que a produção de energia foi quantificada para os dois MFs. Em seguida, a partir dos dados coletados, ficou determinado que o módulo de controle é a que produziu mais energia (MF1). Com isso, a placa de teste (MF2) é iniciada com uma diferença desfavorável nominal de 0,15%.

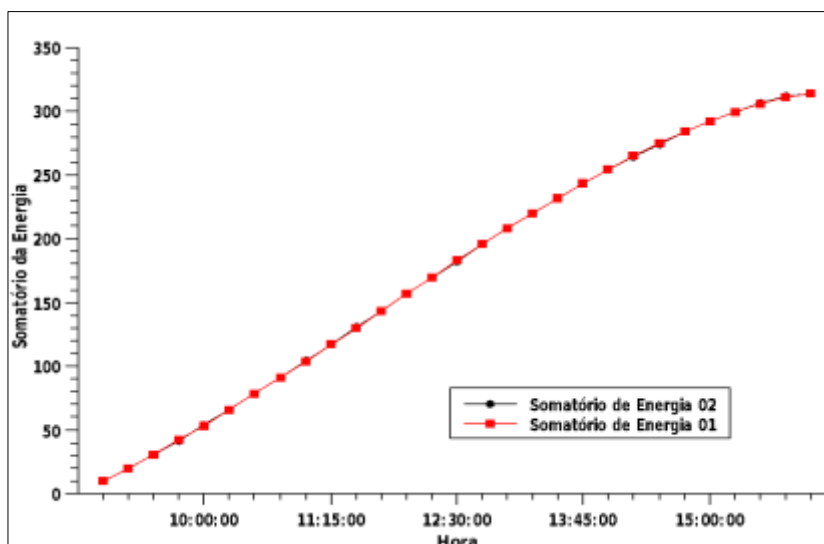


Figura 24 - Somatório da energia das placas ao longo do dia

4.1. PLACA RESFRIADA POR VENTILAÇÃO

A ventilação na superfície foi usada para retirar o calor da placa fotovoltaica de teste, visando estudar o consequente aumento na produção de energia. A Figura 26 mostra essa influência. As barras cinzas são as diferenças de potência de saída, em porcentagem, no momento das medições.

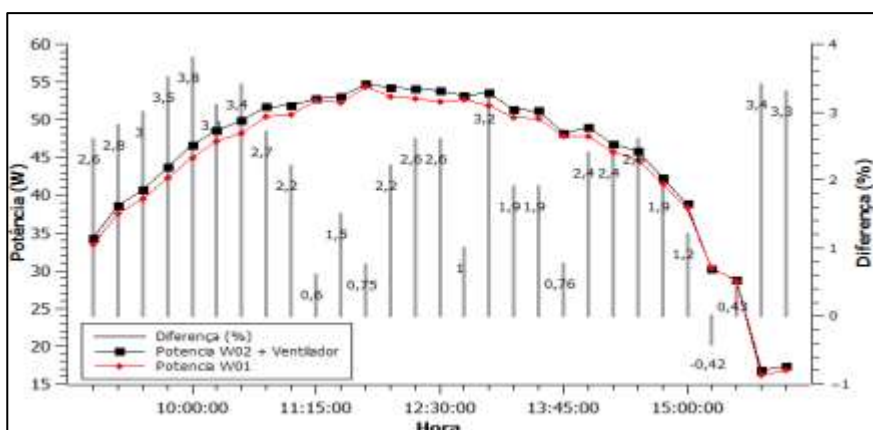


Figura 25 - Potência comparativa do MF resfriado pelo ventilador

Assim, analisando o gráfico é possível observar que o MF2 produz, durante praticamente todo o período de medição, mais potência que a MF1. Às 10:00 horas houve a maior diferença entre os módulos, quando se atingiu 3,62% de acréscimo na produção do MF2 com relação a MF1. Durante o período de 11h15m até as 13h00 as placas não tiveram diferenças relevantes na geração de energia, isso porque nesse período a radiação solar incide de forma mais perpendicular sobre as placas e a retirada do calor não causou influência.

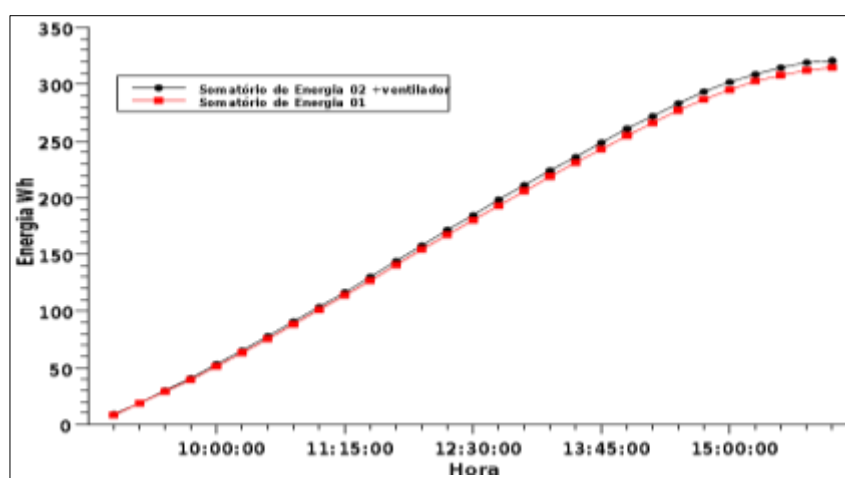


Figura 26 – Somatório das energias geradas pelos MFs ao longo do dia

Tabela 3 - Somatório de energia das MFs, com ventilação

SOMATÓRIO DE ENERGIA	MF1	MF2	Diferença
	314,48 Wh/dia	321,26 Wh/dia	2,16%

A partir da Figura 26, que representa o gráfico do somatório das energias produzidas pelas placas durante o dia, pode-se fazer a comparação da geração de energia da placa de controle com a da placa de teste, na qual foi utilizado ventilação forçada para retirada de

calor. O resultado mostra que a ventilação fez com que o MF2 tivesse um acréscimo acumulado na energia produzida ao longo do dia de 2,16% em comparação com o MF1, indicado na Tabela 3. Esse resultado demonstra que ao resfriar a superfície placa há ganho de energia ao longo dia.

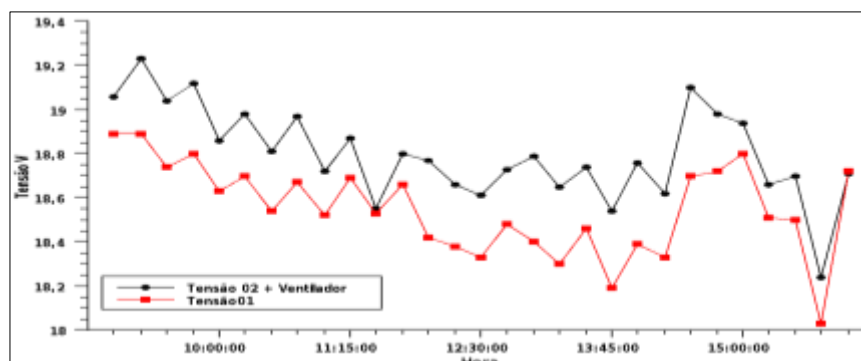


Figura 27 – Tensão gerada nos MFs ao longo do dia

A ventilação na superfície da placa de teste acarreta o resfriamento da placa. Como a potência de saída é diretamente proporcional à tensão, que é a grandeza escalar mais influenciada pela variação da temperatura, a ventilação forçada faz com que a tensão aumente, ou seja, aumentando a potência gerada. Analisando a Figura 27, o gráfico plotado mostra que o MF2 sempre produziu, durante o dia, mais tensão que o MF1. A placa testada apresentou valores máximos e mínimos de 19,23V e 18,24V, respectivamente, enquanto a placa de controle apresentou os valores foram de 18,89V e 18,03V. Os valores de tensão do MF1 ficaram mais próximos da placa de teste no final do dia, devido a diminuição da radiação solar e da temperatura operacional das mesmas, como representado na Figura 28.

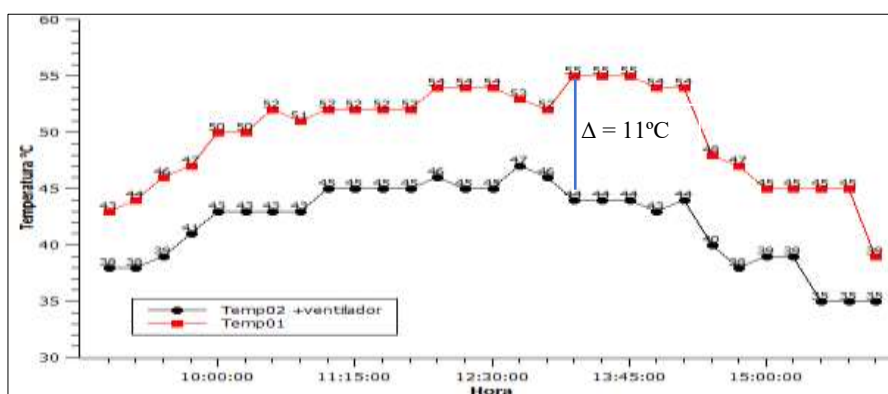


Figura 28 – Temperatura dos MFs ao longo do dia.

Com a retirada do calor pela ventilação forçada, a Figura 28 mostra o resultado das medidas de temperatura de operação dos módulos. É possível observar que o MF2 teve sua

temperatura sempre abaixo do MF1, com a diferença mínima de 5 °C nas extremidades do dia. A placa de teste teve sua temperatura, às 13h45m, medida em 44 °C, já a placa de controle estava à temperatura de 55 °C. Essa foi a maior diferença entre elas, ou seja, 11 °C. Considerando esse ponto da medição, a potência teve um aumento em relação a placa de controle de mais de 2

Com a proposta de facilitar a ventilação no módulo, a segunda etapa deste mesmo item foi colocar o ventilador em uma posição que retirasse o calor da parte traseira da placa de teste. Dessa forma o ventilador não sombreava a superfície, facilitando seu manuseio. Porém, através dos dados obtidos, verificou-se que a ventilação traseira não atende às expectativas. A diferença de potência da placa de teste foi de apenas 0,17%, na soma das energias geradas ao longo do dia, pois a diferença de potência resultante foi consideravelmente menor. Em suma, retirar calor por ventilação forçada da parte de trás dos módulos fotovoltaicos não é um processo eficiente.

4.2. PLACA RESFRIADA COM PELTIER

Nesta etapa do projeto foi acoplado um módulo termoeletrico do tipo Peltier cuja aplicação tem a função de resfriar a parte traseira da placa geradora de energia fotovoltaica. Para ter uma melhor capacidade de resfriamento, é necessário que a face quente da pastilha, que produz calor, seja conectada a um dissipador. Assim, a face fria torna-se mais eficiente e produz maior diferença de temperatura, resfriando a parte posterior do módulo fotovoltaico onde está instalada, e que será analisado. Caso a remoção do calor gerado pela não ocorra, a placa Peltier entra em equilíbrio térmico e não gera nem frio nem calor. Partindo desse entendimento, isso foi colocado um dissipador de metal e um ventilador na superfície quente da placa Peltier.

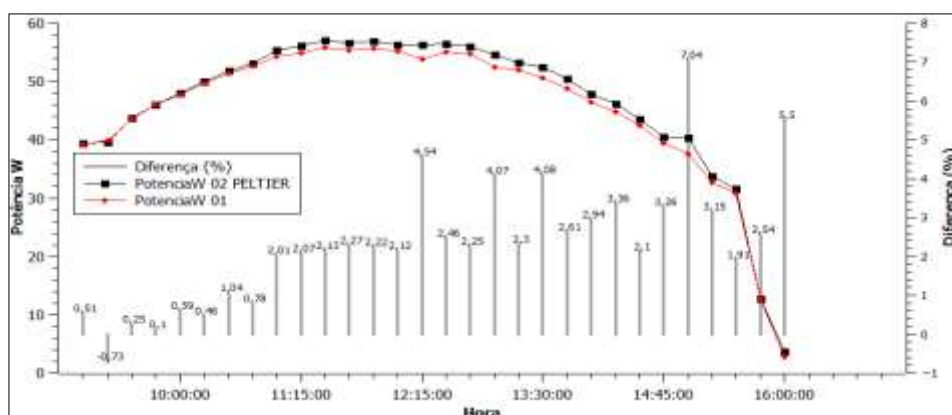


Figura 29 – Potência comparativa do MF resfriado com Peltier.

Na Figura 29 está plotado a comparação da geração de potências da placa de controle, aquela sujeita somente às condições ambientes, e da placa de teste, com a Peltier acoplada. Observando a Figura 29 é possível analisar que as placas produziram, praticamente, a mesma quantidade de potência de saída nas primeiras horas de medição. Mas com o aumento da incidência solar sobre a placa que alimenta a Peltier, também houve o aumento no efeito termoelétrico e ocorreu um impacto na temperatura de operação do módulo. Dessa forma, a face fria começa a ter um resultado no MF de teste, aumentando a produção de potência de saída gradativamente. Isso é nitidamente observado a partir das 11h00m, quando a MF2 produziu 2% a mais que a MF1. Às 15h00m foi observada a maior diferença de produção, que chegou a ser 7% superior módulo de teste do que no módulo de controle.

Com relação à temperatura de operação, há uma diferença. No módulo de teste MF2 a média de temperatura foi de 18°C, enquanto no MF1 foi de 45°C. Os valores máximos e mínimos de temperatura foram de 20 °C e 16 °C para o módulo de teste, enquanto para o módulo de controle esses valores são de 52 °C e 36 °C, respectivamente. A maior diferença de temperatura entre as placas foi de 33 °C.

A Peltier aplicada na placa de teste tem como dimensões $3 \times 3 \text{ cm}^2$, atuando em uma área de 9 cm^2 . Isso corresponde a 18% da área total do módulo testado. É nesse local que foram feitas as medidas de temperatura, plotadas no gráfico da Figura 31.

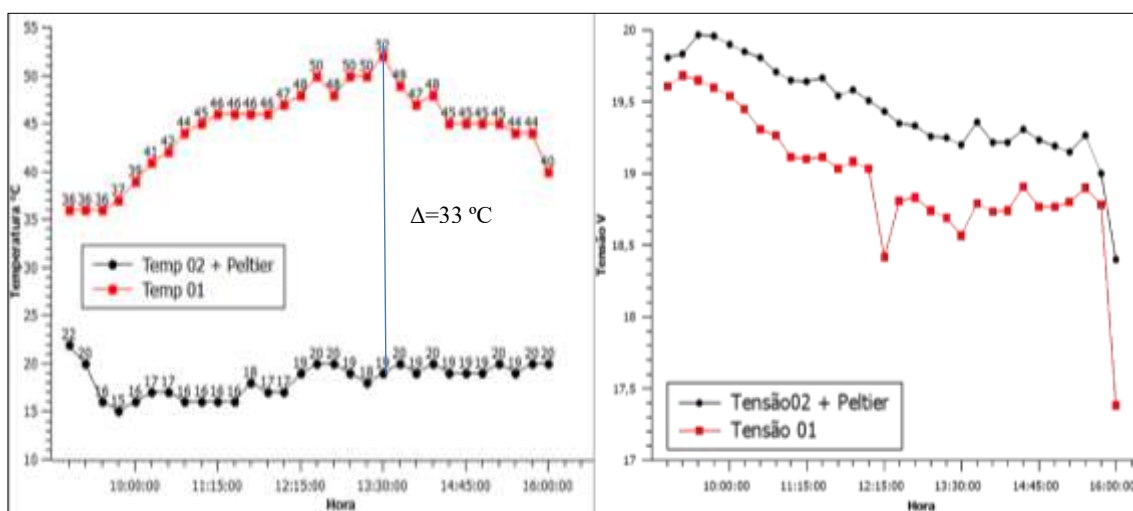


Figura 30 – Temperatura e tensão comparativas do MF resfriado via Peltier.

Os resultados mostrados na Figura 30, para a tensão de circuito aberto (V_{ca}) do painel testado, apresentaram um valor maior do que os mesmos dados para o painel sem resfriamento. Isso vale para todo o tempo de teste. Os maiores valores de tensão do MF2 e

do MF1 foram 20 V e 19,6 V, respectivamente, sendo nas primeiras medições. As últimas medições do dia são as que trouxeram os menores valores de tensão, 18,34 V e 17,38 V, isso porque nesse horário a radiação incidente na placa diminui.

Para Bühler e Krenzinger [32], a tensão apresenta uma variação linear com a temperatura. Para os módulos de silício policristalinos, a tensão decai de acordo com um coeficiente β , que apresenta valores da ordem de $-2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ por célula.

A diminuição da tensão de circuito aberto é devida a uma variação com a temperatura da corrente de saturação reversa e da corrente de curto-circuito. Entretanto, o coeficiente β pode ser atribuído principalmente ao incremento exponencial da corrente de saturação reversa. Essa corrente é fruto dos portadores de carga minoritários criados por excitação térmica. Assim, a tensão de circuito aberto apresentada no gráfico da Figura 30 indica, também, que, com a diminuição da temperatura, a tensão aberta aumenta.

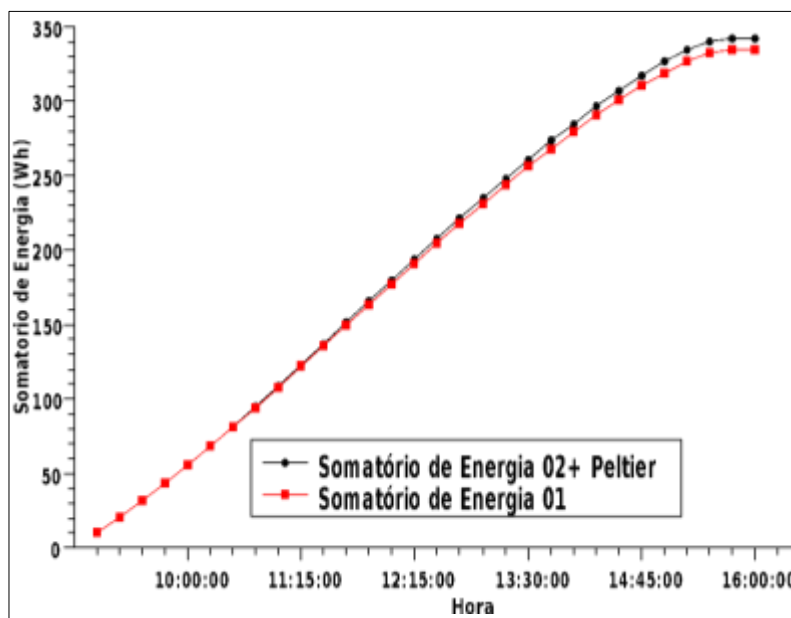


Figura 31 – Energia comparativa do MF resfriado com placa Peltier.

O gráfico das somas das energias produzidas pelos MFs, representadas na Figura 31, indica que, a atuação da placa Peltier sobre o módulo, para resfriá-lo, provoca um aumento 2,3% na potência de saída com relação ao produzido por MF1. A Tabela 04 quantifica a produção de energia de cada placa ao longo da medição.

Tabela 4 - Energia comparativa gerada pelos MFs com Peltier

SOMATÓRIO DE ENERGIA	MF1	MF2	Diferença
	335,02 Wh/dia	342,72 Wh/dia	2,3%

4.3. PLACA RESFRIADA COM ÁGUA

Nessa etapa do projeto foi observado o desempenho do painel solar sendo submetido a um sistema de refrigeração a água. Diferente do que foi realizado na etapa anterior, onde a Peltier atuava em uma área pequena no módulo testado, nesta etapa o bombeamento foi direcionado para que a água percorra uma maior área da superfície do módulo.

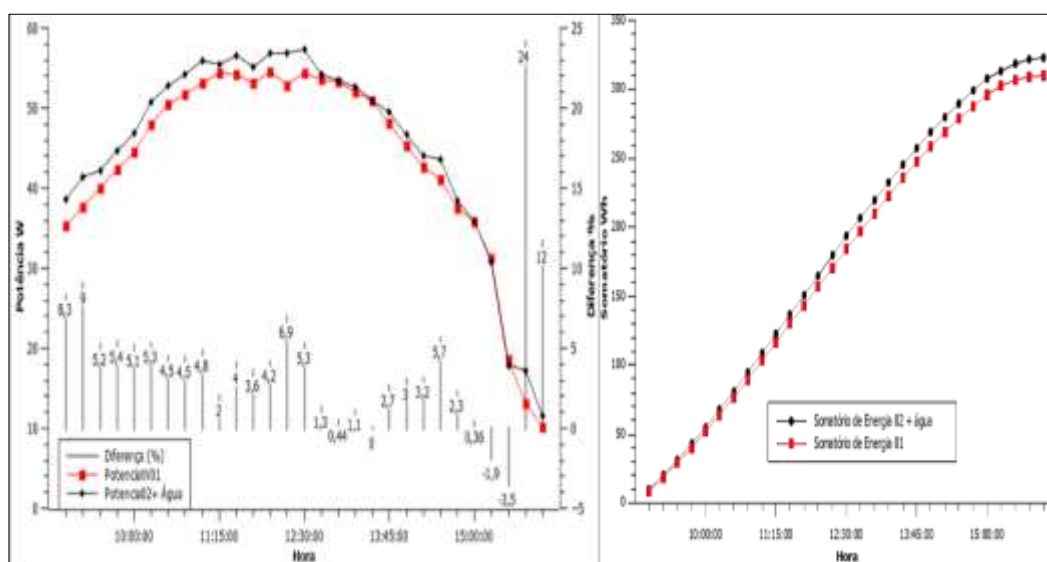


Figura 32 – Desempenho do MF considerando o resfriamento com água

Observando o gráfico da Figura 32 da potência de saída dos módulos fotovoltaicos, pode-se observar que, com ambas recebendo a mesma irradiação solar em todos os momentos, a potência de saída da placa testada teve um desempenho maior no começo das medições. A maior diferença entre os módulos nesse período foi de 9%, mostrando que a refrigeração da placa na superfície retira o calor e resulta no aumento de potência. Porém, nos horários entre 12h45m até 13h45m, a diferença observada entre as potências geradas ficou abaixo dos 2%. Isso se deve à posição do Sol, que incide de forma mais perpendicular sobre os módulos. Fora desse intervalo, os ganhos foram mais significativos.

Tabela 5 - Somatório de energia dos MFs, com água

SOMATÓRIO DE ENERGIA	MF1	MF2	Diferença
	310,60 Wh/dia	323,29 Wh/dia	4,09 %

A comparação do somatório das energias produzidas ao longo do dia resultante para os dois MFs acabou totalizando um ganho de 4,09 % da placa de teste sobre a placa de controle. Como a água teve contato com uma área maior da superfície do MF. Outra

vantagem que é possível observar utilizando a aplicação da água na superfície é que, além de resfriar o MF, há a possibilidade de manter a superfície sempre limpa, sem sujeira, melhorando a incidência da radiação solar sobre o MF.

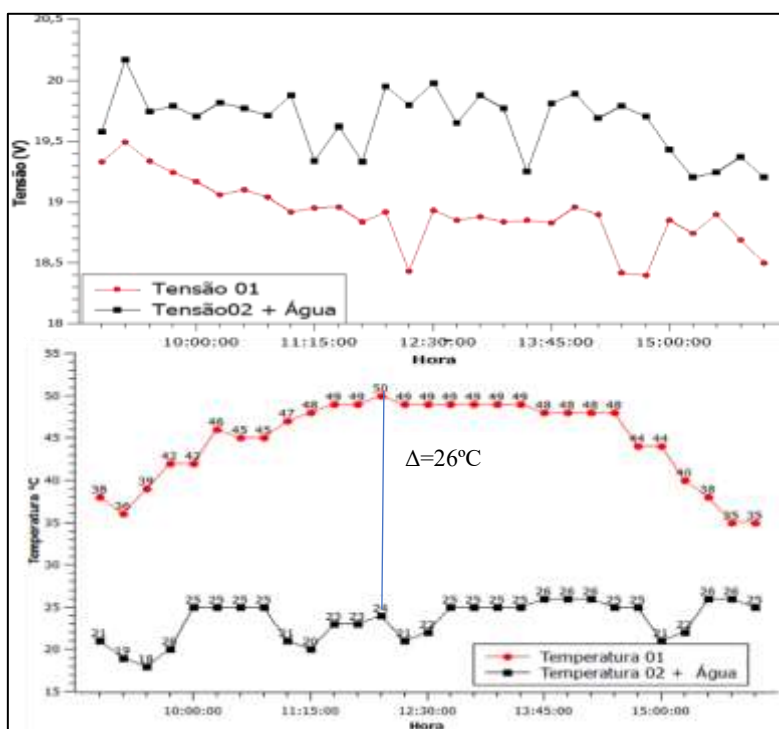


Figura 33 – Temperatura e tensão do MF com a água.

Analisando os dados da Figura 33 conclui-se que, para o painel resfriado, os valores de V_{ca} localizam-se na faixa de 19,5 – 20,0 V. Os valores de V_{ca} do painel de controle diminuíram enquanto a sua temperatura aumentava. Os resultados mostram que a V_{ca} depende mais da temperatura do painel do que da incidência de radiação solar. Conforme a temperatura aumenta, o gap do semiconductor encolhe e a tensão de circuito aberto diminui [11]. Dessa forma, o painel testado, que apresentava menor temperatura de trabalho, produz mais V_{ca} do que o painel sem resfriamento.

O sistema de resfriamento foi realizado a cada 15 minutos por 1 minuto de duração, com a taxa de fluxo de aproximadamente $2 L/min$. Isso era suficiente para atingir o equilíbrio da temperatura resfriada no painel de teste. A temperatura da água utilizada é estável, sempre na faixa entre 20 a 25 °C, com essa pequena variação decorrente das condições ambientes do dia de medições. Sempre foi tomado o devido cuidado para se certificar que a temperatura do painel testado estava na mesma temperatura da água do reservatório. O tempo escolhido para o bombeamento é suficiente para a troca de calor entre o painel e a água estabilizar a temperatura do sistema.

5. CONCLUSÃO

A temperatura operacional desempenha um papel central no processo de conversão fotovoltaica. Tanto a eficiência elétrica e, portanto, a saída de energia de um MF depende diretamente da temperatura de operação. Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de placas fotovoltaicas com sistemas que possam retirar calor e resfriar os módulos, consequentemente otimizando a geração de energia. Foram analisadas comparações entre duas placas fotovoltaicas, uma de controle e outra com um sistema de resfriamento. Três diferentes sistemas de resfriamento foram estudados, separadamente. O primeiro sistema foi a instalação de um sistema de ventilação forçada na superfície, para remover o ar quente da superfície do painel e, consequentemente, abaixar a sua temperatura. O segundo sistema foi a instalação de uma pastilha termoelétrica do tipo Peltier na superfície traseira do painel fotovoltaico, que reduz a temperatura do módulo por transporte de calor. O terceiro sistema estudado foi a instalação de um sistema de bombeamento de água na superfície do módulo.

A aplicação do ventilador no módulo fotovoltaico mostrou uma diferença entre as potências de saída das placas de controle e de teste. A placa sujeita à ventilação forçada produz 2,16 % a mais de energia. O que mais influenciou nesse ganho foi a tensão de circuito aberto, pois as médias atingidas pelos módulos de controle e de teste são 18,55 V e 18,80 V, respectivamente. Porém, nos períodos de maior radiação solar, quando há mais produção de energia, o uso da ventilação forçada não se refletiu em produção de potência. Isso ocorre porque a temperatura de operação das placas era muito elevada nesses momentos e a ventilação não conseguiu remover calor de forma tão eficiente.

Com o sistema de resfriamento utilizando um módulo termoelétrico, a pastilha Peltier, foi possível concluir que este dispositivo pode ser empregado com segurança para o resfriamento dos MFs. Em comparação com outros autores, que realizaram experimentos semelhantes e/ou equivalentes [33,34], os resultados apresentados mostram um ganho maior. Foi possível observar que, na descrição da montagem dos sistemas, módulos fotovoltaicos mais placa Peltier, a pastilha termoelétrica das referências citadas foi utilizada somente com dissipadores metálicos aletados. Neste trabalho, além desses dissipadores, foi acoplado um ventilador que complementava a retirada do calor produzido pela Peltier. Isso resultou em um ganho de 2,30 % em relação à placa de teste.

Uma das possibilidades a serem desenvolvidas para um melhoramento na produção de energia é a utilização de materiais termelétricos acoplados no interior dos módulos. Como foi dito na metodologia, a pastilha Peltier estava localizada na parte traseira da placa,

sendo que durante a construção do módulo a pastilha poderia resfriar diretamente a célula fotovoltaica podendo levar a uma utilização mais promissora. Para isso, seria importante realizar um estudo da quanto de tensão e corrente ideal a pastilha teria que utilizar para gerar incremento positivo na potência de saída da placa fotovoltaica.

O sistema de resfriamento com água foi aplicado e testado. Água foi utilizada através de bombeamento na superfície frontal do painel testado. A cada 15 minutos o bombeamento era ligado e esperava-se o equilíbrio térmico antes de fazer as medições. A temperatura dos painéis solares se comportou de acordo com as características da radiação solar. Os resultados mostraram que a redução da temperatura na superfície frontal do painel testado, em comparação com a placa de controle, afetou a tensão produzida do painel, durante o tempo de teste das 9h às 16h. O V_{ca} do painel testado teve, em média, um valor superior ao do painel de controle: 19,66 V e 18,91 V, respectivamente. A redução da temperatura na superfície frontal do painel resulta em um melhor desempenho na geração de energia produzida. No caso do bombeamento com água, a placa de teste produziu 4,09 % a mais do que a placa de controle.

Para os trabalhos futuros é importante a utilização de sistemas híbridos, que possam utilizar os três sistemas juntos. Como foi observado em alguns períodos das medições, os sistemas tiveram respostas melhores, com mais ganhos, em relação ao MF de controle. Assim determinar períodos de utilização em que a ventilação é mais eficiente, da mesma forma com a atuação da Peltier e o resfriamento com água.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Irena - International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Capacity Statistics 2020. <http://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Energy-Capacity-Statistics-2020>, 2020.
- [2] Epe, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Empresa de Pesquisa Energética, 2015.
- [3] E. Fadigas. *Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica*, Apostila, Grupo de Energia Escola Politécnica – USP, p. 32, 2012.
- [4] M. EL-Shimy, A. A. AbdElAziz, K. A. Oliba, Kh. A. AbdEl-hameed, O. A. Selim, R. M. Helal, et al. *Experimental Analysis of Conditions Based Variations of Characteristics and Parameters of Photovoltaic Modules*, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.6199253.v3>, 2018
- [5] Cresesb - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito. *Radiação Solar: História*, http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301. 2014
- [6] Facts, NASA. *The balance of power in the earth-sun system*, NASA Publication Number: FS-2005-9-074-GSFC, 2005.
- [7] J. T. Pinho, and M. A. Galdino. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, Citado 3 40-42, 2014.
- [8] M. B Costa. *Síntese eletroquímica e caracterização de filmes finos de Sb₂Se₃*, Dissertação de Mestrado em Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- [9] A. Luque, S. Hegedus. *Manual de ciência e engenharia fotovoltaica*, John Wiley & Sons, 2011.
- [10] R. Castro. *Manual sobre tecnologias, projeto e instalação - Energia Fotovoltaica*, Lisboa: IST, 2004.
- [11] T. Simioni. *O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do Brasil*, Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, UFRJ/COPPE, 2017.
- [12] I. Dias, F. Lupiano. *Novos materiais e estruturas semicondutoras*. Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, **v. 12**, n. 4, p.265-274, 2004.
- [13] F. Jurinic. *Estudo para melhoria na performance e eficiência de placas fotovoltaicas: através de um sistema combinado de inclinação e resfriamento*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis, Universidade Federal Fronteira Sul, 2020.
- [14] L. T. C. Lana, E. Almeida, F. C. L. S. Dias, A. C. Rosa, O. C. E. Santo, T. C. B. Sacramento. *Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica*, Engenharias On-line1.2. pag 21-33, 2015.
- [15] O. J. Seraphim, J. A. C. Siqueira, C. D. E. Silva, J. D. J Fiorentino, J. A. B de Araújo. *Eficiência energética de módulos fotovoltaicos mono e poli-cristalinos em função da radiação solar global*, Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, p. 300, 2004.

- [16] H. Al-Ismaïly, D. Robert. *Photovoltaic electricity prospects in Oman*, Applied Energy, **v. 59**, 2-3, p. 97-124, 1998.
- [17] J. A. Carneiro. *Módulos fotovoltaicos: características e associações*, Universidade do Minho, http://repositorium.uminho.pt/bitstream/1822/16961/1/M%c3%b3dulos%20Fotovoltaicos_Caracteristicas%20e%20Associa%c3%a7%c3%b5es.pdf, 2010.
- [18] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Sistemas fotovoltaicos – Classificação*, ABNT NBR 117104, 2008.
- [19] M. Mezaroba. *Sistema de bombeamento de água com energia obtida de painéis fotovoltaicos*, Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, UFSC, 1998.
- [20] G. H. B. Cunha. *Modelagem matemática e implementação computacional no ATP de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- [21] BRASIL. Lei Nº 11.488, de 15 de junho de 2007.
- [22], P. Hersch; K. Zweibe. *Basic photovoltaic principles and methods*, Solar Energy Research Inst. Golden, CO, USA, 1982.
- [23] N. Suwapaet, P. Boonla. *The investigation of produced power output during high operating temperature occurrences of monocrystalline and amorphous photovoltaic modules*, Energy Procedia, **v. 52**, p. 459-465, DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.098, 2014
- [24] A. J. D. Santos. *Resistência interna de células solares fotovoltaicas de Si e TiO₂*, Dissertação de Mestrado em Física, Programa de Pós-Graduação de Física, Departamento de Física da Universidade Federal de Alagoas, 2005.
- [25] W. D. Callister, D. G. Rethwisch. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*; Tradução Sérgio Murilo, 9ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2016.
- [26] B. Yerli, M. Kaymak, E. Izgi, A. Öztopal, A. Sahin. *Effect of derating factors on photovoltaics under climatic conditions in Istanbul*. World Academy of Science, Engineering and Technology, **v. 44**, p. 1400-1404, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1075639>, 2010.
- [27] N. T. J. Wei, W. J. Nan, C. Guiping. *Experimental study of efficiency of solar panel by phase change material cooling*. In IOP - Conference Series: Materials Science and Engineering, **v. 217**, 1, IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/217/1/012011, 2017.
- [28] A. de Souza, A. P. G. Oliveira, F. Aristone, V. dos Santos Rodrigues, G. O. L. Mello. *Efeitos da temperatura ambiente e da velocidade do vento no desempenho de módulos solares fotovoltaicos*. InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade, p. 362-375, <http://dx.doi.org/10.18764/2446-6549.v4n15p362-375>, 2018.
- [29] E. Skoplaki, A. J. Palyvos. *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*, Solar energy, **v. 83**, n. 5, p. 614-624, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>, 2009.

- [30] A. Syafiq, A. K. Pandey, N. N. Adzman, N. A. Rahim. *Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels*, Solar Energy, **v. 162**, p.597–619, 2018.
- [31] C. F. Maidana, A. Marin, R. M. Adamski, R. A. Trindade. *Bancada para medida de eficácia térmica de pastilhas de efeito Peltier*, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [32] A. J. Bühler, A. Krenzing. *Estudo do coeficiente de variação da tensão de circuito aberto de módulos fotovoltaicos com a temperatura a partir de ensaios no escuro*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, **v. 11**, 2007.
- [33] B. D. O. Schneider. *Estudo de viabilidade técnico-financeira de refrigeração de módulos fotovoltaicos com células Peltier*, Monografia Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, 2021.
- [34] H. Najafi, K. A. Woodbury. *Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells*, Solar Energy, **v. 91**, p. 152-160, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.026>, 2013.