

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS CARDOSO DA SILVA

**ANÁLISE DE PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA REDUZIR A
TEMPERATURA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

**Palmas – TO
2021**

LUCAS CARDOSO DA SILVA

**ANÁLISE DE PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA REDUZIR A
TEMPERATURA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELETRICA.**

Trabalho elaborado e apresentado como requisito parcial de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de graduação, do Instituto Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcus André Pereira Oliveira.

**Palmas - TO
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S586a Silva, Lucas Cardoso da

Análise de procedimentos utilizados para reduzir a temperatura dos módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica / Lucas Cardoso da Silva. – Palmas, TO, 2021.

66 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Marcus André Pereira Oliveira

1. Painel Fotovoltaico. 2. Redução de Temperatura. 3. Energias Renováveis. I. Oliveira, Marcus André Pereira. II. Análise de procedimentos utilizados para reduzir a temperatura dos módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

TERMO DE APROVAÇÃO

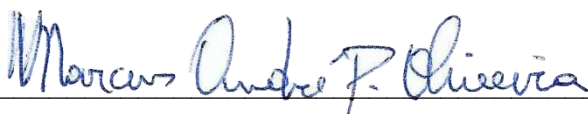
LUCAS CARDOSO DA SILVA

ANÁLISE DE PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA REDUZIR A TEMPERATURA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

Trabalho avaliado e apresentado ao Instituto Federal Do Tocantins – campus Palmas – TO,
Curso de Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua
forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora.

Aprovada em 22 de junho de 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcus André Pereira Oliveira

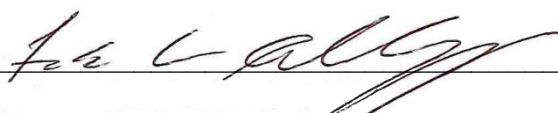
Instituto Federal do Tocantins

Orientador



Prof.Me. Filipe Tozzi Bittencourt

Instituto Federal do Tocantins



Prof. Dr. Fabio de Lima Albuquerque

Instituto Federal do Tocantins

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e as inúmeras pessoas presentes durante esse período em que estive cursando o curso de Engenharia Elétrica no Instituto Federal do Tocantins em Palmas.

Quero agradecer aqueles que por diversas vezes me ajudaram e sanaram minhas dúvidas, aos professores da coordenação da área da Indústria que foram muito prestativos durante este tempo, aos colegas da minha turma e em especial aos meus amigos Alessandro Gui Menezes e Pedro Lucas por estarem presentes em todos os momentos.

Ao meu Orientador Marcus André Pereira Oliveira, por todo o incentivo, paciência, dedicação e compreensão durante o período de realização do trabalho de conclusão de curso, além disso, as dicas e ensinamentos que foram compartilhados durante as disciplinas na sala de aula e nos corredores do instituto.

Aos meus familiares que me incentivaram nesta caminhada, gostaria de agradecer a minha mãe Deuzuita, minha irmã Solange, minha irmã Isabel e ao Barsanulfo por todo apoio para realização desse sonho e em especial a mim pelo o empenho e esforço durante as batalhas travadas nesse curso e na minha vida.

A minha noiva Sãrlei Mota por todo apoio moral e emocional durante o período de realização da graduação e produção do TCC.

“Seus sonhos são seu chefe, o seu líder, o
seu motivador”

(Caio Carneiro)

RESUMO

Esse trabalho avalia procedimentos utilizados a nível acadêmico e comercial para reduzir a temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos por meio de mecanismos ativos e passivos, que não gastam energia adicional para reduzir a temperatura. Os resultados encontrados nesse TCC demonstram que a utilização dos recursos como o vento e a água, passivos, é a melhor forma de reduzir a temperatura de operação por não haver o gasto energético. Considerando o município de Palmas é benéfico usar como agente de resfriamento o vento em função da característica climática que favorece um fluxo forte de vento do norte e leste nos meses em que os sistemas são sujeitos aos maiores índices de temperatura, sendo agosto, setembro e outubro, além disso, apresenta circulação de ar durante todo o ano. Outra forma de resfriamento passivo são aletas de alumínio que apresenta vida útil superior ao dos módulos fotovoltaico. O ponto negativo ao adotar o sistema de resfriamento passivo é a falta de controle sobre a temperatura de operação. Os sistemas ativos são caracterizados por bombear um fluido pelo painel fotovoltaico, para que ocorra a dissipação da temperatura, é necessário garantir o contato do fluido com a placa, para que a retirada da temperatura de operação por convecção seja mais eficiente. Quando se trata de resfriamento ativo é preciso avaliar a quantidade de energia que está sendo consumida pelo sistema adicional e a quantidade de energia que o sistema gerou a mais em função do resfriamento. Em muitos casos o kW para bombear o fluido é superior ao kW acrescido na produção da placa, ocasionando um sistema que não tem saldo energético positivo na produção.

Palavras-chave: Painel Fotovoltaico; Redução de Temperatura; Energias Renováveis.

ABSTRACT

This work evaluated procedures used at academic and commercial level to reduce the operating temperature of photovoltaic panels through passive and active mechanisms, that is, which do not use additional energy to reduce the temperature and which they do respectively. The results found in this TCC- show that the use of resources such as wind and water, passive, is the best way to reduce the operating temperature because there is no energy expenditure. Considering the municipality of Palmas, it is beneficial to use the wind as a cooling agent due to the climatic characteristic that favors a strong flow of wind from the north and east in the months when the systems are subject to the highest temperature indices, being August, September and October , in addition, features air circulation throughout the year. Another form of passive refining is aluminum fins, which have a longer life than photovoltaic modules. The downside to adopting the passive cooling system is the lack of control over the operating temperature. Active systems are characterized by pumping a fluid through the photovoltaic panel, so that the temperature dissipates, it is necessary to guarantee the contact of the fluid with the plate, so that the removal of the operating temperature by convection is more efficient. When it comes to active cooling, it is necessary to evaluate the amount of energy being: consumed by the additional system and the amount of energy that the system generated more due to the cooling. In many cases, the kW to pump the fluid is higher than the kW added in the production of the plate, causing a system that does not have a positive efficiency in production.

Key Words: Photovoltaic panel, Temperature Reduction, Renewable energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Temperatura pontual do módulo	16
Figura 2 - Degradação da tensão	17
Figura 3 - Módulos fotovoltaicos instalados em telhados diferentes	18
Figura 4 - Efeito fotovoltaico	22
Figura 5 - Célula de silício monocristalina	23
Figura 6 - Célula de silício policristalino	24
Figura 7 - Célula de película fina	25
Figura 8 - Células sensibilizadas por corante na lateral de um edifício	26
Figura 9 - Modelos das células fotovoltaicas	27
Figura 10 - Módulo FV instalado sobre o solo	32
Figura 11 - Módulo FV instalado sobre água	33
Figura 12 - Módulo FV instalado sobre a estrutura de PVC	33
Figura 13- Termômetro infravermelho visual Fluke VT02	34
Figura 14- Pirâmetro Hukseflux LP02	34
Figura 15 - Sistema de aquisição de dados	34
Figura 16- Transmissores de temperatura NOVUS	35
Figura 17 - Cargas utilizadas (lâmpadas)	35
Figura 18 - Perfis de alumínio para aletas (1, 2 e 3 respectivamente)	39
Figura 19 - Dissipador perfil de alumínio	40
Figura 20 - Perfil de alumínio 10	41
Figura 21 - Suporte metálico, módulo e espelhos planos. (a) vista geral e (b) vista frontal	43
Figura 22 - Trocador de calor "Caso 1" acoplado ao módulo fotovoltaico e isolamento térmico	44
Figura 23 - Diagrama e foto do sistema de carga puramente resistiva	45
Figura 24 - instalação dos sensores de temperatura e suas respectivas posições	46
Figura 25 - Painéis fotovoltaicos com sistema de resfriamento	49
Figura 26 - Pontos para coletar a temperatura	49
Figura 27 - Termômetro Homis	50
Figura 28 - Carga resistiva	50
Figura 29- Obtenção da radiação	51
Figura 30 - Potencia entre P2 e P1	52

Figura 31 - Convencional e P2 com sistema de resfriamento	52
Figura 32 - Rosa dos ventos para a cidade de Palmas (TO), no período de 2005 a 2015	56
Figura 33 – Temperatura às 08h00min	66
Figura 34 - temperatura às 7h00min	66
Figura 35 – Temperatura às 10h00min	66
Figura 36 - Temperatura às 09h00min	66
Figura 37 - Temperatura às 12h00min	66
Figura 38 – Temperatura às 11h00min	66
Figura 39 – Temperatura às 14h00min	67
Figura 40 – Temperatura às 13h00min	67
Figura 41 – Temperatura às 16h00min	67
Figura 42 – Temperatura às 15h00min	67
Figura 43 – Temperatura às 18h00min	67
Figura 44 – Temperatura às 17h00min	67

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Temperaturas do modulo fotovoltaico diário	17
Tabela 2 - Temperatura dos painéis fotovoltaicos em diferentes tipos de instalação	19
Tabela 3 - Resultados da primeira etapa	36
Tabela 4 - Principais resultados na geração entre P1 convencional e P2 com o sistema de resfriamento no dia 24/01/2020.	53
Quadro 1 - Características do painel BP Solar SX 120 U	38
Quadro 2 - Comparação Alumínio x Aço	39
Quadro 3 - Síntese de informações.....	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos	20
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	21
2.1.1 O efeito fotovoltaico	21
2.1.2 Células Fotovoltaicas	23
2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	27
3. ESTUDO DE CASOS.....	31
3.1 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO PASSIVO	31
3.1.1 Resfriamento passivo – Primeiro caso	31
3.1.2 Resfriamento passivo – segundo caso	38
3.2 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO ATIVO	42
3.2.1 Resfriamento ativo – primeiro caso	43
3.2.2 Resfriamento ativo – segundo caso	47
3.3 SÍNTESE DE INFORMAÇÃO	55
4. SISTEMA DE RESFRIAMENTO PARA SISTEMAS EM PALMAS	56
CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIA	60
ANEXOS	66

1. INTRODUÇÃO

O uso de fontes que possuem como matéria-prima os combustíveis fósseis para geração de eletricidade causa impactos ao meio ambiente e intensifica o efeito estufa. De acordo com Azevedo (2018) o aumento da concentração de gases, que provocam o efeito estufa na troposfera, altera o balanço energético, provenientes do sol, elevando a temperatura da superfície terrestre. Entretanto, o Brasil possui mais fontes sustentáveis na geração de eletricidade. Segundo a Empresa de Pesquisas Energética (EPE) em 2019 a matriz energética brasileira apresentou-se como sendo uma das mais limpas e renováveis quando comparada com a de outros países e conta com 13,7% da geração de eletricidade a partir de fontes não renováveis. Além disso, o Boletim Nacional de Energia (BEM) divulgado pela EPE em 2019 afirma que o brasileiro emite em média 7,5 vezes menos de CO₂ do que um americano e três vezes menos do que um europeu ou um chinês. Mesmo com essas características o Brasil assinou compromisso de reduzir a emissão de gases poluentes até 2030. Para que isso ocorra é preciso diversificar a matriz energética brasileira com a inserção de novas fontes renováveis.

O efeito estufa, a grande demanda de energia e a dependência das hidrelétricas evidenciam a necessidade de novas fontes de geração de energia na matriz elétrica brasileira. Segundo Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL (2008) o foco é abranger opções para complementar a matriz elétrica visando torná-la eficiente com sistemas sustentáveis e economicamente viáveis, utilizando-se dos recursos naturais como o vento, o sol, a maré entre outros. O Brasil possui grande extensão territorial e regiões com características climáticas que permitem a integração de novas fontes geradoras ao SIN, sistema formado pelas linhas de transmissão e subestações que interligam a produção com a distribuição nos centros urbanos de todo o país. Mediante o exposto é necessário inserir fontes renováveis como a fotovoltaica para diminuir a participação de usinas que usam como matéria-prima os combustíveis fósseis e que são agravantes para o meio ambiente, além disso, reduzir a participação das hidrelétricas na geração de energia e assim suprir a demanda do mercado.

Diferente das outras fontes de geração de energia limpa, todo o território brasileiro possui condições favoráveis para geração fotovoltaica. Apresenta bons

índices de radiação e permitir a disponibilização de energia elétrica próximo ao centro de carga, o que não consegue fazer com as hidrelétricas, eólicas e biomassa. Urbanetz (2010), afirma que os sistemas fotovoltaicos apresentam uma enorme sustentabilidade e aproveitamento para geração de eletricidade, tendo em vista que, o sol é uma fonte que viabiliza a geração de energia solar, apresenta bons índices de radiação em todo território brasileiro e possibilitam a integração com a rede de distribuição por meio da instalação desses sistemas no meio urbano. Do mesmo modo, Ruther (2010) defende que a energia solar no Brasil apresenta índices de radiação melhores que em outros países e afirma que a melhor região na Alemanha, país que é um dos que mais produz energia fotovoltaica, é (40%) menor que a pior região no Brasil. Desta maneira, o uso da energia fotovoltaica como fonte geradora é essencial para a produção de energia, em função da grande oferta de matéria-prima e características construtivas que facilitam a instalação nas residências.

A aderência dessa fonte pela população nos últimos anos ocorre em função dos mecanismos usado pelo governo para facilitar o acesso dessa tecnologia ao consumidor final. Conforme Pereira (2019) o Brasil tem realizado diversos esforços para a inserção da energia solar na matriz energética através de ações governamentais, tais como: a resolução normativa 482/212 que estabelece as condições gerais para acesso de micro geração e mini geração distribuída ao sistema de distribuição de energia elétrica; projetos de lei como o PRONASOLAR que tem como objetivo estabelecer uma estratégia para aproveitar o grande potencial da fonte fotovoltaica; decretos como o n 37.717 de 9 de outubro de 2016 que estabelece estímulos ao uso de energia fotovoltaica; e convênios como o do ICMS 16 de 22 de abril de 2015 que visa conceder isenção desse imposto sobre os matérias que compõem o sistema fotovoltaico. Mediante o exposto, há o desenvolvimento de política de incentivo à disseminação de energia fotovoltaica na esfera nacional que resultou no aumento exponencial dessa fonte como micro geração.

Na esfera municipal, a Prefeitura de Palmas do Tocantins criou o programa Palmas Solar que concede descontos de impostos para contribuintes que instalam sistemas fotovoltaicos. Conforme Bordignon (2019) são previstos uma série de descontos aos consumidores em alguns impostos, tais como o IPTU, ISSQN e ITBI. É claro que há o interesse do governo em diversificar a fonte de geração de

energia da matriz. Uma aposta é a fotovoltaica que apresentou um crescimento na matriz energética brasileira em 2019 de 212%, alcançando a marca de 2,4GW de acordo com infográfico emitido no dia 05/04/2021 pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. (ABSOLAR).

Entretanto, é preciso entender o comportamento dos módulos fotovoltaicos na geração de energia elétrica no ambiente real de geração. Simioni (2017) explica que a temperatura e a radiação exercem grande influência na operação dos módulos a partir do momento que a energia solar é transformada em eletricidade. Para que os módulos chegam ao mercado é preciso ser realizados umas séries de testes que determinam as características elétricas referentes à variação de temperatura e radiação. De acordo com Standard (2005), os testes que os módulos realizam em laboratório, a célula solar é normalmente avaliada em condições de teste padrão (STC), onde para um espectro solar médio na massa de ar (AM) 1,5, a irradiância é normalizada para 1000 W / m^2 e a temperatura da célula são definidas como 25°C . Deste modo, é necessário avaliar o comportamento dos parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico quando submetido a valores de temperatura e radiação diferentes dos avaliados em laboratório.

O cenário de geração em Palmas possui altas temperaturas quando comparada com outras cidades brasileiras. De acordo com Paz (2009), isso ocorre em função dos elementos ambientais, climáticos, a densidade urbana e populacional. Enfatiza ainda que a urbanização em conjunto com o adensamento de certas áreas contribui para as alterações de temperatura. Além disso, Sampaio (2015) afirma que a temperatura gira em torno de 26 a 32°C e o pico ocorre nos meses de agosto, setembro e outubro com temperatura na casa dos 48°C . Deste modo, os sistemas fotovoltaicos instalados em Palmas precisam receber atenção na geração de energia fotovoltaica em função do efeito negativo da temperatura de operação.

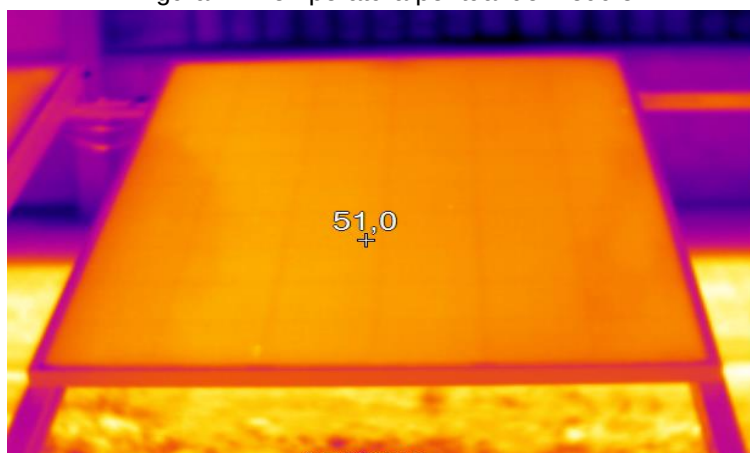
A temperatura afeta a característica I-V do gerador fotovoltaico e Palmas apresenta ao longo do ano um comportamento térmico alto. De acordo com Assunção (2014) a temperatura é responsável pela maioria das reações químicas que envolvem a degradação dos módulos. Diante disso o aumento da temperatura do painel provoca redução na tensão de saída e, conseqüentemente, sua potência e eficiência (LIMA, 2019). Logo, o estudo sobre os procedimentos para reduzir a

temperatura do modulo fotovoltaico no ambiente como o de palmas é de grande importância para melhorar a eficiência dos sistemas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Villalva (2015) afirma que nas regiões de Palmas os raios solares incidem com ângulos azimutais menores e por causa disso fica com as massas de ar reduzidas, proporcionando mais incidência de raios luminosos e ambientes mais quentes. Para demonstrar o cenário térmico que os painéis são submetidos na geração no município de Palmas, no dia 04 de junho de 2019 no IFTO foi registrado através de uma câmera fotográfica térmica Fluke Ti32 as temperaturas de operação do sistema fotovoltaico formado por um módulo de 335 W da Canadian e conectado ao micro inversor Homilies mi-500. A Figura 1 apresenta a captura da maior temperatura do painel com 51°C às 12 horas, enquanto que, a temperatura ambiente segundo os dados da estação meteorológica do INMET (2020) da cidade de Palmas foi de 33,6°C. Logo, é evidente o potencial térmico que os painéis são submetidos em ambientes de geração, tendo em vista que a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de operação do módulo fotovoltaico foi de 22°C.

Figura 1 - Temperatura pontual do módulo

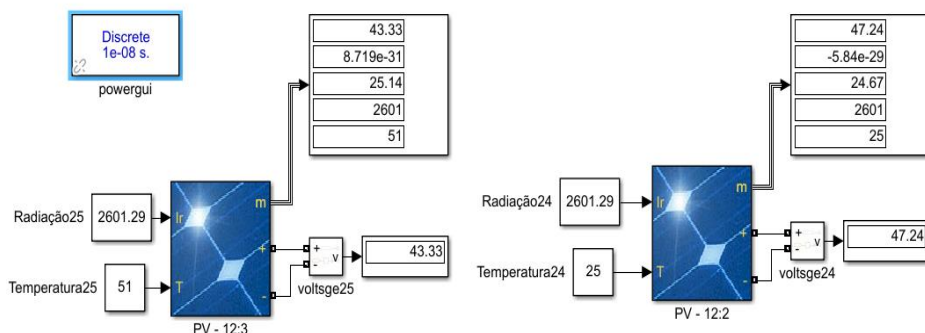


Fonte: Autor, 2019.

Na Figura 1 a placa trabalha com uma temperatura acima da temperatura ambiente, isso ocasiona uma degradação da tensão e redução da potencia gerada. Foi realizada uma simulação no SIMULINK/MATLAB, como pode ser visto na Figura 2, em que foi considerada a temperatura de 51°C obtida através da câmara térmica e comparou com a temperatura do sistema padrão STC de 25°C para demonstrar o

efeito da tensão com o aumento da temperatura. O resultado obtido foi uma degradação de 3,91 V para a temperatura de 51°C.

Figura 2 - Degradação da tensão



Fonte: Autor – MATLAB, 2021.

O efeito que a temperatura ocasiona no painel fotovoltaico durante um dia de insolação é apresentado na Tabela 1 sendo possível identificar a temperatura de operação e a ambiente. O comportamento térmico em função da insolação diária de Palmas apresenta o pico às 13 horas com um valor de 55,6°C evidenciando um aumento de 30,6°C quando comparada a temperatura de 25°C, padrão STC.

Tabela 1 - Temperaturas do modulo fotovoltaico diário

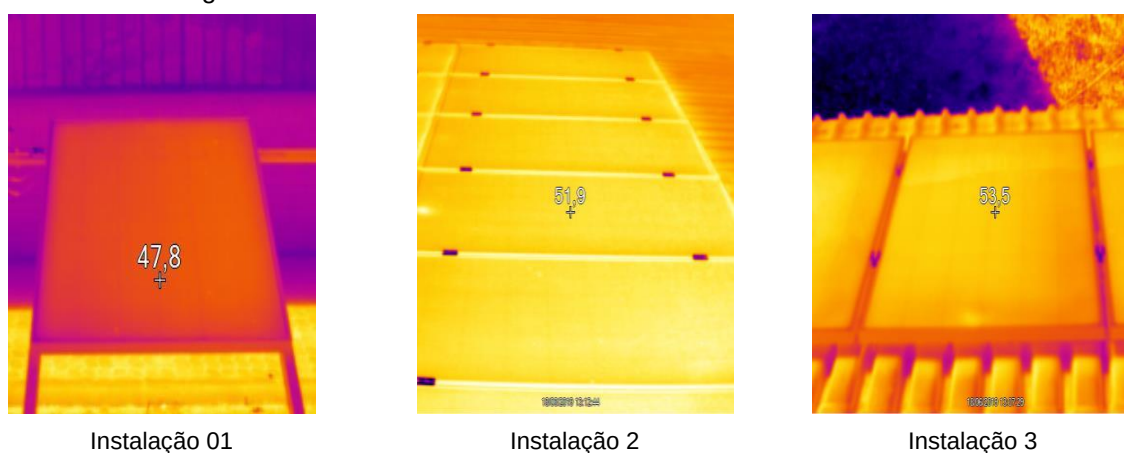
Horário	Temperatura Ambiente	Temperatura Módulo	Ganho Térmico painel
7:00	21,8	24,5	- 2,7
8:00	27,0	33,1	6,1
9:00	29	37,3	8,3
10:00	31,7	44,6	12,9
11:00	33,4	48,7	15,3
12:00	33,6	51,0	17,4
13:00	34,6	55,6	21
14:00	35	52,7	17,7
15:00	35,3	43,1	8,1
16:00	35	41,7	6,7
17:00	34,3	27,9	- 6,4
18:00	32,4	25,2	-7,2

Fonte: Autor, 2019.

De acordo com Jurinic (2020) placas fotovoltaicas sofrem com o efeito do aumento da temperatura, absorvem 80% da irradiação, dos quais consegue converter apenas 5-20%, dependendo da tecnologia utilizada. O restante da energia é refletida e convertida em calor. As 07h00min a temperatura ambiente encontrava-se menor que a temperatura de operação da placa, e em função dos raios incidentes serem convertido em calor fez com que a temperatura do painel seja superior a temperatura ambiente. O mesmo ocorre as 17h00min e 18h00min em que a temperatura de operação da placa fotovoltaica se torna menor que a ambiente, tendo em vista que a incidência de radiação se torna mais próximo de zero tornando as perdas geradas em função do efeito fotovoltaico na célula menor.

Uma das aplicações da energia fotovoltaica no ambiente urbano é por meio da instalação dos painéis nos telhados das residências. As formas que os painéis são instalados influenciam na temperatura de operação devido à troca de calor específica de cada telha e o espaçamento mínimo para resfriamento, seja de forma passiva ou de forma ativa. O IFTO possui instalação de placas fotovoltaicas em três telhados diferentes, conforme a figura 3. Na primeira instalação a placa está sobre uma estrutura metálica fixa no chão; a segunda os módulos estão sobre a telha cerâmica; e a terceira os painéis estão sobre a telha de zinco. A única estrutura que possui ventilação ideal no módulo é a primeira, com ventilação natural em todo o painel, apresentando assim a menor temperatura de operação comparada com as demais.

Figura 3 - Módulos fotovoltaicos instalados em telhados diferentes



Fonte: Autor, 2019.

Em complemento, a Tabela 02 apresenta a comparação entre a temperatura ambiente e a temperatura de operação do módulo para os três tipos de instalações descritas anteriormente. A que possui a menor troca de calor é a instalações das placas sobre a telha cerâmica (instalação três), em virtude do espaço entre a telha a face inferior da placa que impede a circulação de ar. De certo modo, os sistemas fotovoltaicos com instalação já realizados precisam passar por um tratamento térmico, a fim de reduzir a temperatura de operação dos módulos. Além disso, para futuras instalações, o tratamento térmico deve ser um assunto discutido pelo projetista para tornar o rendimento dos sistemas mais eficientes.

Tabela 2 - Temperatura dos painéis fotovoltaicos em diferentes tipos de instalação

	Temp. Ambiente °C	Temp. Módulo °C	Diferença °C
Instalação 01	33,6	47,8	14,2
Instalação 02	33,6	51	17,4
Instalação 03	33,6	53,5	19,9

Fonte: Autor, 2019.

Diante do exposto fez-se necessário identificar as diferentes formas de resfriamento do módulo fotovoltaico. A análise da temperatura submetida pelo painel fotovoltaico pode ser determinante na forma de instalação mais apropriada, tendo em vista que a temperatura afeta na tensão de cada célula e influencia diretamente na quantidade de energia produzida pelo sistema fotovoltaico. Em virtude da pandemia (Covid-19) que afetou o acesso ao IFTO e impossibilitou o uso dos laboratórios para a realização dos experimentos práticos, esse estudo vai buscar identificar os mecanismos empregados comercialmente e academicamente para resfriamento do painel fotovoltaico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho visa identificar diferentes procedimentos adotados para resfriar os módulos fotovoltaicos em função dos altos índices de temperatura que são submetidos na geração fotovoltaica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Elaborar a fundamentação teórica para embasar sobre o efeito da temperatura na geração fotovoltaica;
- Apresentar estudos de casos que exemplifiquem os procedimentos de resfriamento dos módulos fotovoltaicos;
- Relacionar os resultados dos trabalhos apresentados no estudo de casos para o ambiente de geração de Palmas;
- Avaliar e discutir os resultados obtidos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho de conclusão de curso está estruturado em cinco capítulos. O primeiro contém uma introdução, revelando a motivação e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma introdução teórica acerca do efeito fotovoltaico, os tipos de células fotovoltaicas e equacionamento matemático da célula solar que relaciona com temperatura.

No capítulo 3 é descrito o estudo dos processos de resfriamento passivo e ativos, além disso, é apresentada uma síntese das informações.

No capítulo 4 apresenta sugestão de aplicação para o município de Palmas.

Como parte final do trabalho de monografia, no capítulo 5 é apresentada as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

2.1.1 O efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é a conversão da luz em eletricidade por meio da célula solar que recebe os raios luminosos da radiação e converte em energia elétrica. Nascimento (2004) expõe que o elemento semicondutor utilizado na fabricação das células é o Silício (Si). Assim também, Pinto (2018) afirma em seu trabalho que o elemento fundamental na conversão fotovoltaica é a célula solar e o princípio de funcionamento dessas células é baseado na conversão dos raios luminosos em energia elétrica por meio de elementos semicondutores. O desenvolvimento dos semicondutores permitiu a produção de painéis fotovoltaicos com melhores rendimentos na conversão e produtos com maior vida útil

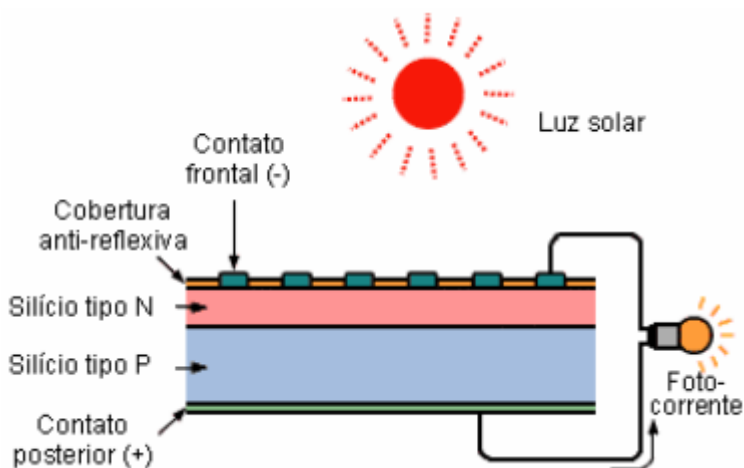
O silício encontrado na natureza não possui como característica a condução de elétrons em função da sua camada de valência. As células fotovoltaicas são construídas com materiais semicondutores, pertencentes aos grupos 14 e 16 da tabela periódica, como o silício (Si), carbono (C), germânio (Ge), fósforo (P), selênio (Se), telúrio (Te) e arsênio (As) (PINHO; GALDINO, 2014). Para Reis (2020) os elementos possuem a banda de valência totalmente preenchida e sua banda de condução vazia. A camada que separa a banda de valência e a de condução é denominada banda proibida (gap). Os raios luminosos da radiação solar possuem energia maior que o gap e isso faz com que o elétron que ocupava a banda proibida passa para a camada de condução, gerando assim um par de elétrons-lacuna.

O silício utilizado na fabricação dos painéis fotovoltaicos passa por um processo de dopagem para que possam conduzir corrente elétrica. De acordo com Crestani; Zanesco; Moehleck (2017) para que haja circulação de corrente pela célula fotovoltaica é preciso que o silício sofra uma dopagem com o Fósforo (P) e com o Boro (B), tornando-se um material com portadores de cargas negativas (silício tipo N) e cargas positivas (silício tipo P), respectivamente. Medeiro (2017) afirma que ao juntar dois condutores, cria-se uma junção P-N e o cristal N passa a ter uma

deficiência de elétrons, uma carga positiva, e a tipo P fica com excesso de elétrons, carga negativa. As junções separadas são eletricamente neutras, mas juntas cria-se um campo elétrico em virtude dos elétrons livres da capa N, ocupando os vazios da capa tipo P evitando que a ligação entre elétrons e lacunas seja refeita.

A Figura 4 representa o efeito fotovoltaico da célula de silício no qual o contato frontal recebe os fótons com energia maior que o gap e assim formam os pares com elétrons do tipo N, dopado com fosforo, e lacunas do tipo P, dopado de boro, gerando assim uma corrente elétrica na junção. Para que a lâmpada seja alimentada pela energia gerada é preciso que se conectem as duas extremidades do silício e assim ocorra a circulação de corrente.

Figura 4 - Efeito fotovoltaico



Fonte: PRIEB, 2002.

Células com apenas uma junção não são capazes de converter toda a energia do fóton por não possibilitar a interação entre elétrons e lacunas. Para Medeiros (2017) um fóton com energia menor que o gap é insuficiente para passar os elétrons para a banda de condução, apenas transforma em calor ou passa direto para a célula, enquanto que a energia maior que o gap passa um elétron para a banda de condução e o excedente é absorvido na forma de calor. Para Stambuk (2017) mais de 55% da energia é perdida através do aquecimento térmico ou através da falta de energia para a conversão fóton-eletron. Logo o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos passa pelo o desenvolvimento de células com semicondutores que aumentem o fator de conversão do fóton incidente.

2.1.2 Células Fotovoltaicas

2.1.2.1 Células de silício – primeira geração

As células da primeira geração são as produzidas com silício cristalino e que podem ser classificados como monocristalino e policristalino. De acordo com o Gouvêa (2017) as células de silício da primeira geração foram as primeiras a surgir no mercado e tem empregado na fabricação o silício grau solar (Si-gs), com 99,9999% de pureza, também conhecido com 6N (seis nove) que é obtido a partir da purificação do silício grau metalúrgico. Segundo Acero (2017) as células de silício cristalino representa 80% do mercado de fotovoltaica e afirma que esse avanço se deu pelo esforço de processar semicondutores de silício para circuitos eletrônicos e integrados. Essa tecnologia está consolidada no mercado e apresenta conforme Gouvêa (2017) uma perda de potência nominal de 0,5% a 1% ao ano e após 25 anos fornece 80% da potência nominal.

O silício monocristalino possui uma qualidade superior ao policristalino em função do processo construtivo que usa um único cristal de silício de alta pureza, conforme pode ser visto na Figura 5. De acordo com Juste (2008) a fabricação da célula de silício começa com a extração do dióxido de silício, atingindo um grau de pureza de 98 ou 99% e posteriormente o silício é fundido com uma pequena quantidade de dopante, com o controle da temperatura vai extraindo cilindros e sendo cortados em fatias de 300 mm. Para Gouvêa (2017) as células são extraídas no formato ortogonal, visto que esse formato proporciona menos perda de material, com espessura de 0,2 mm essas células alcançam em laboratório uma eficiência de 25,3%. Esse produto com mais qualidade reflete para um consumidor final um acréscimo ao módulo fotovoltaico e quando se trata de sistemas fotovoltaicos os

Figura 5 - Célula de silício monocristalina



Fonte: Juste, 2008.

painéis representam 60% do custo

Diferentemente do silício monocristalino, o policristalino apresenta em sua construção um grau de impureza maior e consequentemente uma menor eficiência na conversão dos fótons em energia, conforme pode ser visto na Figura 6. Segundo Ruther (2004), a eficiência do módulo fotovoltaico P-Si é menor que a do silício Monocristalino, por serem fundido e solidificado diversos cristais que resulta em um bloco que concentra um maior número de defeitos. De acordo com Gouvêa (2017) a eficiência das células policristalinas é menor que a monocristalino com 21,3%, além disso, a presença de interfaces entre vários cristais implica em um processo de fabricação menos complexo que resulta em um menor custo do painel para o consumidor final. O policristalino é uma alternativa mais barata em relação ao silício monocristalino já que apresentam bons índices de conversão, de acordo com Juste (2008) o silício policristalino se torna vantajoso por apresentar uma diferença apenas de 4 % na geração de energia.

Figura 6 - Célula de silício policristalino



Fonte: Juste, 2008.

As células de silício cristalino estão consolidadas no mercado por possuir duas características, boa eficiência energética e baixo custo no processo de produção em larga escala. Logo para que outras tecnologias ganhem espaço, é preciso que sejam portadoras de semicondutores com melhores rendimentos e que o processo de fabricação seja menos complexo do que a célula de silício. Atualmente há o desenvolvimento das células da segunda geração e terceira geração que não conseguiram superar o silício cristalino em termo de eficiência e nem de produção.

2.1.1.2 Célula Fotovoltaica de Película – segunda geração

As células de segunda geração não possuem os mesmos rendimentos da célula da primeira geração, em função da dopagem do silício que envolve outros tipos de componentes. De acordo com Gouvêa (2017) as células da segunda geração utilizam silício amorfo que não apresenta na forma de cristais, mas mantém sua característica de semicondutor. Conforme Sampaio (2015) são células construídas tendo como base o silício amorfo (ou a-Si, ou ainda a-Si:H – silício amorfo hidrogenado) e outros elementos semicondutores, tais como Arseneto de 11 Gálio (GaAs), CIS - Dissulfeto de Cobre e Índio ou Telureto de Cádmio (CdTe). As células de filmes finos apresentam rendimentos na conversão menores e isso impacta na aceitação dela no mercado. Porém tem uma finalidade diferente das células fotovoltaicas da primeira geração.

Figura 7 - Célula de película fina



Fonte: Gouvêa, 2017.

As células da segunda geração apresentam desvantagens na eficiência quando comparada com monocristalino e policristalino e degradação logo nos primeiros meses de operação. Para Gouvêa (2017) o processo de fabricação de filmes finos é diferente do silício cristalino, ocorrendo através da sucessiva deposição de camadas de semicondutores sobre uma superfície. Para Mendes (2011) esse processo construtivo proporciona células fotovoltaicas com eficiência energética que fica entre 8% a 10%, e em laboratório podem atingir 13%. Diferente das células cristalinas a flexibilidade das células da segunda geração permite uma aplicação em objetos com curvas e portáteis conforme pode ser visto na Figura 7.

2.1.1.3 Célula Fotovoltaica Orgânica – terceira geração

As células da terceira geração são caracterizadas por serem promissoras novas e que ainda não estão sendo comercializadas e encontradas apenas a nível experimental, entretanto conforme pode ser visto na Figura 8 há aplicação em diferentes vertentes no mercado como aplicação em um edifício. De acordo com Machado (2014) às células solares orgânicas são novas alternativas para geração de energia que busca associar o alto rendimento na geração com o baixo custo de fabricação. De acordo com Ferreira (2013), são dispositivos constituídos por um substrato (vidro ou plástico); o cátodo; o ânodo; a camada ativa, formada por doadores e aceptadores, usa-se polímeros (3-hexiltiofeno) (P3HT), derivados de buckyminster fullerenos (buckyballs ou apenas C60), em especial o 4-C61-4fenil-butanoato de metila (PCBM), respectivamente. Ao contrário das duas gerações de células fotovoltaicas a terceira realiza a absorção de luz em um corante e por causa disso passa a ser considerada fotoquímica e não fotovoltaica.

Figura 8 - Células sensibilizadas por corante na lateral de um edifício



Fonte: Gouvêa, 2017.

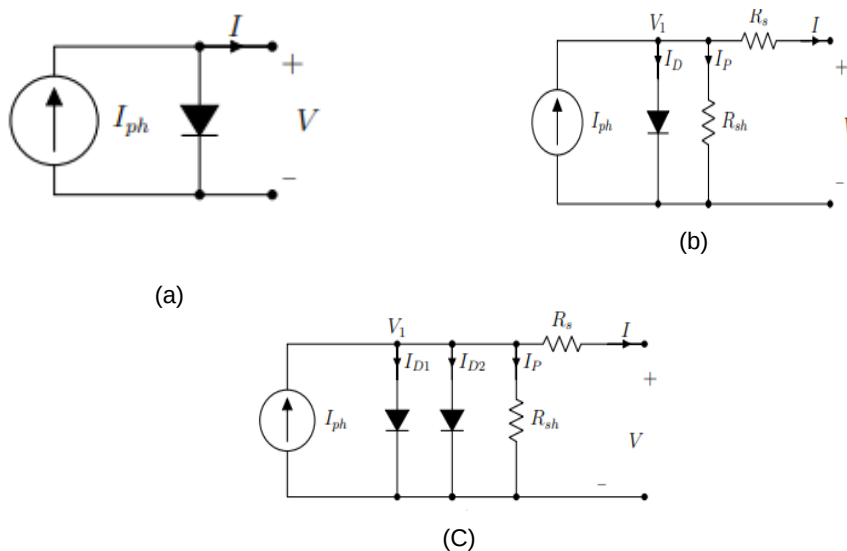
O Processo de geração de energia por meio das células da terceira geração é diferente das duas gerações anteriores. De acordo com Oliveira (2013) o princípio de produção de energia depende dos fótons com energia maior ou igual ao gap do material com isso os elétrons são promovidos do orbital molecular mais alto ocupado (HOMO) para o orbital molecular mais baixo desocupado (LUMO). Logo é preciso que haja uma busca por matérias que realizem a dissociação com mais facilidade e assim aumentem a produção de corrente quando a célula for exposta ao sol. O desafio é que as células orgânicas sejam produzidas com eficiência superiores as de cristais e que possuam um processo de produção fácil que resulta em um produto com valor competitivo no mercado.

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A análise matemática da célula fotovoltaica é realizada a partir de três modelos de diodo que relaciona as propriedades elétricas como corrente, tensão e potência com a incidência de fótons. Para Sauthier (2019) os modelos são o Ideal (ISDM – Ideal Single Diode Model); de um diodo (SDM – Single Diode Model); de dois diodos (TDM – Two Diode Model ou DDM – Double Diode Model). Através da análise desses modelos é possível identificar o comportamento térmico dos módulos fotovoltaicos levando em consideração a localização geográfica e o clima local.

A Figura 9 apresenta a representação dos três circuitos considerados para a análise matemática da célula fotovoltaica, sendo a letra (a) o circuito ideal, letra (b) o com um diodo e a letra (c) o com dois diodos. O circuito eletrônico é formado por uma fonte de corrente, diodos e resistências que matematicamente representa as perdas e características de tensão e corrente da célula ao receber um fóton.

Figura 9 - Modelos das células fotovoltaicas



Fonte: Sauthier, 2019.

Na qual:

V : é a tensão da célula fotovoltaica;

I_{ph} : é a corrente gerada pela luz incidente, ou corrente fotovoltaica (é diretamente proporcional à irradiância);

I_{ph} : é a corrente fotovoltaica, estabelecida anteriormente;

I : Corrente gerada pela célula;

I_D : Corrente característica do diodo;

I_p : é a corrente estabelecida através da modelagem das perdas elétricas por R_s e R_{sh} .

R_s é a resistência em série equivalente do painel;

R_{sh} é a resistência paralela equivalente;

O modelo ideal recebe esse nome por não conter em sua análise as perdas relacionadas nos demais modelos e possibilita a análise da célula como um diodo comum. Para Carvalho (2014) o equacionamento desse modelo se dá pela lei das correntes, ou seja, o somatório das correntes é igual a zero, que pode ser deduzida diretamente sem a necessidade de uma ferramenta numérica muito sofisticada. Contudo, apesar de sua simplicidade, ele não garante uma característica precisa no MPPT. Para Sauthier (2019) o modelo ideal relaciona os pares de elétrons-lacunas que foram gerados nas proximidades da junção em função da corrente reversa e direta do diodo. Esse modelo ideal não retrata o comportamento da célula fotovoltaica tendo em vista que na conversão de fótons em energia elétrica as células possuem em sua maior parcela perdas ocorridas na forma de calor.

Acrescentando às resistências R_s e R_{sh} no circuito ideal obtém-se o modelo do de um diodo que por sua vez é mais empregado para representar o equacionamento matemático da célula fotovoltaica. A resistência shunt R_{sh} modela a corrente de fuga, representando um caminho alternativo para a corrente elétrica gerada pela célula, enquanto a resistência em série R_s representa as perdas internas devido ao fluxo de corrente e às conexões elétricas, além de contribuir para a eficiência do modelo (SAUTHIER, 2019). Para muitos autores o modelo com um diodo é o modelo real da célula fotovoltaica devido à característica de associar a corrente gerada uma perda em cima de uma resistência em série e uma em paralelo.

Com a adição de mais um diodo ao circuito real da célula, obtém-se o modelo de dois diodos que caracteriza locais com altos índices de irradiação solar.

Para Sauthier (2019) o acréscimo do segundo diodo caracteriza o processo de recombinação na região de carga espacial na junção aonde é formada pelo o primeiro diodo que realiza a difusão dos portadores minoritários para a camada de depleção. O circuito com dois diodos possui sete parâmetros para análise sendo que possui meios de simplificar para diminuir o tempo de cálculo dos métodos iterativos, tornando o processo de estimação de parâmetros mais rápido.

Logo, a recombinação de elétrons e lacunas, pacotes, nas junções P-N das células geram uma corrente, e para cada par a célula disponibiliza tensões e correntes específicas. De acordo com Sauthier (2019), um módulo fotovoltaico é geralmente identificado pela sua potência elétrica de pico (Wp), e quando está desconectada a tensão observada em um módulo é a tensão de circuito aberto (V_{oc}). A tensão de circuito aberta é expressa pela equação (1).

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (1)$$

A variação de temperatura é proporcional a variação de tensão, conforme é demonstrado pela equação 2. Isso ocorre porque em Sauthier (2019) os semicondutores obedecem a equação do diodo de Shockley - a relação entre o fluxo de corrente elétrica e o potencial eletrostático através de uma junção P-N - depende de uma tensão característica chamada tensão térmica (V_t).

$$V_t = \frac{N_s KT}{q} \quad (2)$$

Onde:

N_s : Número de células conectadas em série;

K : é a constante de Boltzmann ($1,38064852 \times 10^{-23} \text{J/K}$);

q : é a carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$);

T : é a temperatura em Kelvin (K);

Através do trabalho de Sauthier (2019), a tensão de circuito aberto é então uma média da quantidade de recombinação no dispositivo. As células solares de silício em material Monocristalino (m-Si) de alta qualidade têm voltagens de circuito aberto de até 730 mV em 1000 Wm⁻² e AM 1.5, enquanto dispositivos

comerciais em silício multi-cristalino (mc-Si) normalmente têm voltagens de circuito aberto em torno de 600 mV. Além disso, a equação 2 evidencia a relação da temperatura com a tensão, na qual a variação da tensão está diretamente relacionada a variação da temperatura.

Os painéis fotovoltaicos são avaliados em condição padrão de teste (Standard Testing Conditions - STC) com temperatura fixa em 25°C e irradiância 1000 W/m². Entretanto, o cenário real de geração os painéis trabalham com temperatura superior a especificado e para especificar a temperatura de operação considerando a temperatura ambiente é preciso calcular a temperatura nominal de operação da célula

Outra estimativa de obtenção da temperatura é considerando a temperatura de operação do modulo fotovoltaico (T_{NOCT} - Nominal Operating Cell Temperatura). De acordo com Locks (2019) cada módulo tem uma temperatura nominal para suas células, que é obtida quando o módulo é exposto em circuito aberto a uma irradiância de 800W/m² em um ambiente com temperatura do ar a 20°C e sofrendo ação do vento de 1 m/s. Esta temperatura também é muitas vezes encontrada nas folhas de dados técnicos de módulos, normalmente identificada pela sigla NOCT e geralmente está entre 40 e 50 °C. A NOCT está ligada às propriedades térmicas e ópticas nos materiais empregados na construção do módulo.

$$T_M = \left[\frac{(T_{NOCT} - 20)}{800} \right] * G_i + T_a \quad (3)$$

Ao contrario da analise da temperatura em teste padrão (STC) a temperatura nominal de operação da célula apresenta as características técnicas nominal considerando a temperatura ambiente no impacto da temperatura de operação do módulo e assim obter os parâmetros elétricos do painel.

3. ESTUDO DE CASOS

Algumas formas de resfriamentos passivas e ativas dos painéis fotovoltaicos serão descritas nessa etapa do trabalho. Ao total foram analisados dois trabalhos que tratam do resfriamento passivo e dois trabalhos que analisam o resfriamento ativo.

Cada trabalho possui como característica em comum a de resfriamento das altas temperaturas de operação que influencia no rendimento do painel. As escolhas dos trabalhos passivos envolvem os principais agentes de resfriamento que são a água, vento e dissipadores. Já os processos de resfriamento ativo sempre envolvem o gasto energético dos motores elétricos para bombeamento dos fluídos até a placa.

3.1 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO PASSIVO

Os sistemas de resfriamento passivo do painel fotovoltaico utilizam os recursos naturais como o vento, a água e materiais que são dissipadores de calor. De acordo com Jurinic (2020) os sistemas passivos de resfriamento possuem em seu princípio a troca de calor sem o uso de qualquer fonte de bombeamento de fluídos. O fluído mais utilizado para esse sistema é o próprio ar. Portanto, o resfriamento passivo é a primeira opção para a melhoria do desempenho dos painéis fotovoltaicos e que contribui para o aumento do tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos.

3.1.1 Resfriamento passivo – Primeiro caso

“A avaliação da influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico sobre estrutura flutuante” realizada por Alexandre Atílio Ramos de Alencar Filho em 2018 tinha como objetivo avaliar a eficiência entre o painel fotovoltaico instalado sobre o solo e comparar com um painel instalado sobre a água. O autor tinha como objetivo verificar o gradiente de temperatura entre os módulos e o ambiente; analisou a eficiência do módulo fotovoltaico instalado sobre a estrutura flutuante devido ao gradiente de temperatura pela troca de calor com o ambiente; avaliou a relação entre a distância do módulo ao espelho d'água; e validou modelos matemáticos que correlacionam a temperatura do módulo FV e sua

eficiência. Em função disso determinou a eficácia do método em relação à redução da temperatura de operação e o aumento da produção.

Foram usados dois módulos de 20 Wp, modelo Kyocera, e analisados durante 30 dias nas dependências do Laboratório de Energia Alternativa da Universidade Federal do Ceará em Fortaleza. A motivação da dissertação foram dois trabalhos realizados anteriormente no laboratório. O primeiro foi realizado por Sacramento (2015) no qual o painel foi colocado em contato com a água e obtendo um ganho de 9% em comparação com a instalação de placas em modos convencionais. O outro trabalho realizado por Corrêa (2015) o painel foi instalado em uma estrutura flutuante que ficava com as partes frontal e posterior em contato com a água e que obteve ganhos de até 8,78% em comparação com o modo convencional. Com base nos trabalhos, o autor buscou associar a dissipação do calor por convecção do módulo sobre a água e a circulação do ar no painel fotovoltaico.

Figura 10 - Módulo FV instalado sobre o solo



Fonte: Filho, 2018

O autor dividiu o trabalho em duas etapas. A primeira etapa compara a instalação convencional, Figura 10, com a instalação do painel fotovoltaico sobre estrutura de isopor, Figura 11, onde variou a altura da face inferior do painel para o espelho d'água. No modo convencional o painel FV foi posicionado sobre o isopor para impedir o contato dos sensores de temperatura com o chão e assim evitar alteração nos valores de temperatura que estavam posicionados na parte posterior do painel.

A distância entre o módulo e o espelho d'água variou de 7,5 cm a 3,0 cm com decréscimo de 1,5 cm a cada três dias. O tanque de água possuía o volume de 12.000 l com 1,20m de altura e 3,80 de diâmetro.

Figura 11 - Módulo FV instalado sobre água



Fonte: Filho, 2018.

Para a execução da segunda etapa foi construída uma estrutura flutuante utilizando tubos de PVC que recebesse o painel conforme pode ser visto na Figura 12. Esta estrutura, diferentemente da estrutura utilizada na primeira etapa da pesquisa, permite maior fluxo de ar sob o módulo e exibe menor isolamento do fluxo de calor por convecção entre água e módulo.

Figura 12 - Módulo FV instalado sobre a estrutura de PVC



Fonte: Filho, 2018.

A obtenção da temperatura de operação da célula solar foi realizada por detectores de temperatura por resistência, sensores de temperatura PT-100 (RTD – Resistance Temperature Detectors) que mede a temperatura pela correlação da sua resistência elétrica com a temperatura ($100\ \Omega$ a $0\ ^\circ\text{C}$). Foram usados 03 sensores, o primeiro foi posicionado na parte posterior do painel instalado sobre o solo, o segundo posicionado na parte posterior do módulo sobre a água e o terceiro dentro do reservatório de água. Com o uso de termômetro infravermelho visual Fluke VT02 foi realizado a calibração com os valores apresentados pelos sensores por meio da câmera térmica, conforme pode ser visto na Figura 13.

Figura 13- Termômetro infravermelho visual Fluke



Fonte: Filho, 2018.

A obtenção da irradiância que os painéis foram submetidos no período de teste foram obtidos através de um pirômetro de segunda classe de modelo LP02 do fabricante HusKseflux, apresentado na Figura 14.

Figura 14- Pirâmetro Hukserflux LP02



Fonte: Filho, 2018.

A aquisição dos dados foi coletada por um sistema supervisório composto por controladores lógicos programáveis (CLP). Os sensores de temperatura foram conectados a transmissores de temperatura da marca NOVUS, modelo TxRail. Conforme pode ser verificado na Figura 15.

Figura 15 - Sistema de aquisição de dados



Fonte: Filho, 2018

Em relação à obtenção dos dados elétricos dos painéis, Figura 16, foram conectados os sensores de corrente e tensão no módulo de Input/Output (sinal analógico e digital) remoto Atos BRIO que comunica com o CLP.

Figura 16- Transmissores de temperatura NOVUS



Fonte: Filho, 2018

A carga utilizada no estudo foram duas lâmpadas fluorescente de 12W para sistemas de corrente contínua. Como pode ser verificada na Figura 17.

Figura 17 - Cargas utilizadas (lâmpadas)



Fonte: Filho, 2012.

Ambos módulos FV (sobre o solo e flutuante), foram conectados diretamente aos sensores de tensão e corrente, e esses ao módulo de comunicação Atos BriO. Para aquisição de dados de corrente, o sensor de corrente foi conectado a uma carga (lâmpadas). Os sensores de temperatura PT-100 foram conectados aos transmissores de temperatura da NOVUS. Por fim, o módulo Atos BRiO e os transmissores NOVUS foram conectados ao CLP, e este se comunicava com o sistema SAD (sistema de aquisição de dados) instalado no computador do LEA-UFC.

Os dados de temperatura da primeira etapa foram coletados durante os dias 11 de novembro de 2017 a 22 de novembro de 2017 das 5 horas às 18 horas. Considerando a variação do painel fotovoltaico para o espelho d'água foram obtidos

os dados que se encontram na Tabela 3. Os valores foram obtidos por meio do modelo matemático proposto pelo autor e as variações de temperatura foram calculadas a partir de equações matemáticas.

Tabela 3 - Resultados da primeira etapa

Tmédia Módulo FV Sobre o solo	Tmédia Modulo FV Flutuante	$\Delta T_{\text{médio}}$ Absoluto	$\Delta^{\text{n}}1$	$\Delta^{\text{n}}2$	$\Delta^{\text{n}}3$
43,47 °C	43,40 °C (7,5 cm)	0,07 °C	0,04%	0,07%	0,04%
41,07 °C	40,24 °C (6,0 cm)	0,83 °C	0,45%	0,75%	0,42%
39,19 °C	39,17 °C (4,5 cm)	0, 02 °C	0,01%	0,02%	0,01%
41,64 °C	41,68 °C (3,0 cm)	-0, 04 °C	-0,02%	-0,04%	-0,02%

Fonte: Filho, 2018.

A análise que compara o módulo fotovoltaico no chão e o módulo que estava sobre o espelho d'água na estrutura de isopor não apresentou uma redução sobre a temperatura de operação em função da má circulação de ar entre a água e a placa solar, de forma que impedia a dissipação do gradiente de temperatura.

A segunda etapa ocorreu do dia 28 de março de 2018 a 02 de maio de 2018 das 5 horas às 18 horas, com a coleta da temperatura e geração do painel instalado na estrutura de PVC em comparação os as perdas e ganhos na geração do módulo instalado sobre o solo.

De acordo com o autor o módulo fotovoltaico instalado sobre a estrutura de PVC apresenta um ganho na eficiência de 25,13% quando comparada com a temperatura do módulo fotovoltaico sobre o solo. A dissipação do gradiente formado na face inferior do modulo ocorre com uma taxa maior devido atuação da água e o ar na retirada do calor por meio da convecção. Em termos de geração, a energia elétrica gerada pelo módulo no solo foi de 29,50 Wh e pelo módulo flutuante foi de 36,84 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 7,34 Wh (24,88%). Logo, a instalação de placas fotovoltaicas sobre a água e associada à

circulação do ar possibilita a redução da degradação da tensão e causa o aumento da geração de energia.

Na primeira etapa, através de sensores e dispositivos de aquisição e coleta de dados foi possível verificar que não houve redução significativa de temperatura do módulo FV flutuante quando comparado com um módulo equivalente instalado sobre o solo. Entretanto, a estrutura utilizada na segunda etapa permitir a circulação do ar e maior troca de calor por convecção. Isso foi comprovado com os dados avaliados, mostrando que mesmo apresentando gradientes de temperatura semelhantes entre os experimentos da primeira e da segunda etapa, o módulo sobre estrutura flutuante de PVC permanecia com temperatura inferior ao módulo em solo por um tempo superior quando comparado ao tempo que o módulo sobre estrutura flutuante de isopor.

3.1.1.1 Considerações sobre trabalho analisado

O trabalho analisado trata-se sobre a influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico e possuía como objetivo instalar o módulo fotovoltaico sobre a água e ver o quanto de calor seria possível ser retirado. Em função disso, foi dividido em duas etapas, sendo a primeira instalar o painel sobre uma estrutura de isopor e a segunda sobre estrutura de PVC.

Aumentando o nível de incidência de radiação aumenta também a temperatura de operação do painel em função da estrutura das células quando recebe raios luminosos. De acordo com o autor para realizar o resfriamento é preciso que a estrutura de fixação permita a circulação de ar na face superior e inferior do painel, de modo que o gradiente de temperatura se dissipa e diminua a influência sobre a geração. Além disso, o autor associou a dissipação da temperatura pelo vento com o processo de convecção natural sobre o espelho d'água de um tanque.

A principal aplicação dos sistemas fotovoltaicos é a instalação nos telhados das residências, e levando em consideração as dimensões das placas, não é rentável a construção de um tanque para o tratamento térmico exposto neste trabalho de resfriamento passivo. Entretanto, o que difere esse tipo de instalação

para o telhado é que ao colocar o módulo sobre a água e garantindo o espaçamento mínimo da placa para o espelho d'água, o objeto terá a ação de duas formas passivas de resfriamento, a água e o ar.

3.1.2 Resfriamento passivo – segundo caso

A dissertação de Artur Corrêa Gardone Junior tem a proposta de *DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO: Melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor*. O trabalho foi realizado em ambiente de simulação no software SolidWorks e analisado o painel adaptado considerou-se um painel formado por apenas uma célula. Com isso foi possível desenvolver o protótipo com os melhores rendimentos na dissipação da temperatura de operação.

O modelo do painel considerado para o projeto foi o SX 120U policristalino e fabricante BP Solar e instalado no LABSOLAR (Laboratório Solar Fotovoltaico da Universidade Federal de Juiz de Fora). O dissipador de calor foi projetado considerando as características conforme o quadro.

Quadro 1 - Características do painel BP Solar SX 120 U

FABRICANTE	MODELO	DIMENSÕES	POTENCIA MAX.
BP SOLAR	SX120U	1461 mm x 731 mm x 50 mm	120W

Fonte: Junior, 2019.

Para determinar o tipo de material para construção das aletas foi considerado matérias com baixo custo e que apresentavam boa condutividade térmica. Com base nisso, foram escolhidos o alumínio e o aço no qual apresentam 205 e 50,2 (W/m K) respectivamente. Entretanto foram avaliados outros pontos que interferiam na escolha do melhor material para ser as aletas do protótipo de resfriamento. O quadro a seguir apresenta as características avaliadas.

Quadro 2- Comparação Alumínio x Aço

	PERFIL EM ALUMÍNIO	PERFIL EM AÇO
RESISTÊNCIA MECÂNICA	●	●
RESISTÊNCIA A OXIDAÇÃO SEM TRATAMENTO	●	●
PESO	●	●
FACILIDADE NA MONTAGEM E MANUTENÇÃO	●	●
DURABILIDADE E ACABAMENTO	●	●
FACILIDADE NO APROVEITAMENTO (SUSTENTABILIDADE)	●	●
CUSTO	●	●

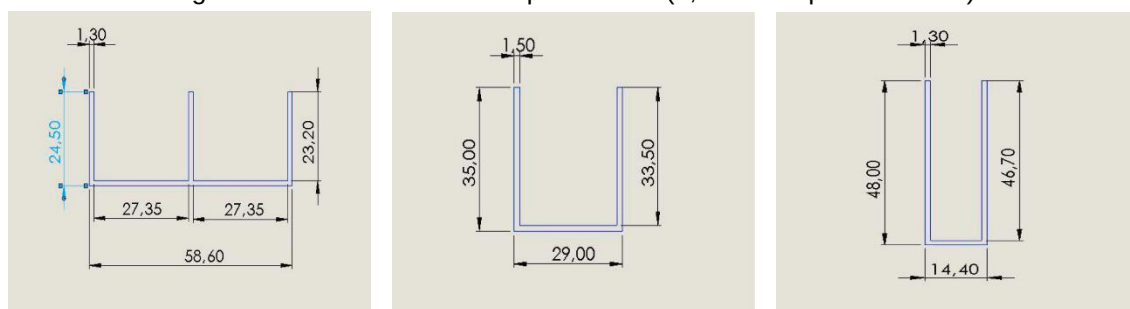
● BOM
 ● REGULAR
 ● RUIM

Fonte: Junior, 2019.

Com base nas informações citadas anteriormente o material escolhido foi o alumínio que apresentou melhores condições para transferir calor, boa resistência mecânica, vida útil maior que a dos painéis, resistência a oxidação e menor peso comparado ao aço. Apenas o custo do aço mostrou ser menor que o do alumínio, porém o tratamento que seria necessário realizar sobre a superfície do aço para combater a oxidação tornaria o custo com variação pequena entre eles.

Dentre os modelos de perfis metálicos que possuía no mercado o autor desenvolveu três modelos para a realização dos protótipos virtuais, conforme figura abaixo.

Figura 18 - Perfis de alumínio para aletas (1, 2 e 3 respectivamente)

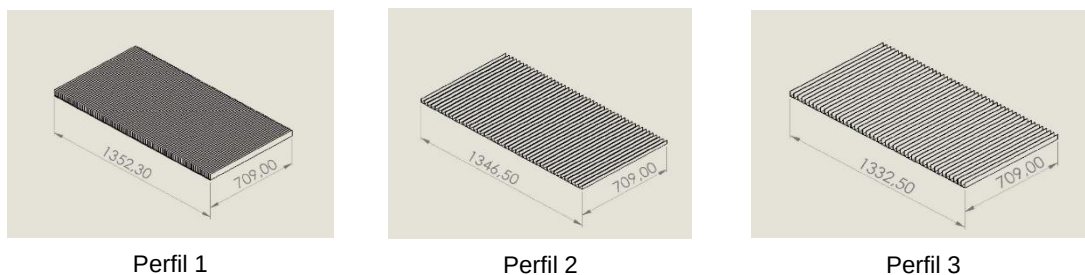


Fonte: Junior, 2019.

O SolidWorks foi o software escolhido para o desenvolvimento da pesquisa em ambiente virtual por se tratar de um programa que permite o desenvolvimento e testes de conjuntos mecânicos para estudo de simulação térmica e por apresentar uma interface de fácil utilização.

Com a escolha dos perfis foi modelado de acordo com as dimensões dos painéis e usando a liga de alumínio, empregada comumente na fabricação de esquadrias e perfis metálicos na construção civil. Foram simulados os três modelos de dissipadores conforme pode ser visto na figura 19.

Figura 19 - Dissipador perfil de alumínio



Fonte: Junior, 2019.

Para simulação foi considerado um painel com apenas uma célula nas dimensões do módulo fotovoltaico, visto que a realização com o modelo padrão com n células apresentou erros na geração de malha e interferiu impedindo a execução do estudo. A fixação das aletas no painel foi realizada pela pasta térmica de silício empregada entre a superfície dos perfis com a do módulo.

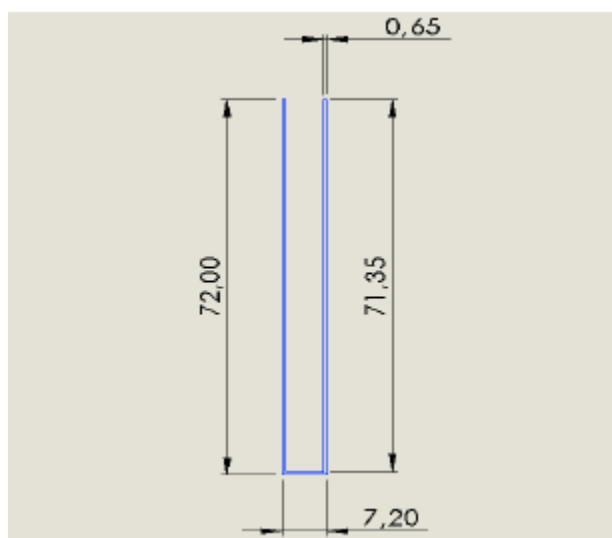
Com base nos modelos elaborados na etapa anterior e utilizando a linguagem geométrica de projeto o autor realizou a análise por meio da realização de simulações térmicas para assim determinar se os dissipadores de calor projetados como solução proporcionam uma redução da temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos.

Utilizando o modelo simplificado o autor realizou a simulação do painel em quatro cenários diferente, em que o intuito era obter a temperatura mínima e máxima para cada uma. Entre os três protótipos o que apresentou o melhor desempenho na redução da temperatura do painel foi o perfil 3 com um percentual médio de redução de 35,48% da temperatura de operação.

Partido desse modelo de aleta com o perfil 3 o autor desenvolveu mais 6 modelos no qual variavam as dimensões A, B e C e para obter o melhor rendimento do dissipador foi analisado o pior cenário que apresenta uma temperatura ambiente de 25°C e uma temperatura de operação de 70°C.

Analisando os resultados obtidos através das alterações dos parâmetros o autor conclui que: quanto mais estreito (menor valor de A), menor o valor encontrado para a temperatura mínima; quanto maior a altura do perfil (maior valor de B), menor o valor encontrando para a temperatura mínima; quanto mais fina a parede do perfil (menor valor da espessura C), menor o valor encontrado para a temperatura mínima.

Figura 20 - Perfil de alumínio 10



Fonte: Junior, 2019.

Com as alterações dos parâmetros dimensionais a Figura 20 apresenta o modelo criado (perfil 10) que apresentou um desempenho superior quando comparado aos demais perfis simulados nessa pesquisa. Com esse perfil nas condições de temperaturas simuladas foi possível reduzir em mais de 51% a temperatura quando comparado as medidas do painel sem o dissipador, apresentando-se assim como uma boa solução para melhoria da eficiência energética através da redução de temperatura dos painéis fotovoltaicos.

3.1.2.1 Considerações sobre trabalho analisado.

O protótipo realizado pelo o autor possui um taxa de resfriamento acima de 50% sobre a temperatura de operação do painel fotovoltaico, entretanto o resultado foi obtido em ambiente de simulação. Isso significa que instalar os painéis em ambiente real de geração a redução do gradiente deverá ser bem menor. Além

disso, o autor considerou o painel apenas sendo formado por uma célula e não entrou no cálculo da temperatura proveniente das conexões das n células que formam um módulo. Portanto, é preciso que seja realizado o estudo prático proposto pelo autor, na qual o protótipo de alumínio 10 seria confeccionado e instalado no módulo físico para obter a real taxa de resfriamento.

Em Palmas a maioria dos sistemas fotovoltaicos está sendo montados sobre os telhados das residenciais e industriais. Surge, portanto, um problema em relação ao espaço necessário entre o dissipador e o telhado, visto que tal distância interfere diretamente na troca de calor entre o dissipador e o ar ambiente. Mas cabe aplicação nas usinas solares que possuem sistemas de fixação sobre o solo e em estacionamentos fotovoltaicos.

A taxa de resfriamento apresentada pelo autor foi encontrada em ambiente de simulação e não apresenta nenhuma comparação com ensaios realizados em cenário real de geração. Todavia, o uso de aletas de alumínio é interessante tendo em vista que o material possui uma durabilidade superior ao do módulo e o custo aplicado para resfriar é apenas uma vez. Para aplicar a dissipação pelas aletas e primordial a validação da taxa de resfriamento apresentada no trabalho analisado com um protótipo em operação.

3.2 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO ATIVO

Ao contrário do resfriamento passivo, o resfriamento ativo do módulo fotovoltaico consome energia elétrica para acionar a circulação de fluídos por meio de motores elétricos e assim obter o controle da temperatura do painel. De acordo com Jurinic (2020) os sistemas de resfriamento ativo possuem um gasto energético na circulação do fluído para dissipar o calor do painel. O item que consome energia nos sistemas ativos são os motores elétricos que levam o material de resfriamento até os módulos fotovoltaicos. Por esse motivo a análise de trabalhos com o uso de sistemas ativos para resfriamento terá como objetivo diferenciar a região em que o sistema fotovoltaico está inserido.

3.2.1 Resfriamento ativo – primeiro caso

A dissertação de Renato Candido Reis possui o tema: “*análise do efeito da convecção forçada para resfriamento de sistema térmico fotovoltaico*”. Foi desenvolvida uma bancada de estrutura metálica de aço SAE 1020, posicionada para o norte com ângulo de inclinação de 20° e com rastreamento remoto para leste e oeste, conforme é apresentada na Figura 21. A bancada foi instalada no prédio do Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) da UNESP de Ilha Solteira ($20^\circ 25' 53.7''\text{S}$ $51^\circ 20' 36.9''\text{L}$) e a esse conjunto foi adaptado o sistema de resfriamento do módulo. O modelo fotovoltaico utilizado foi o Reisen RSM60-6-270P composto de 60 células de silício policristalinos e potência nominal de 270 Wp e eficiência de conversão de 16,5%.

Figura 21 - Suporte metálico, módulo e espelhos planos. (a) vista geral e (b) vista frontal



Fonte: Reis, 2020.

Foram realizados 5 experimentos nos quais foram analisados a influência do rastreamento, resfriamento com água e isolamento. Os dados foram coletados entre as 05h00min e 19h00min e a configuração do sistema (uso ou não de rastreamento solar, isolamento térmico na face posterior e sistema de resfriamento) foi alterada diariamente a fim de comparar sua influência na temperatura e potência do módulo e seguiu um cronograma.

Para realizar o rastreamento solar foi usado o sistema com Arduino para seguir o movimento de leste a oeste no qual variava o azimute superficial igualando-o ao azimute solar. O movimento de rastreamento de 5° a cada 20 minutos, com o primeiro realizado as 11h00min e o ultimo as 15h00min é realizado por atuador linear de 70 W controlado pelo Arduino Mega 2560.

O isolamento térmico da parte posterior do módulo é feito com uma camada de espuma com o objetivo de evitar a troca de calor com o ar ambiente, simulando a instalação de módulos em telhados e/ou integrados a fachadas. Desta forma, diminui-se uma variável climática, garantindo condições iguais de trabalho para diferentes testes. Ao impedir a troca de calor com o ar ambiente, o isolamento também permite avaliar o desempenho do trocador de calor do módulo.

O trocador de calor é o elemento responsável por retirar calor do painel fotovoltaico, sendo construído a partir de uma bobina de tubo de aço inoxidável 304 com diâmetro interno de 8,33 mm. A escolha do inox foi feita com o intuito de evitar qualquer interação química indesejada com a água deionizada. A bobina foi desenrolada e dobrada sucessivas vezes até que se formasse uma serpentina com comprimento total de 24,75 m. Conforme pode ser visto na Figura 22 a serpentina foi colocada na face inferior do painel e fixada com ripas de madeira para garantir o melhor contato térmico possível.

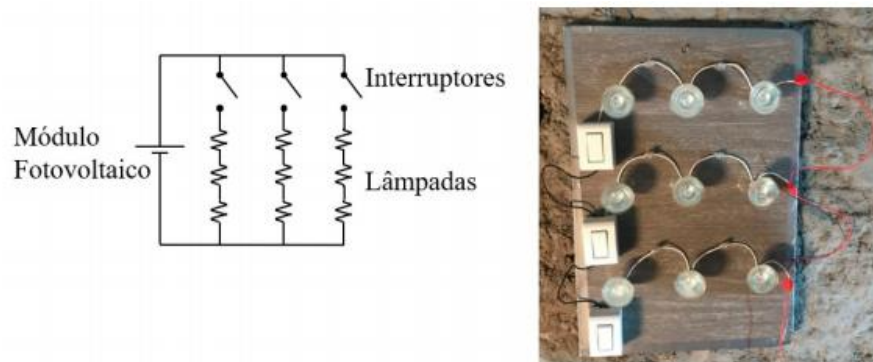
Figura 22 - Trocador de calor "Caso 1" acoplado ao módulo fotovoltaico e isolamento térmico



Fonte: Reis, 2020.

Destaca-se que durante o desenvolvimento do trabalho, três diferentes projetos de trocador de calor foram testados ('Caso 1', 'Caso 2' e 'Caso 3'). O 'Caso 1' foi o que apresentou melhor resultado em relação à temperatura de operação do painel solar quando comparado aos outros dois e que será abordado nesse trabalho. Com o objetivo de simular uma carga elétrica puramente resistiva ligada ao painel fotovoltaico, foi feito um quadro com nove lâmpadas alógenas de 50 W e tensão de alimentação de 12 V, Figura 23, divididas em três associações em paralelo com interruptores independentes, sendo duas associações utilizadas como carga durante o experimento e a terceira ficando como reserva. Um interruptor foi instalado em cada derivação, possibilitando escolher uma carga de 150 W, 300 W ou 450 W.

Figura 23 - Diagrama e foto do sistema de carga puramente resistiva

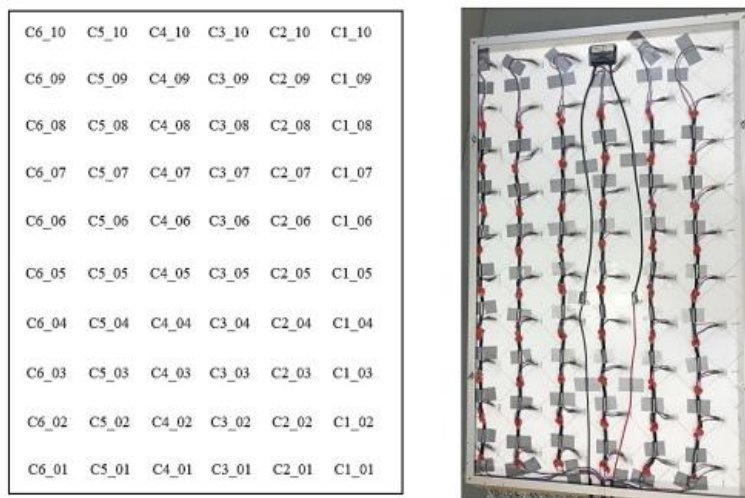


Fonte: Reis, 2020.

O principal objeto de estudo deste trabalho é a temperatura de funcionamento do módulo fotovoltaico levando em consideração diferentes condições de operação. A fim de analisar sua magnitude e distribuição, foram necessários vários sensores em diferentes pontos do módulo fotovoltaico. Os dados de temperatura foram coletados por 60 sensores digitais DS18B20 instalados no centro geométrico de cada célula do módulo, com uma fina camada de pasta térmica entre cada sensor e a parte posterior do módulo para garantir o contato térmico entre ambos. Esses sensores foram então colados na parte posterior do painel com silicone transparente e cola quente, e posteriormente, conectados a um sistema de aquisição composto por um Arduino Mega 2560; o microprocessador fez a leitura das medidas em intervalos de 30 segundos armazenando-as num cartão Micro SD em forma de tabela. A identificação dos sensores permitiu a reconstrução da distribuição e variação das temperaturas na exata geometria do módulo.

Os sensores foram nomeados de acordo com sua posição no módulo fotovoltaico. O módulo está dividido em 6 colunas com 10 linhas cada (10 células fotovoltaicas em cada linha). O sensor C6_01, por exemplo, está instalado na coluna 6 e linha 1. A Figura 24 mostra uma foto dos sensores instalados na parte posterior do módulo e um diagrama indicando cada posição de medida. Para obtenção da temperatura ambiente utilizou-se um sensor DS18B20 encapsulado que foi colocado abaixo do painel PV

Figura 24 - instalação dos sensores de temperatura e suas respectivas posições



Fonte: Reis, 2020.

O primeiro sistema analisado foi o painel sem isolamento térmico e sem trocador de calor, o segundo possuía o isolamento térmico e o trocador de calor, o terceiro apresentava o trocador de calor com o uso de nanofluidos, o quarto usou a serpentina com isolamento térmico e o sexto foi retirado à espuma (isolante) e o ar atuou em conjunto com o trocador de calor para resfriar o painel.

O isolamento térmico da face superior do módulo (simulando módulos integrados às fachadas e telhados) ocasionou um aumento considerável de 15 °C a 20 °C na temperatura de operação, reduzindo a potência máxima produzida em 7,6% em relação ao módulo não isolado. Isto implica que, em regiões quentes como o noroeste paulista, deve-se garantir um espaçamento mínimo da parte posterior do painel a fim de favorecer a troca de calor com o ar ambiente e evitar perdas energéticas devido à alta temperatura de operação. Destaca-se que o isolamento térmico também inviabiliza o uso de concentradores solares devido à alta temperatura de operação, exigindo a instalação de um sistema de resfriamento.

O acoplamento de um trocador de calor do tipo serpentina a um módulo fotovoltaico comercial se mostrou um grande desafio já que é difícil garantir um bom contato térmico entre uma superfície cilíndrica e uma superfície plana. O trocador de calor e o uso de água deionizada como fluido de trabalho diminuiu ligeiramente a temperatura de operação do módulo isolado termicamente, mas não abaixo de um módulo não isolado, o que significa que o ar ambiente foi mais eficiente que a serpentina para a retirada de calor do módulo.

3.2.1.1 Considerações sobre trabalho analisado

O trabalho realizado para resfriamento do módulo não apresentou resultado positivo devido o dissipador não englobar toda a área da face inferior da placa. Além disso, o processo de retirar o calor pela serpentina e bombeamento da água não foi eficiente, em função da falta de contato da face inferior do módulo com a serpentina. O isolamento térmico proposto aumentou a temperatura de operação devida não haver a circulação de ar.

O processo de resfriamento que foi retirado o isolamento térmico e associou o dissipador com o resfriamento devido da circulação do ar, apresentou melhor rendimento na retirada da temperatura de operação do módulo. Logo, para que a temperatura de sistemas fotovoltaicos possa ser tratada é preciso que mesmo com a ação de um sistema ativo é preciso mesclar com o uso das colunas de vento naturais para resfriamento do módulo.

O sistema com o isolamento térmico representa de acordo com o autor a simbolização de sistemas instalados nos telhados sem o mínimo de espaçamento da face inferior do módulo para as telhas. Quando ocorre isso, a placa fica com um ponto quente e assim diminuindo a eficiência do painel. Em função disso, é importante que os sistemas instalados em telhados passem por um estudo térmico na etapa de projetos, a fim de evitar a falta de circulação e dissipação do gradiente de temperatura que forma entre a placa e o telhado.

3.2.2 Resfriamento ativo – segundo caso

A dissertação de mestrado do Francesco Jurinic para obtenção do título em mestre em Ambientes e Tecnologias Sustentáveis tem como objetivo geral aumentar o rendimento dos sistemas fotovoltaicos através de um sistema de resfriamento com água para as placas fotovoltaicas, em seu melhor posicionamento solar em relação ao local instalado.

Os materiais usados para desenvolver esse trabalho foram:

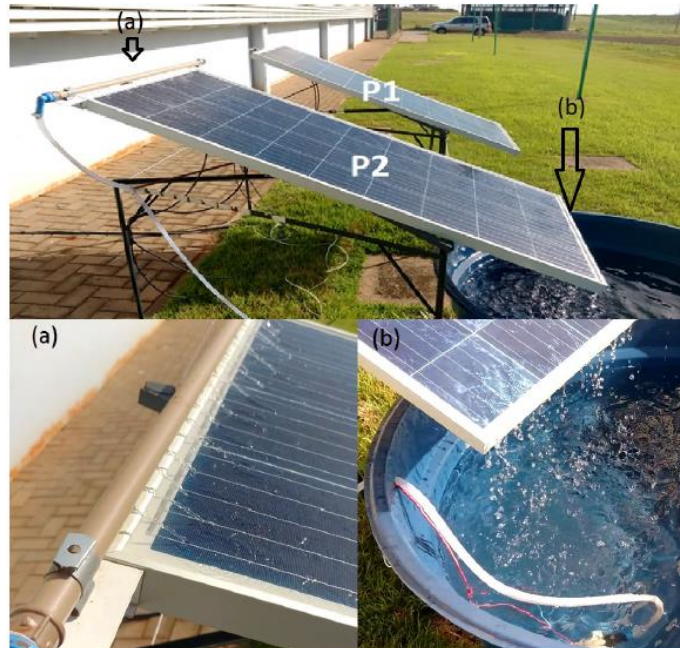
- Dois suportes móveis para fixação de placas fotovoltaicas, nas dimensões de 1,00 m altura x 1,20 m comprimento x 0,70 m largura;
- Duas placas fotovoltaicas de 150 W, da marca Yingli Solar, eficiência energética 15 % (± 5 %), Silício policristalino, nas dimensões de 148,5 cm de comprimento, 69,5 cm de largura por 0,05 cm de espessura;
- Um controlador de carga de capacidade de 30 A, marca Victron energy;
- Uma bateria estacionária 220 Ah;
- Um inversor Phoenix (12 V/ 220 V/ 375 VA);
- Uma caixa de água, PVC, com capacidade de 500 litros;
- Uma bomba submersa de 34 W 220 V;

O trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira consiste em analisar a variação do ângulo e identificar qual o melhor ângulo para receber o máximo de incidência solar e a segunda etapa descreve o processo de resfriamento do painel. O objetivo desse trabalho é identificar as formas de resfriamento ativo e devido a isso o foco vai ser o desenvolvimento o processo de resfriamento do módulo fotovoltaico.

Foi considerado um ângulo de 28° para recebe mais incidência direta da radiação solar e instalados os painéis de 150 W na Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Cerro Largo – RS, ao lado no Laboratório 3, em conjunto com o laboratório de Eletromagnetismo e Óptica. Considera-se para a cidade de Cerro Largo: latitude $-28^\circ 14' 10''$ S, longitude $54^\circ 75' 69''$ W e altitude 211 m.

Em uma das placas fotovoltaicas foi produzido um sistema de resfriamento com água, no qual consiste em reservatório de 500 litros, instalados na parte de baixo do painel e na frente da estrutura de fixação. Dentro do reservatório uma bomba de 34 W, com vazão de 10l/min bombeava água por meio de uma mangueira de silicone para um tubo de PVC soldável de 20 mm que ficava localizado na parte superior da placa. Esse tubo possui a extremidade vedada e furos de três mm com espaçamento de 2cm em 1 m de comprimento e formava uma película uniforme de água sobre a placa conforme pode ser verificado na Figura 25.

Figura 25 - Painéis fotovoltaicos com sistema de resfriamento



Fonte: Jurinic, 2020.

As medições da temperatura foram realizadas com termômetros de dois canais de termopar conforme marcações na Figura 26. Além disso, para poder analisar o quanto a água ganha temperatura com o sistema foi instalado um quarto no reservatório d'água.

Figura 26 - Pontos para coletar a temperatura



Fonte: Jurinic, 2020.

Na placa sem o sistema de resfriamento, foi feita medições apenas no local dois na superfície, pois diferente da placa com sistema de resfriamento, que sofrerá variações de temperatura ao longo da superfície devido aos efeitos convectivos do sistema de resfriamento, a placa sem este sistema terá temperatura uniforme. Para todas essas medições de temperatura foi utilizado o termômetro da marca Homis, modelo 471A. Conforme mostra a Figura 27, este modelo tem a opção de fazer duas medições em um só equipamento, que vai de -50°C a 130°C com precisão de $\pm 0,5\%$ $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

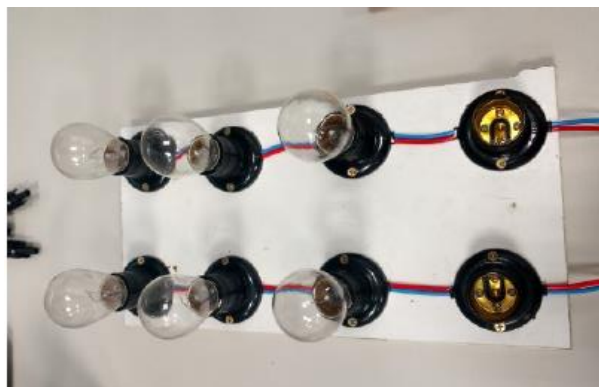
Figura 27 - Termômetro Homis



Fonte: Jurinic, 2020.

As placas foram ligadas diretamente a três lâmpadas incandescentes de 60 W 24 V cada, como mostra a Figura 28, utilizadas como carga do sistema, para se aproximar da máxima potência do sistema. As lâmpadas foram ligadas em paralelo, para aumentar a corrente, e manter a mesma tensão elétrica em todas.

Figura 28 - Carga resistiva

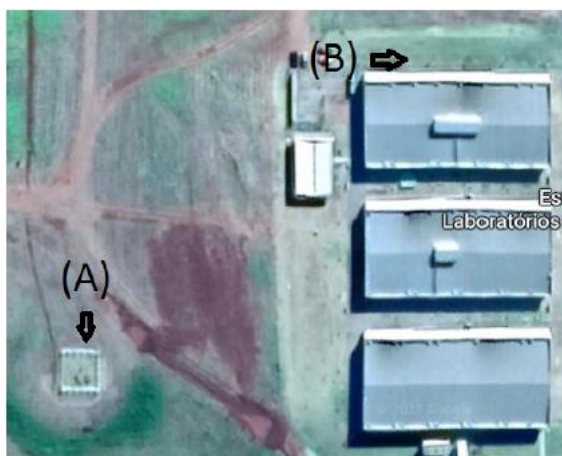


Fonte: Jurinic, 2020.

Para as medições elétricas, foram utilizados quatro multímetros digitais, de mesma marca e modelo (Tozz Dt-830B), dois na opção de tensão (voltímetro) com precisão de $\pm 0,5\%$ em CC, estes em paralelo a carga, sendo sempre um em cada placa, e dois na opção de corrente elétrica (amperímetro) com precisão de $\pm 1,0\%$ em CC, ligação em série.

Para as medições de irradiação (W/m^2) foram obtidas da estação meteorológica do próprio Campus, que está a 130 m de distância dos experimentos conforme pode ser visto na Figura 29. A marcação A refere-se ao sistema de estudo e a B é o local que se encontra a estação.

Figura 29- Obtenção da radiação



Fonte: Jurinic, 2020.

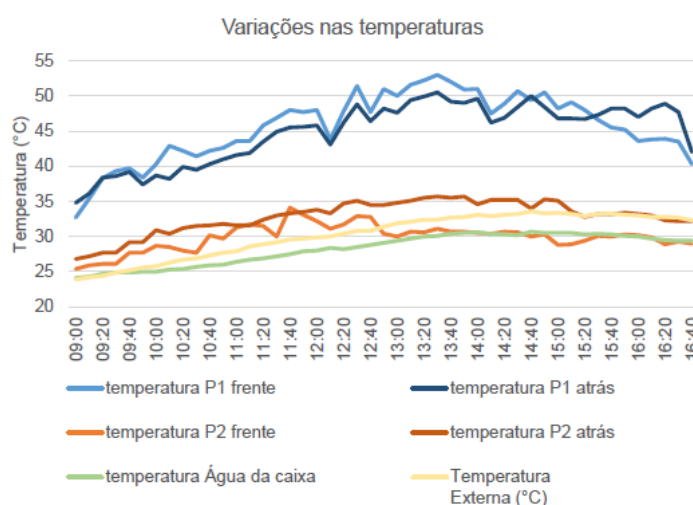
Para o cálculo da potência gerada de cada dia de experimento, foi utilizado todas as potências coletadas das 9 horas até às 16 horas, excluindo medições anteriores e posteriores a este horário, a fim de excluir valores muito baixos de geração, resultando um total de 7 h de incidência solar, valor acima da média do Brasil que é 5,5 h. Para o valor de média da potência gerada, foram somados os valores e dividido pelo total de medições.

A bomba submersa, instalada dentro do reservatório de água, foi alimentado pelo sistema off-grid (bateria e inversor), e as placas fotovoltaicas ligadas como na etapa anterior, somente nas cargas resistivas (lâmpadas) e os equipamentos de medições.

Foram realizados os ensaios do sistema com resfriamento em P2 e o outro sem resfriamento em P1 onde ambas as placas foram inclinadas com a angulação de 28° . A Figura 30 mostra o desenvolvimento da geração de energia em

potência de ambas as placas durante o período de 09h00min a 16h: 30min, incluindo a incidência da irradiação. A potência gerada entre as duas placas, comparadas com a irradiação, sendo P1 convencional e P2 com sistema de resfriamento no dia 13/09/19. Na Figura 30, foi encontrado uma potência média de 107,65 W em P1 e 127,0 W na P2 com sistema de resfriamento, significando um aumento de 18 % no rendimento e 2,35 % na eficiência.

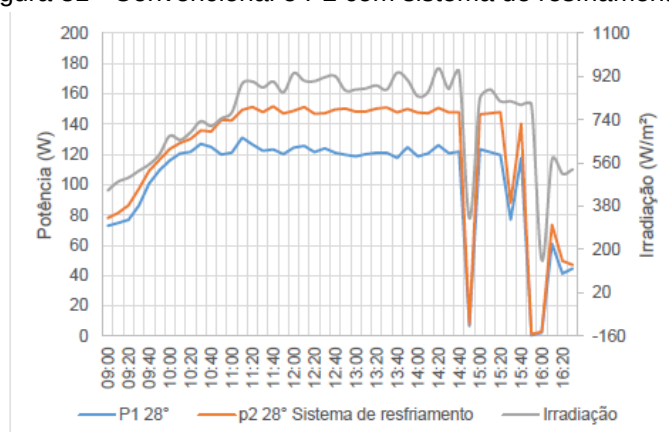
Figura 30 - Potencia entre P2 e P1



Fonte: Jurinic, 2020.

Na Figura 31, observa-se um aumento gradativo em todas as temperaturas ao longo do dia, porém as temperaturas da placa convencional, tanto na parte da frente quando atrás, ficaram muito mais altas que todas as outras. As temperaturas medidas na superfície da placa fotovoltaica com o sistema de resfriamento, foi considerado apenas no centro, pois as medidas na parte de cima e inferior da superfície apresentarem muito pouca diferença, não chegando a 1°C, demonstrando então que o ganho de temperatura da água, se demonstra de forma lenta

Figura 31 - Convencional e P2 com sistema de resfriamento



Fonte: Jurinic, 2020.

O sistema contribuiu muito na redução da temperatura, chegando a uma média de 15,75°C na parte da frente da PV, e 12°C na parte de trás. Com essa redução, foi possível aumentar a eficiência elétrica e a geração de energia na placa fotovoltaica. A Tabela 4 apresenta os valores referentes ao dia 24/01/2020 das placas com sistemas de resfriamento e a placa no modo convencional.

Tabela 4 - Principais resultados na geração entre P1 convencional e P2 com o sistema de resfriamento no dia 24/01/2020.

Descrição	P1 Convencional	P2 c/ sistema de resfriamento	Diferença
Potência média gerada	98,2 W	113,25 W	15,1 W
Potência máxima gerada	124,2 W	151,4 W	27,15 W
Eficiência média	11,3 %	13,0 %	1,6 %
Eficiência máxima	14,5 %	16,4 %	1,9 %
Temperatura máxima na superfície	56,7 °C	35,7 °C	21,0 °C
Temperatura média na superfície	48,96°C	33,18 °C	15,78 °C
Temperatura máxima na parte de trás	56,1 °C	39,9 °C	16,2 °C
Temperatura média na parte de trás	47,39 °C	34,83 °C	12,55 °C
Irradiação média	865 W/m ²		
Irradiação máxima	1081 W/m ²		

Fonte: Jurinic, 2020.

O sistema de resfriamento com água contínuo mostra-se de grande influência na potência gerada, chegando a um ganho médio em um dia de até 18% e uma diferença máxima de 25,5%, e teve uma diferença média na eficiência de até 2,35%, comparando com a placa P1 sem o sistema de resfriamento. Desta forma, além de aumentar a potência gerada, melhorou a eficiência do equipamento, para uma mesma irradiação solar.

3.2.2.1 Considerações sobre trabalho analisado

O autor utilizou a geração das placas para alimentar a bomba de 34 W no modo off-grid por meio da bateria e controlador. Parte da produção foi usada para bombear a água do reservatório e forçar a circulação face superior do painel, e mesmo assim o sistema apresentou um rendimento de 2,35% a mais quando comparada com a placa sem o sistema de resfriamento. Diferente do trabalho que forçou a circulação através de uma serpentina e não garantiu o contato da serpentina com a face inferior do módulo. Além disso, não ocorreu o contato do fluido direto com a placa como nesse trabalho que circula água sobre a face superior do módulo, garantido assim o contato físico 100% do agente que resfria com o objeto quente (módulo fotovoltaico). Isso permitiu o resultado positivo para esse sistema. Além do mais, os sistemas de resfriamentos passivos não permitem o controle térmico no momento do pico da temperatura, assim como, o sistema com bomba que circula a água sobre o painel.

A utilização da água para resfriamento dos painéis por meio de bombeamento tem que levar em consideração o contato do fluido com a placa, caso contrario o resultado será semelhante ao abordado no primeiro caso de resfriamento ativo. As principais aplicações utilizando a água para resfriamento são por meio do espelho d'água sobre a face superior do painel. Esguichar na face inferior do módulo e fazer uso da água para resfriar o módulo para aproveitamento térmico como ocorre com módulos fotovoltaicos híbridos, que armazenam a água em boyler e usam para fornecer água quente para banhos.

Quando a água entre em contato com algum objeto quente ocorre o resfriamento e a evaporação também. No sistema analisado o autor não abordou a quantidade de litros que foram evaporados no resfriamento da placa. Mas, é de suma importância levar em consideração o volume de água gasta em meio urbano, tendo em vista que as piscinas nas residências seriam possíveis pontos para circular a água até nas placas. Como são alimentadas via concessionária loca e cobra sobre o m³ gasto, aumentando assim o tempo de retorno do investimento sobre o sistema fotovoltaico com resfriamento.

3.3 SÍNTESE DE INFORMAÇÃO

Como forma de sintetizar as informações apresentadas e facilitar a compreensão da etapa anterior do projeto foi-se desenvolvido um quadro-resumo, apresentado a seguir.

Quadro 3 - Síntese de informações

ATIVOS	PASSIVOS
TRABALHOS ANALISADOS	
Estudo para melhorar desempenho e eficiência de placas fotovoltaicas: Através de um sistema combinando de inclinação e resfriamento	Módulos fotovoltaicos instalados em estruturas flutuantes
Análise do efeito da convecção forçada para resfriamento de sistema térmico fotovoltaico	Desenvolvimento de produto: melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor
VANTAGENS	
▪ Maior taxa de transferência de calor em comparação com a circulação natural; ▪ Maiores taxas de fluxo de massa em comparação com a circulação natural ▪ Maior condutividade térmica da água em relação ao ar ▪ Maior redução de temperatura	▪ Baixo custo; ▪ Sem manutenção; ▪ Fácil integração; ▪ Vida útil longa; ▪ Sem ruído; ▪ Sem consumo de eletricidade; ▪ Troca passiva de calor.
DESVANTAGEM	
▪ Maior custo inicial devido a bombas ▪ Maior custo de manutenção em comparação com a circulação de ar forçada ▪ Consumo de eletricidade em comparação com passivos ▪ Menor tempo de vida útil em comparação com sistemas passivos devido à corrosão.	▪ Baixas taxas de transferência de calor ▪ depende da direção e velocidade do vento; ▪ Baixa condutividade térmica e capacidade de troca de calor do ar; ▪ Baixas taxas de fluxo de massa; ▪ Redução de temperatura limitada, não é adequado para energia solar integrada no telhado sem espaçamento superior a 3 cm

Fonte: Adaptada de stambuk (2017)

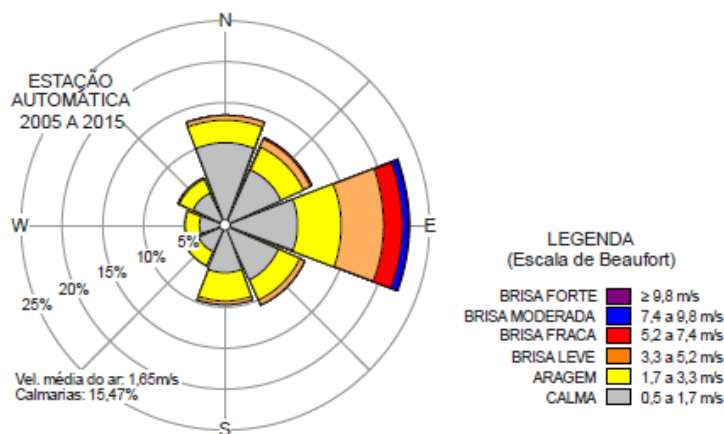
4. SISTEMA DE RESFRIAMENTO PARA SISTEMAS EM PALMAS

A melhor forma de resfriamento do painel fotovoltaico é a utilização do ar com fluido de contato. Tendo em vista que principal preocupação para os sistema de resfriamento ativo é o retorno financeiro em função do gasto energético para resfriar a placa, que em sua maioria conta com o acionamento de bombas e em muitos casos o KW economizado é menor que o KW consumido pelo motor elétrico. Desse modo, é necessário aproveitar as características climáticas de Palmas para tratamento térmico dos módulos fotovoltaicos.

Os sistemas passivos não necessariamente precisam de um investimento para iniciar a resfriar a placa fotovoltaica, sendo possível apenas com o contato do fluido com o módulo. Considerando as características climáticas de geração em Palmas, o uso do vento é a principal ferramenta para auxiliar no resfriamento, tendo em vista do custo benéfico para usufruir desse processo para dissipação do calor em função da sua oferta na região.

Silva, Souza (2016) determinou que a velocidade média de todo o período anual de Palmas foi de 1,65 m/s. Na direção Leste concentram-se as faixas de maior velocidade do vento – “brisa moderada e forte” (em azul e roxo, 5,2 a 9,8 m/s), com 0,77% e 0,04% respectivamente.

Figura 32 - Rosa dos ventos para a cidade de Palmas (TO), no período de 2005 a 2015



Fonte: Silva, Souza, 2019

O inverno de Palmas ocorre de maio a outubro e segundo Silva e Souza (2016) o período que apresenta as maiores velocidades dos ventos e com inserção da brisa leve, fraca e moderada na rosa dos ventos da cidade conforme pode ser verificado na figura 32. No inverno a média da velocidade do vento é de 2,29 m/s.

Nesse período são os meses com as mais altas temperaturas para a geração de energia solar, consequentemente, apresentam as maiores temperaturas de operação dos painéis. Logo, o pico que ocorre a maior presença de calor sobre a placa é o pico com ventos mais fortes, sendo assim, os projetistas necessitam levarem em consideração a circulação de ar nos módulos.

A cidade de Palmas (TO) não possui uma única direção predominante do vento, sendo variável de acordo com a época do ano e o período do dia. De acordo com Silva, Souza (2016) há uma clara tendência de predominância de ventos vindos de Norte e Leste e durante todo o inverno (julho, agosto e setembro) o vento é oriundo do Leste. Os sistemas fotovoltaicos são projetados para serem alocadas nos telhados com inclinação para o norte, em função disso é necessário considerar a distância mínima entre as telhas e a parte posterior do painel para dissipação do calor que receberam as rajadas do leste norte.

Palmas possui ventilação em todas as direções e isso favorece a instalação das placas em telhados de construção que não necessariamente tem queda voltada para o norte. Entretanto, para que ocorra a redução da temperatura de operação por meio do uso do vento é necessário que garanta o espaçamento mínimo para passagem do vento.

Atrelado a essa característica do vento é possível usar as aletas como dissipadores para resfriamento do painel em função da circulação de vento durante o ano todo no município de Palmas. Com o uso das aletas para retirar o calor das placas e transferência para o meio ambiente se torna mais rápido.

CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso, foram analisados quatros trabalhos que realizam o resfriamento dos painéis fotovoltaicos que são sujeitos a altas temperaturas ambientes e altas temperaturas de operação. A temperatura ocasiona uma degradação da tensão em função das características elétricas das células e implica em uma redução na geração de energia fotovoltaica. Na metodologia utilizada foi possível identificar duas formas de resfriamento do painel, o primeiro se trata dos agentes passivos e o segundo dos ativos, ou seja, mecanismos que não gastam energia para resfriar e os que gastam energia respectivamente.

Como verificado ao longo do trabalho de conclusão de curso, os sistemas de resfriamento passivo é o que mais se torna vantajoso por não ter gasto energético em função da utilização dos recursos naturais. Os trabalhos apresentados que utilizaram o ar para resfriamento dos sistemas fotovoltaicos foram mais bem sucedidos em termo de saldo energético. Outra forma de dissipação passiva que apresentou redução da temperatura nas placas foi quando são instaladas sobre a água e associada à dissipação do calor que fica na face inferior do painel por meio da circulação do ar. Porém, se tratando de residência urbana não é lucrativo construir tanques. Em ambiente rural do entorno da cidade é interessante fazer o uso das represas de água para alocação das placas. Outro ambiente que pode receber placa é o lago de Palmas que possui uma grande extensão.

Os sistemas de resfriamento ativo são caracterizados por haver gasto energético para bombear o fluido até o módulo. As principais formas são: circulação de água por meio de uma serpentina, água circulando pelo o modulo fotovoltaico como os painéis híbridos, túnel de vento produzido por ventiladores. Esses sistemas sempre vão envolver um motor elétrico para a circulação do fluido. Caso não seja possível realizar um resfriamento passivo, para que o sistema não opere com temperaturas elevadas é necessário colocar em atuação um sistema ativo, mas é preciso apresentar um resultado positivo no balanço energético.

Os sistemas em palmas não passam por um tratamento térmico. O que ocorre na maioria dos casos é deixar o espaçamento mínimo que o suporte permite não garante que a dissipação da temperatura ocorra por não levar em consideração o ponto de entrada e saída do vento. Logo, é preciso que esses sistemas passem

por análise que relaciona o posicionamento do sistema com relação às direções do vento no município de Palmas, o espaçamento da face inferior para o telhado e formas mecânicas para direcionar a passagem do vento entre as placas e o telhado. Portanto, é necessário que os sistemas fotovoltaicos sejam projetados para usufruir principalmente o comportamento do vento, de modo que reduza a temperatura de operação do painel em Palmas.

Para trabalhos futuros, propõe-se a execução prática dos modelos analisados nesse trabalho de conclusão de curso e assim apresentar a que obteve o melhor rendimento na geração de energia com a redução da temperatura. Além disso, realizar o estudo do comportamento térmico dos inversores na conversão de energia e analisar o percentual de perda que ocorre nesses dispositivos que operaram com altas temperaturas e com pouca dissipação do calor, sendo possível, determinar o impacto na vida útil do inversor e analisar o decréscimo do rendimento ao longo dos anos.

REFERÊNCIA

ABSOLAR. **Energia solar fotovoltaica no Brasil – infográfico ABSOLAR.**

Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 11 de jun. 2021.

ACERO, Gohnny Laura. **Pasta de TiO_2 para uso em Células Solares Fotovoltaicas.** 2017. 53 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do brasil.** Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), 2008.

AZEVEDO, Raquel Lima. **A emissão de gases por ruminantes e o aquecimento global:revisão.** 2018. 32 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

Balanco Energético Nacional. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acesso em: 18 set. 2019.

BORDIGNON, Felipe Augusto. **A aplicação da energia solar fotovoltaica em programas de habitações sociais – empreendimento jardim vitória em palmas – to.** 2019. 65 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto federal de Educação. Ciência e Tecnologia do Tocantins, Palmas. 2019.

CARVALHO, André Luiz Costa. **Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas.** 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado Estação Experimental “Presidente Médici”. **Boletim Científico da Faculdade de Ciências Agrônomicas UNESP**, Botucatu, n. 1, 1983. 95 p.

CRESTANI, T; MOEHLECKE, A; ZANESCO, I. Influência da passivação em células solares de silício com campo retrodifusor seletivo de alumínio e boro. **Associação Brasileira de Metalurgia, Materias e mineração**, São Paulo, v 14, n. 3, p. 236-242, 2017.

FERREIRA, Rodrigo Marques. **Estrutura eletrônicas de derivados de C_{60} para aplicações em células solares orgânicas**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013.

FILHO, Alexandre Atílio Ramos de Alencar. **Avaliação da influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico sobre estrutura flutuante**. 2018. 78 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará , Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.

GOUVÊA, Evaldo Chagas **Resposta espectral de células fotovoltaicas em condições reais de operação**, 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá. 2017.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). **Base dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa** - BDMEP. Disponível em:
<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>. Acesso em: 25/09/2020.

International Standard IEC 61215, **Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules** – design qualification and type approval, 2005.

JUNIOR, Arthur Correa Gardone. **Desenvolvimento de produto: melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor**. 2019, 82 f. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído, Juiz de Fora, 2019.

JURINIC, Francesco. **Estudo para melhoria na performance e eficiência de placas fotovoltaicas: através de um sistema combinado de inclinação e resfriamento**. 2020. 96 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2020.

JUSTE, Flávio Marcos Alves. **Estudos sobre células fotovoltaicas, funcionamento, aplicação e pesquisa de desenvolvimento**. 2008. 30 f. Monografia (Licenciado em Física) - Instituto de Física, Universidade Federal de Urbelandia, Urbelandia, 2008.

LIMA, Ariane Martins Caponi. **Balanço de energia em painel fotovoltaico – um estudo experimental**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LOCKS, Giovana. **Análise de temperatura em módulos fotovoltaicos**. 2019. 56f. TCC – Bacharel em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar. **Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão**, Revista Virtual de Química, Niterói-RJ, Brasil., v. 7, ed. 01, p. 126-143, 14 out. 2014. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v7n1a08.pdf>. Acesso em: 16 out. 2019.

MEDEIROS, Ana Carolina dos Reis. **Sistema de geração fotovoltaico conectado à rede elétrica: estudo de caso**. 2017. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

MENDES, M. C.F.; **Energia solar fotovoltaica em edifícios de Museus ou Centros 80 de Cultura: Contributo para a preservação e sustentabilidade**

ambiental.Disponível em < [http:// recil.grupolusofona.pt/jspui/bitstream/10437/3739/1/Artigo_Energias_Renov_UFRJ.pdf](http://recil.grupolusofona.pt/jspui/bitstream/10437/3739/1/Artigo_Energias_Renov_UFRJ.pdf) /> em 07 de Out. de 2019.

NASCIMENTO, Amanda Loureiro. **Avaliação do uso de célula a combustível como fonte secundária de energia em sistema híbrido com arranjo fotovoltaico.** 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/9577/1/tese_11381_Amanda%20Loureiro%20Nascimento.pdf>. Acesso em: 7 out. 2019.

OLIVEIRA, Eliézer Fernando. **Estrutura eletrônica de derivados de poli(3-hexiltiofeno) para aplicações em camadas ativas de células solares orgânicas.** 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013

PAZ, Luis Hildebrando Ferreira. A influência da vegetação sobre o clima urbano de palmas – TO. 2009,169 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília. 2009.

PEREIRA, Reuler Cardoso. **Políticas públicas para expansão da energia solar fotovoltaica: um estudo dos principais programas de incentivo da tecnologia no brasil.** 2019. 74 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto federal de Educação. Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2019.

PINHO, João T.; GALDINO, Marco A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** CRESESB. 2014.

PINTO, Arthur Caio Vargas e. **Desenvolvimento de um protótipo de árvore fotovoltaica.** 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

REIS, Renato Candido. **Análise do efeito da convecção forçada para resfriamento de sistema térmico fotovoltaico**. 2020. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020.

RUTHER, R. – **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial de geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligadas a rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis, SC: Labsolar, 2004.

SACRAMENTO, E. M.; CARVALHO, P. C. M.; DE ARAÚJO, J. C.; RIFFEL, D. B.; DA CRUZ CORRÊA, R. M.; & PINHEIRO NETO, J. S. **Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs**. IET Renewable Power Generation, v. 9, p. 1019-1024, 2015.

SACRAMENTO, E. M. **Modelo elétrico-térmico para representar o comportamento de módulos fotovoltaicos flutuantes em água a partir das condições climáticas do semiárido brasileiro**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SAMPAIO, Priscila Gonçalves Vasconcelos. **Prospecção tecnológicas de células fotovoltaicos para energia solar**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/20294>. Acesso em: 8 out. 2019.

SAUTHIER, Luís Fernando. **Modelagem matemática de módulos fotovoltaicos aplicados a ambientes de simulação de geração distribuída**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí, Ijuí, 2019

SILVA, Liliane Flávia Guimarães da Silva; SOUZA, Lucas Barbosa. **Ritmo climático e conforto térmico na cidade de palmas (to) em anos-padrão selecionados**, Rio de Janeiro – UFRJ, n. 34, 2019.

SIMIONI, Tássio. **O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico do brasil**. 2017. 222 f. Dissertação (mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, 2017.

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

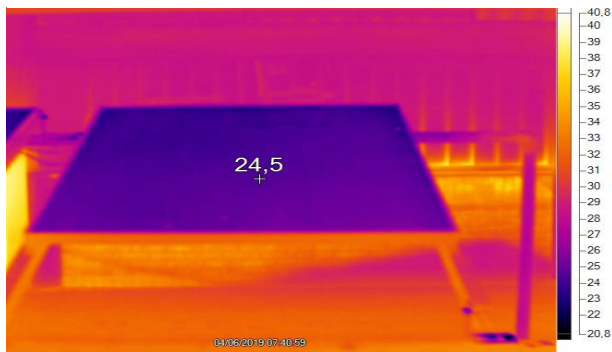
URBANETZ, JR. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2010.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica – conceitos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015

.

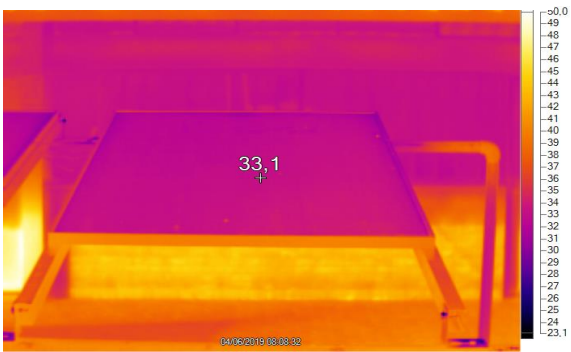
ANEXOS

Figura 34 - temperatura às 7h00min



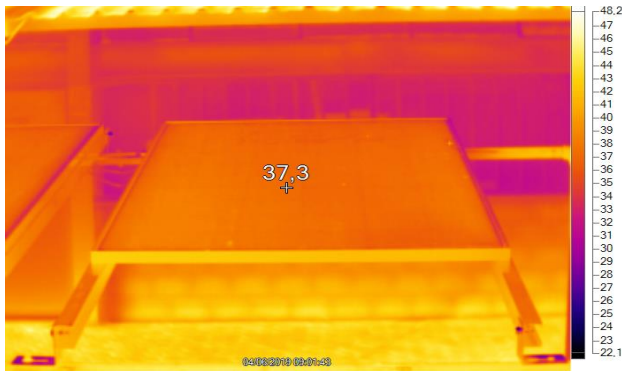
Fonte: Autor, 2019.

Figura 33 – Temperatura às 08h00min



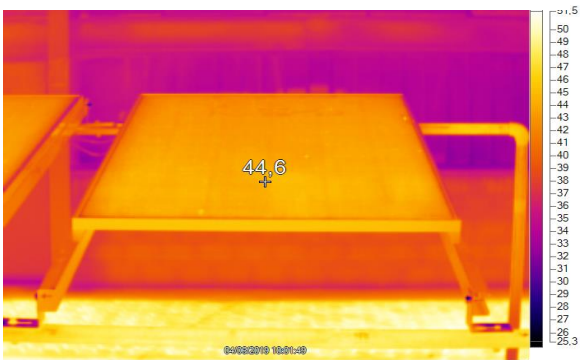
Fonte:Autor, 2019

Figura 36 - Temperatura às 09h00min



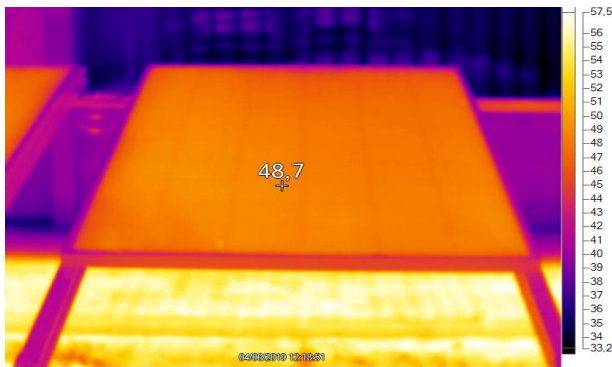
Fonte: Autor, 2019.

Figura 35 – Temperatura às 10h00min



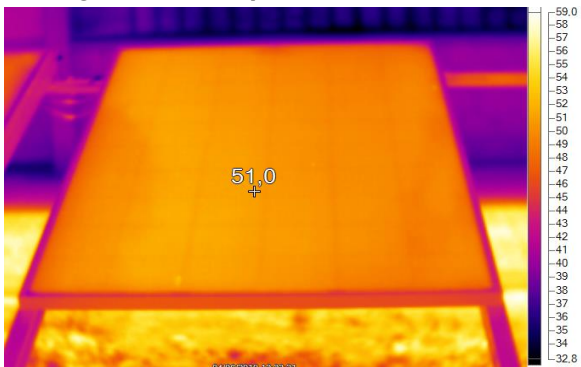
Fonte: Autor, 2019.

Figura 38 – Temperatura às 11h00min



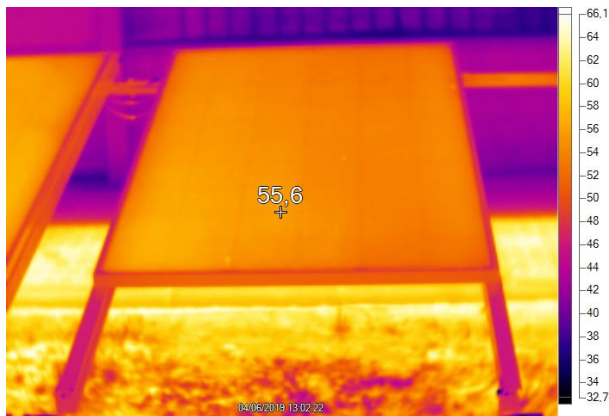
Fonte: Autor, 2019.

Figura 37 - Temperatura às 12h00min



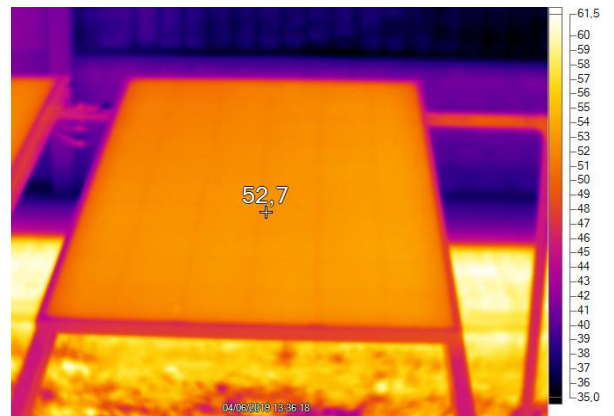
Fonte: Autor, 2019.

Figura 40 – Temperatura às 13h00min



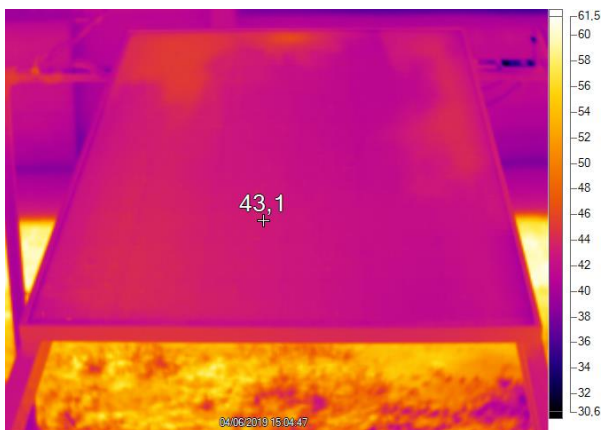
Fonte: Autor, 2019.

Figura 39 – Temperatura às 14h00min



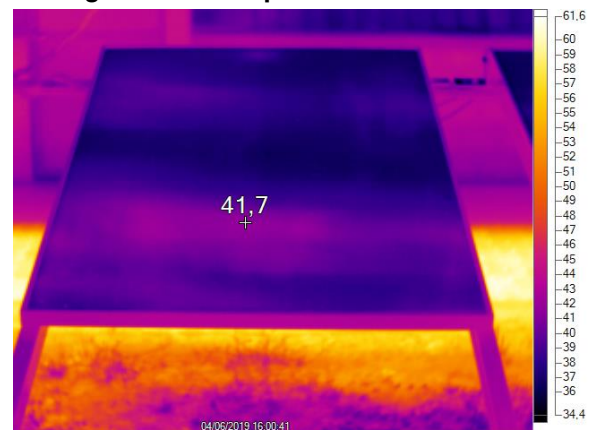
Fonte: Autor, 2019.

Figura 42 – Temperatura às 15h00min



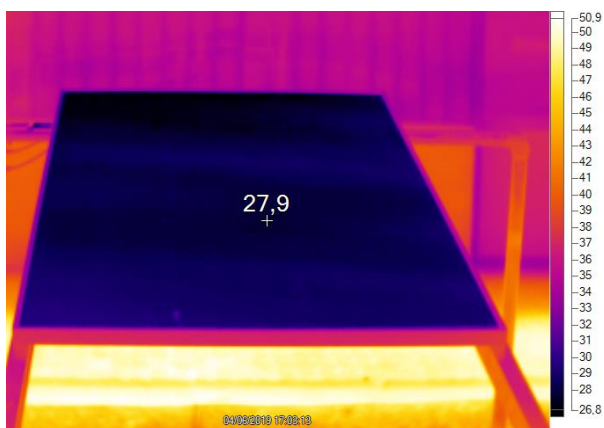
Fonte: Autor, 2019.

Figura 41 – Temperatura às 16h00min



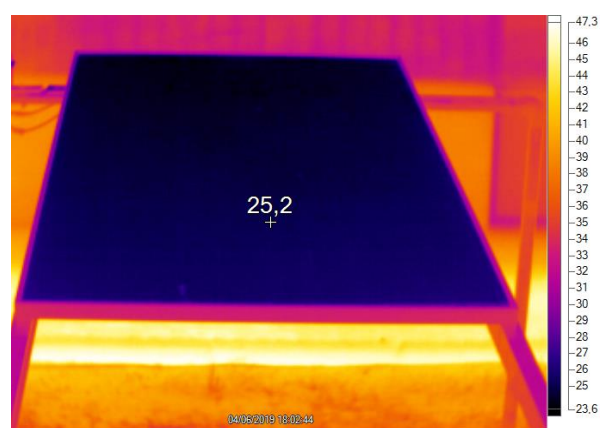
Fonte: Autor, 2019.

Figura 44 – Temperatura às 17h00min



Fonte: Autor, 2019.

Figura 43 – Temperatura às 18h00min



Fonte: Autor, 2019.