

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCO ANTONIO BERTOINA

ANÁLISE DE SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO COM MATERIAL DE MUDANÇA  
DE FASE DE BASE GLICERINADA

CURITIBA

2023

MARCO ANTONIO BERTOONA

ANÁLISE DE SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO COM MATERIAL DE MUDANÇA  
DE FASE DE BASE GLICERINADA

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Mecânica no Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia  
da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Stephan Hennings Och

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Bertogna, Marco Antonio

Análise de sistema fotovoltaico híbrido com material de mudança de fase de base glicerizada. / Marco Antonio Bertogna. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Stephan Hennings Och

1. Sistema fotovoltaico híbrido. 2. Glicerina. I. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. II. Och, Stephan Hennings. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCO ANTONIO BERTO GNA** intitulada: **ANÁLISE DE SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO COM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE DE BASE GLICERINADA**, sob orientação do Prof. Dr. STEPHAN HENNINGS OCH, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 20 de Novembro de 2023.

Assinatura Eletrônica  
20/11/2023 18:19:08.0  
STEPHAN HENNINGS OCH  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
07/12/2023 09:36:00.0  
VIVIANA COCCO MARIANI  
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO  
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
23/11/2023 10:42:11.0  
LUIS MAURO MOURA  
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO  
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
20/11/2023 18:13:51.0  
FELIPE REZENDE DE LOYOLA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha mãe Jeanine e à minha vó Elza por terem cuidado de mim ao longo de todos esses anos, assim como os outros membros da minha família.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Stephan Hennings Och, pelas suas contribuições no trabalho, especialmente em relação aos modelos matemáticos e a revisão detalhada do texto. Agradeço também à doutoranda Danniella Rosa, pela revisão deste texto e continuação do projeto.

Ao prof. Dr. Luís Mauro Moura por ter cedido o seu laboratório e equipamentos, possibilitando os experimentos em ambiente controlado e aberto, assim como o doutorando Evandro Rolin e o técnico Michell de Almenda pela ajuda na efetuação dos experimentos.

Um agradecimento final ao programa de fomento à pós-graduação do CAPES/DS por viabilizar este projeto.

## RESUMO

Células fotovoltaicas perdem em média 0,45% de eficiência de conversão elétrica a cada Kelvin acima da temperatura de operação, tornando-se importante o estudo de métodos de reduzir a sua temperatura. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico híbrido com material de mudança de fase de base glicerizada na redução de temperatura do painel e geração de energia térmica. Foram realizados testes em ambiente controlado deste sistema em três configurações: painel+água; painel+água+base glicerizada; painel+base glicerizada+água. Nestes testes foram medidas a temperatura dos componentes e tensão de circuito aberto, comparando com um painel sem arrefecimento. Um modelo matemático baseado em analogia elétrica foi proposto para os sistemas e seus parâmetros foram identificados através dos dados experimentais. Estes modelos foram utilizados para avaliar a influência de diversos parâmetros no sistema e avaliar o seu desempenho no deserto de Nevada ao longo de um ano. Uma avaliação experimental em ambiente aberto do sistema foi efetuada em Curitiba no outono, inverno e verão. Dentre os três sistemas, o que apresentou melhores resultados em laboratório foi o com o material de mudança de fase na camada inferior, com uma redução máxima da temperatura em relação ao painel sem arrefecimento de 12,6 K, acarretando um aumento máximo de eficiência de conversão elétrica de 5,7%. A mesma configuração também mostrou-se superior nas simulações. A modelagem matemática dos três sistemas mostrou-se adequada, com um erro médio inferior a 2 K e os parâmetros encontraram-se na ordem de grandeza esperada. A simulação em Nevada apresentou um pico de aumento de eficiência elétrica de 10% no verão e na primavera, com valores médios de 3,6% e 2,1%, respectivamente. No inverno não houve aumento significativo, aproveitando-se apenas a energia térmica. Avaliando o sistema em Curitiba através de simulação computacional, a temperatura do painel com arrefecimento manteve-se inferior à do sem arrefecimento, com uma diferença máxima de 3,9 K no inverno, 12,8 K no outono e 14,2 K no verão. Devido à instabilidade climática durante a tarde, o painel sem arrefecimento se resfria mais rapidamente, reduzindo o benefício de utilizar o sistema de arrefecimento. O aumento médio de produção de energia elétrica foi de 2,2; 2,3 e 2,8% para inverno, outono e verão, respectivamente. A geração de energia térmica pelo sistema de arrefecimento foi superior a 40% da energia recebida pelo sol em todas as estações. Ao aumentar o volume de água no reservatório, houve um aumento significativo de energia térmica nas três estações e de elétrica no verão e outono. Conclui-se que o sistema de arrefecimento beneficia o painel, com a glicerina assistindo o sistema térmico e o proveito da energia térmica mostra-se importante para a viabilidade do sistema.

**Palavras-chaves:** Fotovoltaico híbrido. Glicerina. Eficiência. Experimental. Resistências térmicas.

## ABSTRACT

Photovoltaic cells lose on average 0,45% of electrical conversion efficiency for each Kelvin above its operating temperature, making it important to study methods to reduce said temperature. The objective of this work is to evaluate the performance of a hybrid photovoltaic system with glycerol-based phase change material for temperature reduction and thermal energy generation. Tests are conducted in a controlled environment for this system in three configurations: panel+water; panel+water+glycerol; panel+glycerol+water. A lumped mathematical model was proposed for each system and the parameters were identified through experimental data. These models were used to evaluate the influence of various parameters in the system and to analyse the performance of the system in the Nevada desert through an year. An experimental outdoor evaluation of the system was conducted in the city of Curitiba during summer winter and fall. Among the systems, the one which showed best results was the one with the phase change material positioned below the thermal system, with a peak temperature reduction of 12,6 K, leading to an increase of 5,7% of the maximum electrical conversion efficiency. The same system also yielded the best results in the simulations. The mathematical model proved adequate, with an average error below 2 K for each system and the parameters within the expected range. The simulation in Nevada showed a peak increase of 10% for both summer and spring, with an average increase of 3,6% and 2,1% for the respective seasons. No noticeable difference was found in the winter, only benefitting of the thermal energy the system generates. Evaluating the system in Curitiba through computational simulation, the temperature of the panel with cooling is kept below the one without cooling, with a maximum difference of 3,9 K during winter, 12,8 K during fall e 14,2 K during summer. Due to climatic instability after the noon, the panel with no cooling has its temperature reduced faster, reducing the benefit of the cooling system. The average increase in electrical energy production was of 2,2; 2,3; 2,8% for the winter, autumn and summer. The generation of thermal energy by the cooling system was superior to 40% of the energy received from the sun for every season. An increase of the water reservoir's volume lead to a substantial increase of thermal energy for all 3 seasons and of electrical energy during summer and fall. It is concluded that the cooling system is beneficial to the photovoltaic panel, with the glycerol aiding the thermal system and the usage of thermal energy is important for the system's viability.

**Key-words:** Hybrid photovoltaic. Glycerol. Efficiency. Experimental. Lumped model simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA GLOBAL ANUAL . . . . .	15
FIGURA 2 – TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO PARA PAINÉIS DE SILÍCIO	16
FIGURA 3 – POTÊNCIA INSTALADA GLOBAL AO LONGO DO ANO . . . . .	17
FIGURA 4 – POTÊNCIA INSTALADA NACIONAL AO LONGO DOS ANOS . .	18
FIGURA 5 – NÚMERO DE ARTIGOS PUBLICADOS PARA DIVERSAS APLICAÇÕES DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE . . . . .	19
FIGURA 6 – GAP DE ENERGIA PARA MATERIAIS ISOLANTES, CONDUTORES E SEMICONDUTORES . . . . .	22
FIGURA 7 – ESQUEMATIZAÇÃO DO EFEITO FOTOVOLTAICO EM UMA CÉLULA DE SILÍCIO . . . . .	23
FIGURA 8 – ESPECTRO SOLAR, COM PORÇÃO UTILIZÁVEL POR CÉLULAS DE SILÍCIO . . . . .	24
FIGURA 9 – EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO ELÉTRICA MÁXIMA DE CÉLULAS DE SILÍCIO A CADA ANO, OBTIDAS EM LABORATÓRIO .	25
FIGURA 10 – CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA .	26
FIGURA 11 – CURVA CARACTERÍSTICA TENSÃO-POTÊNCIA DO PAINEL YL010P-17B PARA DIVERSAS TEMPERATURAS . . . . .	27
FIGURA 12 – CATEGORIAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TÉRMICOS . .	27
FIGURA 13 – SUPERFÍCIES REFLETORAS UTILIZADAS COMO CONCENTRADORES DE ENERGIA SOLAR . . . . .	28
FIGURA 14 – DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA UM SISTEMA FVT. A) CHAPA E TUBO. B) COM CANAIS. C) FLUXO LIVRE. D) COM DOIS ABSORVEDORES. . . . .	29
FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DOS MÉTODOS DE APRIMORAMENTO DO MMF. A) NANOPARTÍCULAS. B) MICRO ENCAPSULAMENTO. C) ALETAS. D) IMERSÃO EM ESPONJA METÁLICA. . . . .	31
FIGURA 16 – VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO RT42 AO INTRODUIR NANOPARTÍCULAS DE $Al_2O_3$ . . . . .	33
FIGURA 17 – AVALIAÇÃO DO PONTO DE FUSÃO DO MMF . . . . .	37
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ARREFECIMENTO. A) SISTEMA FV+MMF+T. B) SISTEMA FVT. C) SISTEMA FVT+MMF. . . . .	40
FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO DE VISTA EM CORTE DO SISTEMA TÉRMICO .	41
FIGURA 20 – RESERVATÓRIO DO MMF. A) RESERVATÓRIO SENDO PREENCHIDO. B) RESERVATÓRIO CHEIO. . . . .	42

FIGURA 21 – COMPONENTES DO SISTEMA FVT+MMF . . . . .	42
FIGURA 22 – BANCADA UTILIZADA PARA AS MEDIÇÕES . . . . .	44
FIGURA 23 – POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES NO SISTEMA FV+MMF+T	46
FIGURA 24 – POSICIONAMENTO DO SISTEMA NO TELHADO . . . . .	47
FIGURA 25 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA . . . . .	47
FIGURA 26 – NEBULOSIDADE EM 2022 EM CURITIBA . . . . .	48
FIGURA 27 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FV . . . . .	52
FIGURA 28 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FVT . . . . .	54
FIGURA 29 – CIRCUITO TÉRMICO DO SISTEMA FVT . . . . .	54
FIGURA 30 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FV+MMF+T	56
FIGURA 31 – CIRCUITO TÉRMICO DO SISTEMA FV+MMF+T . . . . .	56
FIGURA 32 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FVT+MMF .	58
FIGURA 33 – CIRCUITO TÉRMICO DO SISTEMA FVT+MMF . . . . .	58
FIGURA 34 – RESULTADOS PARA O SISTEMA FVT. A) TEMPERATURA DOS COMPONENTES. B) TENSÃO EM ABERTO. . . . .	63
FIGURA 35 – RESULTADOS PARA O SISTEMA FV+MMF+T. A) TEMPERA- TURA DOS COMPONENTES. B) TENSÃO EM ABERTO. . . . .	63
FIGURA 36 – RESULTADOS PARA O SISTEMA FVT+MMF. A) TEMPERATURA DOS COMPONENTES. B) TENSÃO EM ABERTO. . . . .	64
FIGURA 37 – REDUÇÃO PERCENTUAL DA TEMPERATURA EM RELAÇÃO AO PAINEL DE REFERENCIA PARA AS 3 CONFIGURAÇÕES .	64
FIGURA 38 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E TENSÃO EM CIRCUITO ABERTO PARA OS 3 PAINÉIS ARREFECIDOS E SEUS PAINÉIS DE REFERÊNCIA . . . . .	65
FIGURA 39 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E EXPERI- MENTAIS (EULER). A) FV. B) FVT. C) FVT+MMF. D) FV+MMF+T.	67
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E EXPERI- MENTAIS (RK 4). A) FV. B) FVT. C) FVT+MMF. D) FV+MMF+T. .	68
FIGURA 41 – CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE DA GLICERINA PURA NA FASE LÍQUIDA . . . . .	69
FIGURA 42 – MUDANÇA DA TEMPERATURA DO PAINEL FV AO ALTERAR AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO. A) VARIAÇÃO DE TEMPERATURA AMBIENTE. B) VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO. . . . .	70
FIGURA 43 – TEMPERATURA DO PAINEL DO SISTEMA FVT PARA DIVER- SOS VOLUMES DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO. . . . .	71
FIGURA 44 – TEMPERATURA MÉDIA DA ÁGUA DO SISTEMA FVT PARA DI- VERSOS VOLUMES DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO. . . . .	71

FIGURA 45 – TEMPERATURA DOS COMPONENTES DO SISTEMA FV+MMF+T COM GLICERINA E RT42 COMO MMF. . . . .	72
FIGURA 46 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO PAINEL DO SISTEMA FV+MMF+T COM RT42 E DIFERENTES PERCENTAGENS DE NANOPARTÍCULA . . . . .	73
FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO PAINEL DO SISTEMA FV+MMF+T COM GLICERINA E DIFERENTES PERCENTAGENS DE NANOPARTÍCULA . . . . .	73
FIGURA 48 – PERFIS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS AO LONGO DAS SEMANAS DE TESTE. A) IRRADIÂNCIA GLOBAL. B) TEMPERATURA AMBIENTE. . . . .	74
FIGURA 49 – TEMPERATURA DE CADA PAINEL AO LONGO DE UMA SEMANA EM NEVADA EM TRÊS ESTAÇÕES DISTINTAS. A) INVERNO. B) PRIMAVERA. C) VERÃO. . . . .	75
FIGURA 50 – DIFERENÇA DE POTÊNCIA ELÉTRICA FORNECIDA ENTRE OS SISTEMAS FVT+MMF E FV. . . . .	76
FIGURA 51 – DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURA DO PAINEL FVT+MMF E FV. . . . .	77
FIGURA 52 – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA DO SISTEMA FVT+MMF AO LONGO DO ANO NO DESERTO DE NEVADA PARA DIFERENTES VOLUMES DE ÁGUA . . . . .	78
FIGURA 53 – IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA AMBIENTE E DOS PAINÉIS NO INVERNO. A) DIA NUBLADO. B) DIA ENSOLARADO. . . . .	79
FIGURA 54 – TENSÃO EM ABERTO DO SISTEMA FVT+MMF E DE REFERÊNCIA NO INVERNO. A) DIA NUBLADO. B) DIA ENSOLARADO. . . . .	79
FIGURA 55 – PERFIS DE TEMPERATURA DOS COMPONENTES DO SISTEMA FV+MMF+T NO INVERNO. A) DIA NUBLADO. B) DIA ENSOLARADO. . . . .	80
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DOS COMPONENTES DO MODELO FV+MMF+T MATEMÁTICO E EXPERIMENTAL . . . . .	80
FIGURA 57 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO PAINEL DO MODELO FV+MMF+T MATEMÁTICO E EXPERIMENTAL ALTERANDO O COEFICIENTE DE CONVECÇÃO COM O AR . . . . .	81
FIGURA 58 – PERFIS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS EM DEZEMBRO. A) IRRADIÂNCIA GLOBAL B) TEMPERATURA AMBIENTE. . . . .	82
FIGURA 59 – TEMPERATURA DOS PAINÉIS FV E FVT+MMF EM DEZEMBRO. A) MEDIÇÃO DE 08/12. B) MEDIÇÃO DE 15/12. . . . .	83

FIGURA 60 – POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA POR METRO QUADRADO PELOS SISTEMAS FV E FVT+MMF EM DEZEMBRO. A) MEDIÇÃO DE 08/12. B) MEDIÇÃO DE 15/12. . . . .	83
FIGURA 61 – COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS FV E FVT EM JANEIRO DE 2023. A) MEDIÇÃO DE TEMPERATURA. B) MEDIÇÃO DE TENSÃO EM ABERTO. . . . .	84
FIGURA 62 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA DIA DE MEDIÇÃO EM JANEIRO DE 2023. . . . .	84
FIGURA 63 – COMPARAÇÃO PARA A MEDIÇÃO DE JANEIRO DA TEMPERATURA DO PAINEL FV COM DADOS MEDIDOS E SIMULADOS. .	85
FIGURA 64 – POTÊNCIA POR METRO QUADRADO PARA SISTEMAS FV E FVT+MMF EM JANEIRO. . . . .	86
FIGURA 65 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA A MEDIÇÃO NO DIA 03/04/2023.	86
FIGURA 66 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA ENTRE OS SISTEMAS FV E FVT+MMF NO DIA 03/04/2023. . . . .	87
FIGURA 67 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA POR M <sup>2</sup> ENTRE OS SISTEMAS FV E FVT+MMF NO DIA 03/04/2023. . . . .	87
FIGURA 68 – COMPARAÇÃO DA TENSÃO EM ABERTO ENTRE UM PAINEL FOTOVOLTAICO INCLINADO E HORIZONTAL. . . . .	88

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ESTERES FEITOS A PARTIR DA ADIÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS AO GLICEROL . . . . .	36
TABELA 2 – RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS . . . . .	39
TABELA 3 – LISTA DE PARÂMETROS IDENTIFICADOS E A FAIXA DE VALORES ESCOLHIDA . . . . .	50
TABELA 4 – PARÂMETROS DA NANOPARTÍCULA DE $Al_2O_3$ . . . . .	60
TABELA 5 – COEFICIENTES PARA TENSÃO EM CIRCUITO ABERTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA . . . . .	65
TABELA 6 – DIFERENÇA DOS SISTEMAS COM ARREFECIMENTO EM RELAÇÃO AO SISTEMA ORIGINAL . . . . .	66
TABELA 7 – PARÂMETROS OBTIDOS ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO . . . . .	68
TABELA 8 – GANHOS MÉDIOS DIÁRIOS DO SISTEMA FVT+MMF AO LONGO DO ANO EM CURITIBA . . . . .	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

<b>EG</b>	Esponja de grafeno
<b>FVT</b>	Fotovoltaico Térmico
<b>FVT+MMF</b>	Fotovoltaico Térmico com material de mudança de fase
<b>GE</b>	Grafite expandido
<b>MMF</b>	Material de mudança de fase
<b>NOCT</b>	<i>Nominal operating cell temperature</i>
<b>NREL</b>	<i>National Renewable Energy Laboratory - NREL</i>
<b>PF</b>	<i>Ponto de fusão</i>
<b>PMP</b>	Ponto de máxima potência
<b>RK4</b>	Runge Kutta de 4ª ordem
<b>RP</b>	Regime permanente
<b>RT</b>	<i>Rubitherm</i>
<b>SLSQP</b>	<i>Sequential Least Squares Programming</i>
<b>STC</b>	<i>Standard Test Conditions</i>
<b>cfb</b>	Clima Oceânico Temperado

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Square Error</i>
$\alpha$	Absortividade
<b>C<sub>mmf2</sub></b>	Calor específico do MMF em transição - J/(kg · K)
<b>C<sub>mmf1</sub></b>	Calor específico do MMF, fase sólida - J/(kg · K)
<b>U<sub>mmfb</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre MMF e bancada - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>mmfw</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre MMF e sistema térmico - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>fva</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre painel e ambiente - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>fvb</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre painel e bancada - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>fval</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre painel e sistema aletado - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>fvw</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre painel e sistema térmico - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>almmf1</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre sistema aletado e MMF pelas aletas - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>almmf2</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre sistema aletado e MMF pelo MMF - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>wmmf</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre sistema térmico e MMF - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>U<sub>wb</sub></b>	Coefficiente global de transferência de calor entre sistema térmico e bancada - W/(m <sup>2</sup> K)
<b>k</b>	Condutividade térmica - - W/(m·K)
<b>k<sub>mmf2</sub></b>	Condutividade térmica do MMF em transição - W/(m·K)
<b>k<sub>mmf1</sub></b>	Condutividade térmica do MMF, fase sólida - W/(m·K)

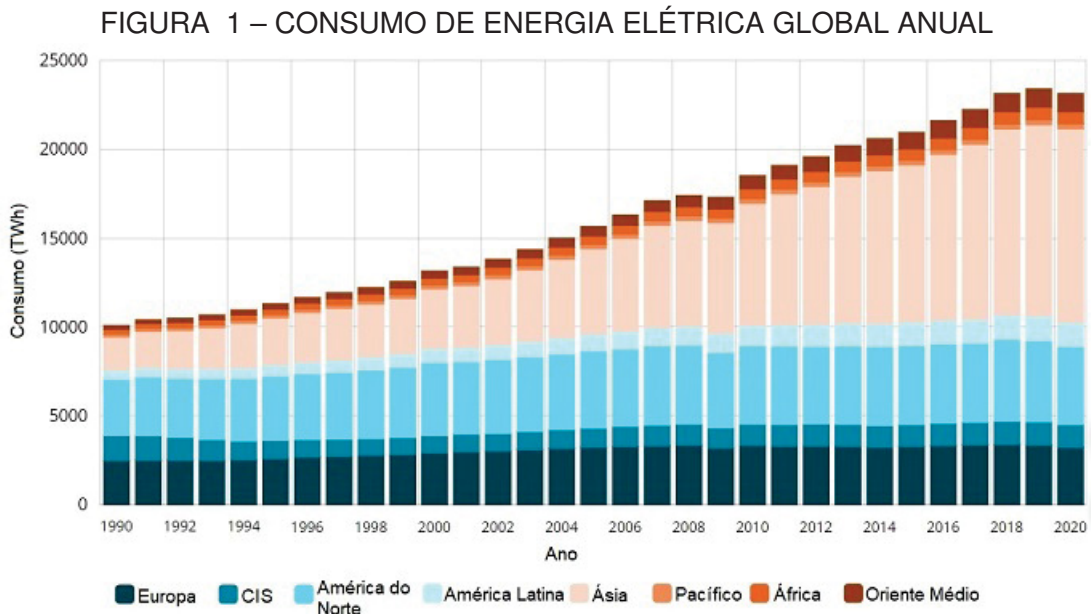
<b>I<sub>sc</sub></b>	Corrente de curto circuito - A
<b>v</b>	Difusividade cinemática - m <sup>2</sup> /s
<b>η<sub>e</sub></b>	Eficiência de conversão elétrica
<b>η<sub>g</sub></b>	Eficiência global
<b>η<sub>t</sub></b>	Eficiência térmica
<b>eV</b>	Elétron-volt - eV
<b>ρ</b>	Massa específica - kg/m <sup>3</sup>
<b>Pr</b>	Número de Prandtl
<b>RE<sub>L</sub></b>	Número de Reynolds
<b>T<sub>a</sub></b>	Temperatura ambiente - K
<b>T<sub>w</sub></b>	Temperatura da água - K
<b>T<sub>NOCT</sub></b>	Temperatura de equilíbrio em testes do padrão NOCT - K
<b>T<sub>sl</sub></b>	Temperatura de mudança de fase do MMF - K
<b>T<sub>fv</sub></b>	Temperatura do painel - K
<b>T<sub>exp</sub></b>	Temperatura experimental - K
<b>T<sub>num</sub></b>	Temperatura numérica - K
<b>V<sub>oc</sub></b>	Tensão de circuito aberto - V
<b>τ</b>	Transmitância

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivos Gerais	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
2.1	FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA	21
2.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO (FVT)	27
2.3	MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (MMF)	30
2.4	SISTEMA COMBINADO FVT COM MMF	33
2.5	SISTEMAS UTILIZANDO GLICERINA COMO MMF	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
3.1	TESTES EM LABORATÓRIO	43
3.2	TESTES EM AMBIENTE ABERTO	46
<b>4</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA</b>	<b>50</b>
4.1	OBTENÇÃO DOS MODELOS	50
4.1.1	Sistema fotovoltaico (FV)	51
4.1.2	Sistema híbrido (FVT)	53
4.1.3	Sistema híbrido com glicerina na camada central (FV+MMF+T)	55
4.1.4	Sistema híbrido com glicerina na camada inferior (FVT+MMF)	58
4.2	USO DOS MODELOS EM SIMULAÇÕES	59
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>62</b>
5.1	COMPARAÇÃO DAS DIFERENTES DISPOSIÇÕES DO SISTEMA	62
5.2	VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS	66
5.3	ANÁLISE DOS MODELOS MATEMÁTICOS EM CONDIÇÕES DIVERSAS	70
5.4	ANÁLISE DO SISTEMA EM CLIMA DESÉRTICO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO	73
5.5	ANÁLISE DO SISTEMA EM AMBIENTE ABERTO	78
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>90</b>
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	92
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica mundial cresce a cada ano, devido ao aumento populacional e de qualidade de vida sobretudo na Ásia, conforme evidenciado na FIGURA 1. Os anos de 2009 e 2020 foram exceções, por consequência da crise financeira mundial e do Covid-19, respectivamente. Este aumento de consumo, aliado com a preocupação com causas ambientais e sanitárias, faz com que a demanda por fontes de energia limpa aumente. Mais de 130 países, dentre eles o Brasil, propõem-se a alcançar um zero líquido de emissões até 2050, buscando um balanço entre as emissões e a absorção por meio de algas e florestas, com o objetivo de reduzir o aquecimento global para um máximo de 1,5°C (ONU, 2021).

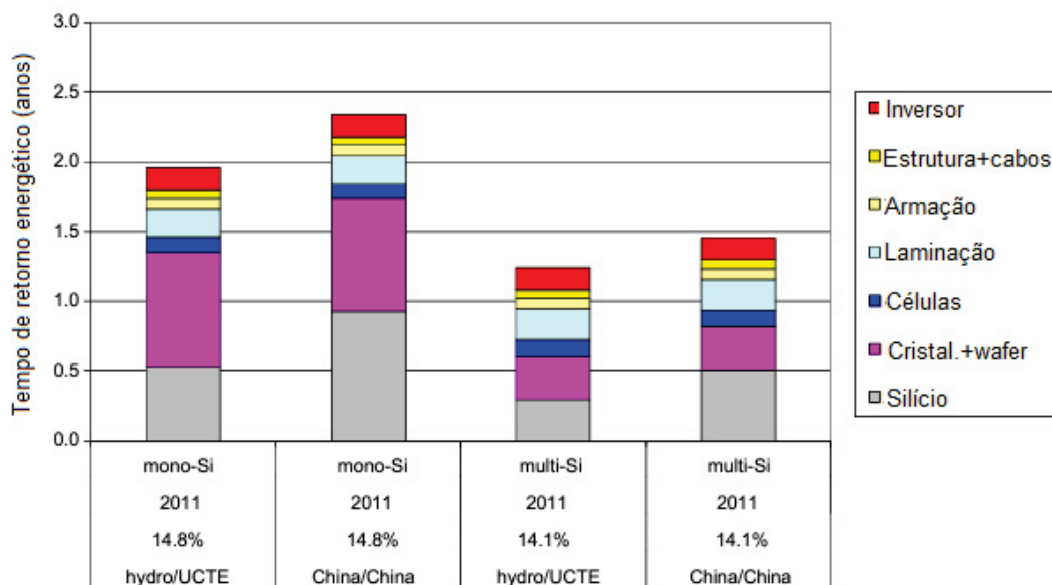


FONTE: Adaptado de Enerdata (2022).

Dentre as fontes limpas a serem utilizadas para cumprir este objetivo, a energia solar, por se tratar uma fonte de energia extremamente abundante e gratuita, recebe destaque. Há uma busca constante pelo desenvolvimento de tecnologias que transformam a energia solar em energia elétrica, de modo a aumentar a sua eficiência e reduzir o custo. A energia solar representa a maior fonte de energia do nosso planeta, chegando aos  $1,533 \times 10^9$  TWh anuais (para uma constante solar média de  $1366 \text{ W/m}^2$  no limite da atmosfera), aproximadamente 65,9 mil vezes o consumo de energia elétrica mundial, estimado em 23177 TWh em 2020 (ENERDATA, 2022). Mesmo considerando uma eficiência de conversão de 10%, este valor ainda é 6,6 mil vezes superior ao consumo global. Uma das maneiras de explorar esta energia é através do uso de células fotovoltaicas, que possibilitam a conversão direta da energia solar para energia elétrica.

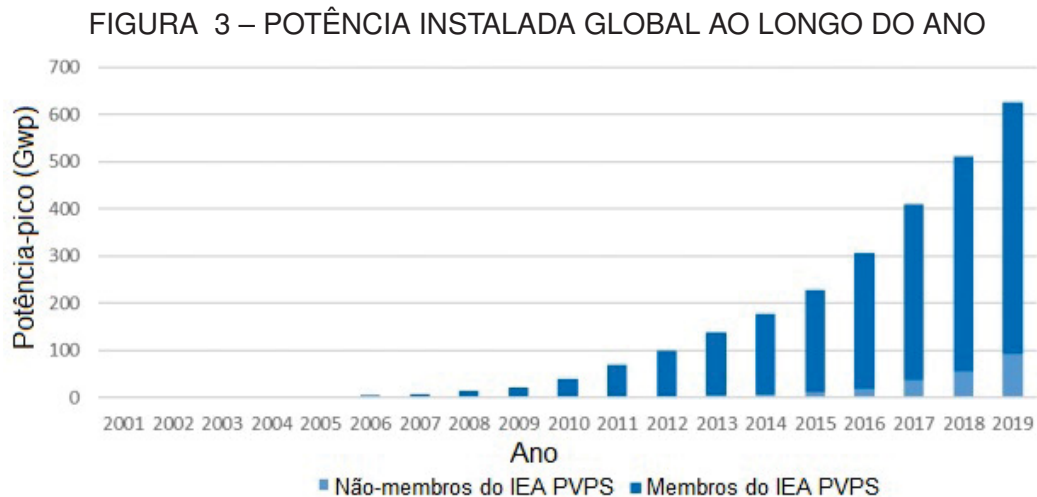
Nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica sofreu a maior redução de custo entre as fontes de energia, passando de 4,12 US\$ por W de módulo policristalino em 2008 para 0,22 US\$ /W em 2018, tornando-se uma das opções mais baratas para a produção de energia elétrica (GREEN, 2019). As principais causas desta redução nos anos iniciais foram o aumento da eficiência das células de silício - crescendo de 5% nos modelos iniciais e chegando aos 23% nos tempos atuais - e a pesquisa e desenvolvimento promovido por instituições governamentais e privadas. Nos últimos anos, o aumento da produção em larga escala também proporcionou grande redução de custos. Os painéis fotovoltaicos de silício cristalino possuem um tempo de retorno de energia entre 1,2 a 2,4 anos em uma região com irradiação média anual de 1700 kWh/m<sup>2</sup>. A FIGURA 2 mostra o tempo que painéis de silício mono e policristalinos comerciais levam para fornecer a energia equivalente a cada parte do processo de produção, sendo os maiores componentes a obtenção da matéria prima e a cristalização, que faz com que o tempo de retorno para um painel monocristalino seja 40% superior ao policristalino, mesmo com uma eficiência de conversão elétrica mais alta. O tempo de retorno para a produção com a matriz energética chinesa é 15% superior ao da matriz continental europeia (UCTE), indicando uma menor eficiência no processo chinês - principalmente na obtenção da matéria-prima. A geração de CO<sub>2</sub> varia de 28 a 81g por kWh para painéis de silício, enquanto fontes como carvão, lignito, óleo combustível e gás natural produzem 1079, 1231, 885 e 642g de CO<sub>2</sub> por kWh, respectivamente (WILD-SCHOLTEN, 2013).

FIGURA 2 – TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO PARA PAINÉIS DE SILÍCIO



FONTE: Adaptado de Wild-Scholten (2013).

Em 2004, a potência instalada de painéis fotovoltaicos atingiu mundialmente a marca de 1 GW de potência-pico (potência para as condições de um painel a 25 °C sob uma irradiância global de 1000 Wm<sup>-2</sup>), ou 1 GWp (JÄGER-WALDAU, 2006). Em 2019, esta produção chegou aos 627 GWp, contabilizando 3% da produção elétrica global (DETOLLENAERE *et al.*, 2020). A FIGURA 3 mostra esta evolução ano-a-ano e nela observa-se um crescimento considerável de produção. A partir de 2016, este aumento ultrapassa os 100 GWp a cada ano. A maior parte da geração vem de países participantes de um programa colaborativo internacional que busca facilitar a evolução da energia fotovoltaica como pilar da transição para energia sustentável, chamado *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme* (IEA PVPS). Dentre os membros desta organização estão Estados Unidos, União Europeia, Japão e China. A contribuição de países não-participantes, incluindo o Brasil, a Rússia e o Paquistão, aumentou consideravelmente nos últimos anos, chegando aos 100 GWp em 2019. Segundo a Global Data, os Estados Unidos e a China promoveram um aumento substancial da capacidade instalada, com a influência de programas governamentais. A região da Ásia-Pacífico (APAC) é a maior contribuinte, sendo responsável por 70,8% das instalações em 2018 e espera-se que esta região continue sendo a maior produtora até 2030. Espera-se que a geração mundial ultrapasse os 1500 GW até 2030 (GLOBALDATA, 2019).

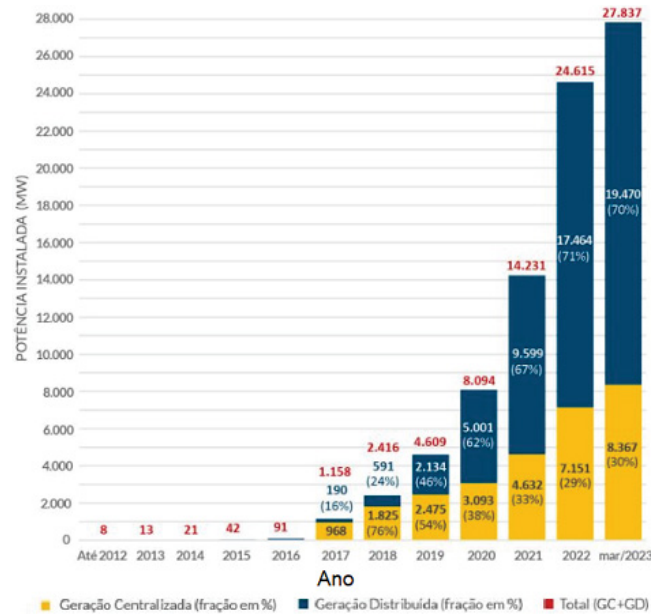


Fonte: Adaptado de Detollenaere *et al.* (2020).

As condições climáticas brasileiras são propícias para a geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos. A irradiação global horizontal média diária é de 5483 Wh/m<sup>2</sup> na região Nordeste e 4444 Wh/m<sup>2</sup> na região Sul, sendo a média nacional de 5153 Wh/m<sup>2</sup> (PEREIRA *et al.*, 2017). Como comparativo, a irradiação média diária nos países nórdicos é de 2192 Wh/m<sup>2</sup> a 2740 Wh/m<sup>2</sup> (SALUJA, 1984). Embora a produção de energia fotovoltaica seja favorável no Brasil, ela representava apenas 1,7% da matriz energética nacional em 2018 (ABSOLAR, 2018). Este cenário está mudando,

conforme visto no aumento substancial de geração, apresentado na FIGURA 4 e em Março de 2023, a energia solar fotovoltaica já representa 12,6% da matriz energética (ANEEL/ABSOLAR, 2023). Nota-se que a geração distribuída (sistemas de até 5 MW) aumentou significativamente a sua participação no mercado nos últimos anos, de 16% em 2017 para 70% em 2021. A geração centralizada (acima dos 5 MW) teve um aumento proporcionalmente menor à distribuída, indicando uma maior disposição da população em adotar este tipo de energia em suas casas e empresas do que um aumento em grandes instalações.

FIGURA 4 – POTÊNCIA INSTALADA NACIONAL AO LONGO DOS ANOS



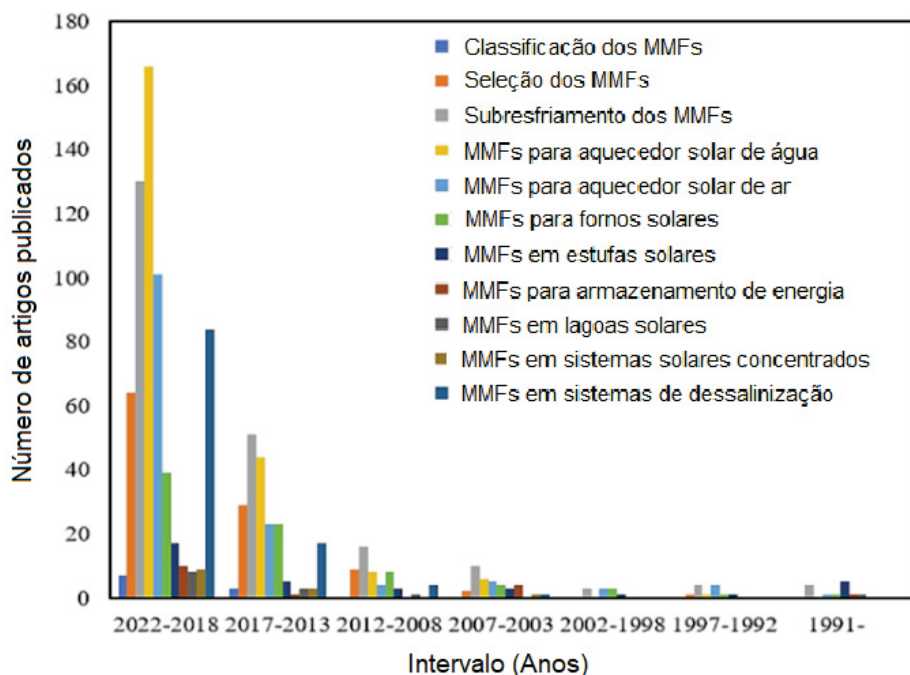
FONTE: Adaptado de ANEEL/ABSOLAR (2023).

Uma das adversidades da exploração deste tipo de energia é atrelada ao seu aquecimento: ao aumentar-se a temperatura da célula fotovoltaica, ela sofre uma redução de eficiência de conversão elétrica. Então, de forma paradoxal, quanto mais energia for cedida através da radiação solar ao painel, mais energia é acumulada na forma de calor sensível, aumentando a temperatura do painel e reduzindo sua eficiência. A perda de eficiência de conversão elétrica média associada ao aumento de temperatura é estimada em 0,45% para cada K acima de 25 °C em painéis de silício cristalino, enquanto que para módulos de filme-fino, esta perda é de aproximadamente metade deste valor (MAU; JAHN, 2006).

Para amenizar este problema, são propostos métodos de arrefecimento do sistema. Um exemplo é o sistema híbrido fotovoltaico + térmico (FVT), que utiliza um trocador de calor entre o painel e um fluido, usualmente optando-se por ar ou água, de modo a resfriar o painel e aproveitar a energia térmica cedida ao fluido. Outro método consiste em utilizar um material de mudança de fase (MMF) para absorver o calor acumulado no painel sob forma de calor latente até tornar-se líquido/gasoso. Esta

energia é dissipada à noite, retornando à fase inicial. Um dos problemas do uso de MMF é o alto custo dos materiais comerciais (ISLAM *et al.*, 2016), acarretando em um grande tempo de retorno do investimento, reduzindo a sua viabilidade. É possível, ainda, unir os dois sistemas, criando um sistema chamado de fotovoltaico híbrido com material de mudança de fase (FVT+MMF). Esta junção mostra-se interessante, pois os sistemas operam de forma simbiótica: o MMF faz com que o sistema térmico se mantenha a uma temperatura baixa por mais tempo, possibilitando uma maior extração de energia do painel fotovoltaico, aumentando a sua eficiência de conversão elétrica. A energia do MMF é absorvida pelo fluido à noite, aumentando a disponibilidade de energia térmica. Conseqüentemente, o estudo de tal sistema recebe destaque nos últimos anos. A FIGURA 5 mostra o crescimento na pesquisa do uso de MMF em diversos sistemas solares, sendo o maior crescimento o de sistemas FVT+MMF (barra amarela para sistemas com água e azul clara para sistemas com ar), totalizando mais de 260 artigos publicados entre 2018 e 2022, enquanto que de 2013 a 2017 este número era inferior a 70 artigos e antes disso era virtualmente inexistente. Embora este crescente avanço na pesquisa de sistemas FVT+MMF, ele ainda não se traduz a um aumento comercial significativo devido ao alto custo previamente citado. Conseqüentemente, há uma busca por materiais economicamente viáveis que possuam as características necessárias para um MMF aplicado a um sistema fotovoltaico.

FIGURA 5 – NÚMERO DE ARTIGOS PUBLICADOS PARA DIVERSAS APLICAÇÕES DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE



FONTE: Adaptado de Goel *et al.* (2022) .

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos Gerais

Embora a cidade de Curitiba se encontre em um país majoritariamente tropical, seu clima é temperado (Clima Oceânico Temperado - cfb) e a análise do desempenho de um sistema FVT+MMF nesta cidade ainda não foi efetuada. Esta dissertação busca contribuir com a avaliação de um sistema FVT+MMF na cidade, utilizando a base glicerizada vegetal como alternativa econômica e ecologicamente viável de MMF. Para tal, serão realizados testes deste sistema com diversas arquiteturas em laboratório e em ambiente aberto e desenvolvidos modelos matemáticos para a sua avaliação, visando uma redução na temperatura de operação do painel fotovoltaico e o consequente aumento na sua eficiência de conversão elétrica e proveito de energia térmica.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Efetuar testes em um sistema fotovoltaico híbrido com material de mudança de fase de base glicerizada em ambiente controlado em três configurações distintas: apenas com o sistema térmico; com o sistema térmico acima do MMF; com o sistema térmico abaixo do MMF.
- Avaliar qual das disposições melhor reduz a temperatura do painel fotovoltaico em ambiente controlado se comparado a um sistema sem arrefecimento.
- Desenvolver um modelo matemático utilizando analogia a circuitos elétricos para o painel fotovoltaico sem arrefecimento e para as três disposições do sistema com arrefecimento.
- Identificar as grandezas físicas necessárias para a implementação de cada modelo matemático através de uma função de otimização da diferença entre as temperaturas experimentais e simuladas.
- Avaliar o sistema através do modelo matemático e parâmetros anteriormente identificados em condições de operação diferentes das utilizadas nos testes experimentais.
- Efetuar medições em ambiente aberto na cidade de Curitiba em dias no verão, inverno e outono próximo aos solstícios e equinócios, observando o comportamento do sistema em situações extremas e no ponto médio.
- Efetuar simulações através dos modelos matemáticos para as condições de temperatura ambiente, velocidade do vento e irradiância global obtidas em Curitiba, avaliando o desempenho dos sistemas nesta cidade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica, assim como do sistema híbrido fotovoltaico+térmico (FVT) e do emprego de materiais de mudança de fase (MMF) para arrefecê-la. Serão apresentados os métodos empregados para aprimorar estes sistemas e o seu progresso histórico, avaliando a melhora em seus desempenhos ao longo dos anos, com foco nos avanços recentes.

### 2.1 FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

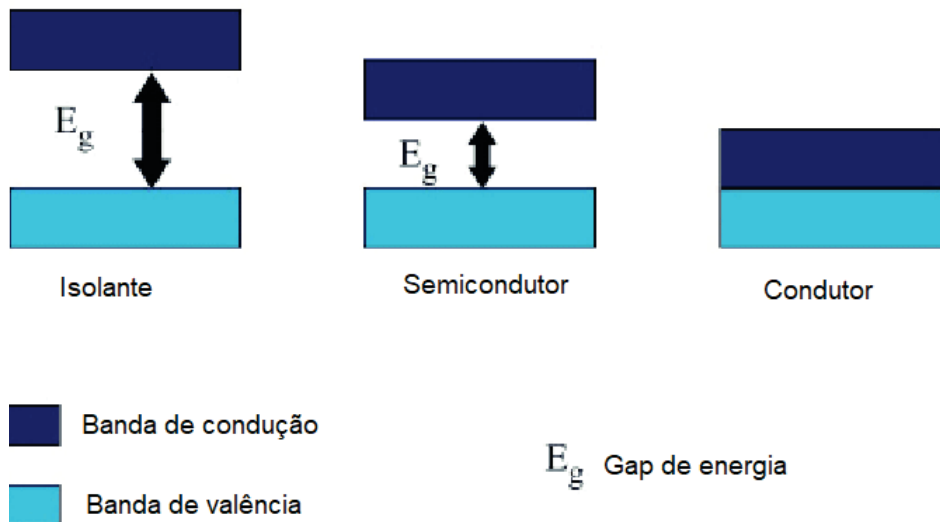
Alguns materiais, notoriamente os metais, possuem a capacidade de absorver os fótons de luz, resultando na emissão de elétrons. Para este efeito, no qual a luz (fóton) produz eletricidade, é atribuído o nome de efeito fotoelétrico. A produção de corrente elétrica através deste efeito requer que a luz forneça energia suficiente para extrair elétrons do material. Quando um elétron é extraído, a carga elétrica do material torna-se positiva, atraindo o elétron de volta para si. Consequentemente, a energia cedida pelos fótons deve ser suficiente para superar esta atração (NUSSENZVEIG, 1997). Em termos matemáticos, isto significa que a energia proveniente destes fótons deve ser maior que uma energia mínima ( $E_{min}$ ), específica para cada material. É portanto necessário que a equação 2.1, sendo  $c$  a velocidade da luz no vácuo (m/s),  $h$  a constante de Planck (J-s) e  $\lambda$  comprimento de onda (m), seja satisfeita. Nota-se que a única variável é o comprimento de onda, que é inversamente proporcional à frequência, significando que para grande parte dos materiais este efeito é possível apenas quando utilizando uma luz de alta frequência, como a ultravioleta.

$$E = \frac{h.c}{\lambda} > E_{min} \quad (2.1)$$

O efeito fotovoltaico se difere do fotoelétrico em que os elétrons não são ejetados do material, são transferidos da banda de valência à de condução (ou seja, vão de um estado ligado ao átomo a um estado livre), mas permanecem dentro do material. A diferença entre a ocorrência dos efeitos está no tipo de material: o fotoelétrico ocorre em metais enquanto o fotovoltaico em semicondutores, que são materiais sólidos com condutividade elétrica intermediária entre os isolantes e condutores. A FIGURA 6 mostra o *gap* (distância) entre as bandas de condução e valência para materiais condutores, semicondutores e isolantes. Nota-se que para materiais condutores a distância é nula. A condutividade de materiais semicondutores é afetada por fatores como a temperatura, aplicação de campo magnético e presença de impurezas. Os materiais semicondutores são divididos em duas categorias: os elementares, constituídos de um único material, como o silício ou o germânio e os compostos, como o GaAs (Arsenieto de gálio) (PRASAD *et al.*, 2009). As células fotovoltaicas tiram proveito do efeito homônimo para transformar a energia solar em elétrica e podem ser produzidas a

partir de materiais semicondutores, tais quais o silício, fosforeto de índio, Arsenieto de gálio e materiais orgânicos. Para os materiais elementares, é necessário efetuar uma dopagem eletrônica em suas superfícies, de modo que uma esteja negativamente e a outra positivamente carregada. A dopagem consiste na adição intencional de impurezas ao semiconductor para controlar a sua capacidade de conduzir eletricidade.

FIGURA 6 – GAP DE ENERGIA PARA MATERIAIS ISOLANTES, CONDUTORES E SEMI-CONDUTORES

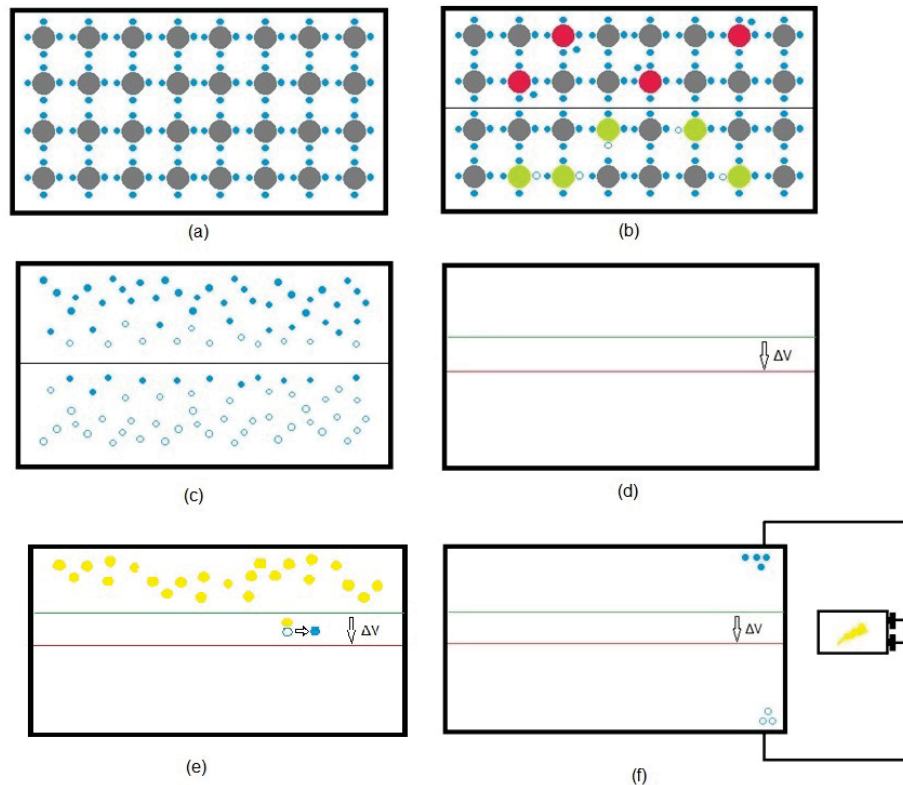


FONTE: Adaptado de González *et al.* (2007).

A FIGURA 7 mostra o passo a passo do efeito fotovoltaico ocorrendo em uma célula de silício. Inicialmente, o silício encontra-se em uma estrutura cristalina organizada, com cada um de seus 4 elétrons na camada de valência fazendo uma ligação covalente com os átomos ao redor. Então ocorre uma dopagem eletrônica do silício introduzindo um material com três elétrons na camada de valência - tipicamente o Boro, representado pelos átomos verdes na FIGURA 7 (b) - em uma camada do silício, gerando uma lacuna (esfera azul vazia) por não completar as quatro ligações necessárias para o silício. Na outra camada, um material com cinco elétrons (átomos vermelhos) em sua camada de valência - tipicamente o Fósforo - é introduzindo, tendo-se um elétron a mais que o necessário. Estas camadas são chamadas, respectivamente de P e N. Quando um elétron adicional da camada N preenche uma lacuna gerada na camada P, acaba-se criando uma lacuna na sua posição original. Ou seja, a movimentação de elétrons em uma direção resulta na movimentação de lacunas no sentido oposto. A difusão de elétrons e lacunas gera uma região de depleção delimitada pelas linhas verde e vermelha na FIGURA 7 (d) no limite entre as duas camadas. As cargas nesta região geram um campo elétrico, onde uma pequena diferença de potencial é produzida. Quando um fóton, representado pelas esferas amarelas na FIGURA 7 (e), emitido pela radiação solar entra em contato com a região de depleção, ele transfere a sua

energia para um elétron, o deslocando de sua camada de valência e gerando uma lacuna. Devido ao campo elétrico na região de depleção, o elétron é direcionado à camada N, enquanto a lacuna à camada P. Conectando as extremidades da célula a um circuito elétrico, é possível então aproveitar esta diferença de potencial gerada pelo par elétron-lacuna, conforme ilustrado na FIGURA 7 (f).

FIGURA 7 – ESQUEMATIZAÇÃO DO EFEITO FOTOVOLTAICO EM UMA CÉLULA DE SILÍCIO

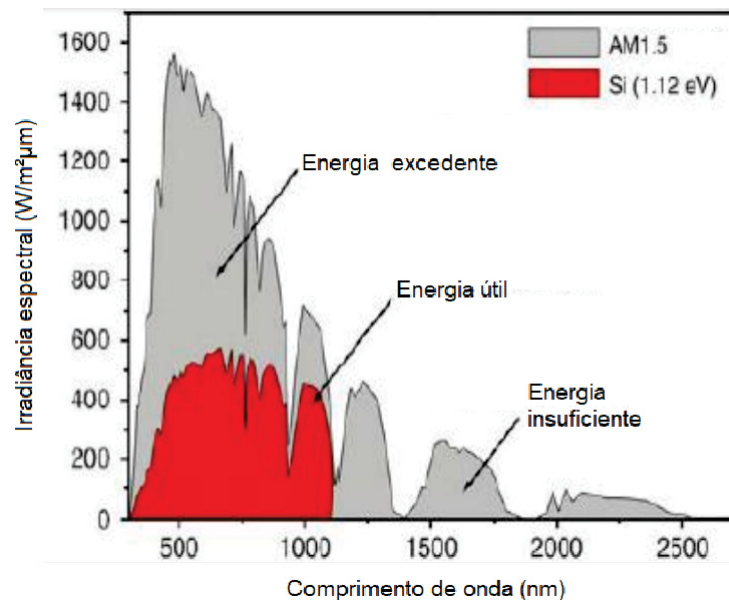


FONTE: O Autor (2023).

Apenas os fótons com energia suficiente para ir da banda de valência à de condução são usados para gerar energia elétrica. A energia proveniente de fótons que não possuem energia suficiente para pular de banda, somada com a energia em excesso daqueles que realizam o salto, é transformada em calor. Há um limite natural para a eficiência máxima das células fotovoltaicas, denominado limite de Shockley–Queisser. No caso do silício monocristalino com um gap de energia de 1,1 eV e com um espectro de irradiância solar padrão AM 1,5 - que considera uma massa atmosférica 50% superior ao valor na linha do equador, adequada para simular o espectro em regiões fora dos trópicos - este limite é de 30% (SHOCKLEY, 1961). A fórmula utilizada para encontrar este limite é bastante simples, requerindo apenas três parâmetros: temperatura da superfície do sol (assumida constante com valor de 6000 K), temperatura ambiente e gap de energia do material semiconductor. Os motivos para não alcançar este limite são: recombinação não radiativa (ocorre quando a energia liberada por uma

recombinação de par elétron-lacuna é fornecida a outro elétron, sem a emissão de um fóton), arquitetura das células, perdas por resistência em série e temperatura da célula (VOSSIER *et al.*, 2015). O espectro solar AM 1,5 e a porção útil para células de silício estão ilustradas na FIGURA 8. O gap de energia cai conforme a temperatura do material semiconductor aumenta. Para o silício em uma faixa de temperatura de 150K a 300K, o polinômio utilizado para aproximar esta relação encontra-se na EQUAÇÃO 2.2 (BLUDAU *et al.*, 1974), proporcionando uma relação entre o gap de energia e a temperatura do silício. Esta redução no gap de energia resulta em uma menor área de energia útil no espectro visto na FIGURA 8 e conseqüentemente faz com que a capacidade dos painéis fotovoltaicos de gerar energia elétrica se reduza conforme a sua temperatura aumenta.

FIGURA 8 – ESPECTRO SOLAR, COM PORÇÃO UTILIZÁVEL POR CÉLULAS DE SILÍCIO



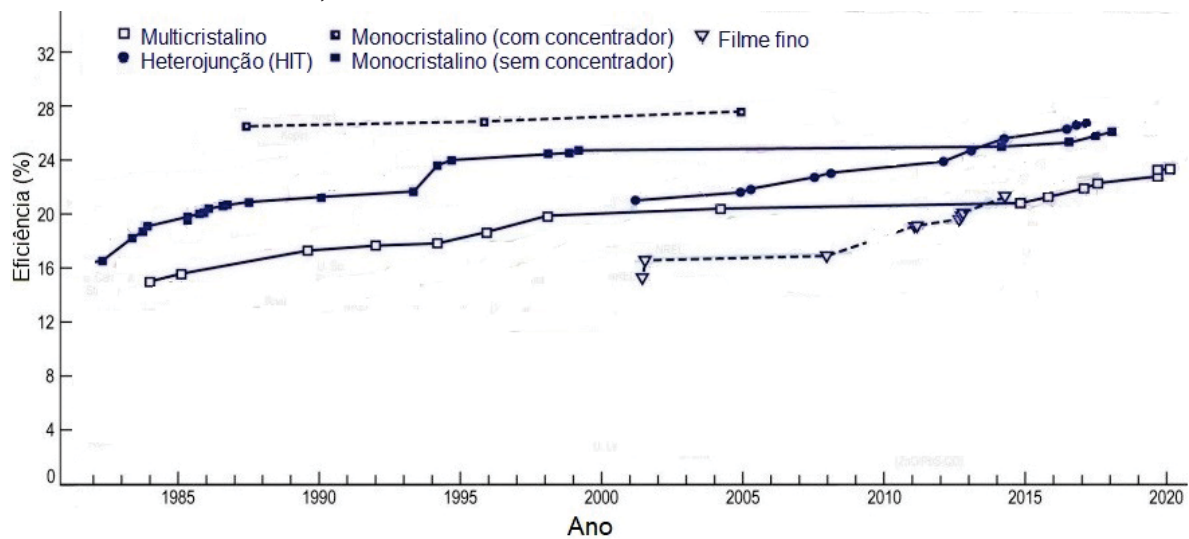
FONTE: Adaptado de Theristis *et al.* (2013)

$$E_g(T) = 1,1785 - 9,025 \times 10^{-5} \times T - 3,05 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (2.2)$$

Em 1955, foi realizada uma demonstração pública inaugural de uma célula fotovoltaica nos Estados Unidos, que apresentava uma eficiência de conversão elétrica de 5% e área inferior aos 2cm<sup>2</sup> (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Ao longo dos anos, esta tecnologia evoluiu substancialmente devido aos fatores comentados na seção 1, alcançando uma eficiência de 20,4±0,3% para módulos policristalinos(p-Si) e de 24,4±0,5% para módulos monocristalinos (mono-Si) testados sob o espectro AM1.5, com uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> a uma temperatura de 25 °C (GREEN *et al.*, 2021). Apesar do aumento significativo de eficiência de conversão elétrica nas décadas passadas, os sistemas cristalinos estão atingindo a maturidade, ou seja, a eficiência de conversão elétrica destes materiais se aproxima do limite teórico. A FIGURA 9 mostra

esta evolução ao longo dos anos para sistemas avaliados em laboratório. Observa-se uma melhoria significativa para os módulos monocristalinos até a metade dos anos 90, mas a partir de então o aumento de eficiência foi significativamente menor. Embora as células fotovoltaicas de outros materiais apresentem eficiências superiores, as células de silício amorfas, monocristalinas e policristalinas são as mais comuns, representando 95% do mercado, por serem materiais abundantes e não-tóxicos e a sua capacidade de produção ser em larga escala (LIU *et al.*, 2020).

FIGURA 9 – EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO ELÉTRICA MÁXIMA DE CÉLULAS DE SILÍCIO A CADA ANO, OBTIDAS EM LABORATÓRIO



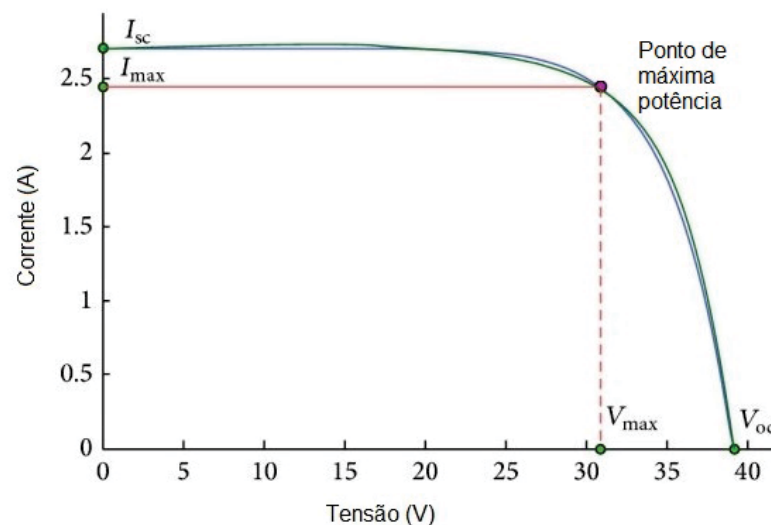
FONTE: Adaptado de NREL (2019) .

Conseqüentemente, novas tecnologias são empregadas para aumentar esta eficiência, como sistemas com concentradores tais quais lentes e espelhos côncavos são utilizados para focar a energia solar sobre o painel, que passa a receber a energia equivalente à de múltiplos sóis. Os sistemas com concentradores são divididos em categorias de baixa (1-10 sóis), média (10-100 sóis) e alta (100-1000 sóis) concentração (XING *et al.*, 2015). Slade e Garboushian (2005) testaram um concentrador para painéis de silício cristalino e obtiveram uma eficiência de conversão de 25% para 7,7 sóis e um pico de 27,6% para 93 sóis. Após este valor, a eficiência se manteve constante até os 122 sóis e decaiu para 25,3% para 405 sóis, mostrando-se portanto uma boa alternativa em locais com pouco espaço disponível. Outro método é o uso de sistemas com múltiplas junções, feitos de diversas camadas de materiais semicondutores com *gap* de energia distintos, capazes de aproveitar partes distintas do espectro solar - a energia que passa pela primeira camada é aproveitada pelas camadas subsequentes, aumentando a capacidade de conversão de energia por área (EBRAHIMI, 2023). Takamoto *et al.* (2014) fizeram uma junção tripla utilizando os seguintes semicondutores da camada superior à inferior, com os seus *gaps* de energia entre parênteses: InGaP (0,88eV), GaAs (1,43eV) e InGaAs (0,99eV), obtendo uma eficiência de conversão

elétrica de 37,9%. Como tanto os concentradores e as junções múltiplas são utilizados em postos onde o espaço é escasso, a combinação deles vem sendo mais estudada que eles isoladamente nos últimos anos. Geisz *et al.* (2017) propuseram um sistema com junção de 6 materiais semicondutores com *gaps* de energia de 2,1; 1,7; 1,4; 1,13; 0,91; 0,7 eV. Este sistema obteve uma eficiência de conversão superior aos 50% ao utilizar alta concentração, contudo, devido à grande carga térmica há uma rápida degradação do sistema, fazendo com que ele ainda não possua aplicação prática.

A potência fornecida por uma célula fotovoltaica é dada pela relação entre tensão e corrente elétrica. Contudo, a tensão é máxima em circuito aberto ( $V_{OC}$ ) e a corrente em curto-circuito ( $I_{SC}$ ). É necessário encontrar um ponto intermediário através da variação de resistência elétrica aplicada ao circuito onde este produto entre tensão e corrente é ótimo, sendo este ponto chamado de ponto de máxima potência (PMP) (STOFFEL; ANDREAS, 2006). A FIGURA 10 mostra a curva obtida ao variar a resistência do circuito de zero a infinito, obtendo um ponto ótimo de funcionamento. Esta curva é denominada curva característica da célula.

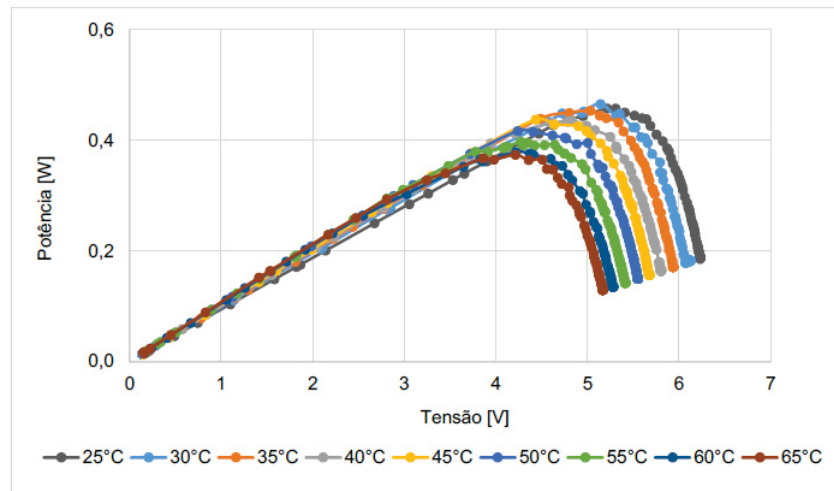
FIGURA 10 – CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA



FONTE: Adaptado de Jakhrani *et al.* (2014) .

A curva característica de uma célula fotovoltaica é influenciada pela temperatura de operação da célula. A relação entre a potência elétrica e a temperatura de operação é linearizável para a faixa de temperatura em que as células operam (DUBEY *et al.*, 2013). Na FIGURA 11 encontra-se a curva tensão-potência do painel que será utilizado neste trabalho para diversas temperaturas, com uma nítida queda de potência máxima ao aumentar a temperatura. De modo a reduzir esta temperatura, diversos métodos de arrefecimento são empregados. Dois destes métodos, além da combinação deles, serão discutidos a seguir.

FIGURA 11 – CURVA CARACTERÍSTICA TENSÃO-POTÊNCIA DO PAINEL YL010P-17B PARA DIVERSAS TEMPERATURAS

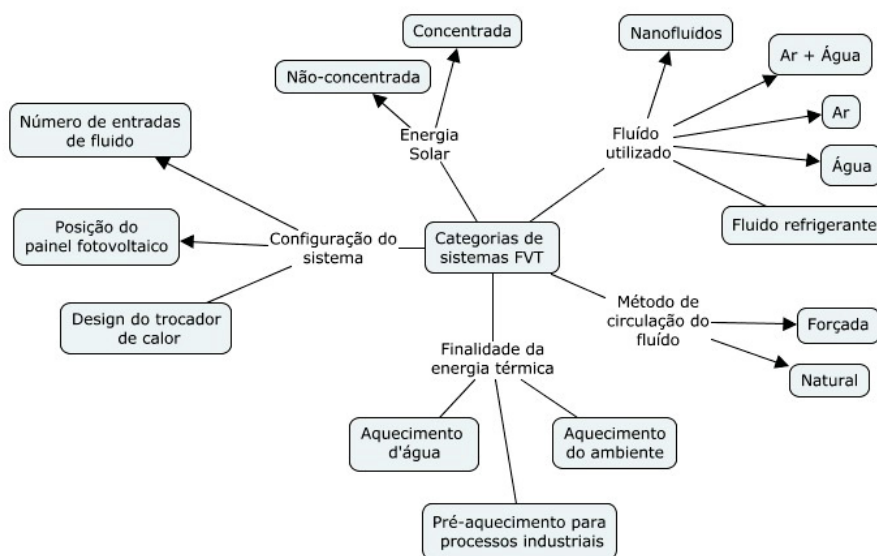


FONTE: Osaka (2019).

## 2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO (FVT)

O sistema híbrido fotovoltaico+térmico (FVT) reduz a temperatura do painel através da troca de calor com o fluido. Ele pode ser categorizado de acordo com diversas características, como ilustrado na FIGURA 12, baseada em (JOSHI; DHOBLE, 2018). Estas configurações apresentam vantagens e desvantagens em relação às outras, como uma variação de custo e eficiência, assim como a facilidade de instalação. Nesta subseção serão apresentados trabalhos que comparam diversas destas configurações.

FIGURA 12 – CATEGORIAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TÉRMICOS

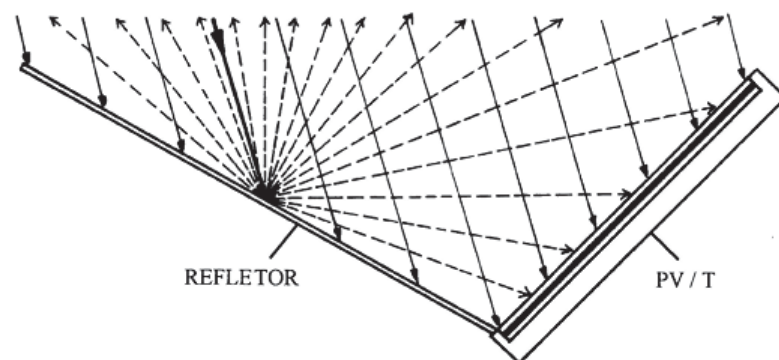


FONTE: O autor (2021).

A circulação forçada tem como vantagem sobre a natural uma melhor transferência de calor por convecção, tendo como ônus a necessidade de um sistema para bombear o fluido, enquanto na natural ele circula devido à diferença de massa específica entre o fluido aquecido e o frio. Os fluidos de refrigeração mais utilizados são a água e o ar, sendo que o primeiro provém maior eficiência elétrica e térmica e o segundo possui instalação mais fácil, sem necessitar um reservatório (ISLAM *et al.*, 2016).

Tripanagnostopoulos *et al.* (2002) efetuaram análises de sistemas FVT com painéis de silício amorfo e policristalino, analisando a relevância do uso de vitrificação - adição de uma camada de vidro acima do painel, criando uma estufa - e o uso de superfícies refletoras apontadas para os painéis, conforme mostra a FIGURA 13. Comparou-se o desempenho de um sistema com água e outro com ar. A vitrificação aumentou significativamente a eficiência térmica, mas reduziu a elétrica, por aumentar a temperatura do painel e a reflexão da energia solar. As superfícies refletoras aumentaram a quantidade de energia fornecida aos painéis, fazendo com que o sistema gerasse mais energia térmica e elétrica. Para todas as configurações, a água mostrou-se superior ao ar como fluido refrigerante.

FIGURA 13 – SUPERFÍCIES REFLETORAS UTILIZADAS COMO CONCENTRADORES DE ENERGIA SOLAR

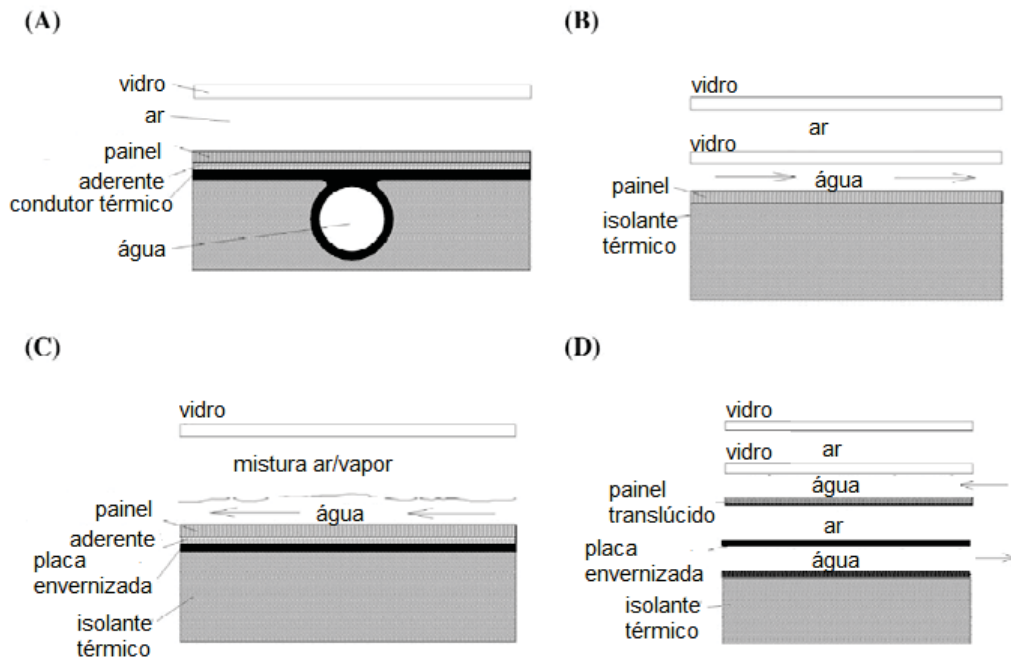


FONTE: Adaptado de Tripanagnostopoulos *et al.* (2002).

Zondag *et al.* (2003) compararam nove diferentes projetos de sistemas FVT à água, divididos em quatro categorias, ilustradas na FIGURA 14: chapa e tubo; com canais; de fluxo livre; com dois absorvedores (painel translúcido + placa envernizada). Na primeira categoria, foram analisados sistemas com zero, uma e duas coberturas de vidro. Na segunda categoria, foram montados dois sistemas com passagem de água sob o painel, diferenciando-se por um possuir painel fotovoltaico convencional e outro um painel transparente com um absorvedor térmico sob ele. Na terceira categoria, analisou-se um único sistema, com fluxo livre de água sobre o painel, sem tubulações. Para a última categoria, foi proposto um sistema constituindo de um painel transparente

e um absorvedor térmico, cada um com um canal de água sob ele. A maior eficiência de conversão elétrica, de 9,7%, foi obtida com o sistema chapa e tubo sem cobertura de vidro, com o ônus de ter a menor eficiência térmica (52%). O sistema que se mostrou mais interessante globalmente foi o com canal e painel transparente, alcançando eficiências elétrica, térmica e global de 9%, 63% e 72%, respectivamente.

FIGURA 14 – DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA UM SISTEMA FVT. A) CHAPA E TUBO. B) COM CANAIS. C) FLUXO LIVRE. D) COM DOIS ABSORVEDORES.



FONTE: Adaptado de Zondag *et al.* (2003).

Kumar e Rosen (2011) compararam um sistema com passagem dupla de ar em configuração com e sem aletas dispostas perpendicularmente à passagem de fluido. Em ambos os casos, utilizou-se circulação forçada e, para uma vazão mássica de 0,06 kg/s e irradiância solar de 800 W/m<sup>2</sup>, as aletas proporcionaram uma redução da temperatura da célula de 16°C, atingindo uma eficiência elétrica de 10% e térmica de 55%. No sistema com aletas, ao variar a irradiância global de 500 a 1000 W/m<sup>2</sup> a eficiência global manteve-se praticamente constante, aumentando a térmica e reduzindo a elétrica proporcionalmente. Ao aumentar a vazão mássica a eficiência global foi de 70, 73 e 75% para vazões de 0,09; 0,12 e 0,15 kg/s.

Rejeb *et al.* (2016) analisaram a influência de duas nanopartículas - óxido de alumínio e cobre - em dois fluidos de base (água e etilenoglicol). A adição das partículas de óxido de alumínio à água em 0,1%, 0,2% e 0,4% de peso forneceram eficiência térmica de 43,3%, 45,4% e 46,7%. Para os mesmos parâmetros, a eficiência térmica da água com cobre foi de 61,7%, 70,0% e 76,9%, enquanto a eficiência elétrica não variou de forma significativa. Os resultados com etilenoglicol foram significativamente

inferiores em todos os casos, atingindo uma eficiência térmica máxima de 60% ao utilizar 0,4% de peso de cobre.

Rahaei *et al.* (2021) elaboraram um sistema FVT com contato direto entre a água e o painel, passando a água sobre a superfície superior do painel sem a presença de tubulação. A água escoava por circulação forçada na superfície inferior do painel. Utilizando uma vazão de 0,0161 kg/s, o pico de aumento de eficiência elétrica em relação a um sistema sem arrefecimento foi de 21,5 %. A eficiência térmica média e máxima do sistema foram de 49% e 58%. Os testes foram realizados em ambiente aberto e os resultados apresentados são provenientes da média de resultados dos dias de teste, com irradiância direta chegando aos 1000 W/m<sup>2</sup> todos os dias com um pico superior aos 1100 W/m<sup>2</sup> e a temperatura ambiente acima dos 30 °C durante todos os dias, com um pico de 36,5 °C.

### 2.3 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (MMF)

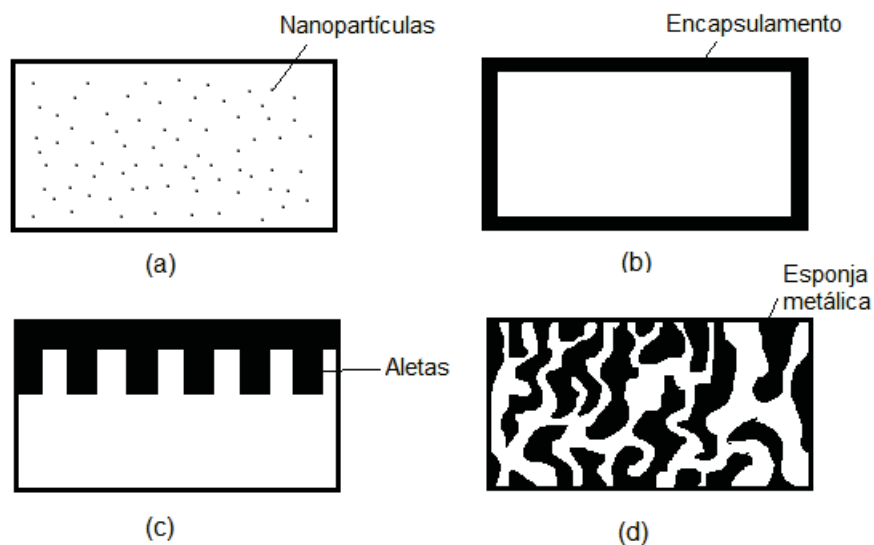
O uso de MMFs para absorver energia do sistema fotovoltaico através do calor latente, proporciona um aumento na eficiência de conversão elétrica. Estes materiais apresentam como vantagens: alta absorção de calor devido ao proveito do calor latente; ausência de partes móveis; dispensabilidade de manutenção e consumo de energia elétrica. Um material de mudança de fase possui como características desejáveis: elevado calor latente e condutividade térmica; mudança de fase reversível e ponto de fusão fixo; baixo volume específico e baixa expansão volumétrica de modo a manter um volume consistente ao longo da operação; ausência de sobrefusão; deve ser estável quimicamente, não-corrosivo, não-inflamável, não-explosivo, não-tóxico e inodoro; economicamente viável e reciclável/reutilizável. Embora o ideal seja utilizar um material com ponto de mudança de fase único, a maioria dos MMFs utilizados são misturas, que mudam de fase ao longo de uma faixa de temperatura (HASAN *et al.*, 2014).

O ponto de fusão do material deve estar entre a temperatura ambiente do local e a temperatura de operação do painel, geralmente mediante uma mistura de materiais para atingir o ponto desejado. Caso a temperatura de fusão seja muito alta, o MMF não alcança o ponto de fusão, não cumprindo o seu propósito. Caso seja muito baixa, corre o risco MMF não retornar ao estado sólido durante o período noturno, começando o ciclo no próximo dia em uma temperatura superior à ambiente. Com um sistema operando em ambiente aberto, torna-se difícil atender esta característica consistentemente ao longo do ano, dada a variabilidade sazonal.

A estimativa de aumento na eficiência elétrica anual utilizando materiais de mudança de fase disponíveis comercialmente em regiões de clima frio é de 1% a 3% (HENDRICKS; VAN SARK, 2013). Em regiões de clima quente, o aumento anual médio

utilizando cera de parafina é de 5,9% (HASAN *et al.*, 2017). Aramesh e Shabani (2022) compararam diversos métodos utilizados para melhorar a performance de MMFs, com as suas vantagens e desvantagens apontadas no QUADRO 1, concluindo que as espumas metálicas - materiais metálicos porosos onde o MMF é introduzido - possuem um balanço mais positivo que os demais métodos. Estes métodos estão ilustrados na FIGURA 15, sendo a parte branca das figuras o MMF e a parte preta os métodos de aprimoramento.

FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DOS MÉTODOS DE APRIMORAMENTO DO MMF. A) NANO-PARTÍCULAS. B) MICRO ENCAPSULAMENTO. C) ALETAS. D) IMERSÃO EM ESPONJA METÁLICA.



FONTE: O Autor (2023).

QUADRO 1 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MÉTODOS DE APRIMORAMENTO DE MMF

Método	Vantagens	Desvantagens
Dispersão de nanopartículas ou grafite expandido	Aumento da condutividade térmica sem prejuízo para a convecção natural	Instabilidade da solução e sedimentação das nanopartículas/grafite
Micro/nano encapsulamento do MMF	Aumento da condutividade térmica e eliminação da variação volumétrica	Redução de convecção natural do MMF
Uso de aletas	Aumento significativo da taxa de transferência de calor	Não previne a formação de espaços vazios. Aletas na horizontal reduzem a capacidade de convecção natural
Incorporação de espumas metálicas no MMF	Aumento significativo da taxa de transferência de calor e condutividade térmica. Redução de espaços vazios.	Supressão da convecção natural.

FONTE: Adaptado de Aramesh e Shabani (2022).

Chen *et al.* (2020) fizeram um estudo sobre materiais de mudança de fase de forma estável. Este sistema consiste na inserção de um MMF orgânico em um material esponjoso. O material esponjoso escolhido foi a esponja de grafeno (EG) e analisaram-se dois MMFs:  $C_{14}H_{31}N$  (tetradecilamina - TDA) e  $C_{18}H_{39}N$  (octadecilamina - ODA). As combinações EG+TDA e EG+ODA apresentaram excelente calor latente, na faixa de 300 kJ/kg. Estes sistemas, quando comparados aos MMF sem EG alcançaram uma condutividade térmica 170% superior. Segundo os autores, o sistema combinado também apresenta melhorias em estabilidade e reciclabilidade se comparado ao MMF sem material esponjoso.

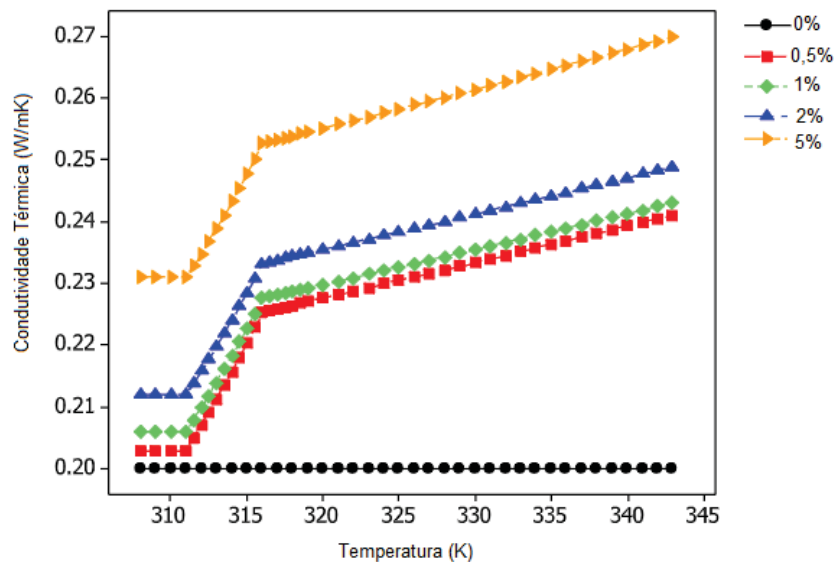
Jamil *et al.* (2021) analisaram o MMF RT22 (base de parafina da marca RubiTherm com ponto de fusão de 22°C) para o gerenciamento térmico de painéis fotovoltaicos utilizando três tipos de nanopartículas: nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNTs), nanoplaquetas de grafite (GNPs) e partículas de óxido de magnésio (MgO). Estas partículas proporcionam maior condutividade térmica ao MMF, aumentando a eficiência elétrica se comparado com um MMF sem partículas. Adicionou-se 0,25% e 0,5% do peso total das três nanopartículas ao MMF. Em todos os casos, a adição de 0,5% mostrou-se superior, reduzindo a temperatura máxima em comparação com o sistema com MMF simples em 5,7 Kelvin para o MWCNTs, 3,1 K para o GNPs e 3,3 K para o MgO.

O MMF RT42 - semelhante ao RT22 mas com um ponto de fusão de 42°C - foi utilizado para o gerenciamento térmico de uma bateria de Lítio-íon. De modo a aumentar a baixa condutividade térmica do material, adicionou-se nanopartículas de  $Al_2O_3$  em percentagens mássicas de 0,5; 1; 2; 5%. A condutividade, que era tida como constante em 0,2 W/(m·K) para o MMF puro passou a variar com a temperatura (conforme ilustrado na FIGURA 16), tendo um grande aumento na transição de sólido para líquido. Para o caso de 5% da massa, este valor chegou a aproximadamente 0,255 W/(m·K) ao alcançar o estado líquido. Todavia, a inserção deste material reduz a capacidade do sistema armazenar calor (aqui somando o calor específico e latente para uma faixa de temperatura de 35°C a 50°C), sendo este valor de 165 kJ/kg para o sistema puro e de 161,68; 158,45; 152,28; 135,77 kJ/kg para o sistema com 0,5; 1; 2; 5% de nanopartículas. A bateria atingiu uma temperatura máxima de 62°C sem o uso de MMF, 42,9°C com o MMF puro e entre 42,7 e 42,8°C para todas as frações de nanopartículas, indicando um balanço entre o benefício do aumento da condutividade e o prejuízo decorrente do calor latente+específico reduzido, fazendo com que o uso das nanopartículas não altere o desempenho do MMF nesta aplicação (BAIS *et al.*, 2022).

Bria *et al.* (2023) testaram a influência da espessura do reservatório de MMF no desempenho de um sistema FV+MMF considerando as condições climáticas de Oudja, em Marrocos. O teste foi feito através do método dos volumes finitos utilizando

a base de parafina RT42 como MMF. O sistema utilizou um trocador de calor aletado de alumínio entre o painel e o MMF para aumentar a taxa de transferência de calor entre estes componentes. O teste foi efetuado para profundidades de 4 cm a 7 cm, detectando um pequeno aumento no desempenho até os 6 cm, que apresentou o mesmo resultado de profundidades superiores, pois a partir deste valor a energia absorvida pelo painel ao longo do dia já não é suficiente para derreter todo o MMF. O ponto máximo de redução de temperatura foi de 32 K, representando um aumento relativo no pico da eficiência elétrica de 14,4% para um painel com perda de 0,45% a cada K.

FIGURA 16 – VARIACÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO RT42 AO INTRODUIR NANOPARTÍCULAS DE  $Al_2O_3$



FONTE: Adaptado de Bais *et al.* (2022).

## 2.4 SISTEMA COMBINADO FVT COM MMF

A união destes dois sistemas mostra-se vantajosa, pois eles se suplementam na extração de calor do sistema fotovoltaico e o calor absorvido pelo MMF é aproveitado pelo sistema térmico, aumentando as eficiências térmica, elétrica e global do sistema.

Comparando-se um sistema FV sem arrefecimento com um FVT e um FVT+MMF utilizando água como fluido refrigerante e ácido cáprico-palmitico como MMF. Notou-se que o material de mudança de fase aumenta o tempo de disponibilidade da energia térmica (tempo em que a temperatura da água é superior à ambiente) em até duas vezes, pois o material a armazena como calor latente e a libera durante a noite. A diferença máxima de temperatura ao longo do dia entre o sistema FVT e FVT+MMF variou de 4 K a 8 K, dependendo das condições climáticas no dia do experimento (BROWNE *et al.*, 2015).

Em estudo realizado na Índia em ambiente aberto, um sistema fotovoltaico sem arrefecimento foi comparado com um sistema FVT com água e FVT+MMF utilizando cera de parafina RT30 como material de mudança de fase. Em teste com vazão de 0,013 kg/s houve uma redução máxima de temperatura em relação ao sistema sem arrefecimento de 49,8% para o sistema FVT+MMF e para o sistema FVT a redução de temperatura máxima foi de 38% indicando que a água aqueceu-se mais rapidamente sem a presença do MMF, reduzindo a sua capacidade de extrair calor do painel. Ao realizar o experimento com uma vazão de 0,031 kg/s a redução de temperatura foi de 53% e 47% para os sistemas com e sem MMF, respectivamente (PREET *et al.*, 2017).

Carmona *et al.* (2021) efetuaram testes em ambiente aberto durante um período de 2 meses (primavera) de um sistema FVT+MMF, comparando-o a um sistema fotovoltaico sem arrefecimento. Neste sistema inseriu-se um fio de cobre enrolado dentro do reservatório de MMF, de modo a uniformizar a temperatura do material. Utilizou-se também um trocador de calor aletado para garantir melhor transferência de calor entre o painel e o MMF. O resultado foi um sistema capaz de produzir 7,43% a mais de energia elétrica em média, se comparado ao módulo simples. A eficiência média global do sistema foi de 31,35%.

Almejando a redução dos custos dos MMF, elaborou-se um sistema FVT+MMF que insere o MMF em uma esponja metálica de alumínio, proveniente do resíduo industrial. Comparou-se, em ambiente aberto, este sistema a um FVT+MMF com hidrato de sal, um sistema FVT e um sistema fotovoltaico convencional. No verão, os sistemas FVT, FVT+MMF e FVT+MMF-poroso produziram, respectivamente, 5,4%, 14,8% e 17,17% mais energia elétrica que o sistema convencional. No inverno, este aumento foi de 4,5%, 9,4% e 14,2%. A eficiência térmica dos sistemas no verão foi de 56,75%, 53,94% e 52,21%, sem considerar a energia extraída do MMF durante a noite (RAD *et al.*, 2021).

Khodadadi e Sheikholeslami (2021) analisaram numericamente de um sistema FVT+MMF utilizando nanopartículas tanto no MMF quanto na água utilizada como fluido de trabalho. No MMF utilizou-se óxido de alumínio, enquanto na água o carbeto de silício, ambos como 0,04% do volume. No final do experimento, a diferença de temperatura deste sistema para um FVT chega aos 13,5%. Comparou-se então o resultado para o sistema FVT+MMF sem aletas entre o painel e o MMF, com sistemas com 10, 14 e 18 aletas igualmente espaçadas. As temperaturas para as quatro configurações no final do sistema são: 311,7 K, 310,1 K, 309,9K e 309,9K. Notou-se um rendimento decrescente com a adição de mais aletas devido ao balanço entre a melhor transferência de calor e a redução de massa do MMF.

Colarossi e Principi (2022) avaliaram o rendimento anual de um sistema FVT+MMF que utiliza o MMF RT35-HC, cera de parafina com alto calor latente e

temperatura de fusão de 35°C. O estudo foi efetuado em ambiente aberto no inverno e em uma câmara solar simulando as demais estações utilizando como referência o clima de Ancona, na Itália. Água passa por uma tubulação de cobre dentro do reservatório de MMF, com reservatórios de 50, 75, 100 e 125 litros. Notou-se um aumento significativo de 50 para 75 litros, mas o aumento para 100 e 125 litros foi inconsequente. A eficiência global no verão para o sistema com 50 litros foi de 32,7%, enquanto que para os demais volumes foi de 38,7%. No inverno, esta eficiência foi de 16% para as quatro configurações. Esta queda no inverno deve-se ao pequeno proveito de energia térmica na estação.

Li *et al.* (2022) propuseram um sistema FVT+MMF com operação modulável para o verão e inverno, utilizando tanto o ar quanto a água como fluido de trabalho. No inverno, o ar é utilizado para reduzir a necessidade de calefação, já nas demais estações a energia térmica é aproveitada através da água. O MMF utilizado é a cera de parafina RT35. A diferença de temperatura entre a entrada e saída do ar no inverno permaneceu constante em aproximadamente 9 K durante o dia. A diferença entre a temperatura da água ao sair sistema e ao ingressar no tanque foi de 10 K no verão, devido à perda durante o transporte pela tubulação. O aumento de geração de energia elétrica ao longo do ano foi de 14% (percentagem relativa) se comparado a um sistema FV convencional.

Simón-Allué *et al.* (2022) fizeram um teste de longo prazo, comparando o desempenho de um sistema FVT com um FVT+MMF ao longo de 9 meses, na Espanha. O fluido de trabalho e o MMF utilizados foram a água e um hidrato de sal tipo C48. A geração média de energia térmica foi de 18-25% para o sistema FVT e 22-30% para o sistema FVT+MMF. Em ambos os casos, a eficiência elétrica foi de 14-16%. A relação energia térmica/elétrica é de 1,5 no verão e 0,9 no inverno. Embora o ganho de eficiência (principalmente térmica), o alto preço deste MMF (15,8 €/kg quando o estudo foi feito) dificulta a sua aplicação, mesmo considerando uma redução de preço por aquisição em grande escala.

Hamada *et al.* (2023) propuseram um sistema FVT+MMF onde o MMF é encapsulado em esferas de cobre, que são fixadas dentro do canal por onde o fluido do sistema térmico passa. Este sistema utiliza o MMF RT35 e água como fluido de trabalho para um painel fotovoltaico de silício com 10 W de potência-pico. O sistema foi testado em ambiente aberto em Cairo, no Egito utilizando tanto uma circulação forçada quanto natural do fluido. Para ambos os casos, fez-se o teste com e sem isolante térmico sob o sistema térmico e o uso do isolante mostrou-se proveitoso para ambos os casos. Os valores médios da eficiência elétrica durante um dia foram de 12% para um sistema fotovoltaico sem arrefecimento, 12,6% para o sistema com circulação natural e 14,6% para o sistema com circulação forçada de 3 litros por minuto. A eficiência térmica foi de

22% para o sistema sem bombeamento e de 59,5% para o sistema com bombeamento.

Choi *et al.* (2023) investigaram um sistema FVT+MMF com injeção de bolhas de ar no MMF (quando ele se encontra na fase líquida), de modo a aumentar o coeficiente de convecção e aumentar a uniformidade da temperatura do MMF. O fluido de trabalho é a água e o MMF o material orgânico n-docosane com ponto de fusão de 42-43 °C e calor latente de 243 kJ/kg. O teste foi feito em laboratório com uma irradiância de 800 W/m<sup>2</sup>. Comparando o sistema com e sem bolhas, o com bolhas obteve uma maior uniformidade de temperatura no painel, sendo a diferença entre o valor mínimo e máximo de 48% quando a temperatura média é máxima. O aumento de eficiência elétrica do sistema com bolhas foi de 3,5% comparado ao sistema sem bolhas enquanto o aumento da eficiência térmica foi de 23%.

## 2.5 SISTEMAS UTILIZANDO GLICERINA COMO MMF

Encontrar um MMF que possua as características desejadas para o armazenamento de energia térmica e seja produzido de forma sustentável, é uma tarefa difícil. A glicerina, nome comercial dado ao glicerol/propanotriol com pureza superior aos 95%, é um subproduto do biodiesel com potencial aplicação como material de mudança de fase sustentável (GUNASEKARA *et al.*, 2017).

Sarı *et al.* (2010) adicionaram ácidos mirístico, palmítico e esteárico ao glicerol, de modo a alterar o seu ponto de fusão (PF), formando os esteres trimiristato de glicerol, tripalmitato de glicerol e tristearato de glicerol, listados na TABELA 1. De modo a aumentar a condutividade térmica do MMF, adicionou-se 5% da massa total de grafite expandido (GE). A capacidade de armazenamento térmico e ponto de fusão destes compostos foram avaliadas através de uma calorimetria de varredura diferencial, enquanto a condutividade térmica foi aferida com um analisador de propriedades térmicas modelo KD2. Com as adições dos ácidos obtiveram-se MMFs com um ponto de fusão na faixa de 32 a 63 °C, sendo utilizáveis em diversas situações. A adição de grafite aumentou a condutividade nos três casos, mas o resultado mais significativo foi do palmitato. Após 1000 ciclos de operação (aproximadamente 3 anos), nenhum dos materiais apresentou degradação significativa.

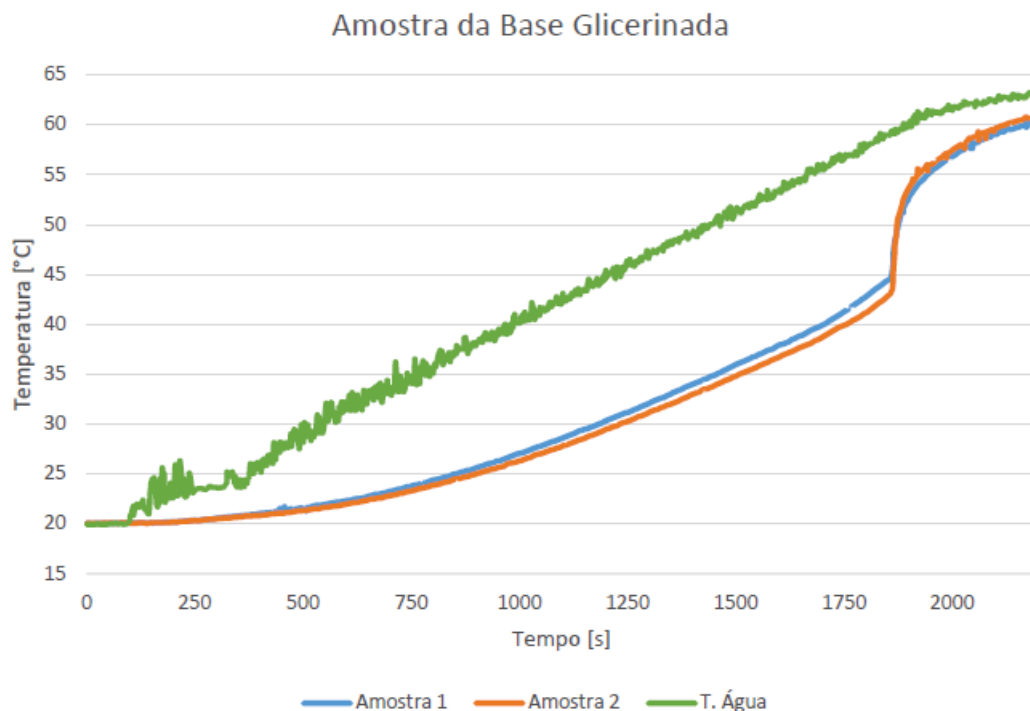
TABELA 1 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ESTERES FEITOS A PARTIR DA ADIÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS AO GLICEROL

Material	PF [°C]	Calor latente [kJ/kg]	k [W/(m·K)]	k+GE [W/(m·K)]
Trimiristato de Glicerol	31,96	154,3	0,23	0,29
Tripalmitato de Glicerol	58,50	185,9	0,19	0,27
Tristearato de Glicerol	63,45	149,4	0,17	0,19

FONTE: Adaptado de Sarı *et al.* (2010).

Osaka (2019) elaborou um sistema FVT+MMF utilizando a glicerina como material de mudança de fase. Neste sistema, utilizou-se um painel de silício policristalino de 10W. Mediu-se a temperatura de fusão do MMF de base glicerinada em um calorímetro, avaliando duas amostras do material. Os resultados da análise encontram-se na FIGURA 17. Observa-se um salto na temperatura do MMF no final do experimento, aproximando-se da temperatura da água e indicando que a mudança de fase inicia-se quando o material está na faixa de 40 a 45 °C e termina aproximadamente 10 °C acima desta temperatura. Este ponto é adequado para um sistema em operação em Curitiba, dadas as condições climáticas da cidade. Através desta análise também é possível ver que este MMF não possui uma temperatura de mudança de fase definida, o que é esperado de uma substância não-pura.

FIGURA 17 – AVALIAÇÃO DO PONTO DE FUSÃO DO MMF



FONTES: Osaka (2019).

No sistema de Osaka, o MMF é colocado em um reservatório de 30 mm de profundidade, utilizando aletas para aumentar a área de transferência de calor entre o painel e o MMF. O sistema térmico consiste em uma serpentina de alumínio abaixo do MMF, utilizando água como fluido de trabalho com convecção forçada. O teste foi feito em laboratório com temperatura ambiente de 25 °C irradiância média de 992,3 W/m<sup>2</sup> e ventilação constante de 1 m/s. O teste foi feito para três configurações de vazão d'água ( 0,026 l/s; 0,014 l/s; convecção natural). Comparando a um sistema convencional, a redução de temperatura máxima do sistema com vazão d'água foi de 9,6 °C, com variação insignificante entre as duas vazões. A tensão obtida no sistema com vazão

d'água foi 3% superior ao sistema com convecção natural e 10% superior ao sistema sem arrefecimento.

Os sistemas FVT, FV+MMF e FVT+MMF discutidos nesta seção estão resumidos na TABELA 2. Os artigos apresentados que não são aplicação direta em sistemas fotovoltaicos não estão listados. Na tabela estão contidos: um resumo do estudo; a melhor configuração encontrada (casos de só uma proposta estão representados por um "-"); Aumento de eficiência de conversão elétrica  $\eta_e$  comparado a um sistema sem arrefecimento (-"em casos onde a comparação foi feita somente entre sistemas com arrefecimento, (Rel) para sistemas onde apenas o aumento relativo foi apresentado e (Pm) quando apenas o ponto máximo foi apresentado numericamente); Eficiência térmica  $\eta_t$  (-"para sistemas FV+MMF e sistemas que não apresentaram seu valor ou apresentam o ganho total de energia térmica ao longo do experimento sem apresentar a eficiência, (v) e (i) para o sistema que apresentou resultados para verão e inverno separadamente); eficiência global  $\eta_g$ . Nota-se na tabela que os sistemas com maior eficiência térmica - e conseqüentemente global - apresentam um baixo ganho de eficiência elétrica, enquanto os sistemas com maior ganho de eficiência elétrica apresentam menor ganho da térmica. Nota-se também que testes efetuados em clima quente apresentam resultados mais favoráveis que em clima frio. Por conta disso, uma parcela significativa dos estudos encontrados sobre arrefecimento de painéis solares são oriundos de países do sul asiático, Oriente Médio/Norte da África e America Latina.

TABELA 2 – RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

Autor	Sistema	Pesquisa	Melhor sistema	Ganho de $\eta_e$ (%)	$\eta_t$ (%)	$\eta_g$ (%)
Tripanagnostopoulos <i>et al.</i> (2002)	FVT	Influência de concentrador e estufa em sistema a água	concentrador + estufa	0	80	93,4
Zondag <i>et al.</i> (2003)	FVT	Sistema a água com diferentes arquiteturas; absorvedor térmico	Painel translúcido com absorvedor	-1,3	63	72
Kumar e Rosen (2011)	FVT	Influência de aletas na tubulação	Dupla passagem de ar com aletas	-	55	68
Rejeb <i>et al.</i> (2016)	FVT	Influência de diferentes nanopartículas na água	Água com nanopartículas de cobre	2,5	76,9	-
Rahaei <i>et al.</i> (2021)	FVT	Água em contato direto com o painel	-	21,5 (Rel)	58	-
Hendricks e Van Sark (2013)	FV+MMF	Uso de diferentes MMFs em clima frio	MMF RT-27	3	-	-
Hasan <i>et al.</i> (2017)	FV+MMF	Uso de diferentes MMFs em clima frio	Cera de parafina	5,9	-	-
Bria <i>et al.</i> (2023)	FV+MMF	Teste da espessura do reservatório de MMF	6 cm	5,9	-	-
Preet <i>et al.</i> (2017)	FVTMMF	Comparação FVT e FVT+MMF em clima quente	Água e MMF RT30	12,6 (Pm)	35,4	53
Carmona <i>et al.</i> (2021)	FVTMMF	Água+RT35 com dissipador de calor de cobre no MMF	-	7,4	17,2	31,4
Khodadadi e Sheikholeslami (2021)	FVTMMF	Avaliação de nanopartículas na água e RT35 e aletas no MMF	Uso de nanopartícula em ambos	-	70	83
Colarossi e Principi (2022)	FVTMMF	Água+RT35, água passa por dentro do reservatório do MMF	-	-	38,7(v) 16(i)	
Li <i>et al.</i> (2022)	FVTMMF	Sistema modular, ar(i) e água (v) com RT35	-	14 (Rel)	-	-
Simón-Allué <i>et al.</i> (2022)	FVTMMF	comparação FVT com FVT+MMF	Água+hidrato de sal C48	-	30	46
Hamada <i>et al.</i> (2023)	FVTMMF	MMF encapsulado; isolante térmico; tipo de circulação	circulação forçada com isolante	-	30	46
Choi <i>et al.</i> (2023)	FVTMMF	Bolhas de ar no reservatório de MMF	-	2,6	59,5	74,1
Osaka (2019)	FVTMMF	Água + MMF de glicerina com aletas no reservatório	-	3,19	-	59,4

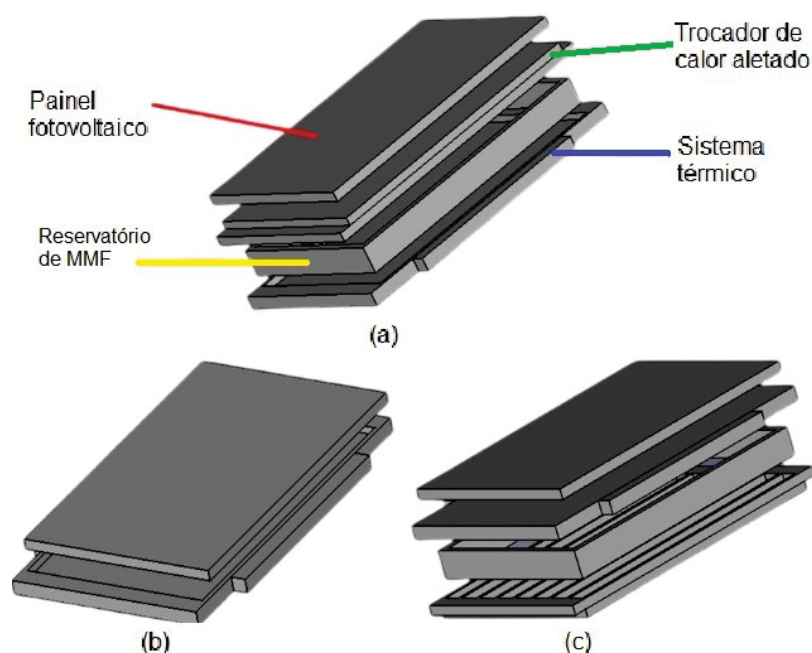
FONTE: O Autor (2023).

### 3 METODOLOGIA

Nesta sessão serão apresentados os componentes do sistema FVT+MMF e as diferentes disposições utilizadas, a metodologia empregada para os testes em laboratório e em ambiente aberto, bem como os equipamentos utilizados e as suas configurações. Também serão especificados os dias e condições em que as medições em ambiente aberto foram realizadas.

O sistema FVT+MMF com glicerina estudado neste texto é o mesmo que foi desenvolvido por Osaka para sua tese de doutorado, abordado na seção 2.5 (OSAKA, 2019). As avaliações são feitas comparando os painéis com arrefecimento a um sistema de referência, somente com o painel fotovoltaico. O painel utilizado para os testes é um painel de silício policristalino, modelo Yingli YL010P-17b com potência elétrica de 10 W, eficiência elétrica de 10% e perda de 0,45% desta eficiência a cada Kelvin acima dos 25 °C, com uma tolerância de  $\pm 5\%$  (NEOSOLAR, 2023). Para o arrefecimento, três configurações são propostas, ilustradas na FIGURA 18, sendo as siglas utilizadas para denotar a ordem dos componentes do sistema de cima para baixo. A FIGURA 18 (a) denota o sistema FV+MMF+T: painel fotovoltaico com um reservatório de MMF (linha amarela) abaixo dele e o sistema térmico (linha azul) abaixo do MMF; FIGURA 18 (b) o sistema FVT: painel fotovoltaico apenas com o sistema térmico sob ele; FIGURA 18 (c) é o sistema FVT+MMF: painel fotovoltaico com o sistema térmico abaixo dele e o reservatório de MMF na camada inferior .

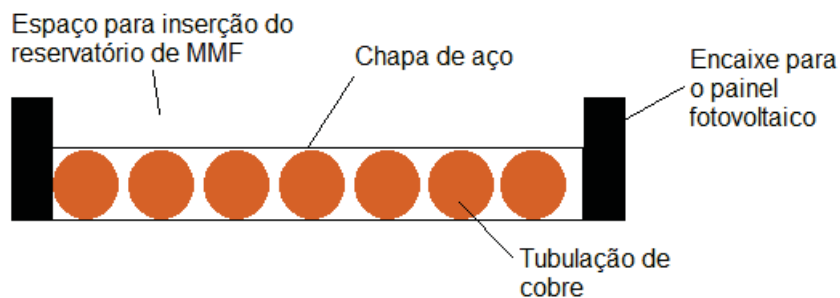
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ARREFECIMENTO. A) SISTEMA FV+MMF+T. B) SISTEMA FVT. C) SISTEMA FVT+MMF.



FONTE: O Autor (2022).

O sistema térmico consiste em um trocador de calor por onde água é bombeada de um reservatório de 6,8 litros a vazão de 0,014 l/s. A água passa por debaixo do painel fotovoltaico ou reservatório de MMF dependendo de qual configuração, absorve parte de sua energia térmica e retorna ao reservatório. Conforme ilustrado na FIGURA 19, o trocador de calor consiste em uma tubulação de cobre em formato de serpentina posta entre duas chapas de aço de modo a uniformizar a temperatura de suas superfícies. A conexão entre o reservatório e o sistema térmico é feita através de uma tubulação de PVC com 2m de comprimento para a entrada e a saída (4m no total). Como o sistema térmico foi projetado originalmente para a posição inferior do sistema, há uma cavidade para a inserção do reservatório de MMF, possibilitando o contato direto entre a glicerina e o sistema térmico. Quando o sistema térmico é utilizado para a análise das configurações FVT e FVT+MMF, uma placa de alumínio é utilizada para preencher o espaço vazio utilizado para o encaixe do reservatório de MMF com uma pasta térmica com condutividade térmica de 0,4 W/(m·K) entre as superfícies, de modo a reduzir a resistência de contato.

FIGURA 19 – ILUSTRAÇÃO DE VISTA EM CORTE DO SISTEMA TÉRMICO



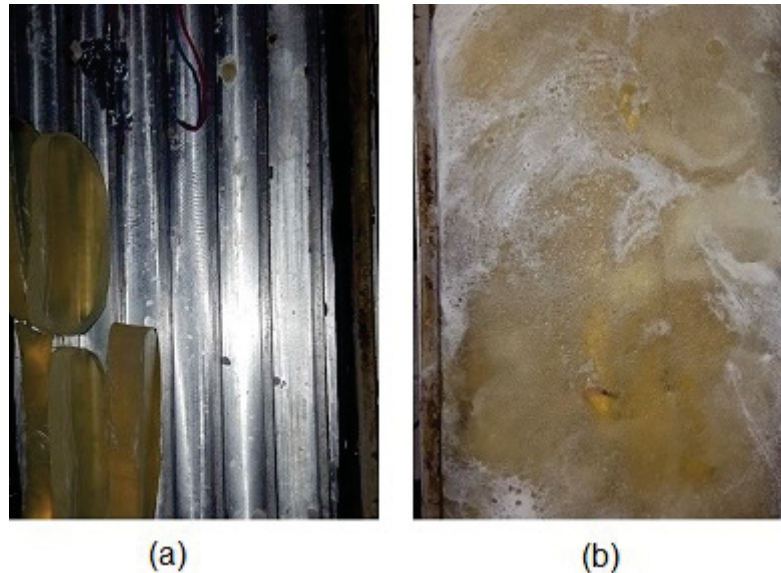
FONTE: O Autor (2023).

O reservatório onde o MMF - base glicerina de origem vegetal - é inserido é feito de uma parede de acrílico com profundidade de 30mm e as duas faces sem cobertura. em uma das faces é encaixado o sistema térmico e, por conta disso, há uma cavidade na região central do sistema térmico, que pode ser visto na FIGURA 18 (b) e ilustrado na FIGURA 19. Na outra superfície é posto um trocador de calor aletado, indicado pela linha verde na FIGURAS 18 (a) e 19, de modo a melhorar a condução de calor ao material de mudança de fase e deixar a sua temperatura mais homogênea. Este trocador de calor é feito de alumínio e possui 7 aletas de 14 mm de comprimento distanciadas igualmente entre si.

A FIGURA 20 mostra o reservatório de MMF sendo preenchido com glicerina com as aletas ao fundo. Também nota-se o posicionamento dos termopares utilizados para avaliar a temperatura deste material: um termopar atado à aleta central e outro solto na altura média do reservatório. A FIGURA 21 apresenta, da esquerda para a direita, o painel fotovoltaico, o reservatório de material de mudança de fase e o

sistema térmico coberto de pasta térmica. O retângulo verde na FIGURA 21 apresenta a conexão da tubulação de saída de água do sistema térmico. O termopar é inserido na tubulação, imediatamente após a saída. O mesmo ocorre na tubulação de entrada.

FIGURA 20 – RESERVATÓRIO DO MMF. A) RESERVATÓRIO SENDO PREENCHIDO. B) RESERVATÓRIO CHEIO.



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 21 – COMPONENTES DO SISTEMA FVT+MMF



FONTE: O Autor (2022).

Fez-se uma avaliação da aquisição de energia térmica pelo sistema. Para tal, utilizou-se a massa de água no reservatório, com o seu calor específico e a diferença de temperatura entre a água no início do sistema e após 1h de experimento, conforme ilustrado na equação 3.1. Pode-se obter a eficiência térmica do trocador de calor pelo mesmo método, substituindo na equação a diferença de temperatura final e inicial e a massa do reservatório pela variação de temperatura entre a entrada e saída da água e a vazão mássica da água, respectivamente. Contudo, como esta variação

não ultrapassa 1 K (incerteza do termopar utilizado), não é razoável fazer a análise desta eficiência. As avaliações da energia total fornecida ao longo de um período foram feitas integrando a potência fornecida pelos painéis ao longo do tempo. Esta integral foi avaliada numericamente, através da regra do trapézio, que simplifica a área da curva potência x tempo para um número finitos de trapézios, possibilitando um cálculo mais simples desta área. Esta solução numérica se encontra na EQUAÇÃO 3.2, onde  $n$  é o número de pontos avaliado,  $\Delta t$  é o intervalo entre as medições e  $P$  a potência e  $E$  a energia. O intervalo utilizado é de 10 segundos, igual ao intervalo entre medições do sistema de aquisição de dados. Nota-se que os pontos inicial e final (0 e  $n$ ) são contabilizados só uma vez, enquanto os termos internos 2, por serem a coluna esquerda de um trapézio e a direita do posterior.

$$E = mc_p \Delta T \quad (3.1)$$

$$E = \int P dt \approx \frac{\Delta t}{2} P(0) + 2P(1) + P(2) + \dots + P(n-1) + P(n) \quad (3.2)$$

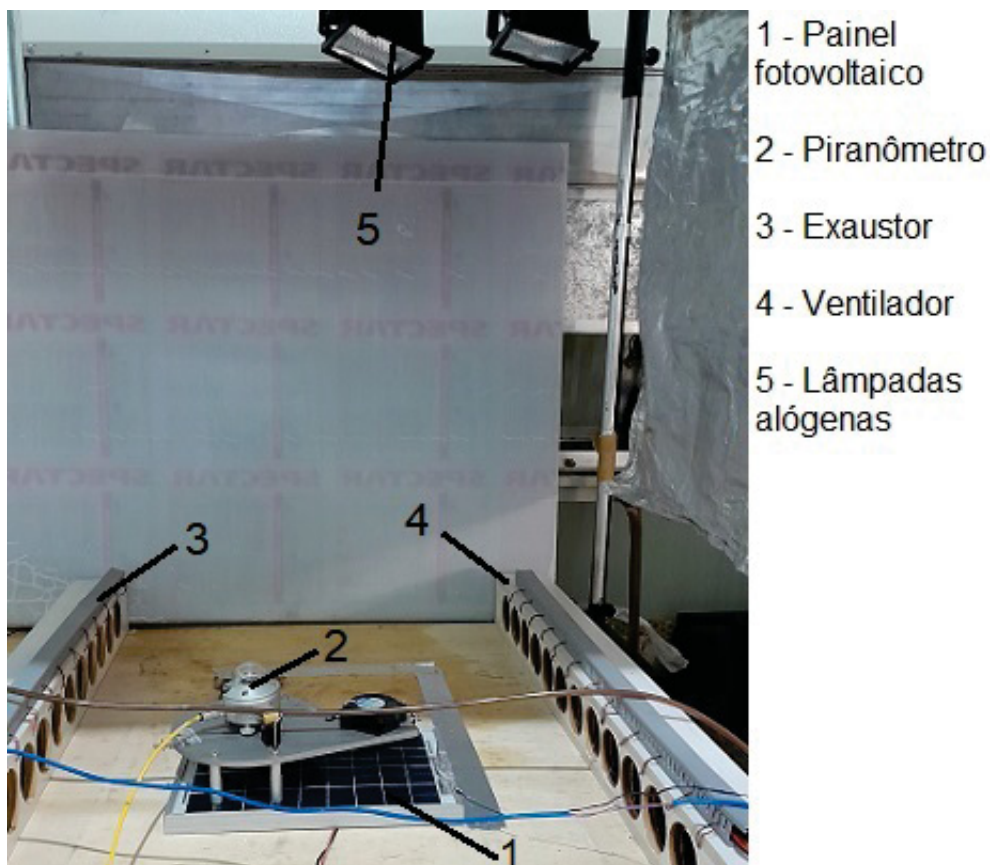
### 3.1 TESTES EM LABORATÓRIO

Para os testes utilizou-se a câmara térmica do laboratório de sistemas térmicos da PUCPR (FIGURA 22). Os testes são efetuados considerando uma mistura entre as condições do padrão STC e as utilizadas para obter a temperatura de operação NOCT, referenciado como padrão NOCT por brevidade. O padrão STC é utilizado pelas empresas fabricantes de painéis fotovoltaicos de modo a avaliá-los sistematicamente considerando uma irradiância solar de  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  com o espectro solar AM 1,5 apresentado na FIGURA 8. Este teste é feito com a temperatura do painel mantida constante a  $25^\circ\text{C}$ , o que não é representativo para condições reais de operação. O padrão NOCT é utilizado para avaliar o teste em condições reais, mais brandas que as propostas pela NOCT - com uma irradiância de  $800 \text{ Wm}^{-2}$ , temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  e velocidade de vento de 1 m/s até que o sistema atinja um equilíbrio entre as entradas e saídas de energia, com uma temperatura  $T_{\text{NOCT}}$  neste estado de equilíbrio. Os testes deste padrão são feitos com o painel em circuito aberto, sem geração de eletricidade (JAVIDNIA, 2023).

Estes testes em laboratório foram efetuados considerando a velocidade do vento e consideração do efeito térmico do padrão NOCT e a irradiância global de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$  propostos pelo STC. Esta combinação foi feita pelo desejo de considerar o efeito da temperatura sem as condições ambientais mais brandas propostas pela NOCT. Para alcançar esta irradiância, utilizou-se 9 lâmpadas

de 500 W, posicionadas de modo que a irradiância global sobre os painéis atinja o valor desejado de maneira uniforme, medindo-a com um piranômetro Kipp & Zonen CMP 11 com sensibilidade de  $9,03 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$  e zero *offset* inferior a  $9 \text{ W}/\text{m}^2$ . De modo a alcançar a irradiância desejada, o piranômetro foi colocado na posição da bancada em que os painéis se encontram durante o teste e o direcionamento das lâmpadas e sua intensidade foi ajustada até este valor chegar aos  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  e valores próximo a este nas proximidades do painel. A irradiância no ponto onde o piranômetro se encontra durante os testes é inferior ao valor acima dos painéis (média de  $960 \text{ W}/\text{m}^2$ ). Conseqüentemente, fez-se uma compensação no valor armazenado pelo sistema de aquisição.

FIGURA 22 – BANCADA UTILIZADA PARA AS MEDIÇÕES



FONTE: O autor (2022).

O vento foi obtido através de um sistema de ventiladores e exaustores em série - itens 3 e 4 na FIGURA 22, variando a sua distância aos painéis até que velocidade média imediatamente acima deles, medida com um anemômetro, atinja o valor de 1 m/s. O anemômetro utilizado foi um de esfera quente, modelo Testo 445 com uma incerteza de  $\pm 0,2 \text{ m}/\text{s}$ . Este anemômetro faz apenas a leitura momentânea, sem a capacidade de armazenar os dados, não permitindo a leitura da velocidade do vento durante o experimento. Tanto a temperatura ambiente quanto a temperatura dos componentes dos

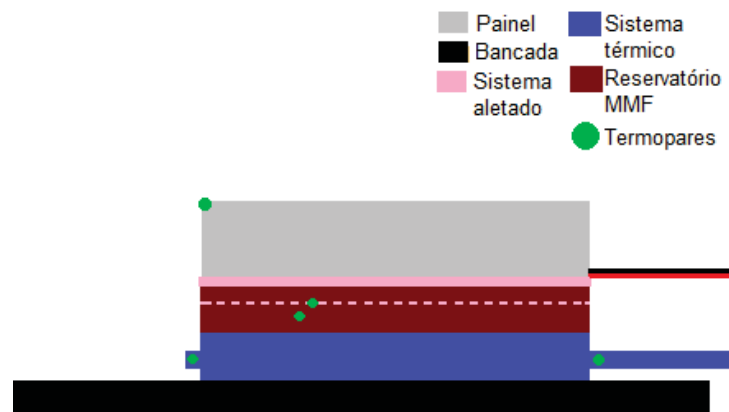
sistemas fotovoltaicos foram medidas através de termopares tipo T (cobre e constantan) com incerteza de  $\pm 1$  K. A temperatura ambiente foi mantida constante através do sistema de arrefecimento da câmara, que funcionava de modo intermitente, ligando sempre que a temperatura ambiente alcançava  $26^\circ\text{C}$  e desligando-se quando ela se reduzia a  $24^\circ\text{C}$ , mantendo um valor médio durante o experimento de  $25^\circ\text{C}$ .

As grandezas medidas no experimento foram armazenadas pelo sistema de aquisição de dados Agilent 34970A. A medição da tensão em circuito aberto foi feita conectando o painel diretamente ao sistema de aquisição. A sua incerteza de medição para a temperatura é de  $\pm 1$  K e para a tensão é de  $\pm 0,0019\%$  para uma ordem de grandeza de 10V e  $\pm 0,0065\%$  para uma ordem de grandeza de 100 mV.

O teste foi efetuado até a temperatura do painel atingir o regime permanente em todos os casos, considerando como regime permanente uma variação de temperatura inferior a 1 K para todos os componentes por um período superior a 5 minutos. Inicialmente, fez-se um teste apenas com o painel e o sistema térmico. Como o sistema foi projetado originalmente para ter o reservatório de MMF entre estes dois sistemas, uma placa de alumínio de 3 mm foi colocada na parte superior do sistema térmico, de modo a preencher a lacuna onde o reservatório de MMF é encaixado e tornar a superfície do sistema térmico compatível com o painel. Devido aos cabos presentes em uma das extremidades do painel (utilizados para a medição de tensão elétrica), nesta extremidade houve uma pequena separação entre o painel e o sistema de arrefecimento. Para não contabilizar a influência deste vão na temperatura, o termopar utilizado para monitorar a temperatura do painel foi inserido na extremidade oposta da fiação, onde não há problemas de contato entre sistema térmico e painel. No sistema com o MMF na parte inferior (FVT+MMF), encaixou-se o reservatório abaixo do sistema descrito anteriormente. Neste sistema, as aletas encontram-se na parte inferior do reservatório, não contribuindo de modo significativo quanto no sistema FV+MMF+T na transferência de calor para o MMF. No sistema FV+MMF+T, é colocada pasta térmica entre o painel fotovoltaico e o trocador de calor aletado. Neste caso, ainda há a ação da resistência de contato entre o painel e a superfície do trocador de calor aletado, mas usinou-se uma ranhura nesta superfície para encaixar os fios, de modo a restringir este efeito para uma área menor.

A FIGURA 23 ilustra o posicionamento dos termopares utilizados para medir a temperatura do painel, da água na entrada e saída do sistema térmico, na ponta das aletas (linha rosa pontilhada dentro do reservatório de MMF) e no centro do reservatório de MMF. Os termopares estão assegurados aos componentes do sistema através de uma fita de alumínio, com exceção do MMF, cujo termopar se encontra encapsulado pela glicerina. Para os outros sistemas, embora a ordem dos componentes mude, a posição dos termopares é a mesma.

FIGURA 23 – POSICIONAMENTO DOS TERMOPARES NO SISTEMA FV+MMF+T



FONTE: O autor (2022).

Em síntese, os experimentos em ambiente controlado foram feitos submetendo os painéis com e sem arrefecimento às condições mencionadas, avaliando a temperatura dos componentes destes sistemas e as tensões em circuito aberto por eles fornecidas desde o estado inicial, a 25°C até atingirem o regime permanente, que foi aqui considerado quando a temperatura dos componentes não sofrem uma variação superior a 1 K por 5 minutos.

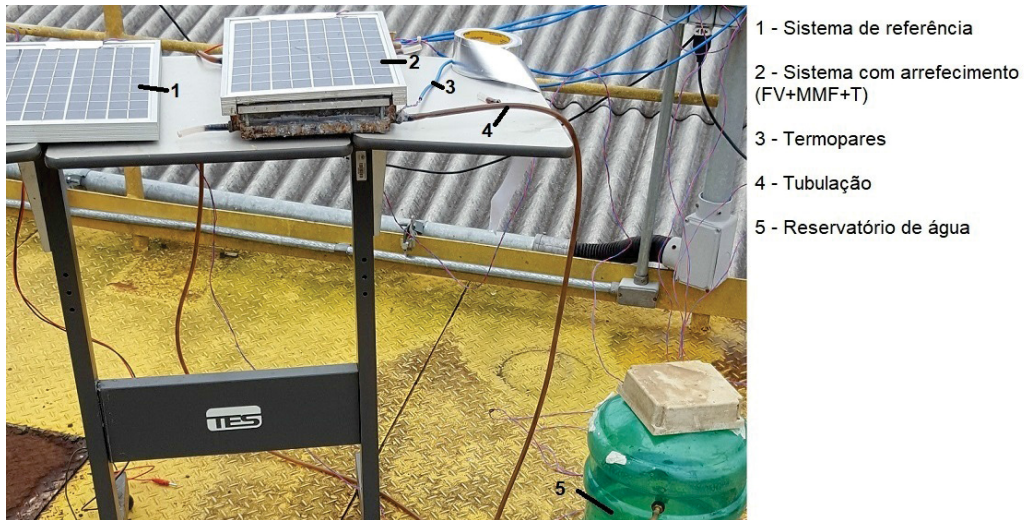
### 3.2 TESTES EM AMBIENTE ABERTO

Para realizar os testes em ambiente aberto, posicionou-se o sistema no telhado do prédio de engenharia elétrica da PUCPR, conforme ilustrado na FIGURA 24. De modo a aumentar a produção de energia elétrica média ao longo do ano, optou-se por direcionar o painel para o norte geográfico, com inclinação horizontal de 0° (orientação horizontal). Para estes testes, utilizou-se o sistema FV+MMF+T e um sistema FV sem arrefecimento. Os resultados são então enviados a um sistema de aquisição de dados no interior do prédio, que armazena os valores médios obtidos a cada minuto. A aquisição da temperatura ambiente foi efetuada através da média adquirida pela medição de 2 termopares tipo T. A temperatura dos componentes dos sistemas FV e FV+MMF+T foram medidas da mesma forma que no experimento em laboratório. Para os termopares, há uma conexão que passa internamente pelo prédio, conectando o painel com o sistema de medição através de um eletroduto.

A irradiância global foi medida através do mesmo piranômetro utilizado para os testes em laboratório. A tensão em aberto é medida diretamente pelo sistema de aquisição, através de fios de cobre ligados ao painel. Não há a uma conexão para os fios de tensão e irradiância através dos eletrodutos utilizados para os termopares, necessitando que a conexão destes fios ao sistema de aquisição seja feita externamente, atravessando a porta que conecta os ambientes interno e externo. Por conta disso, a sua instalação deve ser feita no dia do teste, por motivos de segurança. O cabo que

liga o piranômetro ao sistema de aquisição não é longo o suficiente para colocar o aparelho em uma posição adequada. Conseqüentemente, a medição é feita apenas até o horário que a caixa d'água do prédio, que está ao oeste do local de medição, faz sombra no piranômetro. Isto inviabiliza a aquisição da irradiância após este horário, que está entre as 15h e 17h, dependendo da época do ano.

FIGURA 24 – POSICIONAMENTO DO SISTEMA NO TELHADO



FONTE: O autor (2022).

A partir do verão (dez/22 e jan/23), a medição das variáveis climáticas (velocidade do vento e temperatura ambiente) foi efetuada através de uma central meteorológica MaxiMet GMX 500, com aquisição e armazenamento de dados feitos através de um software proprietário da marca. Contudo, esta estação necessita a presença de um computador em ambiente aberto (FIGURA 25) devido ao curto comprimento de seu cabo. Conseqüentemente, a medição em dias com chuva é comprometida. A incerteza deste sistema é de  $\pm 3\%$  para a velocidade do vento e de  $\pm 0,3$  K para a temperatura.

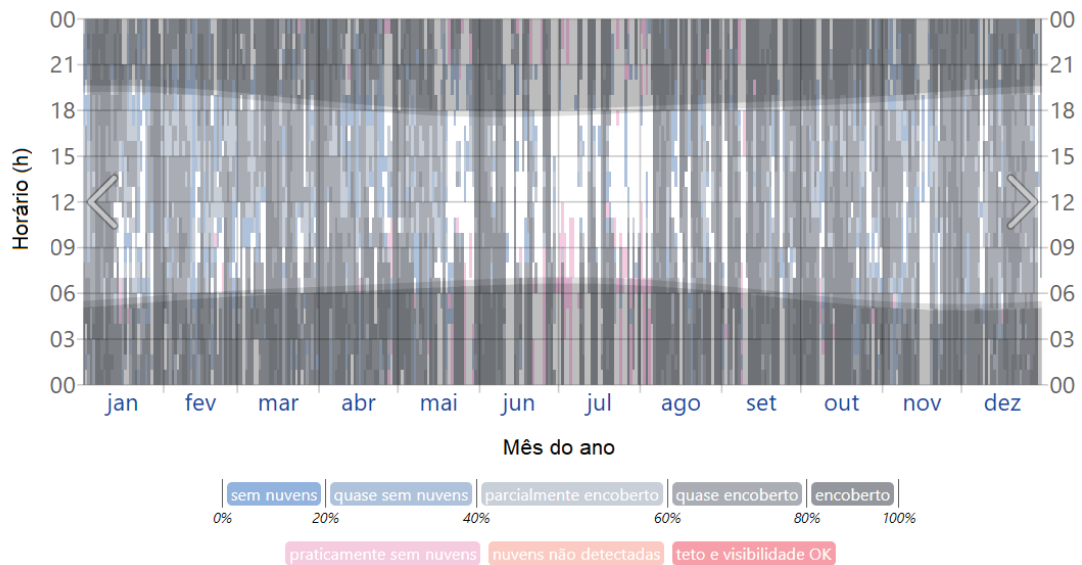
FIGURA 25 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA



FONTE: O autor (2023).

Embora Curitiba seja uma cidade com alto índice de pluviosidade, o segundo semestre de 2022 foi particularmente frio e chuvoso, inviabilizando a medição em uma considerável parte dos dias. A FIGURA 26 mostra a nebulosidade a cada dia de 2022 na cidade, sendo o eixo y o horário do dia. Esta nebulosidade é indicada pela coloração das barras com as barras claras indicando dias com poucas nuvens e é possível notar que a maior parte do ano (exceto o Inverno) é composto por barras cinzas, significando dia nublado ou chuvoso.

FIGURA 26 – NEBULOSIDADE EM 2022 EM CURITIBA



FONTE: WeatherSpark (2022).

A primeira medição foi efetuada em junho de 2022, no início do inverno, próximo ao solstício. Fez-se a medição em um dia com sol de geadas, sem nuvens e em um dia nublado. A medição das temperaturas dos componentes dos sistemas FV e FV+MMF+T foi efetuada para dois dias adicionais, sem aquisição de irradiância. Devido ao baixo aumento de temperatura durante os dias de medição e ausência de dias ensolarados durante a primavera, tornou-se a medir apenas no mês de dezembro, aproximando-se do solstício de verão. Desta maneira, pode-se observar o sistema operando em dois extremos: quando o Sol está na latitude máxima, tanto ao Norte quanto ao Sul, tendo-se então a irradiância em seus estados mais extremos. Em Dezembro, fez-se a medição em dias instáveis, um deles com temperatura sempre elevada (em torno de 30 °C ao longo do dia) e outro com pico de temperatura elevado, mas com valores mais brandos de manhã e de tarde. Em dezembro, fez-se a medição apenas das variáveis climáticas, simulando o comportamento dos painéis através dos modelos matemáticos apresentados no capítulo 4. Em Janeiro avaliou-se o sistema FVT (sem o MMF) substituindo o sistema térmico original com um banho termostático, mantendo a temperatura da água constante em 25 °C durante o dia.

Efetuaram-se medições em torno do equinócio de outono, para poder avaliar o sistema em uma situação média entre os extremos vistos anteriormente. No outono,

fez-se a comparação do sistema FV com o painel na horizontal e inclinado em 25° (latitude de Curitiba). O QUADRO 2 mostra os dias em que os testes foram efetuados, assim como as condições de cada teste. No restante das medições no outono, foram medidas apenas as variáveis climáticas, analisando o sistema através dos modelos matemáticos.

QUADRO 2 – DIAS E CONDIÇÕES DOS TESTES EM AMBIENTE ABERTO

Dia	Tempo	Medições	Observações
09/06/22	Inverno, nublado	V <sub>oc</sub> e temperatura dos sistemas FV+MMF+T e FV, irradiância global e temperatura ambiente.	-
10/06/22	Inverno, nublado	V <sub>oc</sub> e temperatura dos sistemas FV+MMF+T e FV.	-
13/06/22	Inverno, ensolarado	V <sub>oc</sub> e temperatura dos sistemas FV+MMF+T e FV, irradiância global e temperatura ambiente.	-
14/06/22	Inverno, ensolarado	V <sub>oc</sub> e temperatura dos sistemas FV+MMF+T e FV.	-
08/12/22	Verão, nublado	Irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	Temperatura ambiente elevada
15/12/22	Verão, nublado	Irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	Temperatura ambiente reduzida
24/01/23	Verão, nublado	Irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	Medição interrompida às 15h por chuva
27/01/23	Verão, ensolarado até 14h, nublado após	V <sub>oc</sub> e temperatura dos sistemas FVT e FV, irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	FVT com temperatura da água constante
20/03/23	Outono, nublado	Irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	Medição interrompida às 14h por chuva
03/04/23	Outono, ensolarado	Irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	Medição interrompida por falta de luz, retomada às 10:15
12/04/23	Outono, nublado	Sistema FV na horizontal e inclinado, irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	-
16/05/23	Outono, ensolarado	Sistema FV, irradiância global, velocidade do vento e temperatura ambiente.	-

FONTE: O Autor (2023).

## 4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Esta seção é dividida em duas sub-seções: a descrição do método empregado para a obtenção do modelo matemático para os sistemas FV, FVT, FV+MMF+T e FVT+MMF e o uso destes modelos para aferir o desempenho dos sistemas em diferentes condições.

### 4.1 OBTENÇÃO DOS MODELOS

Os sistemas são modelado através de analogia elétrica. Foi utilizado o método dos mínimos quadrados para encontrar os parâmetros não mensuráveis: resistência de contato entre o painel e a superfície abaixo dele (sistema térmico ou trocador de calor aletado, dependendo de qual sistema); coeficientes de transferência de calor por convecção; propriedades do MMF. A obtenção dos parâmetros é feita através da função *Sequential Least Squares Programming* (SLSQP) da biblioteca SciPy do Python, que resolve o sistema de equações diferenciais para a taxa de variação de temperatura dos componentes de forma iterativa, utilizando diversos valores para os parâmetros dentro de um intervalo específico, até obter os parâmetros que melhor ajustam as temperaturas dos componentes do modelo às experimentais, por meio do método dos mínimos quadrados. Para utilizar esta função, deve-se atribuir a ela a equação diferencial (ou sistema de equações), os limites mínimo e máximo de cada parâmetro, assim como um valor inicial para eles. Os limites foram escolhidos identificando uma faixa razoável para estes parâmetros através da literatura quando possível e estimando uma faixa coerente de valores para os demais. A TABELA 3 mostra quais parâmetros foram identificados para cada sistema, assim como os limites inferiores e superiores escolhidos. Os significados de cada um destes parâmetros será esclarecido juntamente aos modelos matemáticos de cada sistema, nas seções 4.1.1 a 4.1.4.

TABELA 3 – LISTA DE PARÂMETROS IDENTIFICADOS E A FAIXA DE VALORES ESCOLHIDA

Parâmetro	Sistemas	Limite inferior	Limite superior
$h_b$ (W/m <sup>2</sup> K)	FV, FVT, FVT+MMF, FV+MMF+T	0	12
$h_{w1}$ (W/m <sup>2</sup> K)	FVT, FVT+MMF, FV+MMF+T	20	100
$h_{w2}$ (W/m <sup>2</sup> K)	FVT, FVT+MMF, FV+MMF+T	20	100
$R''$ (m <sup>2</sup> K/W)	FVT, FVT+MMF, FV+MMF+T	0	0,2
$T_{sl}$ (°C)	FVT+MMF, FV+MMF+T	40	45
$c_{mmf1}$ (J/kgK)	FVT+MMF, FV+MMF+T	1500	3000
$c_{mmf2}$ (J/kgK)	FVT+MMF, FV+MMF+T	5000	15000
$k_{mmf1}$ (W/mK)	FVT+MMF, FV+MMF+T	0	0,5
$k_{mmf2}$ (W/mK)	FVT+MMF, FV+MMF+T	0	0,5

FONTE: O Autor (2023).

O critério de parada pode ser baseado em um limite de iterações ou uma tolerância entre iterações, de modo que se a diferença de erros entre duas iterações chegar ao valor indicado, o *script* é interrompido. Neste caso foi utilizado o critério de tolerância, com diferença de  $10^{-6}$  entre os erros de uma iteração e a subsequente. Para a análise do erro, considerou-se a diferença entre o valor experimental e o valor obtido numericamente através da métrica RMSE, que em português é chamada de raiz do erro quadrático médio. Esta métrica encontra-se na EQUAÇÃO 4.1 e consiste no somatório da diferença entre as temperaturas experimental  $T_{exp}$  e numérica  $T_{num}$  ao quadrado em cada ponto da medição, dividido pelo número de pontos. Para os sistemas com mais de um componente, as diferenças entre  $T_{exp}$  e  $T_{num}$  de cada componente são somadas para a obtenção da métrica. Neste texto, o uso do termo erro médio se refere a esta métrica.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (T_{exp,i} - T_{num,i})^2}{n}} \quad (4.1)$$

Os modelos são obtidos em relação aos dados experimentais em laboratório e então comparados com os resultados experimentais em ambiente aberto. As equações diferenciais que descrevem o sistema são resolvidas através do método de Euler de primeira ordem e do método de Runge-Kutta de quarta ordem, para passos de tempo de 10 segundos - intervalo igual ao utilizado para o armazenamento de dados experimentais. A equação de base utilizada para o modelo é a equação de conservação de energia na forma da EQUAÇÃO 4.2, sendo C a capacidade térmica (produto entre o calor específico e a massa) do componente em análise.  $E_e$  e  $E_s$  são as taxas de entrada e saída de energia do componente, discorridos na seção de cada um dos sistemas. Todos os componentes de entrada e saída, exceto a entrada de irradiância no painel fotovoltaico e a saída de energia elétrica, são representados na forma  $U \cdot A \cdot \Delta T$  - sendo U o coeficiente global de transferência de calor em  $W/(m^2 \cdot K)$ , A a área do componente em análise em  $m^2$  e  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre os componentes em análise.

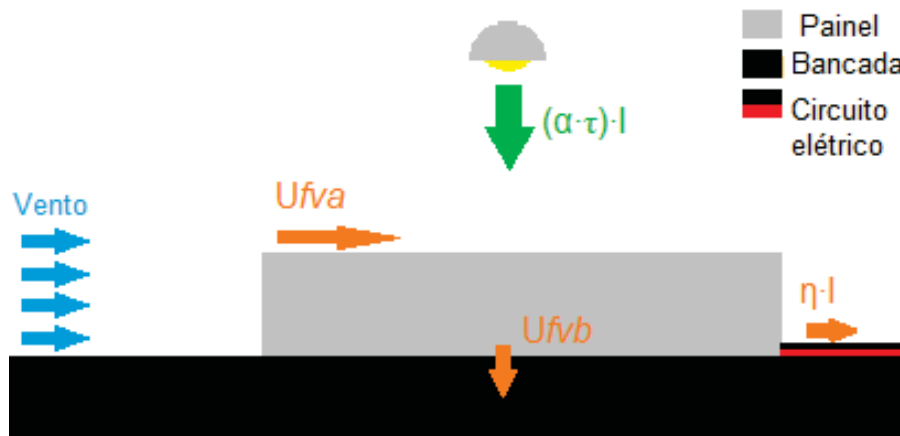
$$C \frac{dT}{dt} = E_e - E_s \quad (4.2)$$

#### 4.1.1 Sistema fotovoltaico (FV)

Para o sistema fotovoltaico simples, tendo como único componente o painel fotovoltaico, as entradas (setas verdes) e saídas (setas laranjas) de energia estão ilustradas na FIGURA 27. Tem-se como única entrada a irradiância proveniente das lâmpadas e como saídas a energia transformada em eletricidade, a energia perdida para a bancada e a dissipação para o ambiente, com convecção forçada pelos ventiladores. A entrada de energia é reduzida pela absorvidade  $\alpha$  do material e a transmitância  $\tau$

do vidro, coeficientes intrínsecos ao material que representam a fração da luz incidente que ele é capaz de absorver e a fração que o atravessa, respectivamente. Embora  $\alpha$  e  $\tau$  sejam variáveis de acordo com a frequência da luz incidente, para este sistema,  $\alpha$  e  $\tau$  são considerados constantes, com valores de 0,93 e 0,89, respectivamente, obtidos através dos valores médios para o silício e vidro com baixo teor de ferro (INCROPERA *et al.*, 1996).

FIGURA 27 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FV



FONTE: O Autor (2023).

Aplicando estas entradas e saídas em um balanço de energia, chegamos na EQUAÇÃO 4.3 onde a variação da temperatura do painel ao longo do tempo (primeiro membro da equação) é obtida pela irradiância global multiplicada pelos coeficientes  $\alpha$  e  $\tau$  e dela se subtrai a geração de energia elétrica do painel, com uma eficiência de conversão elétrica  $\eta_e$ . As saídas de energia são o segundo e terceiro termos da equação, representadas pelo produto entre a diferença de temperatura e a taxa global de transferência de calor - valor inverso das resistências do circuito térmico - entre o painel fotovoltaico e o vento e a bancada respectivamente. Estas entradas e saídas de energia são multiplicadas pela área superficial e divididas pela capacidade térmica do componente em análise - neste caso, o painel fotovoltaico.

A eficiência de conversão é de 0,1 para valores inferiores a 25°C e é reduzida para temperaturas superiores, conforme descrito na EQUAÇÃO 4.4. As temperaturas avaliadas na equação são a temperatura do painel fotovoltaico  $T_{fv}$  e a temperatura ambiente  $T_a$ , ambas em graus Celsius. A saída de energia para o ambiente é calculada pela diferença de temperatura entre o painel e o ambiente, multiplicado por um coeficiente global de transferência de calor equivalente à taxa de convecção entre o painel e o vento  $U_{fva}$  - EQUAÇÃO 4.5. Este coeficiente é obtido considerando o número de Nusselt médio - relação entre a transferência de calor por convecção e condução - em escoamento sobre placa plana com regime laminar (BEJAN, 2013). A consideração de regime laminar para o escoamento do vento é feita, pois, dados o comprimento da

placa e a viscosidade cinemática do ar a condições ambientes, a velocidade do vento deve ser de 28,7 m/s para alcançar a região de transição entre os regimes laminar e turbulento, que é atingida quando o número adimensional de Reynolds  $Re_L$  - relação entre as forças de inércia e viscosas - é superior a 500 mil.

As propriedades do ar (número de Prandtl, viscosidade cinemática, massa específica e condutividade térmica) foram obtidos através da biblioteca CANTERA do Python, considerando a temperatura ambiente e pressão atmosférica de 100 kPa para a determinação dos valores. As propriedades utilizadas para a análise são: a condutividade térmica; a massa específica ( $\rho$ ); a difusividade cinemática, também conhecida como viscosidade dinâmica ( $\nu$ ), que relaciona a tensão cisalhante aplicada sobre o fluido com a sua taxa de deformação, dividida pela massa específica do fluido; o número de Prandtl ( $Pr$ ), número adimensional que relaciona a difusividade cinemática e térmica do fluido.

O último termo da equação representa a troca de calor entre o painel e a base/bancada. Também considerando a diferença de temperatura entre o painel e o ambiente, mas com um coeficiente global  $U_{fvb}$ . Conforme indicado pela EQUAÇÃO 4.6, este coeficiente representa a condução pelo painel e a superfície de vidro (subíndices FV e g, respectivamente), com condutividades térmicas de 150 W/(m·K) para o silício e 0,86 W/(m·k) para o vidro. Utilizou-se um termo  $h_b$  para representar a troca de calor com a base, que teve seu valor obtido através do método dos mínimos quadrados.

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{fv} = [(\alpha\tau - \eta_e)I - U_{fva}(T_{fv} - T_a) - U_{fvb}(T_{fv} - T_a)] \frac{A_{fv}}{C_{fv}} \quad (4.3)$$

$$\eta = 0,1 - 0,0045(T_{fv} - 25) \quad (4.4)$$

$$U_{fva} = 0.664 \frac{k_a Pr^{1/3}}{L_p} Re_L^{0,5} \quad (4.5)$$

$$U_{fvb} = \left( \frac{1}{h_b} + \frac{L_{fv}}{k_{fv}} + \frac{L_v}{k_v} \right)^{-1} \quad (4.6)$$

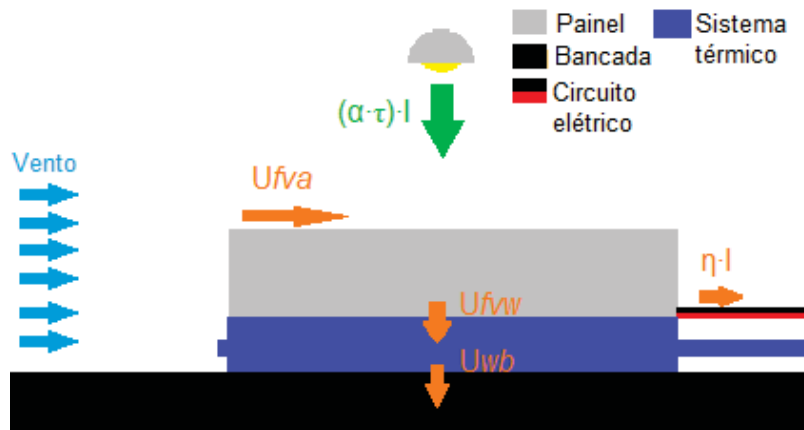
#### 4.1.2 Sistema híbrido (FVT)

Neste sistema, as entradas e saídas de calor estão indicadas na FIGURA 28, com a mesma entrada do sistema anterior, mas agora a energia do painel é extraída pelo sistema térmico para então ser dissipada pela bancada.

O circuito utilizado para esta análise se encontra na FIGURA 29. A seta verde indica a entrada de energia solar no sistema, enquanto as setas laranjas indicam a geração de energia elétrica e a dispersão de calor para o ambiente e os componentes do

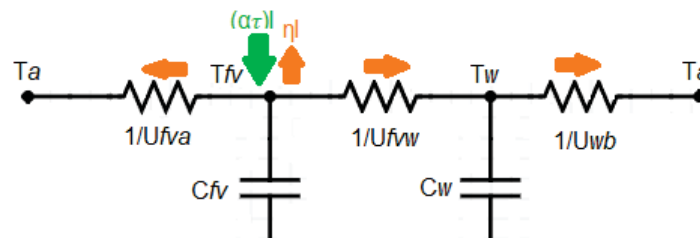
sistema de arrefecimento. Para a temperatura da água  $T_w$ , considerou-se a temperatura média entre o fluxo de entrada e o de saída. Foi considerada a massa total de água (reservatório + trocador de calor) no volume de controle e o reservatório, por estar fora da câmara de testes foi considerado como adiabático. Assim como para o ar, as propriedades da água foram obtidas através da biblioteca CANTERA, considerando uma pressão atmosférica de 100 kPa e a temperatura da água, que é variável ao longo da simulação.

FIGURA 28 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FVT



FONTE: O Autor (2023).

FIGURA 29 – CIRCUITO TÉRMICO DO SISTEMA FVT



FONTE: O Autor (2022)

O sistema de equações 4.7 representa a variação de temperatura do painel e da água ao longo do tempo. A equação para a temperatura do painel é similar à EQUAÇÃO 4.3, mas a saída de energia para a bancada é substituída pela saída para o sistema térmico. O balanço de energia para a água possui apenas uma entrada e uma saída, sendo a entrada a energia extraída do painel (primeiro termo da equação) obtida pela diferença de temperatura entre o painel e a água multiplicada pelo coeficiente global de transferência de calor  $U_{fww}$ . A saída para a bancada (segundo termo da equação) é obtida pela diferença de temperatura entre a água e o ambiente multiplicada pelo coeficiente global  $U_{wb}$ . A área superficial do sistema térmico é a mesma do painel e a

massa utilizada para o cálculo da capacidade térmica é a massa total do sistema, de 6,8 kg.

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} \Big|_{fv} = [(\alpha\tau - \eta_e)I - U_{fva}(T_{fv} - T_a) - U_{fvw}(T_{fv} - T_w)] \frac{A_{fv}}{C_{fv}} \\ \frac{dT}{dt} \Big|_w = [U_{fvw}(T_{fv} - T_w) - U_{wb}(T_w - T_a)] \frac{A_{fv}}{C_w} \end{cases} \quad (4.7)$$

As equações para  $U_{fvw}$  e  $U_{wb}$  encontram-se no sistema de equações 4.8. A primeira considera a condução pelo painel e o vidro, assim como da camada de pasta térmica (subíndice p, com condução térmica de 0,4 W/(m·k)) aplicada entre o painel e o sistema térmico e da placa de alumínio mencionada na SEÇÃO 3, utilizada para preencher o espaço onde o MMF é encaixado no sistema FV+MMF+T. Mesmo utilizando a pasta térmica entre o painel fotovoltaico e o sistema térmico, considerou-se também uma resistência térmica  $R''$  entre eles. Esta resistência foi considerada devido ao espaçamento entre estes dois componentes, causado pelos cabos de cobre do painel. O último componente  $h_w$  refere-se ao coeficiente de convecção da água. Em  $U_{wb}$  há também o coeficiente de convecção da água em relação à bancada  $h_{w2}$  e o coeficiente  $h_b$  para a troca de calor entre o sistema térmico e a base.

$$\begin{cases} U_{fvw} = \left( \frac{L_{fv}}{k_{fv}} + \frac{L_g}{k_g} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_{al}}{k_{al}} + \frac{1}{h_w} + R'' \right)^{-1} \\ U_{wb} = \left( \frac{1}{h_{w2}} + \frac{1}{h_b} \right)^{-1} \end{cases} \quad (4.8)$$

Neste caso, os parâmetros a serem determinados com o método dos mínimos quadrados foram  $h_b$ ,  $h_{w1}$ ,  $h_{w2}$  e  $R''$  sendo eles, respectivamente, a transferência de calor para a base, o coeficiente de convecção da água com o material acima e abaixo dela e a resistência de contato entre o painel e o sistema térmico.

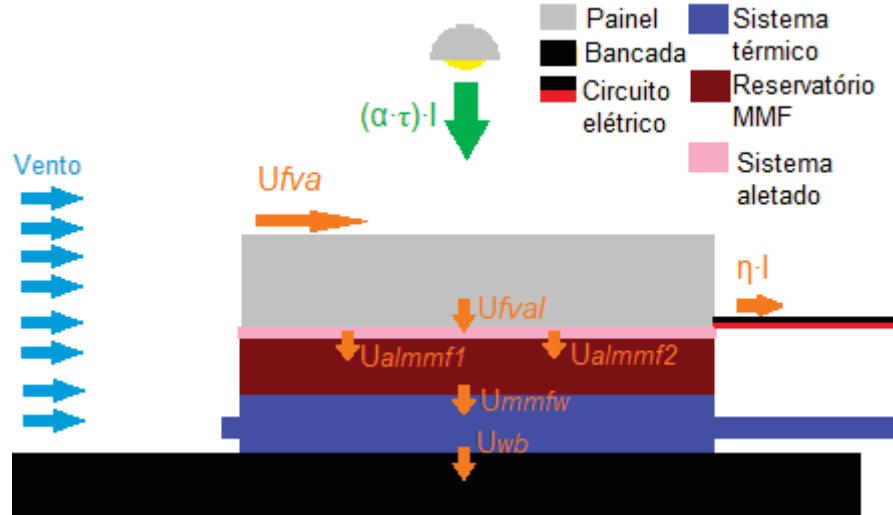
#### 4.1.3 Sistema híbrido com glicerina na camada central (FV+MMF+T)

A FIGURA 30 mostra as entradas e saídas de energia do sistema FV+MMF+T. Neste caso, além da entrada de irradiância, saída para o ambiente e para o circuito elétrico, há a interação entre o painel e o sistema aletado (rosa). A energia deste sistema é absorvida pelo MMF (bordô), que fornece energia ao sistema térmico e parte dela é dissipada para a bancada, de maneira semelhante ao sistema FVT. Portanto, a energia dissipada pelo painel é absorvida na seguinte ordem: aletas, MMF, água e bancada, cada um destes absorvendo uma parcela da energia.

O circuito utilizado para representar este sistema encontra-se na FIGURA 31. As saídas e entradas do painel se mantêm equivalentes ao sistema anterior; a base do trocador aletado recebe energia do painel e a cede ao MMF por dois trajetos (diretamente ao MMF e através das aletas, o que resulta nas resistências em paralelo

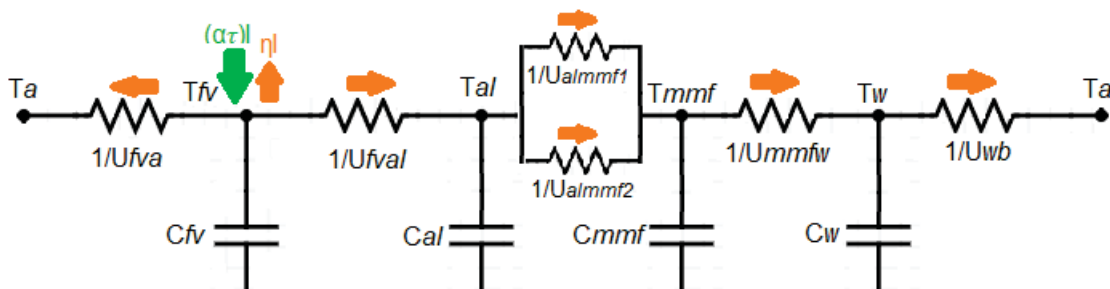
vistas na FIGURA 31); o MMF recebe a energia do trocador aletado, que é absorvida pelo sistema térmico, e dissipada para a bancada do mesmo modo do sistema FVT.

FIGURA 30 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FV+MMF+T



FONTE: O Autor (2023).

FIGURA 31 – CIRCUITO TÉRMICO DO SISTEMA FV+MMF+T



FONTE: O Autor (2022).

O sistema de equações diferenciais ordinárias 4.9 representa a variação de temperatura nos quatro componentes ao longo do tempo, notando-se como diferença para os sistemas FV e FVT a presença do termo multiplicativo entre dois coeficientes globais de transferência de calor,  $U_{almmf1}$  e  $U_{almmf2}$ , em virtude das resistências em paralelo.

A equação para o painel mantém-se similar aos sistemas anteriores, com o último termo sendo a interação entre o painel e o sistema aletado, com um coeficiente global  $U_{fval}$ . A segunda equação, referente ao sistema aletado, tem a entrada de energia proveniente do painel e a dissipação para o MMF, representada pela diferença de temperatura entre os dois componentes multiplicada pela relação entre os coeficientes globais dos dois trajetos mencionada anteriormente. A equação para o MMF é dada

pela energia extraída do trocador aletado e fornecida ao sistema térmico, conforme apresentado no segundo termo da equação, com um coeficiente global  $U_{mmfw}$ . A água recebe esta energia do MMF e a dissipa para a bancada, da mesma forma vista para o sistema FVT. As propriedades do alumínio utilizadas foram a sua condutividade térmica, de 204 W/(m·K) e o seu calor específico, de 896 J/(kg·K) (INCROPERA *et al.*, 1996), sendo a massa do sistema aletado de 2,1 kg. A área superficial de todos os sistemas foi considerada igual à do painel fotovoltaico.

O conjunto de equações 4.10 traz os coeficientes globais não utilizados nos sistemas FV e FVT.  $U_{fval}$  é composto da condução através do painel, do sistema aletado e da pasta térmica entre estes dois componentes. Também considerou-se uma resistência de contato devido à área usinada do sistema aletado para a passagem dos cabos do painel.  $U_{almmf1}$  e  $U_{almmf2}$  representam a condução da base do trocador de calor aletado até a parte central do MMF, passando pelas aletas de alumínio e pelo MMF, respectivamente.  $U_{mmfw}$  é composto da condução do centro do MMF à água e da estrutura do sistema térmico, além da convecção devido ao escoamento de água.

$$\begin{cases} \frac{dT_{fv}}{dt} = [(\alpha\tau - \eta_e)I - U_{fva}(T_{fv} - T_a) - U_{fval}(T_{fv} - T_{al})] \frac{A_{fv}}{C_{fv}} \\ \frac{dT_{al}}{dt} = \left[ U_{fval}(T_{fv} - T_{al}) - \frac{U_{almmf1} \cdot U_{almmf2}}{U_{almmf1} + U_{almmf2}} (T_{al} - T_{mmf}) \right] \frac{A_{fv}}{C_{al}} \\ \frac{dT_{mmf}}{dt} = \left[ \frac{U_{almmf1} \cdot U_{almmf2}}{U_{almmf1} + U_{almmf2}} (T_{al} - T_{mmf}) - U_{mmfw}(T_{mmf} - T_w) \right] \frac{A_{fv}}{C_{mmf}} \\ \frac{dT_w}{dt} = [U_{mmfw}(T_{mmf} - T_w) - U_{wb}(T_w - T_a)] \frac{A_{fv}}{C_w} \end{cases} \quad (4.9)$$

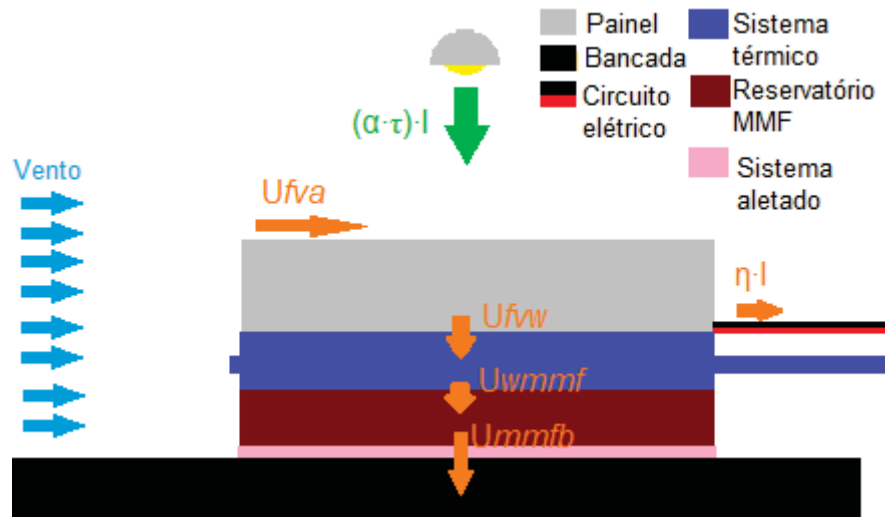
As características do MMF foram consideradas diferentes para duas faixas de temperaturas: sólido e na transição sólido+líquido. Esta mudança ocorre quando o material atinge a temperatura de transição entre sólido e líquido  $T_{sl}$ , alterando o seu calor específico e a sua condutividade térmica de  $c_{mmf1}$  para  $c_{mmf2}$  e  $k_{mmf1}$  para  $k_{mmf2}$ , respectivamente. Isto gera uma imprecisão no sistema, pois esta mudança nas propriedades térmicas do material ocorrem de forma gradativa, enquanto no modelo matemático são avaliadas de forma binária. Os parâmetros obtidos através da análise paramétrica foram, além dos obtidos para o sistema FVT, a temperatura de mudança de fase, a condutividade térmica e o calor específico do material ( $T_{sl}$ ,  $k_{mmf}$  e  $c_{mmf}$ ).

$$\begin{cases} U_{fval} = \left( \frac{L_{al1}}{k_{al}} + \frac{L_{fv}}{k_{fv}} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_v}{k_v} + R'' \right)^{-1} \\ U_{almmf1} = \frac{k_{al} \cdot A_{cel}}{L_{al2} \cdot A_{al}} \\ U_{almmf2} = \frac{k_{mmf} \cdot A_{cel}}{L_{mmf1} \cdot A_{mmf}} \\ U_{mmfw} = \left( \frac{L_{mmf2}}{k_{mmf}} + \frac{1}{h_w} + \frac{L_{al3}}{k_{al}} \right)^{-1} \end{cases} \quad (4.10)$$

#### 4.1.4 Sistema híbrido com glicerina na camada inferior (FVT+MMF)

A FIGURA 32 ilustra as entradas e saídas de energia do sistema FVT+MMF, com o sistema térmico acima do MMF. Neste caso, a energia é dissipada do painel para o sistema térmico e depois para o MMF. As demais interações continuam como visto para o sistema FVT.

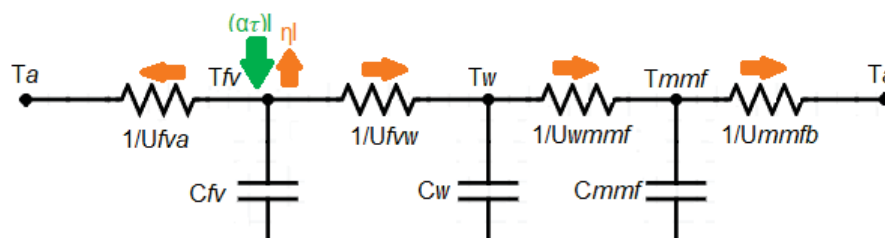
FIGURA 32 – ENTRADAS E SAÍDAS DE ENERGIA DO SISTEMA FVT+MMF



FONTE: O Autor (2023).

O circuito equivalente adquire a forma da FIGURA 33.  $U_{wmmf}$  representa a interação entre a água e o MMF, enquanto  $U_{mmfb}$  a perda de calor do MMF para a bancada. Como as aletas estão contidas na parte inferior do reservatório do MMF e portanto não colabora significativamente com a distribuição de calor dentro do reservatório, a sua temperatura não é avaliada neste sistema. Neste caso, os parâmetros obtidos numericamente são os mesmos do sistema FV+MMF+T.

FIGURA 33 – CIRCUITO TÉRMICO DO SISTEMA FVT+MMF



FONTE: O Autor (2022).

O sistema de equações 4.11 representa a taxa de variação de temperatura para os componentes do sistema, sendo equivalente ao sistema FVT com a adição de uma equação para o MMF.  $U_{wmmf}$  e  $U_{mmfb}$  representam os coeficientes globais

de transferência de calor do MMF com a água e a bancada, respectivamente. Os demais coeficientes globais permanecem como visto para o sistema FVT. O conjunto de equações 4.12 mostra os componentes destes coeficientes, sendo  $U_{wmmf}$  constituído pela transferência por convecção através da água e a condução através do MMF até chegar ao seu ponto médio.  $U_{mmfb}$  é constituído pela condução através do MMF - considerando apenas a parcela da área constituída pela glicerina, desprezando a parcela de alumínio e pelo coeficiente  $h_b$  utilizado para contabilizar a transferência de calor entre o MMF e a bancada.

$$\begin{cases} \frac{dT_{fv}}{dt} = [(\alpha\tau - \eta_e)I - U_{fva}(T_{fv} - T_a) - U_{fvw}(T_{pv} - T_w)] \frac{A_{fv}}{C_{fv}} \\ \frac{dT_w}{dt} = [U_{fvw}(T_{fv} - T_w) - U_{wmmf}(T_w - T_{mmf})] \frac{A_{fv}}{C_w} \\ \frac{dT_{mmf}}{dt} = [U_{wmmf}(T_w - T_{mmf}) - U_{mmfb}(T_{mmf} - T_a)] \frac{A_{fv}}{C_{mmf}} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} U_{wmmf} = \left( \frac{1}{h_{w2}} + \frac{L_{mmf}}{k_{mmf}} \right)^{-1} \\ U_{mmfb} = \left( \frac{L_{mmf}}{k_{mmf}} \frac{A_{cel}}{A_{mmf}} + \frac{1}{h_b} \right)^{-1} \end{cases} \quad (4.12)$$

## 4.2 USO DOS MODELOS EM SIMULAÇÕES

Será avaliado o impacto de diversos fatores nos modelos. De modo a observar a influência do fator de forma mais isolada, será analisado o sistema com menor número de componentes. Deste modo, a influência da variação da temperatura ambiente e da velocidade do vento serão avaliadas para o sistema FV, enquanto a variação de temperatura e quantidade de água no reservatório serão avaliadas no sistema FVT.

No sistema FV+MMF+T será feita a avaliação com os parâmetros do MMF RT42 no lugar da glicerina. O fabricante disponibiliza a condutividade térmica do material de 0,2 W/(m·K). A sua fusão não ocorre em uma temperatura única, mas ao longo de uma faixa e, conseqüentemente, o fabricante não forneceu valores isolados para calor latente e sensível, mas informou que este material exige 165 kJ de energia para passar dos 35 °C aos 50 °C (RUBITHERM, 2020). A sua massa específica é de 880 kg/m<sup>3</sup> no estado sólido e 760 kg/m<sup>3</sup> para o estado líquido. Por conta da faixa de temperatura cedida pelo fabricante, a simulação foi efetuada com a temperatura inicial dos componentes e temperatura ambiente de 35 °C.

Conforme visto na seção 2.5, a adição da nanopartícula de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> traz ao RT42 um aumento de condutividade térmica ao passo da redução da capacidade de armazenar calor. Para o caso com 5% de peso da nanopartícula, o calor latente+específico reduz-se para 9050 kJ/(kg·K), enquanto a condutividade térmica é variável, sendo ela descrita pela equação 4.13 e as variáveis  $\gamma$ ,  $f(T)$  e  $\xi$ , pelas equações 4.14, 4.15 e

4.16 (BAYAT *et al.*, 2018). As variáveis utilizadas nestas equações encontram-se na TABELA 4, que apresenta as características da nanopartícula necessárias para o uso das equações. A massa específica e o calor latente+específico são resultados de uma média ponderada entre o MMF e o  $Al_2O_3$ . Será feita a simulação do modelo com RT42, antes validando o modelo com os resultados originais (BAIS *et al.*, 2022). A simulação é feita para diversas percentagens de nanopartícula e a mesma simulação será feita utilizando a glicerina, alterando as características do RT42 ( $\rho$ ;  $c$ ;  $k$ ) para aquelas da glicerina encontradas na parametrização do modelo FV+MMF+T

TABELA 4 – PARÂMETROS DA NANOPARTÍCULA DE  $Al_2O_3$

Variável	Significado	Valor
$d_{np}$ [nm]	Diâmetro médio da nanopartícula	53
$k_{np}$ [W/(m·K)]	Condutividade térmica da nanopartícula	36
$\phi$	fração mássica de RT42	Variável
$K_b$ [J/K]	Constante de Boltzmann	$1,381e^{-23}$
$T_o$ [K]	Temperatura de referência	273

FONTE: Adaptado de Bais *et al.* (2022).

$$k = k_{mmf} \frac{k_{np} + 2k_{mmf} - 2(k_{mmf} - k_{np})\phi}{k_{np} + 2k_{mmf} + (k_{mmf} - k_{np})\phi} + 5e^4 \gamma \xi \rho_{mmf} C_{mmf} \phi \sqrt{\frac{K_b T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T) \quad (4.13)$$

$$\gamma = 8,4407(100\phi)^{-1,073} \quad (4.14)$$

$$f(T) = (3,917e^{-3} + 2,822e^{-2}\phi) \frac{T}{T_o} - 3,067e^{-2}\phi - 3,911e^{-3} \quad (4.15)$$

$$\xi = \begin{cases} 0 & \text{para } T < 311K \\ \frac{T-311}{4} & \text{para } 311 \leq T \leq 315K \\ 1 & \text{para } T > 315K \end{cases} \quad (4.16)$$

Analisou-se também o desempenho dos sistemas em Las Vegas, no deserto de Nevada nos Estados Unidos, devido à boa disponibilidade dos dados meteorológicos e possibilidade de estudar o sistema em condições extremas - com temperatura ambiente que ultrapassa os 40°C no verão. Para tal, fez-se uso dos dados fornecidos pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável americano ( *National Renewable Energy Laboratory* - NREL) (STOFFEL; ANDREAS, 2006). O sistema foi analisado ao longo de todo o ano de 2014, mas para a geração dos gráficos escolheu-se uma semana com quantidade mínima de nuvens no verão, primavera e inverno. Optou-se

por não representar o outono nestes gráficos, devido à similaridade com a primavera. Os dados externos necessários para efetuar a simulação são a irradiância global, a velocidade do vento e a temperatura ambiente. Embora o modelo matemático não leve em consideração a presença de chuva, por se tratar de um clima desértico a sua influência é pequena durante o ano.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados, primeiramente comentando os resultados obtidos para cada sistema em laboratório, identificando parâmetros para os modelos matemáticos obtidos e utilizando-os para avaliar o sistema em diversas configurações. Além disto, o sistema foi avaliado experimentalmente em ambiente aberto na cidade de Curitiba - Paraná, aferindo o ganho de energia elétrica através da variação de temperatura do painel e o armazenamento de energia térmica no reservatório de água ao utilizar o sistema de arrefecimento em suas diferentes disposições.

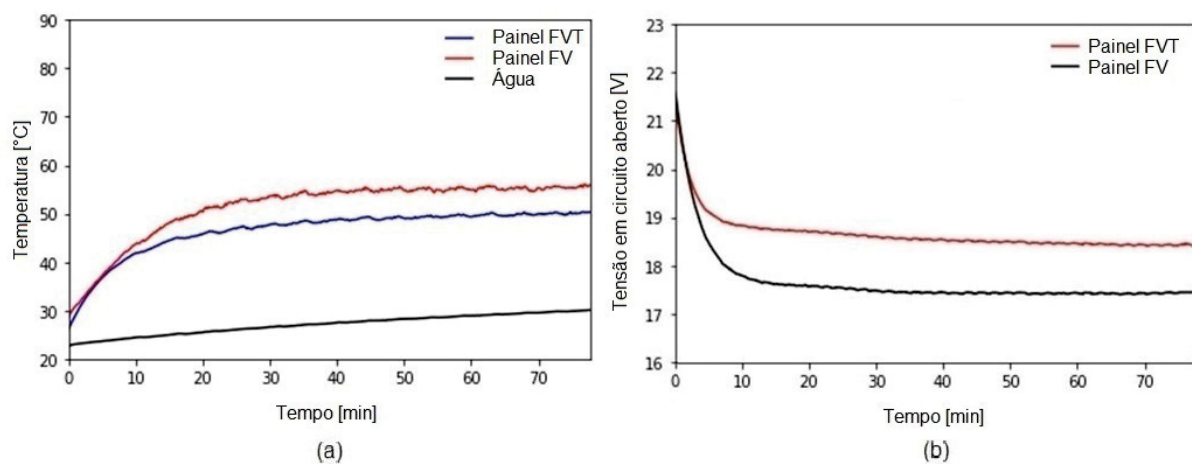
### 5.1 COMPARAÇÃO DAS DIFERENTES DISPOSIÇÕES DO SISTEMA

Os experimentos em laboratório para os sistemas FVT, FV+MMF+T e FVT+MMF foram efetuados conforme descrito no capítulo 3. Como os resultados são feitos em comparação com um sistema de referência, fez-se a aquisição da tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) ao invés de obter a tensão no ponto de máxima potência, assim como é feito para a obtenção da temperatura NOCT.

As temperaturas dos componentes e as tensões em circuito aberto dos painéis com arrefecimento e de referência, indicados pelos subíndices com o nome do componente ou ref, respectivamente, encontram-se nas FIGURAS 34 a 36. Nota-se que no sistema FV+MMF+T há uma redução significativa de temperatura enquanto as aletas de alumínio absorvem o calor do painel e o MMF ainda encontra-se no estado sólido, mas, à medida que a temperatura das aletas se aproxima do painel e após o MMF sofrer a fusão, este ganho é significativamente menor. Nota-se também que neste sistema a temperatura da água não se altera de forma significativa ao longo do teste, já que o MMF absorve grande parte da energia dissipada pelo painel e apenas parte dela é cedida à água - restringindo a geração de energia térmica. Por outro lado, nos sistemas onde o painel encontra-se em contato direto com a água, a redução de temperatura não é tão acentuada nos minutos iniciais, mas torna-se consideravelmente maior quando o sistema se encaminha para o regime permanente, pois a temperatura da água (componente em contato direto com o painel) se mantém consideravelmente menor que a das aletas, permitindo uma troca de calor mais eficiente por um período prolongado se comparado ao sistema FV+MMF+T. Isso faz com que no caso do sistema FVT+MMF, a glicerina não sofra a fusão, pois para tal a temperatura da água deveria ultrapassar consideravelmente os 40 °C ao longo do experimento, o que acaba não ocorrendo devido à grande capacidade térmica do fluido. Para que ela ocorra deve-se, portanto, aumentar a temperatura ambiente para valores próximos de 40 °C. Todavia, os objetivos desta análise em laboratório são a comparação entre os sistemas fotovol-

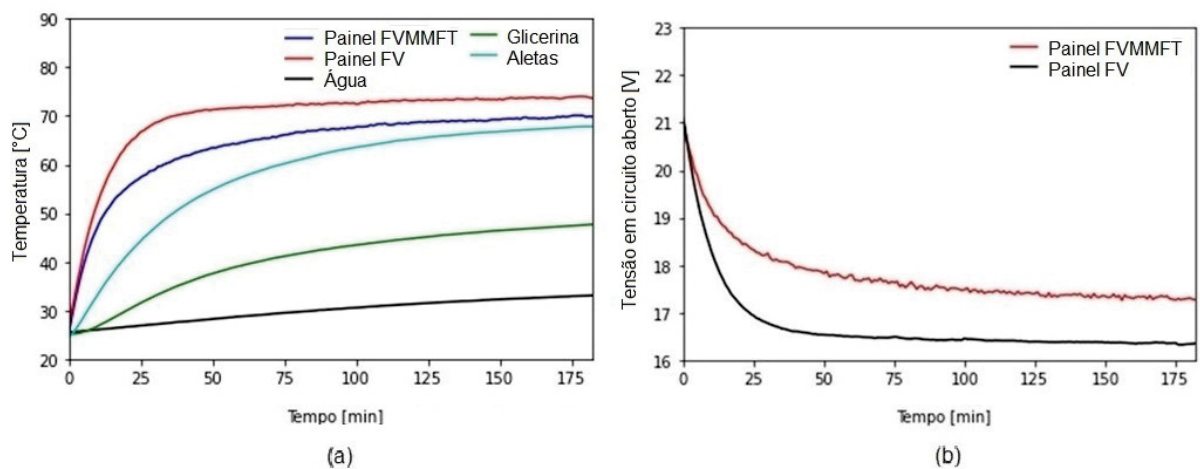
taicos com e sem arrefecimento - que não é comprometida pela ausência de mudança de fase - e a obtenção de parâmetros para o modelo matemático e, conforme será visto na seção 5.2, a análise do sistema FVT+MMF mostra-se satisfatória ao utilizar os parâmetros obtidos para o sistema FV+MMF+T. No caso do sistema FVT+MMF, nota-se que a temperatura do MMF se aproxima da temperatura da água na parte final do experimento. Isso se deve à transferência de calor ao MMF através das aletas, que se aquecem a partir da estrutura metálica do sistema e possuem temperatura similar à da água.

FIGURA 34 – RESULTADOS PARA O SISTEMA FVT. A) TEMPERATURA DOS COMPONENTES. B) TENSÃO EM ABERTO.



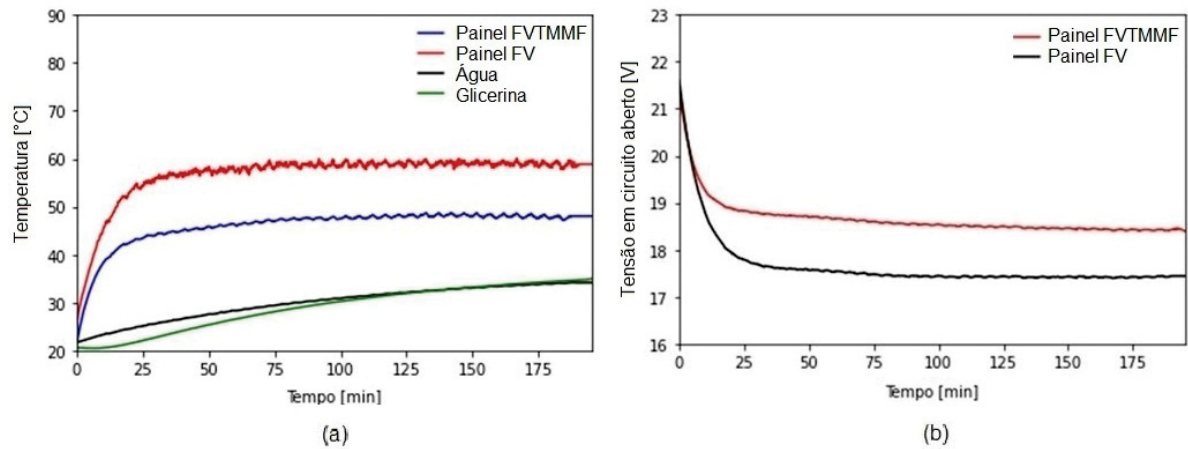
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 35 – RESULTADOS PARA O SISTEMA FV+MMF+T. A) TEMPERATURA DOS COMPONENTES. B) TENSÃO EM ABERTO.



FONTE: O Autor (2022).

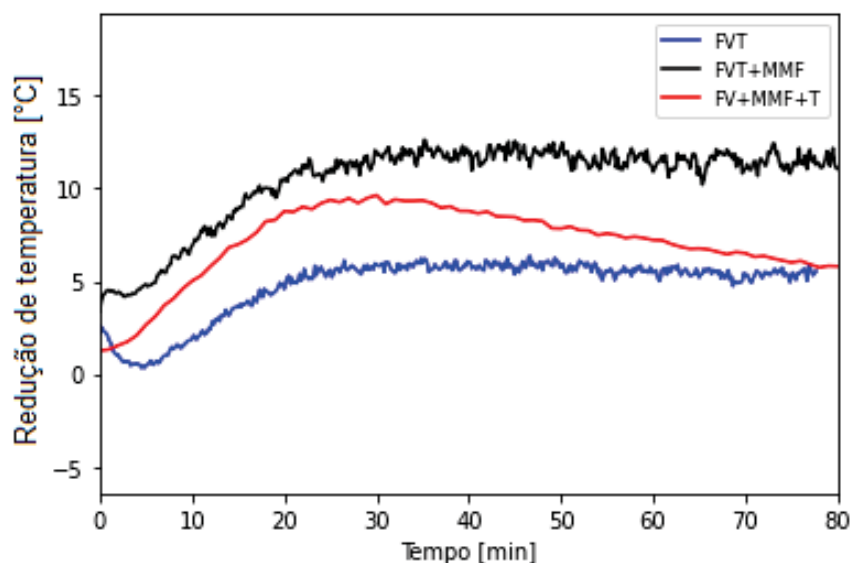
FIGURA 36 – RESULTADOS PARA O SISTEMA FVT+MMF. A) TEMPERATURA DOS COMPONENTES. B) TENSÃO EM ABERTO.



FONTE: O Autor (2022).

A FIGURA 37 mostra a redução de temperatura do painel dos três sistemas com arrefecimento em relação ao de referência. Comparando o sistema FVT com o FVT+MMF, observa-se um benefício considerável ao incorporar o MMF ao sistema, aumentando a diferença de temperatura tanto no regime transiente quanto no permanente, também aumentando o tempo que o sistema leva para atingir o regime permanente, amenizando o maior problema observado no sistema FVT. A medição do sistema FVT foi mais curta devido à velocidade que o sistema atingiu o regime permanente. A diferença de temperatura entre os painéis com e sem arrefecimento no estado inicial deve-se à água encontrar-se inicialmente em uma temperatura inferior à ambiente.

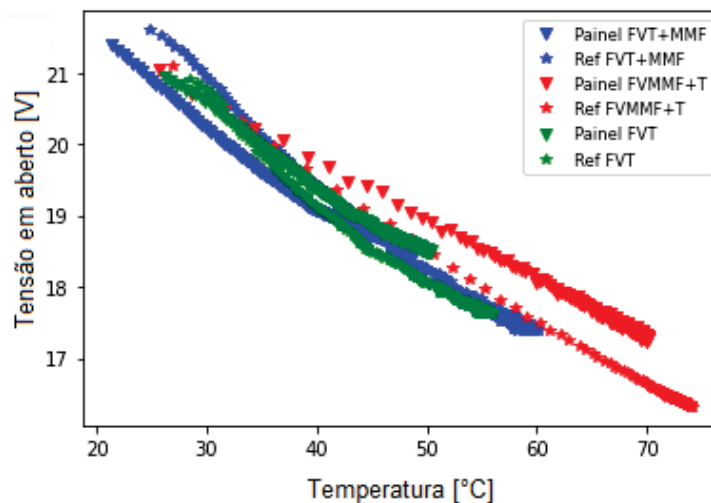
FIGURA 37 – REDUÇÃO PERCENTUAL DA TEMPERATURA EM RELAÇÃO AO PAINEL DE REFERENCIA PARA AS 3 CONFIGURAÇÕES



FONTE: O Autor (2022).

Os valores de tensão em circuito aberto dos sistemas encontram-se ao lado dos de temperatura e mostram um espelhamento entre o aumento de temperatura e a redução de tensão. A FIGURA 38 mostra a relação entre a temperatura e tensão em circuito aberto dos painéis com e sem arrefecimento para os três sistemas. Esta relação possui um comportamento linear e encontrou-se uma equação da reta da forma  $y=ax+b$  através de regressão linear para cada um dos painéis. No caso dos sistemas FVT e FVT+MMF, esta variação de tensão em relação ao painel de referência é inferior ao sistema FV+MMF+T. A TABELA 5 apresenta os coeficientes a e b para cada caso e o erro médio, obtido através da raiz do erro quadrático médio. Para todos os casos o erro foi inferior a 0,1 V e o maior erro foi do painel de referência do sistema FVT, de 0,091 V ou 0,4%. O coeficiente linear variou de 23 a 23,6V, enquanto o coeficiente angular de -0,111 a -0,087 V/K. O coeficiente angular mostrou-se mais baixo no painel com arrefecimento em todos os casos, mas foi particularmente baixo para o sistema FV+MMF+T, 0,01 V/°C inferior aos outros, em módulo. A queda média de tensão em aberto dos painéis de aproximadamente 0,1 V/K representa 0,47% a cada K (tendo como referência 21 V a 25°C), condizente com a queda de potência prevista de 0,45% .

FIGURA 38 – RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E TENSÃO EM CIRCUITO ABERTO PARA OS 3 PAINÉIS ARREFECIDOS E SEUS PAINÉIS DE REFERÊNCIA



FONTE: O Autor (2022).

TABELA 5 – COEFICIENTES PARA TENSÃO EM CIRCUITO ABERTO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

	a (V/K)	b (V)	Erro médio (V)
FVT	-0,0975	23,34	0,06
FVT (referência)	-0,1087	23,608	0,094
FVT+MMF	-0,095	23,026	0,061
FVT+MMF (referência)	-0,111	23,94	0,081
FV+MMF+T	-0,083	23,197	0,067
FV+MMF+T (referência)	-0,095	23,367	0,050

FONTE: O Autor (2023).

Os resultados discutidos nesta seção encontram-se na TABELA 6, com RP denotando valores no regime permanente. A energia total recebida pelo sistema em uma hora é calculada pela irradiância integrada ao longo do tempo (pela regra do trapézio) e multiplicada pela área do painel, sendo a energia térmica 43,1%, 26% e 40,0% para os sistemas FVT, FV+MMF+T e FVT+MMF, respectivamente. O valor para o segundo sistema é mais baixo porque o MMF é aquecido antes da água, mantendo a temperatura da água reduzida por um período prolongado. Nota-se que a água do sistema sem MMF atingiu temperaturas superiores comparado à água do sistema FVT+MMF, o que é esperado, já que o MMF auxilia o arrefecimento da água. Vale ressaltar que a temperatura da água para os sistemas FVT e FVT+MMF estava 4 °C abaixo da temperatura ambiente, então os resultados obtidos são mais favoráveis do que se a água estivesse inicialmente na temperatura ambiente. Ignorando este período inicial do experimento, estes valores caem para 34,5% e 32,0% para os sistemas FVT e FVT+MMF - continuando consideravelmente maiores que o sistema FVT+MMF. Como esperado, a diferença de tensão em aberto comparado ao sistema de referência foi menor no sistema FVT que no FVT+MMF, dada a maior redução de temperatura do segundo. O resultado para o sistema FV+MMF+T foi melhor do que o esperado pela diferença de temperatura, mas é explicado pelo menor coeficiente angular entre a sua tensão em aberto e temperatura comparado aos outros painéis.

TABELA 6 – DIFERENÇA DOS SISTEMAS COM ARREFECIMENTO EM RELAÇÃO AO SISTEMA ORIGINAL

	FVT	FV+MMF+T	FVT+MMF
Redução de temperatura no RP (°C)	5,53	3,87	10,83
Redução máxima de temperatura (°C)	6,35	9,63	12,61
Acréscimo de tensão em aberto no RP (%)	4,89	4,38	5,71
Energia térmica gerada após 1h (kJ)	155,2	103,5	168,0

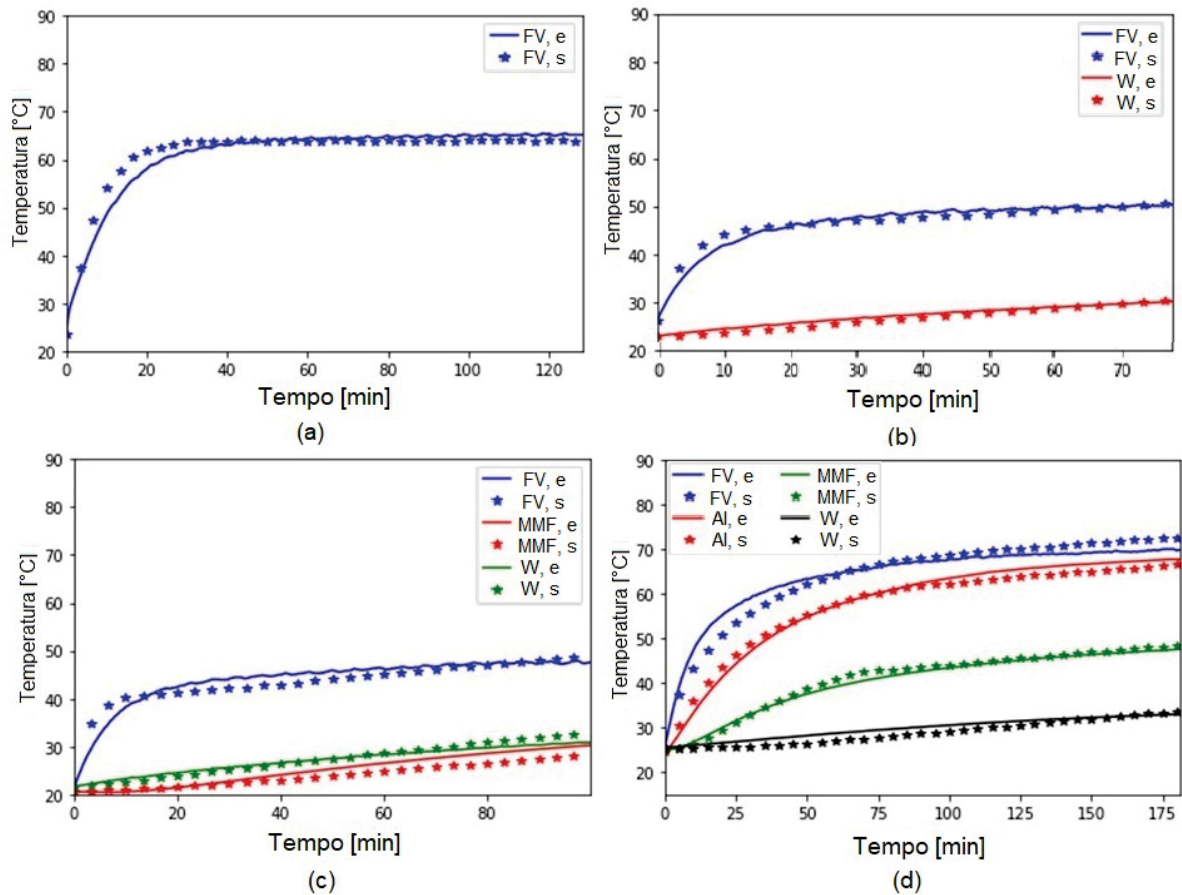
FONTE: O Autor (2022).

## 5.2 VALIDAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Os gráficos da FIGURA 39 comparam os resultados obtidos através da modelagem matemática utilizando o método de Euler com os resultados em laboratório. O erro médio para cada um dos modelos ficou entre 1,4 K e 2 K, conforme visto na TABELA 7. Para os modelos FV, FVT e FV+T+MMF foram encontrados valores diversos para os parâmetros, listados na mesma tabela. Para o sistema FVT+MMF foram utilizados os mesmos parâmetros encontrados para o FV+MMF+T e ele apresentou um erro médio inferior ao do sistema FV+MMF+T, devido aos primeiros 20 minutos da simulação do sistema FV+MMF+T, na qual a variação de temperatura é mais brusca e a temperatura simulada se mantém substancialmente abaixo da experimental, enquanto

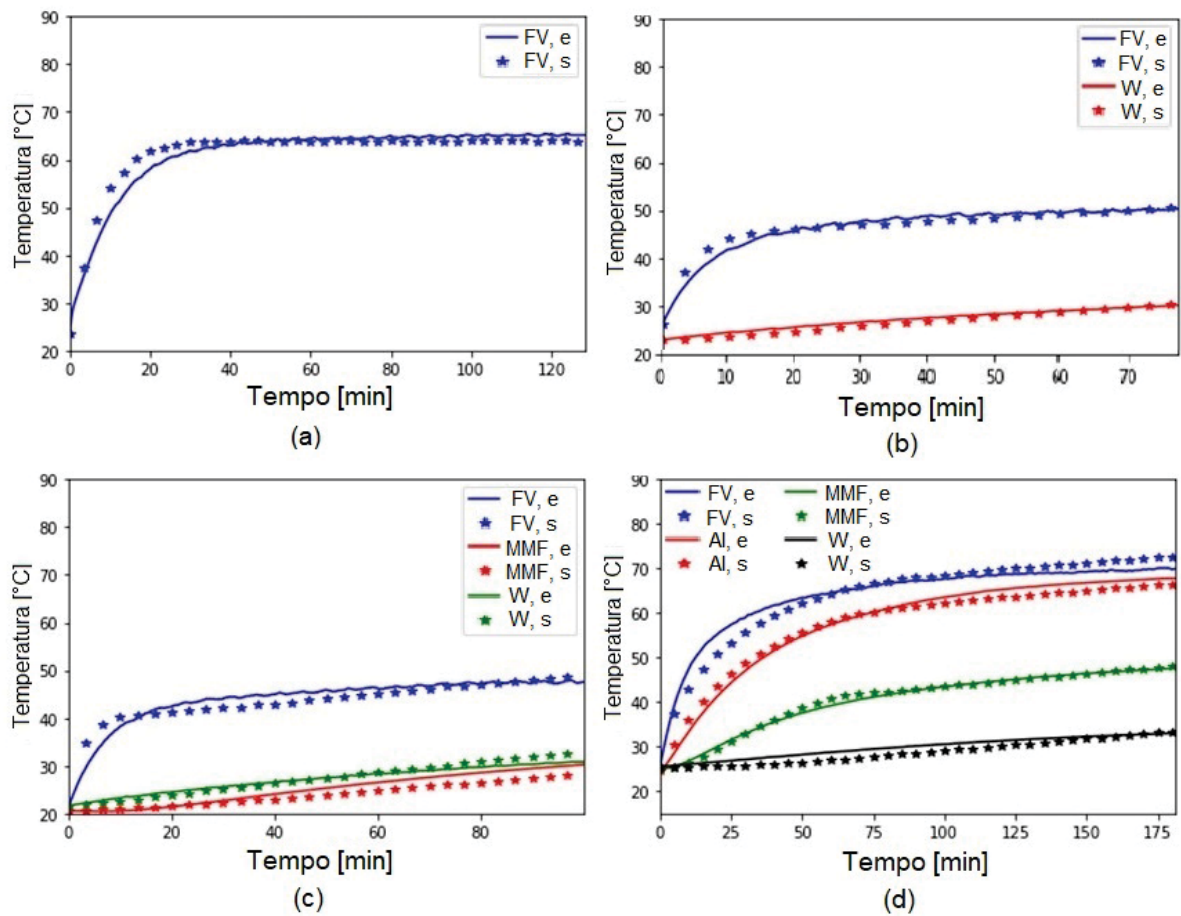
que no sistema FVT+MMF este período de maior discrepância dura 10 minutos. Esta mesma comparação foi feita utilizando o método de Runge Kutta de 4ª ordem (RK4) para resolver o sistema de equações diferenciais, com os seus resultados mostrados na FIGURA 40. Nota-se que os resultados são similares aos obtidos com o método de Euler, dada a suavidade das curvas de temperatura devido às condições estáveis do teste (temperatura ambiente, velocidade do vento e irradiâncias mantidas constantes). Contudo, para testes em ambiente aberto, onde as condições variam bruscamente, este método pode proporcionar simulações mais coerentes e será o método utilizado durante as simulações. Comparando os dois métodos, o RK4 mostra-se levemente superior para quatro sistemas, sendo a maior redução de erro médio no sistema FV+MMF+T de 0,12 K, com uma melhora principalmente na seção inicial, onde a temperatura do painel fotovoltaico aumenta de forma mais brusca. Nota-se que, embora seja o modelo mais simples, o modelo FV apresentou o maior erro médio. Isto é uma consequência da análise paramétrica, que adequa a curva simulada à experimental mais facilmente quanto maior o número de parâmetros.

FIGURA 39 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS (EULER). A) FV. B) FVT. C) FVT+MMF. D) FV+MMF+T.



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 40 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS (RK 4). A) FV. B) FVT. C) FVT+MMF. D) FV+MMF+T.



FONTE: O Autor (2023).

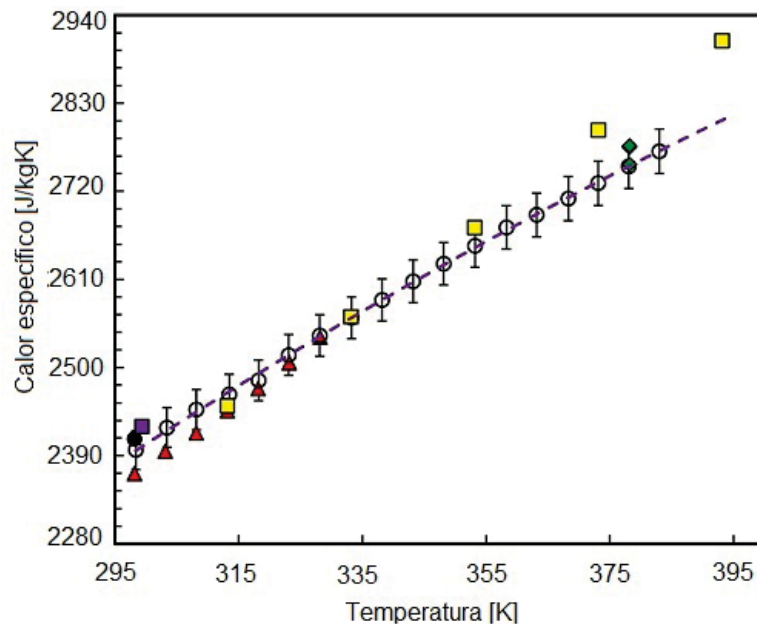
TABELA 7 – PARÂMETROS OBTIDOS ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO

Dimensão	FV	FVT	FV+MMF+T	FVT+MMF
$h_b$ (W/m <sup>2</sup> K)	16,537	12	0	0
$h_{w1}$ (W/m <sup>2</sup> K)	-	76,721	100	100
$h_{w2}$ (W/m <sup>2</sup> K)	-	100	96,9	96,9
$R''$ (m <sup>2</sup> K/W)	-	0,01477	0,0076	0,0076
$T_{sl}$ (°C)	-	-	42,26	42,26
$c_{mmf1}$ (J/kgK)	-	-	2477,9	2477,9
$c_{mmf2}$ (J/kgK)	-	-	10307,5	10307,5
$k_{mmf1}$ (W/mK)	-	-	0,309	0,309
$k_{mmf2}$ (W/mK)	-	-	0,314	0,314
Erro médio Euler (K)	2,02	0,99	1,61	1,50
Erro médio RK4 (K)	1,99	0,98	1,49	1,48

FONTE: O Autor (2022).

Os parâmetros possuem valores coerentes, estando na ordem de grandeza prevista. A condutividade térmica da glicerina encontrou-se em 0,3 W/mK, valor próximo ao dos esteres da TABELA 1. A temperatura de mudança de fase ficou dentro do valor esperado (40-45 °C). O calor específico da glicerina durante a mudança de fase ( $c_{mmf2}$ ) é elevado, porém está embutido nele, além da energia necessária para elevar a temperatura do material, a energia para a mudança de fase, enquanto  $c_{mmf1}$  é exclusivamente o calor sensível da fase sólida e apresenta um valor significativamente menor. A resistência de contato do sistema FVT é superior à do sistema FVT+MMF, o que é esperado, dada a maior área sem contato direto com o sistema de arrefecimento ao redor dos cabos. O modelo para o material de mudança de fase contém apenas o comportamento da fase sólida e da sólida+líquida, não alcançando o estado puramente líquido durante os experimentos. Para os estudos em Curitiba, isto não é um grande problema, pois as condições até no verão são amenas. Contudo, para simulações em condições extremas o MMF atinge a fase líquida durante a operação. Conforme visto na FIGURA 17, o material atinge completamente a fase líquida aproximadamente 10 °C acima do início da mudança de fase. A FIGURA 41 mostra a alteração do calor específico da glicerina pura para uma faixa de 295 a 395 K, com as diferentes formas geométricas representando medições distintas. O valor para 50 °C é de aproximadamente 2500 J/(kg·K), valor similar ao obtido para a fase sólida através da análise paramétrica. Portanto, nos modelos matemáticos serão utilizados os valores de  $c_{mmf1}$  e  $k_{mmf2}$  para temperaturas superiores aos 52 °C.

FIGURA 41 – CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE DA GLICERINA PURA NA FASE LÍQUIDA

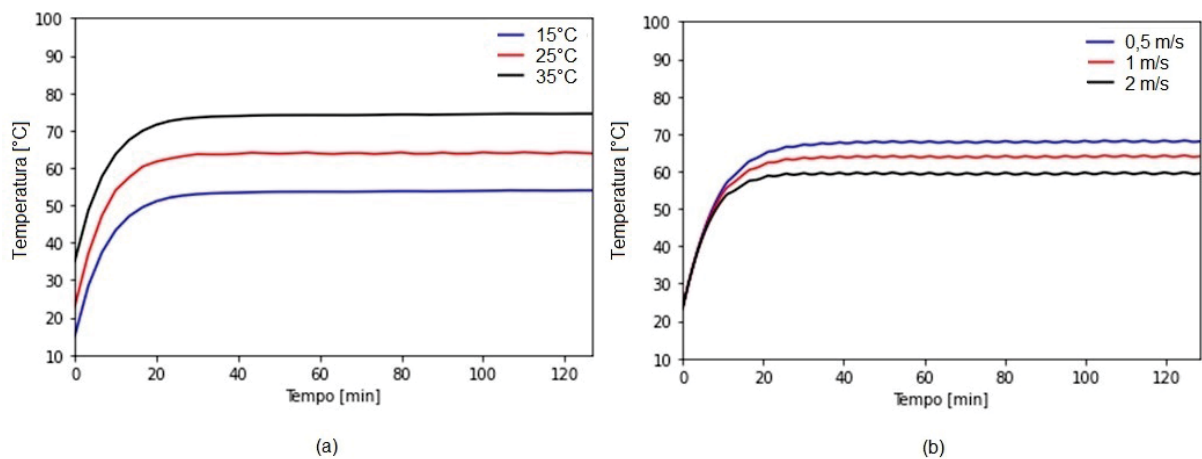


FONTE: Adaptado de Ahmadi *et al.* (2023).

### 5.3 ANÁLISE DOS MODELOS MATEMÁTICOS EM CONDIÇÕES DIVERSAS

Nesta seção foram alterados os parâmetros dos sistemas fotovoltaicos de modo a visualizar o impacto destas variáveis no desempenho. A FIGURA 42 mostra o quanto a temperatura ambiente e a velocidade do vento alteram a temperatura do painel sistema sem arrefecimento. Alterando a temperatura ambiente em  $\pm 10$  K a temperatura do painel alterou-se na mesma proporção ao longo do experimento. Tanto ao dobrar quanto ao reduzir pela metade a velocidade do vento, a temperatura do painel alterou-se em aproximadamente 4 K.

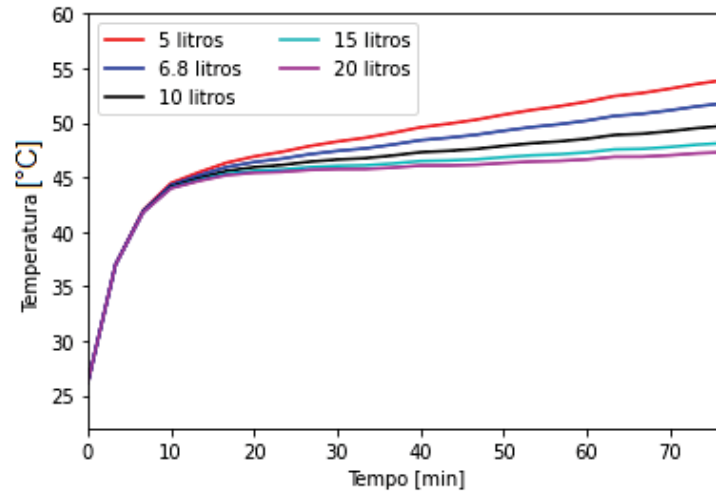
FIGURA 42 – MUDANÇA DA TEMPERATURA DO PAINEL FV AO ALTERAR AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO. A) VARIAÇÃO DE TEMPERATURA AMBIENTE. B) VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO.



FONTE: O Autor (2022).

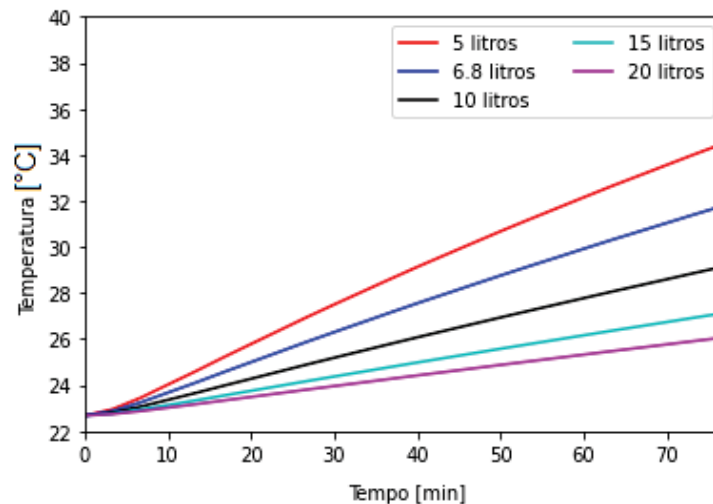
A FIGURA 43 mostra o efeito de alterar a quantidade de água do reservatório no sistema FVT, sendo 6,8 litros o valor original. Ao reduzir a quantidade para 5 litros, a água aumenta a sua temperatura rapidamente, o que reduz a sua capacidade de extrair calor do painel. Ao aumentar a quantidade da água, o benefício é grande ao aumentar até os 10 litros, reduzindo a temperatura do painel no final da simulação em 3 K. A partir dos 10 litros, o benefício do aumento do volume torna-se menos significativo, sendo a diferença entre 15 e 20 litros inferior a 1 K. Ao elevar ainda mais o volume de água no reservatório, chegamos em um ponto que a quantidade de água pode ser considerada efetivamente infinita, pois a água passa a possuir capacidade térmica suficiente para manter a sua temperatura próxima ao valor inicial ao longo do experimento. Como visto na FIGURA 44, à medida que o volume e, conseqüentemente, a massa de água aumenta, sua temperatura aumenta mais lentamente, chegando a valores menores no final do experimento. Apesar desta redução na temperatura final da água, o aumento de massa faz com que o acúmulo de energia térmica seja superior, sendo o valor para o reservatório de 20 litros 12,3% superior ao valor para 5 litros.

FIGURA 43 – TEMPERATURA DO PAINEL DO SISTEMA FVT PARA DIVERSOS VOLUMES DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO.



FONTE: O Autor (2023).

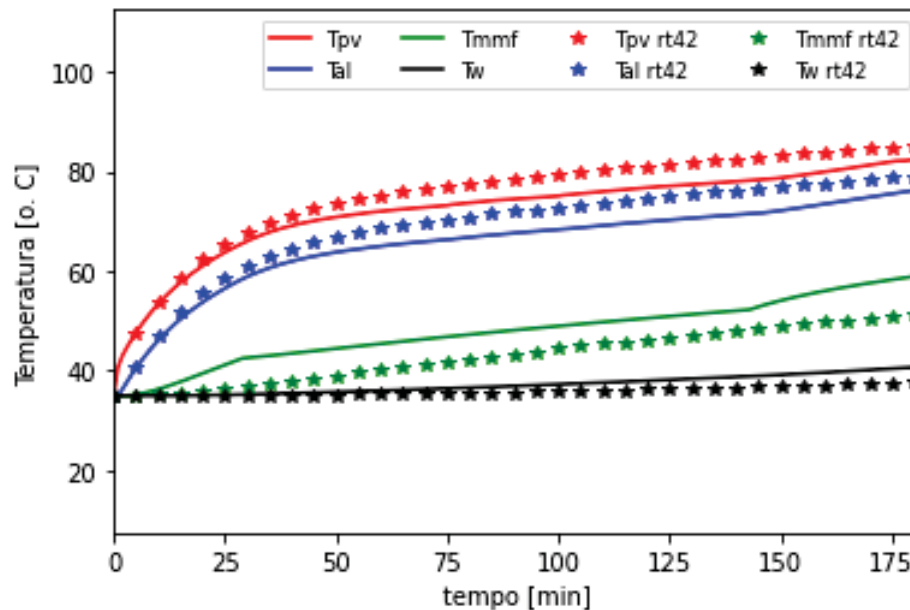
FIGURA 44 – TEMPERATURA MÉDIA DA ÁGUA DO SISTEMA FVT PARA DIVERSOS VOLUMES DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO.



FONTE: O Autor (2023).

Comparando o RT42 com a glicerina encontrou-se que o calor específico do RT42 é superior ao da glicerina, enquanto a sua condutividade térmica é inferior. Isto faz com que, embora a temperatura do MMF permaneça mais baixa ao utilizar a cera, a sua capacidade de extrair calor do painel é inferior. Por conta desta menor condutividade, conforme visto na FIGURA 45, a temperatura do painel do sistema FVT+MMF com RT-42 (em pontilhado) é ligeiramente superior enquanto a glicerina não está completamente na forma líquida, mesmo com um MMF com temperatura bastante inferior. Eventualmente, ambos os sistemas atingem uma temperatura quase idêntica e, conforme a glicerina muda de fase, o sistema com RT42 tende a adquirir uma temperatura mais baixa.

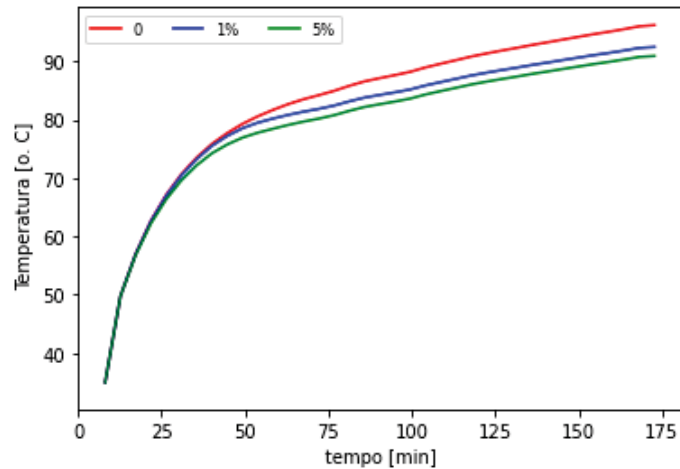
FIGURA 45 – TEMPERATURA DOS COMPONENTES DO SISTEMA FV+MMF+T COM GLICERINA E RT42 COMO MMF.



FONTE: O Autor (2022).

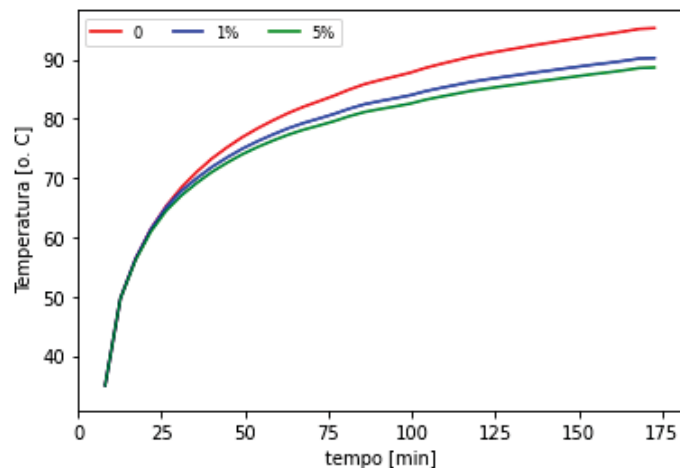
A temperatura do experimento para o sistema sem nanopartícula, com 1% e 5% encontram-se na FIGURA 46. Antes de fazer a simulação com as nanopartículas no sistema fotovoltaico, validou-se o sistema de equações, obtendo o mesmo resultado do artigo original, encontrado na FIGURA 16. Nota-se que não há um benefício significativo até atingir temperaturas elevadas, havendo o mesmo balanço entre a redução de calor específico e o aumento de condutividade térmica encontrado em artigo na seção 2.3. Todavia, ao atingir elevadas temperaturas (quando o painel ultrapassa os 70°C), o aumento de condutividade térmica faz com que o sistema apresente uma melhora considerável ao utilizar a nanopartícula, com uma redução de temperatura de 4 e 5K para o uso de 1% e 5% de nanopartículas, mostrando um rendimento decrescente ao aumentar a percentagem. Nota-se portanto utilidade da adição deste material no MMF em lugares de clima quente, não sendo benéfico em locais onde a temperatura dos painéis não atinja valores extremos. A mesma análise foi efetuada para o sistema utilizando a glicerina como MMF, com a temperatura do painel ao variar a percentagem mássica da nanopartícula ilustrada na FIGURA 47. Assim como para o RT42, houve uma melhora na parte final do experimento, reduzindo a temperatura em 5 e 7K, para frações de 1 e 5%. O resultado foi melhor se comparado ao RT42, pois, como a glicerina possui uma capacidade térmica inferior à parafina, a redução desta capacidade ao utilizar a nanopartícula é proporcionalmente menor.

FIGURA 46 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO PAINEL DO SISTEMA FV+MMF+T COM RT42 E DIFERENTES PERCENTAGENS DE NANOPARTÍCULA



FONTE: O Autor (2023).

FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO PAINEL DO SISTEMA FV+MMF+T COM GLICERINA E DIFERENTES PERCENTAGENS DE NANOPARTÍCULA



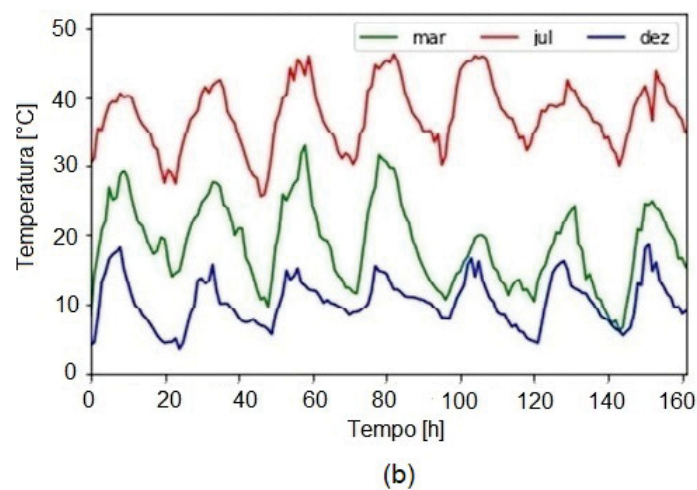
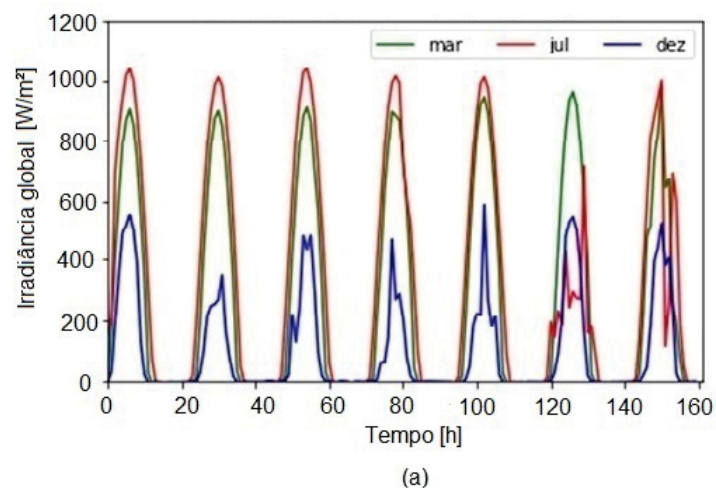
FONTE: O Autor (2023).

#### 5.4 ANÁLISE DO SISTEMA EM CLIMA DESÉRTICO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO

A simulação foi efetuada por uma semana em cada estação, das 6h do primeiro dia às 23:59h do sétimo, nos meses de dezembro, março e julho para o inverno, primavera e verão, respectivamente. A FIGURA 48 mostra o perfil de irradiância global e temperatura ambiente ao longo da semana para cada estação. A irradiância no inverno é consideravelmente menor que nas outras estações, que atingem um pico diário de aproximadamente  $900 \text{ Wm}^{-2}$  na primavera e de  $1050 \text{ Wm}^{-2}$  no verão. A duração do dia durante o verão é aproximadamente 1:30h superior à primavera, permitindo a geração de energia elétrica e térmica por um período adicional. Pelo formato da curva de irradiância, é possível observar os dias ensolarados, onde o comportamento torna-se

quase parabólico e os picos são elevados, enquanto para os dias nublados (sexto dia durante o verão e sétimo para ambos verão e primavera) há uma grande variação no comportamento, com picos randômicos quando o sol aparece por dentre as nuvens, sem chegar ao mesmo ápice que durante os dias com sol constante. A temperatura ambiente é alta durante o verão, até mesmo durante a noite, o que acaba dificultando o resfriamento do painel para o próximo dia, começando-o em um estado sub-ótimo; do terceiro ao quinto dia esta temperatura chega a ser maior que a temperatura de mudança de fase da glicerina durante boa parte do dia. Há uma correlação entre a estação e a velocidade do vento, com a intensidade não ultrapassando os 10m/s em nenhum ponto e a sua média sendo de 0,76; 1,68 e 2,34 m/s da estação mais fria à mais quente, sendo esta correlação coincidente com a média histórica (NATIONAL-WEATHER-SERVICE-OFFICE, 2022). Embora o valor médio seja superior no verão, o valor de pico na primavera foi o mais elevado, chegando aos 9 m/s.

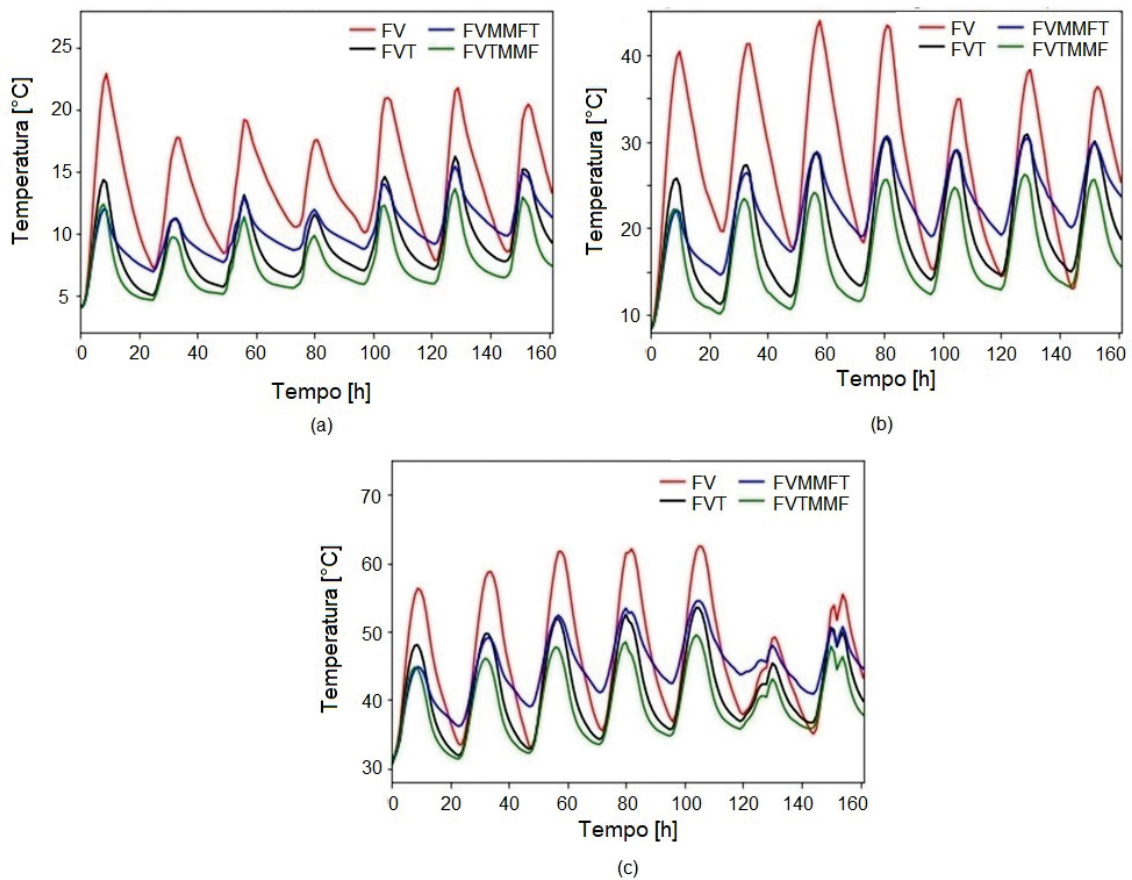
FIGURA 48 – PERFIS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS AO LONGO DAS SEMANAS DE TESTE. A) IRRADIÂNCIA GLOBAL. B) TEMPERATURA AMBIENTE.



FONTE: O Autor (2022).

A temperatura do painel dos 4 sistemas encontra-se na FIGURA 49. Nota-se que, no inverno, nenhum painel atinge a temperatura de 25 °C, não resultando em uma queda significativa de eficiência elétrica. Tanto no verão quanto na primavera há uma queda expressiva de temperatura ao usar os sistemas de arrefecimento. Esta queda no verão foi em média de 4,8 K, 1,4 K e 7 K para os sistemas FVT, FV+MMF+T e FVT+MMF. A diferença máxima foi de 11,5 K para os sistemas FVT e FV+MMF+T e 16,3 K para o sistema FVT+MMF.

FIGURA 49 – TEMPERATURA DE CADA PAINEL AO LONGO DE UMA SEMANA EM NEVADA EM TRÊS ESTAÇÕES DISTINTAS. A) INVERNO. B) PRIMAVERA. C) VERÃO.



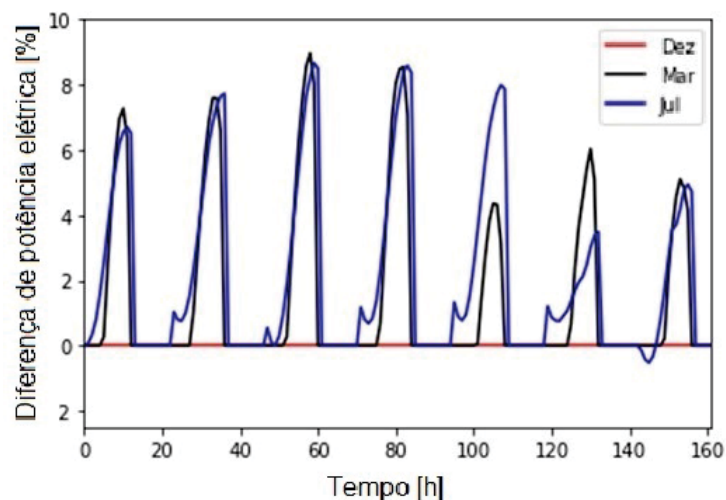
FONTE: O Autor (2022).

Os resultados desfavoráveis para o sistema FV+MMF+T são decorrentes da alta temperatura ambiente, que reduz a eficácia da glicerina como MMF. Devido a sua grande capacidade térmica, o MMF não consegue se resfriar completamente durante a noite, começando o dia em um estado parcialmente líquido. O resultado para o valor médio de redução de temperatura durante a semana também levou em conta o período noturno e os sistemas com MMF, que apresentam maior dificuldade de se resfriar ao longo da noite dada a maior capacidade térmica comparado ao sistema FVT, têm a sua redução média afetada - exacerbando os resultados do sistema FVT. Durante a primavera, estação em que a temperatura ambiente não faz com que a glicerina sofra a mudança de fase de forma antecipada, a diferença média e de pico foi maior que no verão: 7,1; 4,3; 10 K e 16,7; 18,5; 21,7 K para os sistemas FVT, FV+MMF+T e

FVT+MMF, respectivamente. O sistema FVT+MMF apresentou a maior redução de temperatura, conforme esperado pelos testes em laboratório. Consequentemente, as análises posteriores são feitas considerando apenas este sistema.

A diferença de potência elétrica - obtida através da equação de redução de potência de conversão elétrica com o aumento de temperatura - entre o painel FVT+MMF e o de referência devido à diferença de temperatura entre eles se encontra na FIGURA 50. No inverno não houve nenhuma diferença, dada a baixa temperatura de ambos os sistemas. Na primavera e no verão, este valor chega a quase 10% nos dias ensolarados. O ganho médio durante a semana foi de 3,6% no verão e 2,1% durante a primavera, mesmo com ganhos similares durante o período de pico. Embora em termos percentuais a situação durante o pico se assemelhe para as duas estações, o ganho de potência é maior no verão, devido à irradiância mais intensa e maior período diurno. No verão há uma redução no ganho durante o início da manhã, pois o sistema de arrefecimento mantém o painel de referência acima da temperatura ambiente, enquanto o sistema de referência inicia o dia na temperatura ambiente. O valor total de energia elétrica gerada ao longo da semana foi calculado através da integral da potência ao longo do tempo, através da regra do trapézio. A energia elétrica gerada ao longo da semana para o inverno, primavera e verão, foram em kWh por metro quadrado, respectivamente de 1,67; 4,30; 4,60 para o painel de referência e 1,67; 4,42; 4,76 para o painel do sistema FVT+MMF.

FIGURA 50 – DIFERENÇA DE POTÊNCIA ELÉTRICA FORNECIDA ENTRE OS SISTEMAS FVT+MMF E FV.

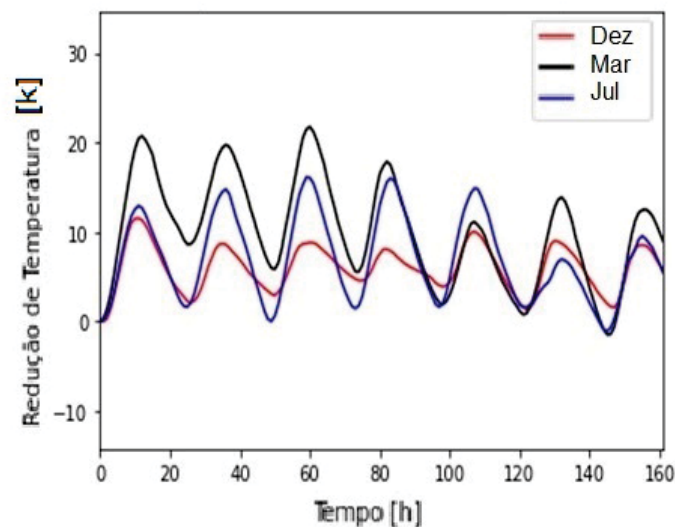


FONTE: O Autor (2022).

Na FIGURA 51, observa-se a redução de temperatura deste sistema para as três estações. Na primavera a redução é maior, porque no verão a temperatura ambiente chega a ser superior à temperatura de mudança de fase, fazendo que o MMF tenha um impacto reduzido. Portanto, para o sistema ser utilizado em ambientes tão

hostis quando o do deserto de Nevada, é razoável incorporar um material à glicerina de modo a aumentar o seu ponto de fusão (utilizando, por exemplo, os ácidos da TABELA 1). A energia térmica gerada ao longo do dia, obtida com a EQUAÇÃO 3.1 avaliando a diferença de temperatura da água entre às 6:00 e 18:00 do primeiro dia foi de 0,47; 0,87; 0,93 kWh do inverno ao verão, sendo todavia este ganho influenciado pelo aumento de temperatura ambiente ao longo do dia. A velocidade do vento mais alta no verão também contribui para uma diferença de temperatura inferior nesta estação, visto que o sistema sem arrefecimento, devido à sua menor capacidade térmica, é afetado de forma mais significativa pelo vento.

FIGURA 51 – DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURA DO PAINEL FVT+MMF E FV.

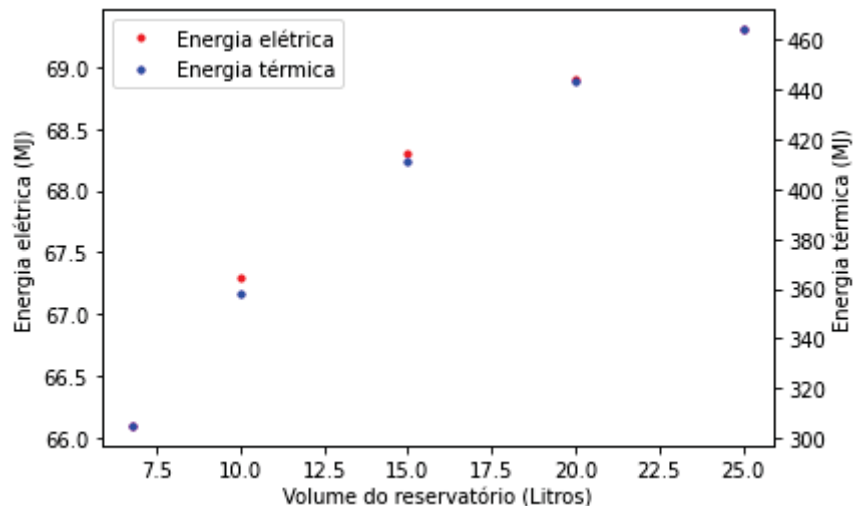


FONTE: O Autor (2022).

Fazendo a simulação para os sistemas FV e FVT+MMF ao longo do ano de 2014, encontrou-se uma geração de energia elétrica total ao longo do ano de 64,9 MJ e 66,1 MJ, respectivamente, significando um aproveitamento 1,9% superior para o sistema FVT+MMF. Embora o sistema com arrefecimento demore mais para se aquecer, durante a tarde - quando a irradiância e temperatura ambiente caem - o seu resfriamento também é mais lento, chegando a apresentar uma irradiância menor que a do sistema FV durante o período. A água do sistema FVT+MMF absorveu 305 MJ de energia ao longo do ano, representando 42,9% da energia fornecida pela irradiação solar, mostrando que o seu proveito é fundamental na viabilidade de um sistema solar híbrido. Ao aumentar a quantidade de água no reservatório para 10 litros, a sua temperatura é reduzida, mantendo o painel do sistema FVT+MMF mais baixa e aumentando a energia elétrica produzida ao longo do ano para 67,3 MJ - um aumento de 3,65% comparado ao sistema FV e a energia térmica é de 358 MJ; aumentando este valor para 15 litros, a geração de energia elétrica é de 68,3 MJ e de energia térmica 411 MJ. Para um reservatório de 20 litros, estes valores são de 68,9

MJ e 443 MJ e para um de 25 litros de 69,3 MJ (um aumento de 6,8% comparado ao sistema FV) e 464 MJ para as energias elétrica e térmica, respectivamente. O aumento da quantidade de água faz com que ela permaneça em uma temperatura reduzida por mais tempo, aumentando significativamente a capacidade do sistema térmico de extrair o calor do painel fotovoltaico. Assim como visto na seção 5.3, há um rendimento decrescente ao aumentar este volume - sendo a diferença de geração de energia elétrica entre os sistemas de 6,8 e 10 litros consideravelmente superior à diferença entre os sistemas de 20 e 25 litros. Na FIGURA 52, na qual se encontram os valores de energias elétrica e térmica previamente mencionados, nota-se este rendimento decrescente, que apresenta um comportamento similar para ambas.

FIGURA 52 – GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA DO SISTEMA FVT+MMF AO LONGO DO ANO NO DESERTO DE NEVADA PARA DIFERENTES VOLUMES DE ÁGUA



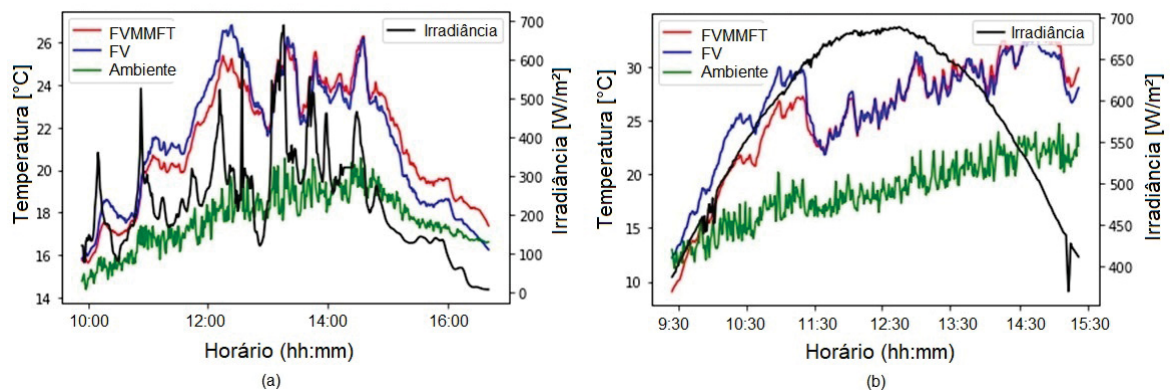
FONTE: O Autor (2023).

## 5.5 ANÁLISE DO SISTEMA EM AMBIENTE ABERTO

A FIGURA 53 mostra a temperatura do painel FV+MMF+T e de referência para um dia nublado e um ensolarado. Assim como na simulação vista em Nevada, em uma semana fria de inverno em Curitiba não houve alteração significativa na temperatura ao utilizar o sistema de arrefecimento, atingindo uma diferença máxima de 3,9 K às 10:25 da manhã no dia ensolarado, mas esta diferença logo diminui ao uma rajada de vento frio resfriar os sistemas. Já no dia nublado esta diferença chega aos 1,9 K às 12:22. A irradiância adquire formato similar a uma parábola para o dia ensolarado, chegando aos 680 W/m<sup>2</sup> em seu pico, já para o dia nublado o comportamento é imprevisível, variando conforme as nuvens bloqueiam o sol. Na FIGURA 54 estão a tensão em aberto dos dois sistemas para o dia nublado e ensolarado. No dia nublado, a diferença de tensão foi baixa ao longo do dia, assim como ocorreu para a temperatura,

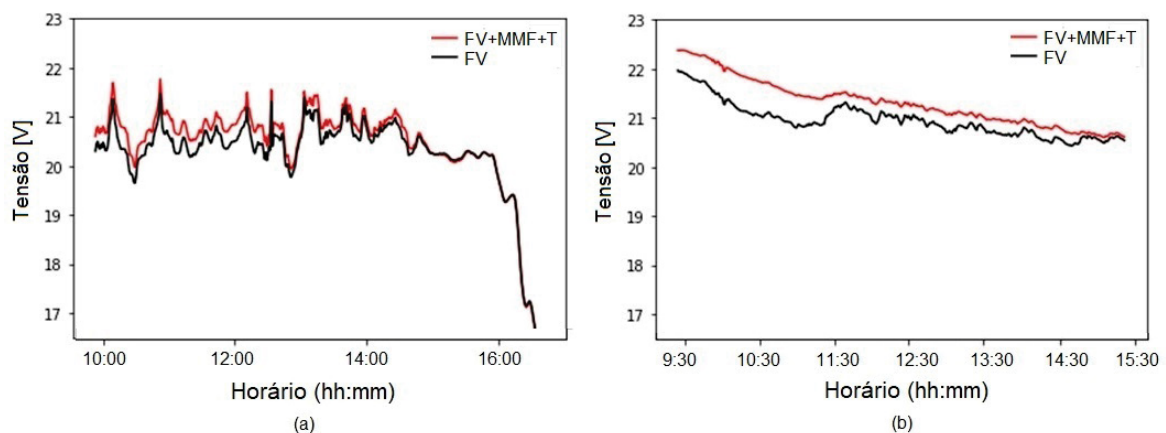
porém no dia ensolarado houve uma diferença máxima de 0,72V (3,4%) às 10:25 - mesmo horário onde a diferença de temperatura entre os sistemas é máxima. Nota-se que, embora a relação entre tensão em circuito aberto e temperatura seja linear, a relação com a irradiância não é, mantendo um valor quase constante mesmo com a grande oscilação da irradiância no dia nublado. A FIGURA 55 mostra a temperatura dos componentes do sistema FVT+MMF para ambos os dias. Observa-se que ao final da medição, a temperatura da água encontra-se acima da temperatura ambiente, providenciando energia térmica, sendo esta uma importante contribuição do sistema de arrefecimento durante os dias frios. Nota-se que em ambos os casos, a temperatura do MMF ultrapassa a do painel durante a tarde, pois a sua capacidade térmica é consideravelmente superior e ele não está em contato direto com o vento, que reduz a temperatura do painel rapidamente. Conseqüentemente, o painel com arrefecimento é mantido a uma temperatura superior à do painel sem arrefecimento durante a tarde.

FIGURA 53 – IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA AMBIENTE E DOS PAINÉIS NO INVERNO. A) DIA NUBLADO. B) DIA ENSOLARADO.



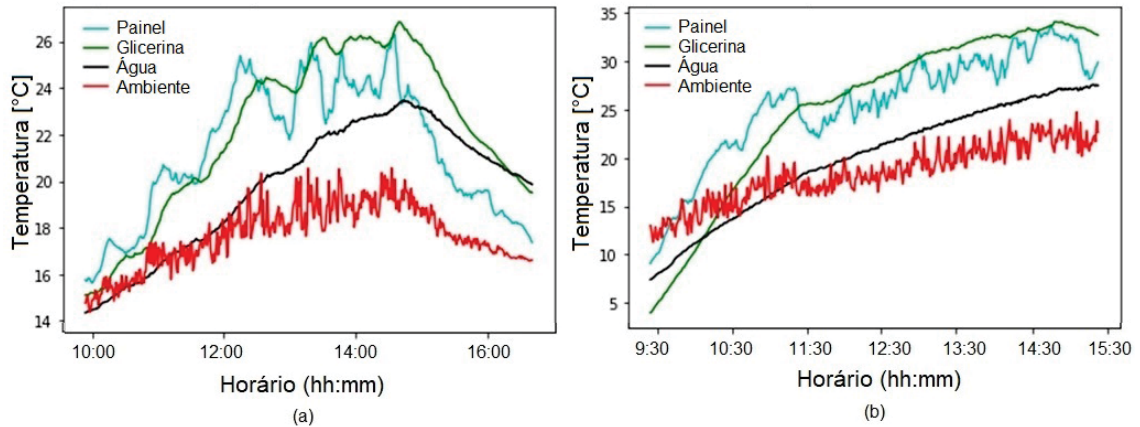
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 54 – TENSÃO EM ABERTO DO SISTEMA FVT+MMF E DE REFERÊNCIA NO INVERNO. A) DIA NUBLADO. B) DIA ENSOLARADO.



FONTE: O Autor (2022).

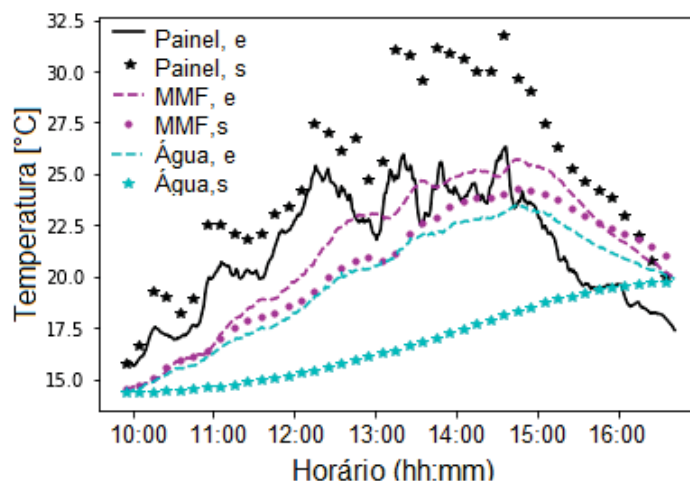
FIGURA 55 – PERFIS DE TEMPERATURA DOS COMPONENTES DO SISTEMA FV+MMF+T NO INVERNO. A) DIA NUBLADO. B) DIA ENSOLARADO.



FONTE: O Autor (2022).

Comparou-se o resultado experimental do dia nublado com o modelo matemático. Como não foi efetuada a medição da velocidade do vento neste dia, utilizou-se a média diária, de 2,1 m/s (WEATHERSPARK, 2023). A FIGURA 56 mostra a comparação para o painel, o MMF e a água. Nota-se que a simulação do MMF foi boa, enquanto que a temperatura do painel foi superestimada. A principal fonte de erro foi a água, que foi consideravelmente inferior à temperatura experimental, isto ocorreu pois o reservatório e a tubulação estavam sob o sol, recebendo energia de forma direta, enquanto no modelo matemático (e nos testes em laboratório) o reservatório encontra-se isolado e a água recebe energia exclusivamente dos outros componentes do sistema. Contudo, o resultado ainda mostra-se adequado, com um erro quadrático médio de 2,3 K. Os valores de erro médio para cada componentes (painel; aleta; MMF; água) foram de 3,6; 1,6; 0,8; 3,0 K. Nota-se que o erro do painel foi o maior, devido principalmente ao comportamento ao final do dia, quando ocorre uma variação brusca na temperatura.

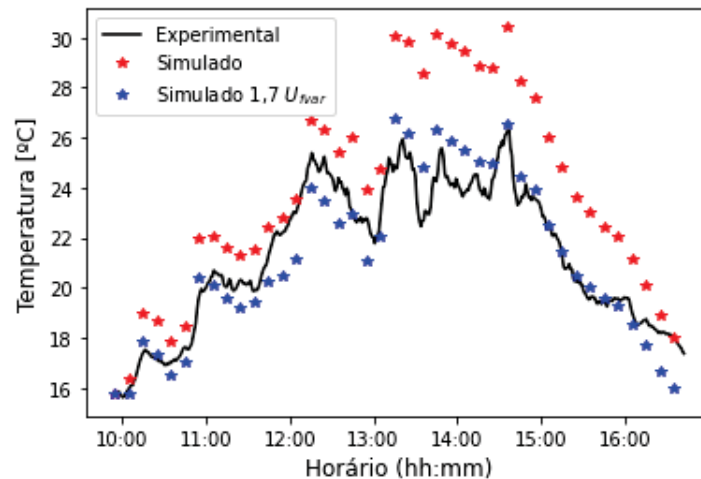
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS DOS COMPONENTES DO MODELO FV+MMF+T MATEMÁTICO E EXPERIMENTAL



FONTE: O Autor (2022).

Embora os valores para o painel sejam notavelmente diferentes dos valores experimentais, o comportamento das curvas é similar. Variando apenas a relação entre o painel com o vento, ou seja, variando o valor do coeficiente de convecção com o ar  $U_{fval}$  o seu erro pode ser reduzido substancialmente. A FIGURA 57 mostra a diferença entre usar um coeficiente global  $U_{fval}$  como previsto em laboratório e este valor multiplicado por 1,7. Nota-se que a simulação torna-se bem mais adequada neste caso, reduzindo o erro médio de 3,6 K para 1,14 K. Esta divergência em relação ao modelo obtido em laboratório pode ser atribuída a fatores como a direção do vento ser variável em ambiente aberto e o seu escoamento ser turbulento mesmo com baixas velocidades, devido à sua interação com obstáculos.

FIGURA 57 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA DO PAINEL DO MODELO FV+MMF+T MATEMÁTICO E EXPERIMENTAL ALTERANDO O COEFICIENTE DE CONVECÇÃO COM O AR



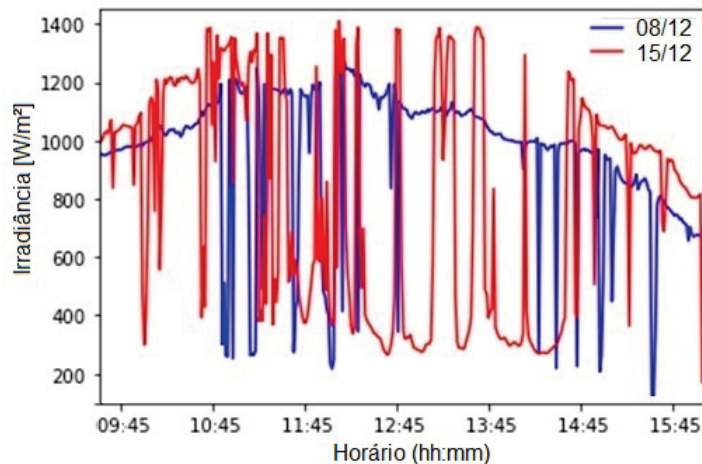
FONTE: O Autor (2022).

Comparando neste mesmo dia nublado o sistema FVT+MMF com o FV através de simulação, obteve-se um aumento de eficiência elétrica de 0,6% e um aumento da temperatura d'água de 8,8 K, equivalente a um ganho de 250,4 kW ou 43,2% da energia recebida pelo sistema através da irradiância solar. Para o dia ensolarado, houve um aumento de eficiência elétrica de 1,8% e 19,8 K na temperatura da água, sendo este valor de 44,6% da energia fornecida.

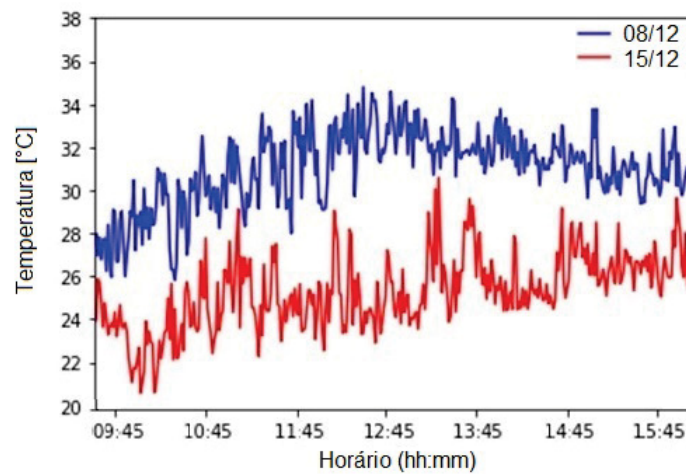
As variáveis climáticas para as medições em Dezembro encontram-se na FIGURA 58. No dia 15, os resultados foram mais instáveis, com uma grande variação entre o tempo nublado e ensolarado. A irradiância neste dia chega aos  $1400 \text{ Wm}^{-2}$ , o que não é possível com a irradiância direta tendo o seu valor máximo de  $1366$  no limite da atmosfera. Contudo, o valor medido pelo piranômetro é a irradiância global, somando a direta com a difusa. A grande quantidade de irradiância refratada pelas nuvens (sendo ela próxima aos  $400 \text{ Wm}^{-2}$ ), como visto pelos vales gerados quando o

sol é coberto pelas nuvens na FIGURA 58 (a) faz com que o valor atinja estes níveis. A temperatura ambiente no dia 08/12 foi, em média, 6 K superior à do outro dia. A velocidade do vento também foi superior, com uma média de 1,76 m/s comparado a 0,93 m/s do dia 15/12.

FIGURA 58 – PERFIS DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS EM DEZEMBRO. A) IRRADIÂNCIA GLOBAL B) TEMPERATURA AMBIENTE.



(a)



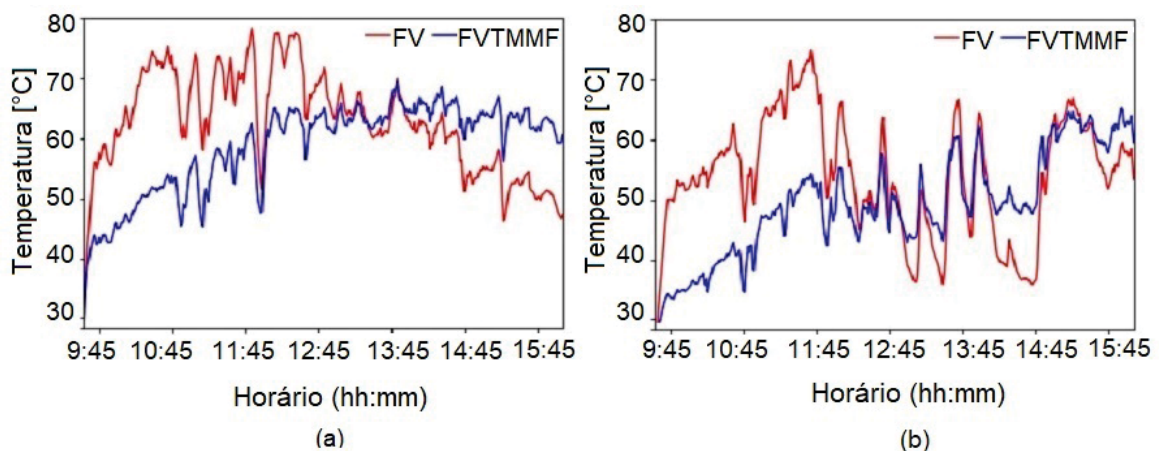
(b)

FONTE: O Autor (2022).

A FIGURA 59 mostra a distribuição da temperatura do painel FVT+MMF e do FV ao longo do dia em ambos os dias. Em ambos, o resultado mostrou-se similar: houve uma grande disparidade de temperatura durante a manhã, mas como a temperatura dos sistemas se reduz nos momentos nublados, o sistema FV se resfria mais rapidamente que o com arrefecimento, tornando a sua temperatura menor que a do sistema FVT+MMF, como visto a partir das 14 horas na medição do dia 08 e em torno das 14:45 no dia 15. A energia elétrica gerada para os sistemas FV e o FVT+MMF no dia 08/12 foi de 0,472 e 0,485 kWh/m<sup>2</sup> e no dia 15/12 de 0,459 e 0,476 kWh/m<sup>2</sup>, acarretando um aumento de 2,7% e 3,7%, mostrando que, mesmo com a

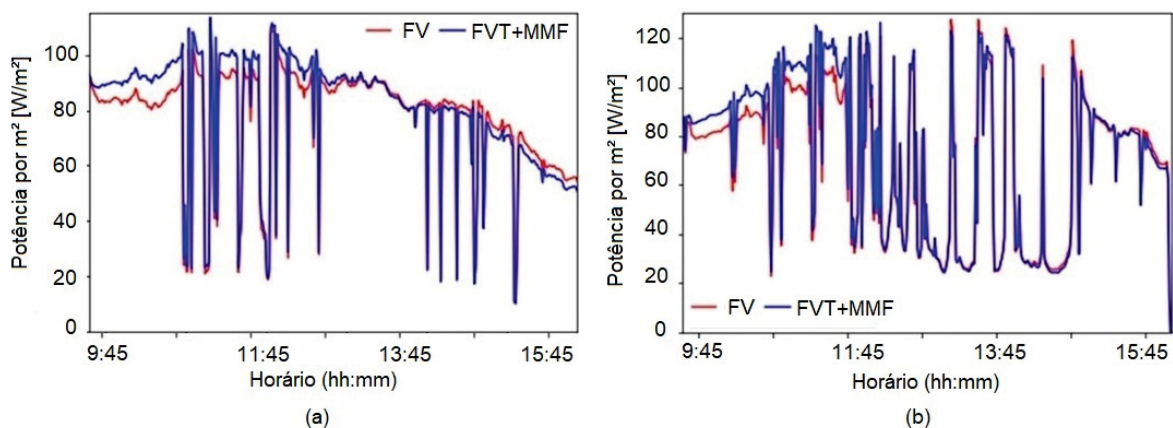
instabilidade no tempo, ainda é favorável utilizar o sistema de arrefecimento. A FIGURA 60 mostra esta geração por  $m^2$  nos dois dias. Nota-se um bom aumento no início, mas a partir do momento que a irradiância diminui e a temperatura do painel é reduzida, o sistema convencional passa a ter uma performance levemente superior ao sistema com arrefecimento (a partir das 15:30). Todavia, a geração neste período é baixa, pois a irradiância se reduz conforme o Sol se põe. No primeiro dia, a água sofreu um aumento de temperatura de 34,2 K ao final do dia, sendo este valor igual a 50,4% da energia gerada pelo sistema, enquanto no segundo dia, estes valores foram de 30,5 K e 42,1%.

FIGURA 59 – TEMPERATURA DOS PAINÉIS FV E FVT+MMF EM DEZEMBRO. A) MEDIÇÃO DE 08/12. B) MEDIÇÃO DE 15/12.



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 60 – POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA POR METRO QUADRADO PELOS SISTEMAS FV E FVT+MMF EM DEZEMBRO. A) MEDIÇÃO DE 08/12. B) MEDIÇÃO DE 15/12.

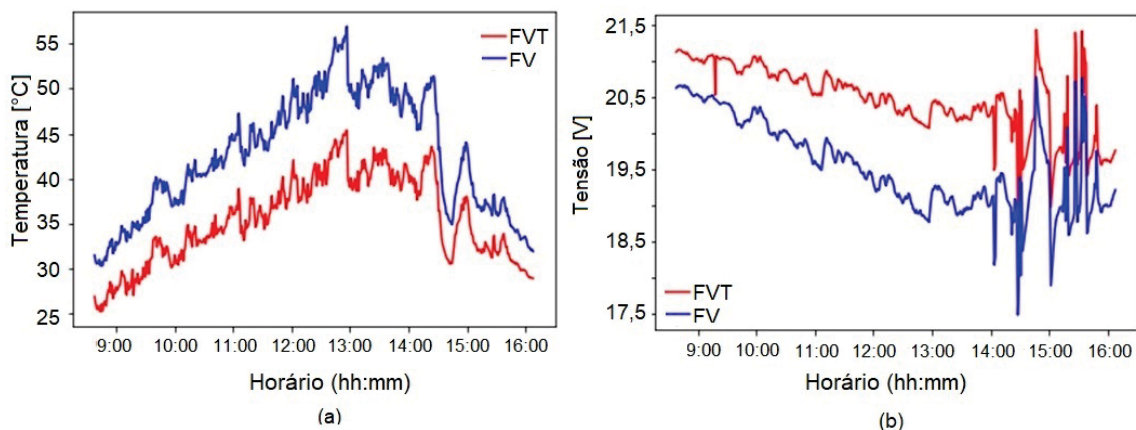


FONTE: O Autor (2022).

Em janeiro fez-se uma medição utilizando um sistema FVT modificado, com um sistema de banho termostático substituindo o reservatório + bomba. Isto permitiu uma avaliação onde a água permanece em uma temperatura constante de 25°C. Como a

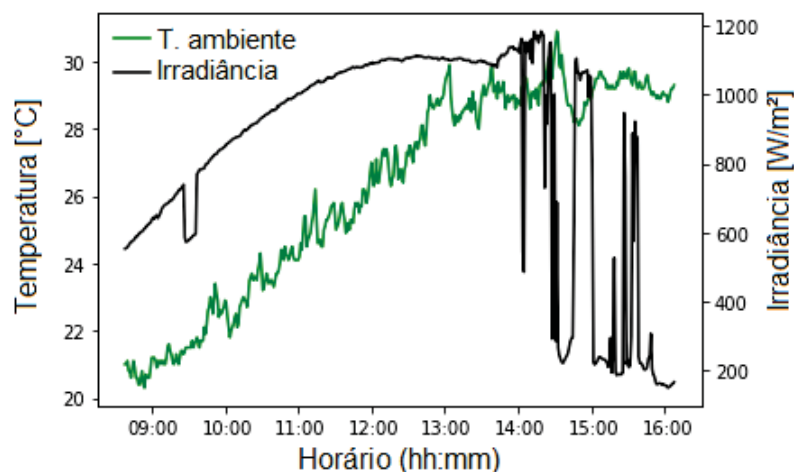
vazão mínima deste sistema é superior à máxima da bomba, não é possível utilizar os parâmetros obtidos para o outro sistema FVT na seção 5.2 para simulá-lo. A FIGURA 61 mostra as medições de temperatura e tensão em aberto comparando este sistema FVT com o sistema FV. A FIGURA 62 mostra a irradiância e a temperatura ambiente no dia da medição, sendo que até aproximadamente 13:30 o dia estava ensolarado e a partir e então começou a tornar-se nublado. Os picos quando o sol aparece por entre as nuvens no período nublado mostram-se significativamente superiores a quando não há nuvens (inclusive sendo superiores ao pico do meio dia mesmo após às 14:00). Isto se deve à adição da irradiância difusa, enquanto nos períodos ensolarados há apenas a direta. Utilizando este sistema, houve um incremento de 3,9% na geração de energia elétrica ao longo do dia. Nota-se que, mesmo com uma temperatura da água controlada, o sistema com arrefecimento possui uma dificuldade maior em se refrigerar, evidenciado pela redução de temperatura significativamente menor que a do painel sem arrefecimento a partir das 14:00 na FIGURA 61.

FIGURA 61 – COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS FV E FVT EM JANEIRO DE 2023. A) MEDIÇÃO DE TEMPERATURA. B) MEDIÇÃO DE TENSÃO EM ABERTO.



FONTE: O Autor (2023).

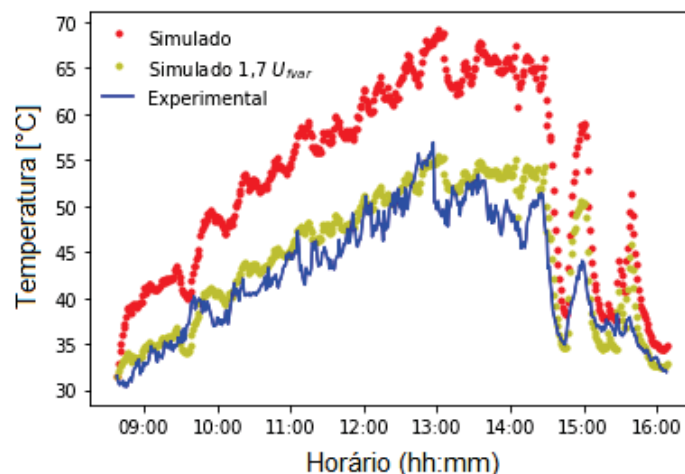
FIGURA 62 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA DIA DE MEDIÇÃO EM JANEIRO DE 2023.



FONTE: O Autor (2023).

A FIGURA 63 mostra a comparação entre a temperatura experimental do sistema FV com a simulada. Assim como na comparação efetuada no inverno, a temperatura da simulação é consideravelmente superior à temperatura experimental, com um erro médio de 11,2 K. Efetuando novamente um aumento em  $U_{var}$  em 1,7 vezes, nota-se uma melhora significativa na simulação ao aumentar o coeficiente, obtendo um erro médio de 3,03 K. O comportamento da simulação mostra-se similar ao experimental, mas há dificuldades em reproduzir com acurácia quando a variação de temperatura é mais brusca (seja por uma rajada de vento ou uma omissão repentina do sol pelas nuvens). Quanto ao vento, a dificuldade está associada à aquisição ser feita pela média a cada minuto, enquanto pode ocorrer uma rajada forte por alguns segundos, o que resulta em um comportamento diferente do que um valor médio e contínuo. Esta dificuldade com altas oscilações é notada a partir das 14:00 na figura 63, onde se encontram os maiores erros da simulação. Removendo esta parte final da simulação (últimas 2h), o erro médio cai para 2,9 K.

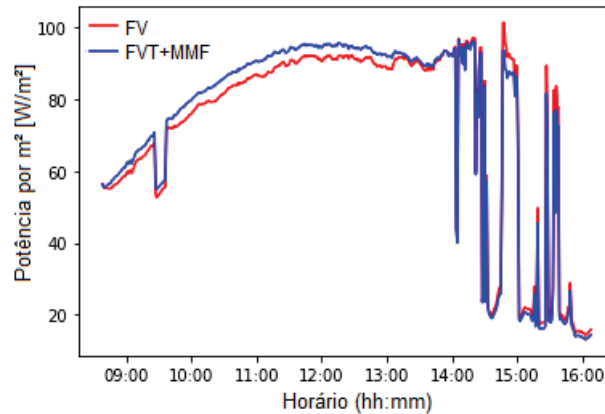
FIGURA 63 – COMPARAÇÃO PARA A MEDIÇÃO DE JANEIRO DA TEMPERATURA DO PAINEL FV COM DADOS MEDIDOS E SIMULADOS.



FONTE: O Autor (2023).

Simulando os sistema FV e FVT+MMF nas mesmas condições, obteve-se um aumento de 2,1% de geração de energia elétrica ao longo do dia (FIGURA 64). Houve o mesmo problema evidenciado nos demais experimentos: o sistema com arrefecimento inicialmente possui uma vantagem, mas devido à queda de temperatura e irradiância durante a tarde, ele passa a operar em uma temperatura superior ao sistema FV pois o sistema abaixo do painel mantém a sua temperatura estável. Assim como nos demais casos, como a temperatura do sistema com arrefecimento é inferior quando a irradiância é mais intensa, a sua geração de energia elétrica total durante o dia é superior à do painel sem arrefecimento. Quanto ao proveito da energia térmica, neste dia a temperatura da água ao final do dia foi 33,3 K superior ao início (beneficiando-se de 41,8% da energia provinda do sol).

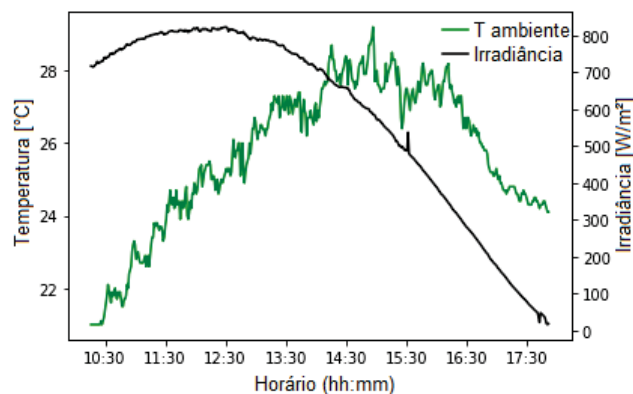
FIGURA 64 – POTÊNCIA POR METRO QUADRADO PARA SISTEMAS FV E FVT+MMF EM JANEIRO.



FONTE: O Autor (2023).

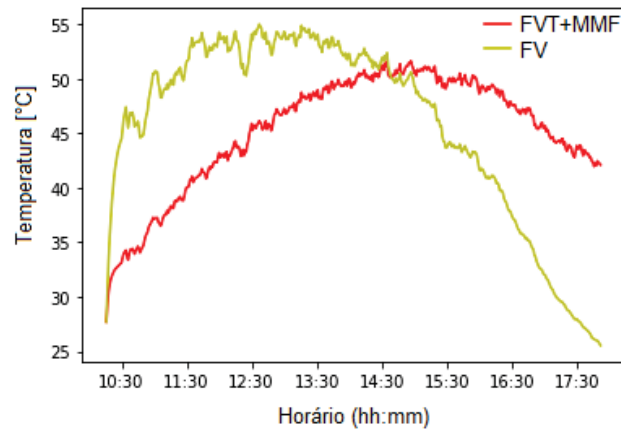
No início do outono, fez-se uma comparação através da simulação dos sistemas FV e FVT+MMF em um dia sem nuvens, com condições ambientais representadas na FIGURA 65, com condições mais brandas do que apresentado no verão, sendo a velocidade média do ar durante o dia de 0,93 m/s. A FIGURA 66 mostra a temperatura dos sistemas FV e FVT+MMF, observando-se uma boa redução de temperatura inicialmente, mas a partir das 14:30 a temperatura dos sistemas se reduz e, como visto anteriormente, o sistema FVT+MMF se resfria mais lentamente que o sistema FV - neste caso de forma significativa. Contudo, no período onde há maior irradiação solar, o sistema com arrefecimento mantém uma temperatura inferior, mostrando-se proveitoso. A FIGURA 67 mostra o ganho de potência por metro quadrado ao utilizar este sistema, sendo o seu valor médio de 2,3%, havendo um aumento apenas até às 13h, aproximadamente. Vale salientar ainda que, por problemas externos, o experimento teve início às 10:16, sendo que este ganho seria maior ao utilizar o sistema desde o início do dia. O ganho de temperatura da água foi de 22,6 K, resultando em 642 kJ ou 40,3% da energia total.

FIGURA 65 – CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA A MEDIÇÃO NO DIA 03/04/2023.



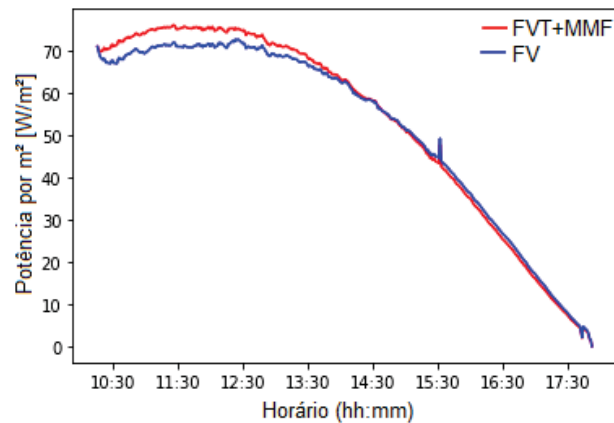
FONTE: O Autor (2023).

FIGURA 66 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA ENTRE OS SISTEMAS FV E FVT+MMF NO DIA 03/04/2023.



FONTE: O Autor (2023).

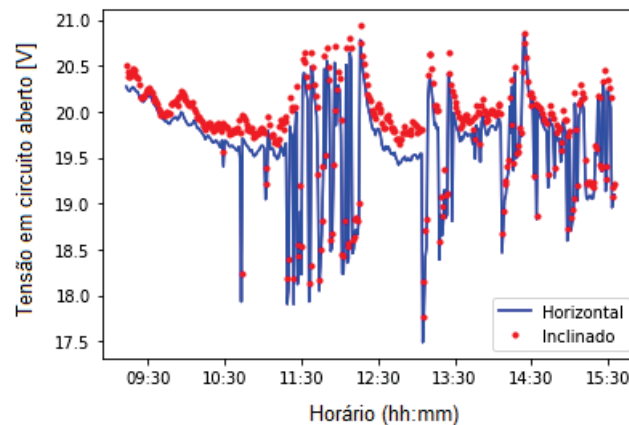
FIGURA 67 – COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA POR M<sup>2</sup> ENTRE OS SISTEMAS FV E FVT+MMF NO DIA 03/04/2023.



FONTE: O Autor (2023).

A FIGURA 68 mostra o resultado da comparação da tensão em aberto entre um painel posto na horizontal e outro com uma angulação de 25° para o norte (ângulo ótimo anual, considerando a latitude de Curitiba), efetuada também em Abril. Observa-se que a tensão do painel inclinado foi levemente maior ao longo do dia. Como o dia da medição foi próximo ao equinócio, o ângulo utilizado também é próximo ao ideal para o dia. Este ganho ao utilizar o painel inclinado, possui um valor médio de 0,87% ao longo do dia. A maior diferença entre a tensão dos painéis deu-se ao redor do meio dia; período onde os painéis estão apontados diretamente para o sol. No gráfico é também possível observar os momentos em que está ensolarado e parcialmente nublado, sendo que, assim como ocorre com a irradiância, a tensão quando há a presença de nuvens sem bloquear o Sol é superior aos momentos sem a presença de nuvens, embora a relação não seja linear.

FIGURA 68 – COMPARAÇÃO DA TENSÃO EM ABERTO ENTRE UM PAINEL FOTOVOLTAICO INCLINADO E HORIZONTAL.



FONTE: O Autor (2023).

a TABELA 8 mostra os ganhos médios diários de energia elétrica ( $E_e$ ) e térmica ( $E_t$ ) comparando o sistema FVT+MMF com o sistema FV ao longo do ano (exceto a primavera), através dos modelos matemáticos. Estes ganhos consideram apenas os dias ensolarados e nublados, visto que nenhum teste foi feito em dias com chuva, devido à restrição do sistema meteorológico mencionada na seção 4. Nota-se se que, em termos percentuais, a melhora de desempenho do sistema é relativamente constante ao longo do ano, pois embora o sistema com arrefecimento traga um benefício maior durante o início/meio do dia nas estações mais quentes, ele se mantém em uma temperatura elevada durante a tarde, enquanto o sistema sem arrefecimento se resfria mais rapidamente. O grande benefício em utilizar o sistema de arrefecimento é o aumento da temperatura da água, sendo ela capaz de absorver acima de 40% da energia cedida ao painel durante o dia. Embora os números sejam próximos sob a forma percentual, evidentemente no verão o ganho é muito maior que no inverno, devido aos valores consideravelmente superiores de irradiação. Aumentando o volume do reservatório para 10 litros (1 litro para cada Watt de potência do painel), o ganho de energia elétrica média no verão sobe para 4,9%, enquanto a energia térmica passa a fazer uso de 49,6% da energia recebida. No outono, os valores passam a ser de 3,9 % e 48,3 %, enquanto no inverno estes valores são de 1,9% e 49,2%. Isto mostra que com uma quantidade maior de água, a sua temperatura demora mais para aumentar, mantendo o painel com arrefecimento em uma temperatura mais baixa e gerando mais energia térmica sem que a temperatura da água atinja níveis extremos - melhorando significativamente a performance no verão e no outono, onde a exigência é maior. Realizando a simulação para 15 litros, o impacto é menos significativo para o inverno, aumentando a energia térmica para 54,3% e o ganho de energia elétrica para 2,3%. No outono, os valores para energia térmica e ganho de energia elétrica comparado ao

sistema FV aumentaram para 54,5% e 4,3%, enquanto no verão para 55,9% e 6,8%. Os ganhos ao aumentar o volume para 20 litros foram menores. No inverno houve um aumento apenas da energia térmica de 54,3% para 56,7% e de 0,2% para a energia elétrica; no outono um aumento de 4,3% e 54,5% para 4,5% e 58,1%; no verão o aumento continuou razoavelmente elevado comparado às demais estações, de 6,8% e 55,9% para 7,8% e 59,7%.

Também na TABELA 8 está a comparação do sistema FVT com o FV, de modo a avaliar a influência do uso do MMF. Esta comparação foi feita para os casos com menor e maior volume de água (6,8 e 20 litros). Nota-se uma redução expressiva para a geração elétrica em todos os casos quando comparado ao sistema FVT+MMF. Isto se deve pois, sem o material, a água se aquece mais rapidamente, reduzindo a sua capacidade de extrair calor do sistema fotovoltaico. A geração de energia térmica foi similar à do sistema FVT+MMF (um pouco inferior, na maioria dos casos), pois, embora a água se aqueça mais rapidamente sem o MMF para extrair calor do sistema térmico, ela também se resfria mais rapidamente, fornecendo resultados similares para os dois sistemas.

TABELA 8 – GANHOS MÉDIOS DIÁRIOS DO SISTEMA FVT+MMF AO LONGO DO ANO EM CURITIBA

Volume de água (l)	Estação	Ganho de Ee (kJ)	Ganho de Ee (%)	Et (kJ)	Et (%)
Sistema FVT+MMF					
6,8	Inverno	1,2	1,3	406,6	44,2
	Outono	3,2	2,3	642	40,3
	Verão	4,9	2,8	928,7	44,6
10	Inverno	1,7	1,9	452,3	49,2
	Outono	5,4	3,9	769,4	48,3
	Verão	8,6	4,9	1032,8	49,6
15	Inverno	2,1	2,3	499,1	54,3
	Outono	5,9	4,3	868,1	54,5
	Verão	11,9	6,8	1163,8	55,9
20	Inverno	2,3	2,5	511,5	55,8
	Outono	6,2	4,5	926,0	58,1
	Verão	13,7	7,8	1242,0	59,7
Sistema FVT					
6,8	Inverno	0,7	0,8	376,4	40,9
	Outono	1,1	0,8	506,7	35,2
	Verão	4,9	2,8	778,4	37,7
20	Inverno	1,7	1,9	511,4	56,7
	Outono	4,5	3,1	865,5	54,3
	Verão	9,0	5,1	1173,3	56,4

FONTE: O autor (2023).

## 6 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi analisado um sistema fotovoltaico híbrido com material de mudança de fase em três configurações diferentes, concluindo-se através dos testes em laboratório que aquela com a glicerina abaixo do sistema térmico (FVT+MMF) trouxe uma redução de temperatura do painel fotovoltaico mais significativa que as demais, aumentando a eficiência de conversão elétrica de forma mais acentuada. Nos três casos, a variação da tensão em aberto espelha a variação de temperatura: conforme a temperatura do painel sobe, a tensão se reduz linearmente, como esperado. O aumento de temperatura da água do reservatório foi superior para as configurações com o sistema térmico imediatamente abaixo do painel, embora este resultado seja influenciado pela temperatura da água encontrar-se inicialmente abaixo da temperatura ambiente. Mesmo removendo esta influência, os sistemas onde a água está em contato direto com o painel mostram-se superiores ao sistema com MMF na parte central (FV+MMF+T).

A modelagem matemática mostrou-se coerente, com um erro médio inferior aos 2 K para todas as configurações tanto com o método de Euler quanto com o de Runge-Kutta de quarta ordem. A diferença de resultado entre os métodos não foi grande devido à suavidade das curvas da análise em laboratório, mas o método de quarta ordem apresentou erros levemente inferiores ao de primeira especialmente na parte inicial do teste, devido à mudança mais brusca de temperatura sobretudo do painel fotovoltaico do sistema FV+MMF+T.

A simulação feita através da variação dos parâmetros dos modelos matemáticos mostrou uma influência significativa ao alterar as condições climáticas. Uma variação da temperatura ambiente faz com que a temperatura do painel varie na mesma quantidade, enquanto dobrar/reduzir pela metade a velocidade do vento faz com que a temperatura varie em  $\pm 4$  K. Alterar a quantidade de água do reservatório do sistema térmico influencia a temperatura da água e, conseqüentemente, do painel fotovoltaico. Todavia, acima dos 15l, a mudança provinda da variação do volume mostrou-se menos significativa. A simulação com os dados da base de parafina RT42 trouxeram resultados semelhantes à glicerina, havendo um balanço entre o efeito da maior capacidade térmica com uma condutividade inferior. Ao simular a imersão de nanopartículas de alumínio na glicerina e no RT42, houve uma melhora apenas em casos extremos, tornando-se razoável utilizar estas partículas apenas em regiões com clima quente.

A simulação do sistema em clima desértico apontou o sistema FVT+MMF como aquele com melhores resultados. A temperatura do painel fotovoltaico no inverno não foi significativamente afetada pelo arrefecimento, enquanto na primavera e no verão houve um aumento de até 10% na potência elétrica no horário de pico. A variação

de temperatura foi superior na primavera, pois a temperatura ambiente no verão é maior que a temperatura de mudança de fase do MMF, reduzindo a sua capacidade de absorver energia térmica. Nesta análise também percebeu-se um problema do sistema arrefecimento: a temperatura do painel deste sistema possui maior dificuldade de se resfriar a noite comparado com o sistema convencional. Conseqüentemente, o sistema por vezes começa o dia com uma temperatura acima da temperatura ambiente. A temperatura do painel sem arrefecimento ultrapassa rapidamente a temperatura do painel do sistema arrefecido no início do dia, portanto não há grandes conseqüências negativas para o uso do arrefecimento. Para a análise feita ao longo do ano completo, a energia elétrica gerada pelos sistemas FV e FVT+MMF foi de 64,9 e 66,4 MJ enquanto a energia térmica armazenada pelo sistema FVT+MMF foi de 305 MJ. Ao aumentar o volume do reservatório de água para 10, 15, 20 e 25 litros, tanto a geração de energia térmica quanto elétrica do sistema FVT+MMF aumentou significativamente. Este aumento foi decrescente, com a diferença entre o 6,8 e 10 litros consideravelmente maior que a diferença entre 20 e 25 litros.

A análise do sistema FV+MMF+T em ambiente externo no inverno mostrou uma baixa redução de temperatura, assim como previsto pela simulação em Nevada. Mesmo assim, nos momentos onde houve uma redução de temperatura, ocorreu um ganho na  $V_{OC}$  proporcional à esta variação de temperatura. As análises durante a temporada quente mostraram uma irradiância global bastante acima do esperado devido à influência da irradiância difusa. A temperatura do sistema com arrefecimento permaneceu inferior à do painel de referência enquanto o tempo estava ensolarado, porém nos períodos nublados o painel do sistema com arrefecimento tem dificuldade de se resfriar, alcançando uma temperatura superior à do sistema sem arrefecimento, pois o componente abaixo do painel com arrefecimento encontra-se a uma temperatura superior à ambiente. Embora haja este efeito, o uso do arrefecimento se mostra benéfico, aumentando a geração total de energia elétrica ao longo do dia e permitindo o uso de uma quantia considerável de energia térmica.

Efetuada uma simulação dos sistemas FV e FVT+MMF em todas as estações exceto a primavera com as condições ambiente obtidas ao longo do ano, houve um ganho médio diário de energia elétrica de 2 a 3% para todas elas, enquanto que o acúmulo de energia térmica ao longo do dia é superior aos 40% da irradiação em todas as estações. O aumento do volume de água no reservatório mostrou-se benéfico para o sistema durante todas as estações, mas para o inverno a geração de energia elétrica não se alterou de forma significativa. O ganho médio de energia elétrica durante o dia comparado ao sistema FV durante o dia com um reservatório de água de 6,8 litros foi de 2,1; 3,2; 4,9 kJ para inverno; outono; verão, enquanto que para 20 litros este ganho passou a 3,3; 6,2; 13,7 kJ. Para os mesmos parâmetros, a energia térmica passou de 406,6; 642; 928,7 kJ para 520; 928; 1242 kJ. Verificando o sistema FVT nas mesmas

condições, notou-se um resultado inferior ao sistema FVT+MMF em todas as estações: o aumento de geração de energia elétrica para o sistema de 20 litros foi de 1,7; 4,5; 9,0 kJ respectivamente para inverno, outono e verão.

Conclui-se que para a cidade de Curitiba, o uso deste sistema de arrefecimento justifica-se especialmente quando há a intenção de aproveitar a energia térmica. O ganho de energia elétrica anual comparado ao sistema FV não passa dos 3% com o sistema com as suas características atuais, mas nota-se que com um redimensionamento do sistema - como o aumento do volume de água no reservatório podem melhorar significativamente o seu desempenho. Dentre os três sistemas, aquele com melhores resultados nos testes foi o FVT+MMF, sendo que o uso da glicerina como MMF mostrou-se vantajoso, alcançando resultados superiores ao sistema FVT nos experimentos e simulações.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros que abordem este tema, recomenda-se:

- Efetuar a Adição de grafite expandido/nanopartículas ou substituir o trocador de calor aletado por uma estrutura de metal poroso para melhorar a área de troca de calor do MMF.
- Otimizar a massa de MMF utilizada, alterando a profundidade do reservatório.
- Avaliar as propriedades térmicas da base de glicerina, substituindo na modelagem matemática os valores obtidos numericamente pelos valores encontrados.
- Estudar outras substâncias que possam ser utilizadas como material de mudança de fase de forma econômica e sustentável.
- Avaliar diferentes arquiteturas para o sistema térmico, variando parâmetros como a profundidade da tubulação e sua forma, utilizando, por exemplo, um canal único no lugar da tubulação em serpentina.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **ABSOLAR projeta fonte solar liderando matriz em 2040**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/absolar-projeta-fonte-solar-liderando-matrizem-2040/>. Acesso em: 16 nov. 2022.

AHMADI, P.; CHAPOY, A.; BURGASS, R. An investigation on the thermophysical properties of glycerol. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, Elsevier, v. 178, p. 106975, 2023.

ANEEL/ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 11 abr. 2023.

ARAMESH, M.; SHABANI, B. Metal foam-phase change material composites for thermal energy storage: a review of performance parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 155, p. 111919, 2022.

BAIS, A. R.; SUBHEDAR, D. G.; PANCHAL, S. Critical thickness of nano-enhanced RT-42 paraffin based battery thermal management system for electric vehicles: a numerical study. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 52, p. 104757, 2022.

BAYAT, M.; FARIDZADEH, M. R.; TOGHRAIE, D. Investigation of finned heat sink performance with nano enhanced phase change material (NePCM). **Thermal Science and Engineering Progress**, Elsevier, v. 5, p. 50–59, 2018.

BEJAN, A. **Convection heat transfer**. 4. ed. [S.l.]: John wiley & sons, 2013.

BLUDAU, W.; ONTON, A.; HEINKE, W. Temperature dependence of the band gap of silicon. **Journal of Applied Physics**, American Institute of Physics, v. 45, n. 4, p. 1846–1848, 1974.

BRIA, A.; RAILLANI, B.; CHAATOUF, D.; SALHI, M.; AMRAQUI, S.; MEZRHAB, A. Effect of PCM Thickness on the Performance of the Finned PV/PCM System. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 72, p. 3617–3625, 2023.

BROWNE, M. C.; LAWLOR, K.; KELLY, A.; NORTON, B.; MC CORMACK, S. J. Indoor characterisation of a photovoltaic/thermal phase change material system. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 70, p. 163–171, 2015.

CARMONA, M.; BASTOS, A. P.; GARCÍA, J. D. Experimental evaluation of a hybrid photovoltaic and thermal solar energy collector with integrated phase change material (PVT-PCM) in comparison with a traditional photovoltaic (PV) module. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 172, p. 680–696, 2021.

CHEN, T.; LIU, C.; MU, P.; SUN, H.; ZHU, Z.; LIANG, W.; LI, A. Fatty amines/graphene sponge form-stable phase change material composites with exceptionally high loading rates and energy density for thermal energy storage. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 382, p. 122831, 2020.

CHOI, S. H.; SOHN, D. K.; KO, H. S. Experimental study on PVT- PCM system performance using bubble-driven flow. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 146, p. 106919, 2023.

COLAROSSO, D.; PRINCIPI, P. Yearly performance of a PV-PCM and water storage for domestic hot water energy demand. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 274, p. 112451, 2022.

DETOLLENAERE, A.; VAN WETTER, J.; MASSON, G.; KAIZUKA, I.; JÄGER-WALDAU, A.; DONOSO, J. **Snapshot of Global PV Markets 2020 PVPS Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach**. [S.l.: s.n.], abr. 2020.

DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. **Energy procedia**, Elsevier, v. 33, p. 311–321, 2013.

EBRAHIMI, M. **Power Generation Technologies: Foundations, Design and Advances**. [S.l.]: Elsevier, 2023.

ENERDATA. **Consumo energetico mundial**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>. Acesso em: 7 jul. 2022.

GEISZ, J. F.; STEINER, M. A.; JAIN, N.; SCHULTE, K. L.; FRANCE, R. M.; MCMAHON, W. E.; PERL, E. E.; FRIEDMAN, D. J. Building a six-junction inverted

metamorphic concentrator solar cell. **IEEE Journal of Photovoltaics**, IEEE, v. 8, n. 2, p. 626–632, 2017.

GLOBALDATA. **Global solar photovoltaic capacity**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.globaldata.com/global-solar-photovoltaic-capacity-expected-to-exceed-1500gw-by-2030-says-globaldata/>. Acesso em: 10 set. 2021.

GOEL, V.; SAXENA, A.; KUMAR, M.; THAKUR, A.; SHARMA, A.; BIANCO, V. Potential of phase change materials and their effective use in solar thermal applications: A critical review. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, p. 119417, 2022.

GONZÁLEZ, R.; GONZÁLEZ, V.; ARIAS, E. Relación estructura – luminiscencia en aductos de condensación aldólica. **Ingenierías**, v. X, p. 69–75, jan. 2007.

GREEN, M.; DUNLOP, E.; HOHL-EBINGER, J.; YOSHITA, M.; KOPIDAKIS, N.; HAO, X. Solar cell efficiency tables (version 57). **Progress in photovoltaics: research and applications**, Wiley Online Library, v. 29, n. 1, p. 3–15, 2021.

GREEN, M. A. How did solar cells get so cheap? **Joule**, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 631–633, 2019.

GUNASEKARA, S. N.; STALIN, J.; MARÇAL, M.; DELUBAC, R.; KARABANOVA, A.; CHIU, J. N. W.; MARTIN, V. Erythritol, glycerol, their blends, and olive oil, as sustainable phase change materials. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 135, p. 249–262, 2017.

HAMADA, A.; EMAM, M.; REFAEY, H.; MOAWED, M.; ABDELRAHMAN, M. Investigating the performance of a water-based PVT system using encapsulated PCM balls: An experimental study. **Energy**, Elsevier, p. 128574, 2023.

HASAN, A.; MCCORMACK, S.; HUANG, M.; NORTON, B. Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 81, p. 322–329, 2014.

HASAN, A.; SARWAR, J.; ALNOMAN, H.; ABDELBAQI, e. S. Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate. **Solar Energy**, Elsevier, v. 146, p. 417–429, 2017.

HENDRICKS, J. H. C.; VAN SARK, W. G. J. H. M. Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials.

**Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 21, n. 4, p. 620–630, 2013.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *et al.*

**Fundamentals of heat and mass transfer**. [S.l.]: Wiley New York, 1996. v. 6.

ISLAM, M.; PANDEY, A.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. Recent progresses and achievements in photovoltaic-phase change material technology: a review with special treatment on photovoltaic thermal-phase change material systems. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 126, p. 177–204, 2016.

JÄGER-WALDAU, A. European Photovoltaics in world wide comparison. **Journal of non-crystalline solids**, Elsevier, v. 352, n. 9-20, p. 1922–1927, 2006.

JAKHRANI, A.; SAMO, S.; KAMBOH, S.; LABADIN, J.; RIGIT, A. An Improved Mathematical Model for Computing Power Output of Solar Photovoltaic Modules.

**International Journal of Photoenergy**, v. 2014, p. 1–9, mar. 2014.

JAMIL, F.; ALI, H. M.; NASIR, M. A.; KARAHAN, M.; JANJUA, M.; NASEER, A.; EJAZ, A.; PASHA, R. A. Evaluation of photovoltaic panels using different nano phase change material and a concise comparison: An experimental study. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 169, p. 1265–1279, 2021.

JAVIDNIA, S. **Condições de teste STC, PTC and NOCT**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://solarmazd.com/stc-ptc-noct-what-do-they-mean-and-how-to-use-them/>.

Acesso em: 26 nov. 2023.

JOSHI, S. S.; DHOBLE, A. S. Photovoltaic-Thermal systems (PVT): Technology review and future trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 92, p. 848–882, 2018.

KHODADADI, M.; SHEIKHOLESAMI, M. Numerical simulation on the efficiency of PVT system integrated with PCM under the influence of using fins. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 233, p. 111402, 2021.

KUMAR, R.; ROSEN, M. A. Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 31, n. 8-9, p. 1402–1410, 2011.

LI, J.; ZHANG, W.; XIE, L.; LI, Z.; WU, X.; ZHAO, O.; ZHONG, J.; ZENG, X. A hybrid photovoltaic and water/air based thermal (PVT) solar energy collector with integrated PCM for building application. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 199, p. 662–671, 2022.

LIU, Y.; LI, Y.; WU, Y.; YANG, G.; MAZZARELLA, L.; PROCEL-MOYA, P.; TAMBOLI, A. C.; WEBER, K.; BOCCARD, M.; ISABELLA, O. *et al.* High-efficiency silicon heterojunction solar cells: materials, devices and applications. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, Elsevier, v. 142, p. 100579, 2020.

MAU, S.; JAHN, U. 'Performance analysis of grid-connected PV systems. **Arsenal Res., Bus. Area Renew. Energy Technol., Vienna, Austria, Tech. Rep. IEA-PVPS**, v. 2, p. 2006, 2006.

NATIONAL-WEATHER-SERVICE-OFFICE. **Las Vegas Climate book**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: [https://www.weather.gov/vef/lasvegas\\_climate\\_book](https://www.weather.gov/vef/lasvegas_climate_book). Acesso em: 18 dez. 2022.

NEOSOLAR. **Características do painel solar fotovoltaico Yingli YL010P-17b**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl010p-17b-10wp.html>. Acesso em: 7 jul. 2023.

NREL. **Best Research-Cell Efficiency Chart**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 10 fev. 2022.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**. [S.l.]: Blucher São Paulo, 1997. v. 3.

ONU. **Net Zero Coalition**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>. Acesso em: 10 jul. 2021.

OSAKA, W. G. **proposta de sistema fotovoltaico-térmico com material de mudança de fase para a melhoria da eficiência energética**. 2019. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas brasileiro de energia solar - 2 ed. **São José dos Campos: INPE**, p. 80, 2017.

PRASAD, S.; SCHUMACHER, H.; GOPINATH, A. **High-speed electronics and optoelectronics: devices and circuits**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009.

PREET, S.; BHUSHAN, B.; MAHAJAN, T. Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). **Solar Energy**, Elsevier, v. 155, p. 1104–1120, 2017.

RAD, M. A. V.; KASAEIAN, A.; MOUSAVI, S.; RAJAEI, F.; KOURAVAND, A. Empirical investigation of a photovoltaic-thermal system with phase change materials and aluminum shavings porous media. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 167, p. 662–675, 2021.

RAHAEI, A.; RAFEE, R.; ZARGARABADI, M. R. A photovoltaic thermal system with a complete contact between water and PV modules suitable for district heating and electric power generation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Elsevier, v. 47, p. 101325, 2021.

REJEB, O.; SARDARABADI, M.; MÉNÉZO, C.; PASSANDIDEH-FARD, M.; DHAOU, M. H.; JEMNI, A. Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 110, p. 367–377, 2016.

RUBITHERM. **RT42 datasheet**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: [https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata\\_RT42\\_EN\\_09102020.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT42_EN_09102020.PDF). Acesso em: 16 nov. 2022.

SALUJA, G. POTENTIAL OF SOLAR HOT WATER HEATING SYSTEMS AT HIGHER LATITUDE LOCATIONS. In: ENERGY Developments: New Forms, Renewables, Conservation. [S.l.]: Elsevier, 1984. P. 199–202.

SARI, A.; BIÇER, A.; KARAIPEKLI, A.; ALKAN, C.; KARADAG, A. Synthesis, thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters with glycerol as novel solid–liquid phase change materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 94, n. 10, p. 1711–1715, 2010. ISSN 0927-0248.

SHOCKLEY, W. The Shockley-Queisser limit. **J. Appl. Phys**, v. 32, n. 3, p. 510–519, 1961.

SIMÓN-ALLUÉ, R.; GUEDEA, I.; COCA-ORTEGÓN, A.; VILLÉN, R.; BRUN, G. Performance evaluation of PVT panel with phase change material: Experimental study in lab testing and field measurement. **Solar Energy**, Elsevier, v. 241, p. 738–751, 2022.

SLADE, A.; GARBOUSHIAN, V. 27.6% efficient silicon concentrator solar cells for mass production. In: TECHNICAL Digest, 15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Beijing. [S.l.: s.n.], 2005.

STOFFEL, T.; ANDREAS, A. **Nevada Power: Clark Station; Las Vegas, Nevada (Data)**. [S.l.], 2006.

TAKAMOTO, T.; WASHIO, H.; JUSO, H. Application of InGaP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells to space use and concentrator photovoltaic. In: IEEE. 2014 IEEE 40th photovoltaic specialist conference (PVSC). [S.l.: s.n.], 2014. P. 0001–0005.

THERISTIS, M.; ARNAOUTAKIS, G.; SARMAH, N.; MALLICK, T. K.; O'DONOVAN, T. S. Solar spectrum dependent thermal model for HCPV systems. In: 13TH UK Heat Transfer Conference. [S.l.: s.n.], 2013.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y.; NOUSIA, T.; SOULIOTIS, M.; YIANOULIS, P. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. **Solar energy**, Elsevier, v. 72, n. 3, p. 217–234, 2002.

VOSSIER, A.; GUALDI, F.; DOLLET, A.; ARES, R.; AIMEZ, V. Approaching the Shockley-Queisser limit: General assessment of the main limiting mechanisms in photovoltaic cells. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 117, n. 1, 2015.

WEATHERSPARK. **Nebulosidade em 2022 em Curitiba**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/h/y/29910/2022/Condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-hist%C3%B3ricas-durante-2022-em-Curitiba-Brasil>. Acesso em: 8 ago. 2023.

WEATHERSPARK. **Condições meteorológicas em 9 de junho em Curitiba (2022)**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/d/29910/6/9/Condi%C3%A7%C3%B5es->

meteorol%5C%C3%5C%B3gicas-caracter%5C%C3%5C%ADsticas-de-Curitiba-Brasil-em-9-de-junho#Figures-WindSpeed. Acesso em: 10 mai. 2023.

WILD-SCHOLTEN, M. M. de. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 119, p. 296–305, 2013.

XING, Y.; HAN, P.; WANG, S.; LIANG, P.; LOU, S.; ZHANG, Y.; HU, S.; ZHU, H.; ZHAO, C.; MI, Y. A review of concentrator silicon solar cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 51, p. 1697–1708, 2015.

ZONDAG, H.; DE VRIES, D.; VAN HELDEN, W.; VAN ZOLINGEN, R.; VAN STEENHOVEN, A. The yield of different combined PV-thermal collector designs. **Solar energy**, Elsevier, v. 74, n. 3, p. 253–269, 2003.