

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO LEINEKER OCHOSKI MACHADO

**SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/TÉRMICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA E AQUECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO TERMOSSIFÕES**

PONTA GROSSA

2022

PEDRO LEINEKER OCHOSKI MACHADO

**SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/TÉRMICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA E AQUECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO TERMOSSIFÕES**

**Hybrid Photovoltaic/Thermal System for Power Generation and Water Heating
using Thermosyphons**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Área de Concentração: Térmicas e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*

Coorientador: Prof. Dr. *Romeu Miqueias Szmoski*

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



PEDRO LEINEKER OCHOSKI MACHADO

**SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/TÉRMICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E
AQUECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO TERMOSSIFÕES**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Térmica E Fluidos.

Data de aprovação: 10 de Fevereiro de 2022

Prof Thiago Antonini Alves, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Gerson Henrique Dos Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Kamal Abdel Radi Ismail, Doutorado - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Prof Moises Alves Marcelino Neto, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Romeu Miqueias Szmoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/02/2022.

Dedico este trabalho aos meus pais, por
me proporcionarem a oportunidade de
estudar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado a capacidade de aprender e a oportunidade de estudar.

Aos meus pais *Vinicius e Andréa* e avós *Oswaldo e Rosicler, Vicente e Zélia*, por terem sempre me incentivado a estudar e nunca desistir. Todos são exemplos de esforço e dedicação para mim, e o apoio que me deram foi fundamental para a conquista dos meus sonhos. Ao meu irmão *Vitor* e minha cunhada *Isabeli*, pelo companheirismo para tudo, seja nos momentos de lazer, descontração, estudo ou quando mais precisei de ajuda.

Aos meus familiares em geral, pois acredito que sem o apoio essa jornada seria muito mais difícil e dolorosa, em especial à minha prima *Taine* e seu esposo *Leandro*, por se mostrarem sempre presentes e buscarem me proporcionar momentos de diversão, me ajudando a me desligar um pouco e aprender a apreciar as pequenas coisas da vida.

Aos meus amigos, em especial *Isaque, Luane, Laise, Fernando, Karine, Daniel e Viviane* por, mesmo à distância, fazerem parte do meu dia a dia com conversas, risadas, músicas, jogos e reflexões.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves* e ao meu coorientador Prof. Dr. *Romeu Miqueias Szmoski*, pela sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

Aos meus primeiros orientadores de Iniciação Científica, Prof. Dr. *Marcos V. Barbosa* e Prof. Dr. *Luiz E. M. Lima*, por terem me direcionado para a minha atual área de pesquisa, pela amizade e por todos os conselhos recebidos ao longo de minha trajetória acadêmica.

Aos membros do LabCT por toda a ajuda e cooperação durante a realização de minhas atividades, especialmente *Felipe, Guilherme, e Luis*, por todo apoio desde o início das minhas atividades no laboratório, *Carlos* pelas risadas e pela parceria, e *Victor*, amigo de infância, companheiro de engenharia, trabalhos, artigos, publicações, futebol e demais atividades.

Ao técnico de laboratório *Eriel* por toda a ajuda no laboratório de usinagem e à Secretaria do Curso por todo apoio. À UTFPR e CAPES (número de financiamento: 40006018029P3) pela bolsa do programa. Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“The meaning and purpose of dancing is the dance. Like music also, it is fulfilled in each moment of its course. You do not play a sonata in order to reach the final chord, and if the meaning of things were simply in ends, composers would write nothing but finales.”
(WATTS, A. W., 1951)

RESUMO

A busca de novas fontes e tecnologias renováveis que permitam a substituição de combustíveis não renováveis e de elevado potencial de degradação ambiental, principalmente nas duas últimas décadas tem sido muito elevada. Uma das fontes renováveis de destaque é a energia solar, que apresenta elevado potencial no território brasileiro e pode ser aproveitada por meio de coletores solares e painéis fotovoltaicos. Apesar do elevado potencial, tal forma de energia apresenta baixa participação na matriz energética brasileira, principalmente devido ao elevado custo de implementação e à baixa eficiência de dispositivos fotovoltaicos que, a cada acréscimo de 1°C em relação à sua temperatura ideal de funcionamento, perdem cerca de 0,4% de eficiência. Este estudo experimental tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico utilizando um painel fotovoltaico e termossifões. Para isso, os termossifões foram inseridos em um meio absorvedor (barras chatas de alumínio) em contato direto com o painel fotovoltaico, retirando energia desse na forma de calor e transferindo tal energia para a água proveniente de um sistema de circulação. O sistema híbrido foi testado em comparação com um painel fotovoltaico comercial, e os resultados mostraram que o meio absorvedor e os termossifões não foram capazes de realizar o resfriamento do painel fotovoltaico, o sistema PV/T apresentou uma temperatura média de 56,3°C, ao passo que o painel comercial apresentou uma temperatura média de 49,0°C, resultando em eficiências elétricas médias de aproximadamente 14,09% e 14,65%. Considerando a parcela térmica, o sistema PV/T apresentou uma eficiência total média de aproximadamente 45,75%, enquanto o painel fotovoltaico comercial apresentou uma eficiência total média de aproximadamente 12,69%, cumprindo o objetivo de elevar a eficiência do dispositivo e também possibilitar a geração de dois tipos de energia distintos, elétrica e térmica.

Palavras-chave: energia renovável; energia solar; painel fotovoltaico; termossifão; sistema híbrido fotovoltaico/térmico.

ABSTRACT

The search for new renewable sources and technologies that allow the substitution of non-renewable fuels and of high potential for environmental degradation, especially in the last two decades, has been very high. One of the most prominent renewable sources is solar energy, which has a high potential in Brazil and can be harnessed through solar collectors and photovoltaic panels. Despite the high potential, this form of energy has a low participation in the Brazilian energy matrix, mainly due to the high costs of implementation and low efficiency of photovoltaic devices that, for each 1°C increase in relation to its ideal operating temperature, lose about 0.4% of efficiency. This experimental study aims to develop a hybrid photovoltaic/thermal system using a photovoltaic panel and thermosyphons. For this, the thermosyphons were inserted in an absorber medium (aluminum flat bars) in direct contact with the photovoltaic panel, taking energy from it in the form of heat and transferring such energy to the water coming from a circulation system. The hybrid system was tested in comparison with a commercial photovoltaic panel, and the results showed that the absorbing medium and the thermosyphons were not able to perform the cooling of the photovoltaic panel, the PV/T system had an average temperature of 56.3°C, while the PV had an average temperature of 49.0°C, resulting in electrical efficiencies of 14.09% and 14.65%. Considering the thermal part, the system provided an average total efficiency of 45.75%, while the PV provided an average total efficiency of 12.69%, achieving the goal of elevating the efficiency of the PV panel, while also being able to generate both kinds of energy, electrical and thermal.

Keywords: renewable energy; solar energy; photovoltaic panel; thermosyphon; hybrid photovoltaic/thermal system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Média anual de irradiação solar no território brasileiro	21
Figura 2 – Diagrama de um sistema fotovoltaico	30
Figura 3 – Hierarquização entre painel – módulo – célula.....	31
Figura 4 – Camadas de semicondutor em uma célula fotovoltaica	32
Figura 5 – Esquema representativo do <i>Aquecedor de Perkins</i>	35
Figura 6 – Esquema representativo do <i>Forno de Perkins</i>	35
Figura 7 – Esquema representativo do dispositivo de <i>F.W. Gay</i>	36
Figura 8 – Diagrama esquemático de um termossifão	38
Figura 9 – Identificação das resistências térmicas de um termossifão	46
Figura 10 – Esquema do sistema PV/T analisado em <i>Gang et al. (2011)</i>	51
Figura 11 – Seção transversal do sistema PV/T analisado em <i>Gang et al. (2011)</i>	52
Figura 12 – Sistema PV/T sem isolamento – <i>Moradgholi, Nowee & Abrishmachi (2014)</i>	55
Figura 13 – Sistema PV/T – <i>Brahim & Jemni (2021)</i>	59
Figura 14 – Representação esquemática do aparato experimental.....	62
Figura 15 – Sistema híbrido fotovoltaico/térmico	67
Figura 16 – Posicionamento dos termopares no termossifão [mm].....	70
Figura 17 – Esquema das ligações elétricas do sistema de aquisição de dados	84
Figura 18 – Conexão entre resistores e módulo relé	85
Figura 19 – Conexões do módulo relé.....	86
Figura 20 – Conexões do sensor de corrente.....	87
Figura 21 – Conexões do divisor de tensão.....	88
Figura 22 – Configuração dos resistores	88
Figura 23 – Associação dos resistores	89
Figura 24 – Simulação do divisor de tensão.....	90
Figura 25 – Seção transversal do sistema híbrido PV/T	92
Figura 26 – Barras chatas de alumínio.....	92
Figura 27 – Suportes em perfil de alumínio: (a) painel convencional; (b) sistema PV/T.	94
Figura 28 – Posicionamento dos termopares na base do painel fotovoltaico...97	

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Sistema de circulação fechado.....	63
Fotografia 2 – Circulador e medidor de vazão.....	64
Fotografia 3 – Sistema de circulação e aquisição de dados	65
Fotografia 4 – Pátio solar do LabSOLAR	66
Fotografia 5 – Aparato experimental para testes de termossifões	70
Fotografia 6 – Fita resistiva, termopares e cabos conectados ao termossifão .	71
Fotografia 7 – Isolamento do termossifão e posicionamento para testes.	72
Fotografia 8 – Sistema de aquisição de dados para aplicação de carga resistiva	82
Fotografia 9 – Fresamento lateral das barras de alumínio	93
Fotografia 10 – Furação das barras de alumínio	94
Fotografia 11 – Painel fotovoltaico comercial no suporte	95
Fotografia 12 – Preparo do painel fotovoltaico do sistema PV/T	96
Fotografia 13 – Conexões no <i>manifold</i>	97
Fotografia 14 – Aplicação de pasta térmica na base do painel fotovoltaico.....	98
Fotografia 15 – Montagem do meio absorvedor no painel fotovoltaico	99
Fotografia 16 – Sistema PV/T montado em seu suporte.....	100
Fotografia 17 – Posicionamento dos painéis fotovoltaicos durante os testes	101
Fotografia 18 – Aparato experimental para coleta de dados do sistema PV/T	102
Fotografia 19 – Componentes de um termossifão	141
Fotografia 20 – Limpeza dos componentes por banho ultrassônico	142
Fotografia 21 – Processo de montagem dos termossifões	142
Fotografia 22 – Teste de estanqueidade	143
Fotografia 23 – Processo de evacuação	143
Fotografia 24 – Término do processo de evacuação	144
Fotografia 25 – Processo de preenchimento	145
Fotografia 26 – Posicionamento do conjunto tampão/tubo de PVC	146
Fotografia 27 – Preenchimento com Resina	146
Fotografia 28 – Sistema de circulação de água para teste dos termossifões .	147
Fotografia 29 – Entrelaçamento dos materiais semicondutores do termopar.	152
Fotografia 30 – Processo de soldagem do termopar	153
Fotografia 31 – Resultado do processo de soldagem dos termopares.....	153

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Matriz de Produção de Energia Elétrica no Brasil – 2020	20
Gráfico 2 – Características de painel fotovoltaico de acordo com irradiação solar.....	33
Gráfico 3 – Características de painel fotovoltaico de acordo com temperatura.....	33
Gráfico 4 – Influência da temperatura na eficiência de um painel fotovoltaico.....	34
Gráfico 5 – Temperatura de operação [°C] para diferentes fluidos de trabalho.....	39
Gráfico 6 – Figura de Mérito de alguns fluidos de trabalho	41
Gráfico 7 – Parâmetro f_1 do número de <i>Kutateladze</i>	43
Gráfico 8 – Parâmetro f_3 do número de <i>Kutateladze</i>	44
Gráfico 9 – Distribuição de temperatura <i>versus</i> tempo para o Termossifão A.....	73
Gráfico 10 – Distribuição de temperatura <i>versus</i> tempo para o Termossifão B.....	74
Gráfico 11 – Distribuição de temperatura <i>versus</i> tempo para o Termossifão C.....	75
Gráfico 12 – Distribuição de temperaturas <i>versus</i> tempo para o Termossifão B até 100W.....	76
Gráfico 13 – Distribuição de temperatura <i>versus</i> tempo para o Termossifão C até 100W.....	76
Gráfico 14 – Temperatura <i>versus</i> comprimento para o Termossifão A.....	77
Gráfico 15 – Temperatura <i>versus</i> comprimento para o Termossifão B.....	77
Gráfico 16 – Temperatura <i>versus</i> comprimento para o Termossifão C	78
Gráfico 17 – Comparação da resistência térmica entre os Termossifões A, B e C.....	79
Gráfico 18 – Distribuição de temperatura <i>versus</i> tempo para a RP de 30%	79
Gráfico 19 – Distribuição de temperatura <i>versus</i> tempo para a RP de 40%	80
Gráfico 20 – Distribuição de temperatura <i>versus</i> tempo para a RP de 60%	81
Gráfico 21 – Comparação das resistências térmicas entre as razões de preenchimento.....	81
Gráfico 22 – Comparação de distribuição de temperatura entre os painéis fotovoltaicos.....	110
Gráfico 23 – Temperatura do meio absorvedor e acrílico do sistema PV/T	110
Gráfico 24 – Temperaturas dos termossifões do sistema PV/T: (a) Termossifão 1; (b) Termossifão 2; (c) Termossifão 3; (d) Termossifão 4.....	112
Gráfico 25 – Comparação entre sistema PV/T e painel fotovoltaico comercial: (a) Eficiência Elétrica; (b) Temperatura	113
Gráfico 26 – Eficiências de Primeira Lei para vazão volumétrica de 6,5L/min em dia ensolarado	114
Gráfico 27 – Eficiências de Segunda Lei para o sistema PV/T e painel fotovoltaico considerando vazão volumétrica de 6,5 L/min.....	115
Gráfico 28 – Temperaturas de entrada e saída da água no <i>manifold</i> para vazão volumétrica de 6,5L/min no dia ensolarado	116
Gráfico 29 – Comparação de temperaturas entre os painéis fotovoltaicos para o dia nublado	117
Gráfico 30 – Comparação da temperatura do painel fotovoltaico do sistema PV/T nos dias nublado e ensolarado.....	117
Gráfico 31 – Temperaturas dos termossifões do sistema PV/T no dia nublado: (a) Termossifão 1; (b) Termossifão 2; (c) Termossifão 3; (d) Termossifão 4	118
Gráfico 32 – Comparação de eficiência elétrica do sistema PV/T nos dias nublado e ensolarado	119

Gráfico 33 – Comparação das eficiências de Primeira Lei nos dias nublado e ensolarado	119
Gráfico 34 – Comparação do calor transferido para a água nos dias nublado e ensolarado	120
Gráfico 35 – Comparação das eficiências de Segunda Lei para os sistemas PV/T nos dias nublado e ensolarado	121
Gráfico 36 – Eficiências de Primeira Lei para vazão volumétrica de 6,5L/min em dia nublado	122
Gráfico 37 – Eficiências de Segunda Lei para vazão volumétrica de 6,5L/min em dia nublado	122
Gráfico 38 – Temperaturas e irradiação solar para a vazão volumétrica de 1,5L/min.....	123
Gráfico 39 – Comparação da temperatura do sistema PV/T com diferentes vazões volumétricas	124
Gráfico 40 – Comparação da eficiência elétrica do sistema PV/T para as vazões volumétricas	124
Gráfico 41 – Comparação das eficiências de Primeira Lei para o sistema PV/T submetido a diferentes vazões volumétricas	125
Gráfico 42 – Comparação do calor transferido para a água no <i>manifold</i> pelo sistema PV/T em duas vazões volumétricas diferentes.....	126
Gráfico 43 – Temperaturas de entrada e saída no <i>manifold</i> para vazão volumétrica de 1,5L/min	127
Gráfico 44 – Comparação das eficiências de Segunda Lei para o sistema PV/T submetidos a diferentes vazões volumétricas	127
Gráfico 45 - Influência da vazão mássica nos parâmetros do sistema PV/T ...	128
Gráfico 46 – Comparação das eficiências de Primeira Lei para a vazão volumétrica de 1,5L/min	129
Gráfico 47 – Comparação das eficiências de Segunda Lei para a vazão volumétrica de 1,5L/min	129
Gráfico 48 – Regressão linear dos dados de temperatura para calibração de um termopar.....	155
Gráfico 49 – Comparação entre valores e suas incertezas	156
Gráfico 50 – Calibração da aquisição de tensão	161
Gráfico 51 – Calibração da aquisição de corrente	162
Gráfico 52 – Obtenção da potência máxima em diferentes cargas resistivas .	165
Gráfico 53 – Curva característica do painel fotovoltaico: (a) Irradiação solar constante; (b) Irradiação solar variável.....	166
Gráfico 54 – Influência da irradiação solar no desempenho do painel fotovoltaico	166

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lista de materiais recomendados para o invólucro em função do fluido de trabalho	40
Quadro 2 – Incertezas de medida	108
Quadro 3 – Propagação de incertezas para os valores de eficiências	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do painel fotovoltaico	68
Tabela 2 – Dimensões dos termossifões [mm].....	69
Tabela 3 – Exemplo de calibração de um termopar.	154
Tabela 4 – Resultados da calibração de um termopar.....	156
Tabela 5 – Aquisição de dados dos painéis fotovoltaicos	164
Tabela 6 – Dados experimentais do sistema PV/T para a vazão volumétrica de 6,5L/min em dia ensolarado.	169
Tabela 7 – Dados experimentais do sistema PV/T para a vazão volumétrica de 6,5L/min em dia nublado.....	169
Tabela 8 – Dados experimentais do sistema PV/T para a vazão volumétrica de 1,5L/min.....	170

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área	$[m^2]$
Bo	Número de <i>Bond</i>	$[]$
C_p	Calor específico a pressão constante	$[J/KgK]$
d	Diâmetro	$[m]$
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
G	Irradiação solar	$[W/m^2]$
h_{IV}	Calor latente de vaporização	$[J/kg]$
h_e	Coeficiente convectivo externo	$[W/m^2 \cdot K]$
k	Condutividade térmica	$[W/m \cdot K]$
l	Comprimento	$[m]$
M'	Figura de mérito	$[kg/s^{5/2} \cdot K^{3/4}]$
P	Pressão	$[Pa]$
q	Taxa de transferência de calor	$[W]$
q_e	Calor estimado	$[W]$
q_{th}	Carga térmica aplicada	$[W]$
R_{th}	Resistência térmica	$[K/W]$
RP	Razão de preenchimento	$[%]$
T	Temperatura	$[K]$
V	Volume	$[m^3]$

Letras Gregas

μ	Viscosidade dinâmica	[Pa·s]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
σ	Tensão superficial	[N/m]
β	Ângulo do tubo com a horizontal	[°]

Subscritos

<i>adiab</i>	Região adiabática
<i>amb</i>	Ambiente
<i>cond</i>	Condensador
<i>ef</i>	Efetivo
<i>evap</i>	Evaporador
<i>ext</i>	Externo
<i>l</i>	Líquido
<i>lv</i>	Vaporização
<i>máx</i>	Máximo
<i>p</i>	Piscina
<i>f</i>	Filme
<i>sat</i>	Saturação
<i>th</i>	Térmica
<i>t</i>	Transversal
<i>v</i>	Vapor
<i>atm</i>	Atmosférica
<i>ebu</i>	Ebulição
<i>i</i>	Interno
<i>e</i>	Externo
<i>s</i>	Sólido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Delimitação do problema	21
1.2	Justificativa	22
1.3	Objetivos	22
1.3.1	Objetivo geral	23
1.3.2	Objetivos específicos	23
1.4	Organização da dissertação	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	O uso de energia elétrica	25
2.2	O uso de fontes de energia renováveis	25
2.2.1	Principais fontes de energia renovável	26
2.3	Energia solar	28
2.4	Energia solar fotovoltaica	29
2.4.1	Sistema fotovoltaico	29
2.4.2	Módulo fotovoltaico	30
2.4.3	Célula fotovoltaica	31
2.4.4	Influência da irradiação solar e da temperatura	32
2.5	Contextualização histórica e aplicação de termossifões	34
2.6	Princípio de funcionamento de um termossifão	36
2.7	Principais componentes de um termossifão	38
2.7.1	Invólucro	38
2.7.2	Fluido de trabalho	39
2.7.3	Figura de mérito	40
2.8	Limites operacionais	41
2.8.1	Limite viscoso	41
2.8.2	Limite sônico	42
2.8.3	Limite de arrasto	43
2.8.4	Limite de ebulição	45
2.9	Metodologia de projeto de termossifões	45
2.9.1	Resistência entre meio externo e parede	46
2.9.2	Resistências de condução pela parede	47
2.9.3	Resistências de condensação e ebulição	47
2.9.4	Resistência térmica do material do invólucro	49

2.9.5	Demais resistências térmicas	49
2.9.6	Etapas do projeto térmico de um termossifão	50
2.10	Estado da arte	51
2.10.1	Lacunas	60
3	METODOLOGIA	62
3.1	Aparato experimental	62
3.1.1	Sistema de circulação	62
3.1.2	Sistema híbrido fotovoltaico/térmico	66
3.2	Painel fotovoltaico	67
3.3	Termossifões	68
3.3.1	Teste experimental dos termossifões	69
3.3.2	Resultado da seleção dos termossifões	73
<u>3.3.2.1</u>	<u>Influência do diâmetro das seções</u>	<u>73</u>
<u>3.3.2.2</u>	<u>Influência da razão de preenchimento</u>	<u>79</u>
3.4	Sistema de aquisição de dados para aplicação de cargas	82
3.4.1	Conexão entre resistores	85
3.4.2	Conexões do módulo relé	86
3.4.3	Sensor de corrente	87
3.4.4	Divisor de tensão	87
3.5	Meio absorvedor	91
3.6	Montagem do sistema PV/T	94
3.7	Procedimento experimental	100
3.8	Redução de dados	102
3.9	Incertezas experimentais	106
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
4.1	Sistema PV/T	109
4.1.1	Vazão volumétrica de 6,5L/min	109
<u>4.1.1.1</u>	<u>Dia ensolarado</u>	<u>109</u>
<u>4.1.1.2</u>	<u>Dia nublado</u>	<u>116</u>
4.1.2	Vazão volumétrica de 1,5L/min	122
5	CONCLUSÃO	131
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	132
	REFERÊNCIAS	134
	APÊNDICE A - Construção dos termossifões e dimensões das tampas e conexão de cobre	139

APÊNDICE B - Construção e calibração de termopares	151
APÊNDICE C - Programação e calibração do sistema de aquisição de dados para aplicação de cargas resistivas	157
APÊNDICE D - Principais resultados obtidos pelo sistema de aquisição de dados para aplicação de cargas resistivas	163
APÊNDICE E - Dados experimentais dos testes do sistema PV/T ...	168

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de uma região está diretamente relacionado com a sua capacidade energética. Com isso, a partir de pesquisas acadêmicas e políticas ambientais, evidencia-se a busca por novas fontes e tecnologias renováveis que permitam a descentralização da produção de energia e substituição de combustíveis não renováveis e de elevado potencial de degradação ambiental, principalmente nas duas últimas décadas (LACERDA, 2015; ADAMS; KLOBODU; APIO, 2018).

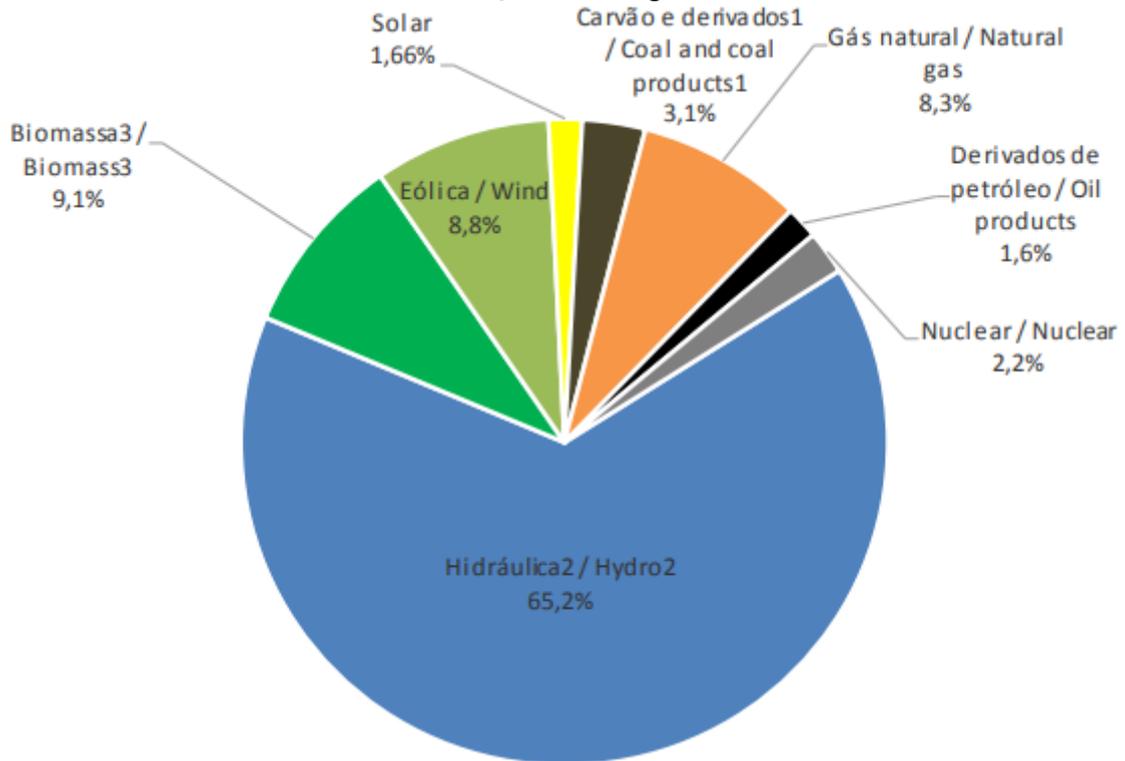
O recente desenvolvimento acerca do suprimento de energia sustentável pode estar diretamente relacionado com a transição energética para fontes renováveis, já que essas, além de se apresentarem como fontes relativamente limpas, podem ser utilizadas de maneira descentralizada. Isso representa papel crucial na transição energética, obtendo um setor de energia mais diversificado e democratizado, uma vez que pessoas e indústrias passaram a investir em formas de energia para autoconsumo e que reduzem suas contas, abrindo portas para novos entrantes nos mercados de energia, além de permitir maior estabilidade da rede elétrica (BRAUN *et al.*, 2009; KAPHENGST; VELTEN, 2014; HENTSCHEL; KETTER; COLLINS, 2018).

Apesar dessa transição, a produção de energia global ainda é majoritariamente baseada no uso de combustíveis fósseis. No ano de 2020, 34% do total da energia foi gerada com base em petróleo, seguido por gás natural (30,6%), carvão (13,2%), energia nuclear (9,6%), bioenergia (6,6%), energia hidrelétrica (2,6%), além de outras fontes (3,4%) (IEA, 2021).

Tratando-se do Brasil, o país é o que mais utiliza recursos renováveis em sua matriz energética. O Gráfico 1 apresenta a matriz energética brasileira referente à produção de energia no ano de 2020.

Pelo Gráfico 1 observa-se que 84,76% da energia gerada em território brasileiro provém de fontes renováveis, sendo a geração hidráulica o principal meio de produção de energia representando 65,2% da geração total do país. Tratando-se de outras fontes renováveis, têm-se a geração eólica representando 8,8% e a biomassa representando 9,1%. A energia solar representa apenas 1,66% do total gerado em território brasileiro (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2021).

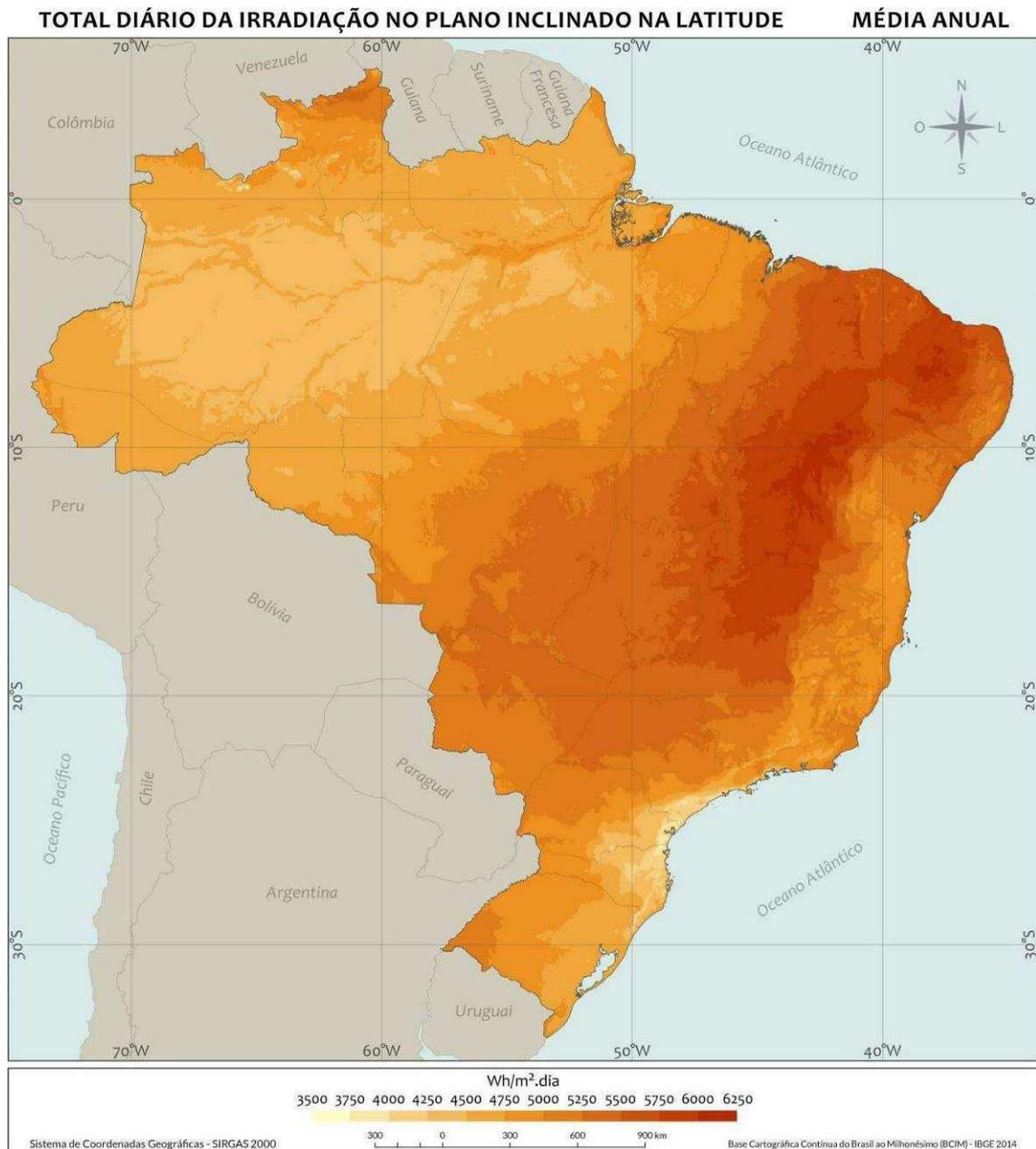
Gráfico 1 – Matriz de Produção de Energia Elétrica no Brasil – 2020



Fonte: Balanço Energético Nacional (2021)

Apesar da baixa geração em comparação com as demais fontes, o Brasil possui elevado potencial energético tratando-se da geração solar. Isso se deve ao fato de que a maior parte de seu território se encontra na região subtropical, uma vez que a intensidade dos raios solares depende da latitude geográfica da área em questão e da estação do ano (PEREIRA *et al.*, 2017). A Figura 1 apresenta a média anual de irradiação solar no território brasileiro.

Figura 1 – Média anual de irradiação solar no território brasileiro



Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2017)

1.1 Delimitação do problema

Como se pode perceber, apesar de todo o potencial energético, a quantidade de energia solar aproveitada é pequena em relação ao total de energia utilizando-se fontes renováveis. Isso porque um painel fotovoltaico, por exemplo, possui baixa eficiência, uma vez que uma pequena parte da radiação solar absorvida por suas células fotovoltaicas é realmente convertida em energia elétrica, ao passo que a parte majoritária é transformada em calor e é responsável pela elevação da temperatura

das células e painel fotovoltaico. Os níveis de decréscimo de energia variam de acordo com as características do painel fotovoltaico, como fabricante, potência e eficiência. Um estudo realizado com um painel fotovoltaico *Siemens*TM SM46 de 46W e eficiência de 9% indica que ocorre uma perda de cerca de 0,41% da eficiência do painel para cada acréscimo de 1°C na sua temperatura ótima de operação (TINOCO *et al.*, 2018).

1.2 Justificativa

Acredita-se ser de grande valia e importância para o cenário energético em geral, mais especificamente ao de fontes renováveis, realizar estudos que visem elevar a eficiência tanto elétrica quanto exergética de painéis fotovoltaicos. Dessa forma, nesta Dissertação de Mestrado é proposto um sistema híbrido fotovoltaico/térmico que possibilite o resfriamento de painéis fotovoltaicos ao mesmo tempo em que aquece água para consumo. Dessa maneira, o sistema englobará as duas principais formas de aproveitamento do potencial energético solar, a geração de energia elétrica e de energia térmica, tendendo a aumentar seus níveis de eficiência e elevar sua contribuição dentre as formas de geração de energia na matriz energética brasileira.

Além disso, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática sobre o estudo proposto, um sistema híbrido fotovoltaico/térmico utilizando painéis fotovoltaicos e termossifões, notou-se que as publicações sobre o tema são recentes e, especificamente em países da América Latina, escassas, além de apresentarem possibilidades de novas investigações, ou seja, apresentam lacunas. Isso demonstra que a temática vai de acordo com a tendência de desenvolvimento tecnológico voltado à questão ambiental e também se apresenta como uma boa oportunidade de pesquisa que, além de contribuir para o avanço da tecnologia, resultará em publicações de elevada relevância na comunidade científica.

1.3 Objetivos

Essa seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos dessa pesquisa de mestrado.

1.3.1 Objetivo geral

Realizar um estudo experimental visando o desenvolvimento e análise de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico para geração de energia elétrica e aquecimento de água a partir de termossifões e painéis fotovoltaicos.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos dessa Dissertação de Mestrado são:

- Projetar, construir e testar termossifões com diferentes configurações;
- Projetar, construir e testar um sistema de aquisição de dados de cargas resistivas para obtenção das curvas características do painel fotovoltaico que compõe o sistema híbrido fotovoltaico/térmico;
- Projetar, construir e testar um sistema híbrido fotovoltaico/térmico utilizando painéis fotovoltaicos e termossifões;
- Avaliar a eficiência térmica de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico;
- Comparar a eficiência elétrica de um sistema integrado painel fotovoltaico/termossifão e um painel fotovoltaico convencional;
- Avaliar a eficiência exergética de um sistema integrado painel fotovoltaico/termossifão em comparação a um painel fotovoltaico convencional;
- Avaliar a influência de parâmetros como irradiação solar e vazão de água nas eficiências de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico.

1.4 Organização da dissertação

No primeiro capítulo são apresentados aspectos gerais sobre o cenário energético global e também mais especificamente do Brasil, dando enfoque na energia solar. Apresentaram-se também os objetivos e a motivação para o estudo.

O Capítulo 2 contém um panorama sobre o uso de energia elétrica, o uso de energias renováveis e suas principais fontes, aspectos sobre a energia solar, a geração de energia solar via princípio fotovoltaico, os componentes de um sistema fotovoltaico e a influência da irradiação solar e temperatura na geração de energia pelas células fotovoltaicas. Além disso, é apresentada a fundamentação teórica sobre termossifões, incluindo a contextualização histórica, suas aplicações, princípios de funcionamento e projeto.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, incluindo o sistema de circulação de água, o sistema híbrido fotovoltaico/térmico, o processo de seleção e construção dos termossifões e o sistema de aquisição de dados a ser utilizado.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, desde a seleção dos termossifões (parâmetro geométrico e razão de preenchimento), o funcionamento do sistema de aquisição de dados de cargas resistivas, e os resultados do sistema híbrido fotovoltaico/térmico (PV/T) sob diferentes condições.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas pelo estudo e também as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentado um panorama sobre os processos de geração e transformação de energia, mais especificamente as renováveis, e suas principais fontes, especialmente a energia solar e o princípio fotovoltaico, além de apresentar a fundamentação teórica sobre termossifões, incluindo a contextualização histórica, suas aplicações, princípios de funcionamento e projeto. Por fim, apresenta-se a revisão de alguns trabalhos científicos acerca do tema desse trabalho.

2.1 O uso de energia elétrica

Nas sociedades mais primitivas, o consumo de energia era baseado primeiramente na queima de lenha para aquecimento em geral e cozer alimentos. Com o passar dos anos, esse consumo apresentou um grande crescimento, sendo então necessário procurar novas formas de obter essa energia. Durante a idade média cursos d'água e ventos foram utilizados como fonte geradoras, porém o consumo ainda crescente obrigou que, durante a revolução industrial, fontes como gás, petróleo e carvão começassem a serem utilizadas para gerar energia em grande escala (GOLDEMBERG & LUCON, 2007).

No ano de 2020, 34% do total da energia foi gerada com base em petróleo, seguido por gás natural (30,6%), carvão (13,2%), energia nuclear (9,6%), bioenergia (6,6%) e energia hidrelétrica (2,6%), além de outras fontes (3,4%) (IEA, 2021).

O uso de fontes fósseis acarreta na emissão de poluentes e gases de efeito estufa, além de colocar em risco o suprimento de longo prazo no planeta, uma vez que tais fontes não são inesgotáveis. Fatores como esses são responsáveis para o elevado crescimento do uso de energias renováveis, permitindo a geração de eletricidade e calor sem emissão de poluentes e de forma sustentável (GOLDEMBERG & LUCON, 2007; ANEEL, 2008).

2.2 O uso de fontes de energia renováveis

Atualmente, existe uma nova ordem mundial no quesito da energia. Busca-se uma autossuficiência na geração dessa em conjunto com uma diversificação da matriz energética, utilizando de fontes energéticas alternativas capazes de suprir a demanda energética nos países no caso da escassez de fontes fósseis. Tornou-se comum inclusive políticas governamentais de incentivo ao uso de energias renováveis a partir

de reduções de taxas e concessões, permitindo que o custo de produção de energia seja reduzido devido a uma maior competitividade (PACHECO, 2006; SHAHBAZ *et al.*, 2019).

Apesar de tais políticas, previsões apontam que o cenário tendencial para o ano de 2030 é de que o petróleo exercerá uma participação de 35% na geração energética mundial, ao passo que o carvão mineral e o gás natural corresponderão a 22% e 25% da oferta energética, respectivamente. O uso de fontes renováveis, que em 2008 correspondiam a 12,7% da oferta energética mundial, chegarão a apenas cerca de 14% de tal oferta nesse mesmo. Torna-se então necessário o aprimoramento da exploração de tais fontes de forma a se elevar a participação de fontes renováveis na geração energética mundial (BERMANN, 2008).

2.2.1 Principais fontes de energia renovável

As fontes renováveis de maior destaque são a energia eólica, biomassa, biogás, energia geotérmica, energia hidráulica, energia do mar e energia solar. Dependendo da topografia, localização geográfica e atividades econômicas de cada país, essas fontes podem ser exploradas em diferentes níveis (ANEEL, 2008; LIMA *et al.*, 2020).

A energia eólica consiste na energia cinética das massas de ar provocadas pelo aquecimento desigual na superfície da Terra. Atualmente, a energia eólica é utilizada para produção de energia elétrica em aerogeradores, desenvolvidos em 1888 por *Charles Bruch*, porém o uso da energia dos ventos é datado por volta de 200 a.C. a partir de moinhos na região da Pérsia (CUNHA *et al.*, 2019).

O uso da energia eólica apresentou um declínio no período da revolução industrial, marcada pela introdução do uso de combustíveis fósseis (gás natural, petróleo, carvão mineral) para geração de energia em processos produtivos. Com isso, a evolução da produção de aerogeradores em escala comercial teve seu início apenas a partir da década de 70, fato esse resultante da crise do petróleo que teve seu início nesse período (CUNHA *et al.*, 2019).

Tal evolução pode ser evidenciada pelo fato de que, no ano 2000, a capacidade global instalada de produção de energia elétrica a partir da energia eólica era de 23.900 MW, passando para 53.9581 MW no ano de 2017 (SILVA; AZEVEDO, 2021).

A biomassa consiste em qualquer matéria orgânica derivada de plantas, animais ou setores industriais que apresentam potenciais de ser reutilizados. Uma das principais vantagens da biomassa é o seu aproveitamento direto por meio da combustão da matéria orgânica em fornos ou caldeiras, sendo utilizada para a geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração, em que ocorre a geração de eletricidade e calor em conjunto (BRIDGWATER, 2007; OLSON *et al.*, 2012).

A energia geotérmica consiste na energia obtida pelo calor presente no interior da Terra. Para tal, utiliza-se de gêiseres (fontes de vapor com erupções periódicas) e também energias presentes na formação rochosa para realizar aquecimento da água, que posteriormente é aproveitada para geração de vapor em usinas termelétricas. Apesar de a primeira usina ser datada de 1904, a evolução de tal segmento é lenta e caracterizada por pequeno número de usinas geotérmicas (ANEEL, 2008).

A energia hidráulica, ou também denominada de energia hídrica, consiste no aproveitamento da energia cinética das massas de água de rios para a geração de energia elétrica. Sua grande vantagem é o fato de não contribuir para o aquecimento global e também ser totalmente renovável devido ao fato de o vapor de água se condensar na forma de nuvens e retornar para a superfície terrestre na forma de chuvas. Apesar disso, a participação da energia hidráulica na matriz energética mundial é pouco expressiva, correspondendo a uma média de 2% da produção total de energia entre os anos de 1973 e 2006 (ANEEL, 2008).

Pelo fato de a superfície do planeta Terra ser constituída majoritariamente por água, os oceanos e mares apresentam elevado potencial energético, tornando-se necessário o aprimoramento de tecnologias que possam aproveitar tal potencial. As principais formas de se obter energia pelos mares e oceanos consiste no aproveitamento do desnível promovido pelas marés, utilização da ondulação marítima, aproveitando a salinidade da água e também a diferença de temperatura existente entre a superfície e o fundo do mar. Apesar disso, a exploração dessa forma de energia ainda se encontra em fase de desenvolvimento, sendo então necessários estudos e aprimoramentos tecnológicos para elevar os níveis de eficiência na produção de energia elétrica (MARTINS, 2009).

2.3 Energia solar

De forma simplificada, o conceito de energia solar está baseado no aproveitamento da luz e do calor fornecido pela radiação solar. A energia do sol origina-se de um processo termonuclear que converte toneladas de hidrogênio em hélio a cada segundo, gerando calor e radiação eletromagnética. O calor mantém-se na superfície solar, sendo responsável por manter o processo termonuclear, ao passo que a radiação térmica é emitida para a vizinhança, atingindo a superfície terrestre com uma pequena fração de seu total. Tal fração poderia fornecer toda a energia necessária para o planeta Terra, porém as atuais tecnologias não possuem capacidade de aproveitar esse potencial energético ao todo (KABIR *et al.*, 2018).

A atmosfera terrestre é responsável pela forma como a radiação solar pode ser aproveitada, uma vez que parte dessa radiação é refletida, outra é absorvida pela atmosfera e, por fim, o restante da radiação ou é absorvida pela superfície terrestre, ou refletida para a atmosfera. Além disso, fatores como umidade do ar, quantidade de nuvens e também a distância que os raios solares percorrem pela atmosfera interferem diretamente na forma como a radiação solar alcançará a superfície terrestre. Apesar disso, a densidade de radiação provinda do sol é aproximadamente 5 mil vezes maior do que a densidade energética requerida pela população humana (GRASSL, 2007).

A energia solar pode ser aproveitada por tecnologias passivas ou ativas. Por definição, as tecnologias passivas não fazem a transformação da luz ou energia térmica em outra forma de energia, sendo utilizada majoritariamente para aquecimento de residências, por exemplo. Já as tecnologias ativas estão caracterizadas principalmente pelo uso de tecnologias fotovoltaicas e também tecnologias térmicas, como coletores solares (KABIR *et al.*, 2018).

Em relação ao Brasil, seu território recebe elevados índices de radiação solar quando comparado a países em que a tecnologia fotovoltaica é largamente utilizada na produção de energia elétrica. Apesar disso, o país ainda apresenta pequena participação da energia solar na matriz energética global, devendo-se principalmente à falta de políticas públicas de incentivo e também pelo fato de o custo de geração do sistema fotovoltaico não ser competitivo (PINHO & GALDINO, 2014).

2.4 Energia solar fotovoltaica

O uso de energia solar fotovoltaica vai muito além da diversificação da matriz energética de um país. Essa forma de geração de energia é uma ótima alternativa para levar eletricidade a localidades de difícil acesso, não supridas pela rede convencional. Além disso, destaca-se a questão da sustentabilidade envolvida ao uso de painéis fotovoltaicos, uma vez que é considerado um sistema de geração de energia limpa sem a emissão de poluentes (SALAMONI, 2009).

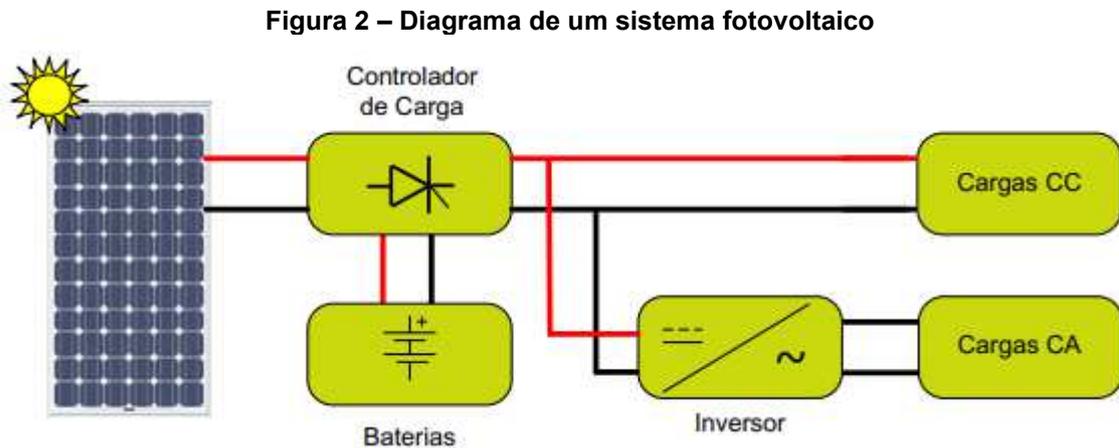
O efeito fotovoltaico foi descoberto por *Edmond Becquerel* em 1839, sendo que em 1876 foi construído o primeiro aparato fotovoltaico e, apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial, seguindo o crescimento da área da eletroeletrônica. Inicialmente, o desenvolvimento dessa tecnologia veio com interesse da área da telecomunicação, buscando fontes de energia para sistemas instalados em regiões remotas. Além disso, a corrida espacial também foi um agente impulsionador de tal tecnologia, sendo o sistema fotovoltaico o mais adequado para fornecer energia por longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço (PINHO & GALDINO, 2014).

Dados de 2014 apontam que a capacidade total mundial de geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos era de 177GW, sendo os países de maior capacidade Alemanha, China, Japão, seguidos por Itália e Estados Unidos. Esses dois últimos, em conjunto com a China, apresentaram-se como os países que tiveram os maiores aumentos em suas capacidades no ano de 2014 (PINTO, 2015). De acordo com estudos da *Bloomerang New Energy Finance* (BNEF), a geração fotovoltaica totalizou um acréscimo total de 1400% entre os anos de 2010 a 2019, passando de 43,7GW para um total de 651GW gerados (VIALLI, 2020).

2.4.1 Sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é composto por módulos fotovoltaicos e um conjunto de equipamentos complementares, como controladores, acumuladores, inversores e circuitos de segurança. Os controladores possuem como função realizar uma proteção do sistema contra sobrecargas, além de impedir e prevenir possíveis falhas do sistema, protegendo todos os componentes em geral. Os acumuladores consistem em um banco de baterias, possuindo a função de armazenar a energia produzida pelo painel fotovoltaico. Os inversores possuem a função de transformar a corrente

contínua gerada pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada, com o intuito de expandir a gama de equipamentos que podem usufruir da energia gerada. Um esquema de um sistema fotovoltaico pode ser observado na Figura 2 (ALVES, 2008; SILVA, 2010).



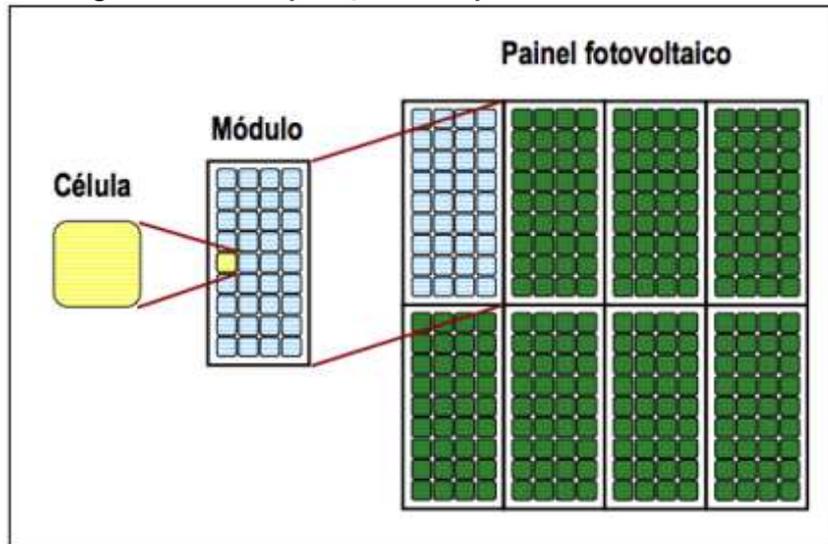
Fonte: Alves (2008)

2.4.2 Módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos consistem em um agrupamento de células fotovoltaicas ligadas em série ou paralelo de forma a se obter uma tensão e corrente desejada. Um módulo é geralmente identificado pela sua potência de pico (W_p), porém torna-se importante entender que o desempenho de um módulo depende de sua temperatura de operação e também nível de irradiação solar (FREITAS, 2008; PINHO & GALDINO, 2014).

Tratando-se de sua construção, um módulo fotovoltaico necessita de uma proteção às diversas condições ambientais adversas a que são submetidos. Para isso, as células são cobertas por uma película de etileno acetato de vinilo (EVA), que tem como principais funções assegurar o isolamento elétrico dessas células. Tratando-se da parte estrutural, o acabamento é realizado normalmente com aros de alumínio, que apresentam a característica de serem leves e resistentes, além de uma placa de vidro. A diferenciação entre célula fotovoltaica, módulo fotovoltaico e painel fotovoltaico pode ser observada na Figura 3 (CARNEIRO, 2010).

Figura 3 – Hierarquização entre painel – módulo – célula



Fonte: Carneiro (2010)

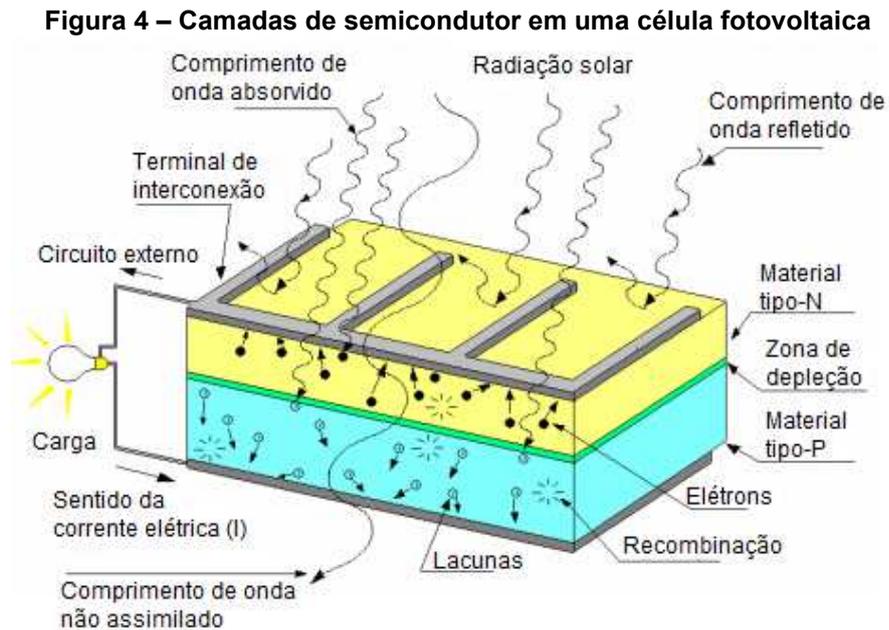
2.4.3 Célula fotovoltaica

O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica consiste na ocorrência de uma diferença de potencial em uma célula eletroquímica ocasionada pela absorção de luz. Cada célula é composta por duas camadas de semicondutor, uma do tipo *N* com excesso de elétrons, outra do tipo *P*, com escassez de elétrons, como pode ser observado na Figura 4. Cada camada é dopada com substâncias específicas de modo a criar um ambiente favorável para que ocorra o efeito fotovoltaico (FREITAS, 2008).

O boro é o dopante normalmente utilizado para criar a região do tipo *P*, realizando 4 ligações covalentes com o silício (semicondutor normalmente utilizado), sendo 3 contendo dois elétrons e uma contendo apenas um elétron. A falta de um elétron nessa última ligação gera uma lacuna que tende a ser preenchida por átomos vindos da camada vizinha, ao passo que cada lacuna preenchida gera uma nova lacuna em outro átomo, fazendo com que uma carga positiva percorra o material. No caso na camada *N*, o dopante é o fósforo, o qual realiza quatro ligações covalentes com o silício e deixa um elétron livre, que pode viajar pelo material (carga negativa) (FREITAS, 2008).

Como pode ser observado na Figura 4, a região de contato entre as camadas *P* e *N* forma a junção *PN*, onde é gerado um campo elétrico que separa as duas camadas portadoras de carga que a constituem. Quando a luz solar atinge tal junção, os fótons de luz são absorvidos pelos elétrons e, caso a energia do fóton seja

suficiente, ocorre a quebra de ligações e a liberação de elétrons. Esses elétrons liberados migram para a camada *N*, enquanto as lacunas formadas migram para a camada *P*, gerando assim um fluxo de cargas negativas e positivas. Caso conecte-se os terminais das células em um circuito externo, tem-se a circulação de corrente elétrica (FREITAS, 2008; PINHO & GALDINO, 2014).



Fonte: Freitas (2008)

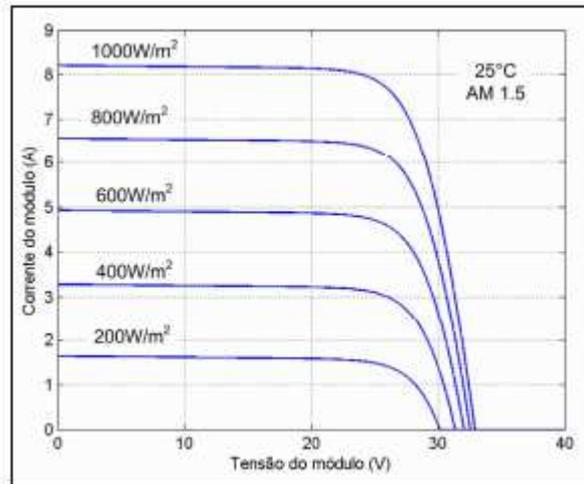
Em relação aos semicondutores, esses são majoritariamente fabricados de silício cristalino, podendo ser apresentado em sua forma monocristalina (m-Si), policristalina (p-Si) ou ainda como silício amorfo hidrogenado (a-Si:H). Tratando-se de custos, a forma monocristalina é a que apresenta maior valor e conseqüentemente maior eficiência, ao passo que as policristalinas apresentam menor valor e também menor eficiência devido à presença de interfaces entre seus cristais constituintes (PINHO & GALDINO, 2014). Na questão da eficiência, as células monocristalinas comerciais apresentam eficiência entre 20,2% e 21,6%, enquanto as policristalinas entre 17,8% e 19,9% (PORTAL SOLAR, 2022).

2.4.4 Influência da irradiação solar e da temperatura

Os níveis de irradiação solar e temperatura do painel fotovoltaico exercem diferentes influências na eficiência de tal componente. Estudos apontam que a corrente gerada pelo painel fotovoltaico aumenta com o aumento da radiação solar que o incide, ao passo que o aumento da temperatura tende a ser prejudicial para a

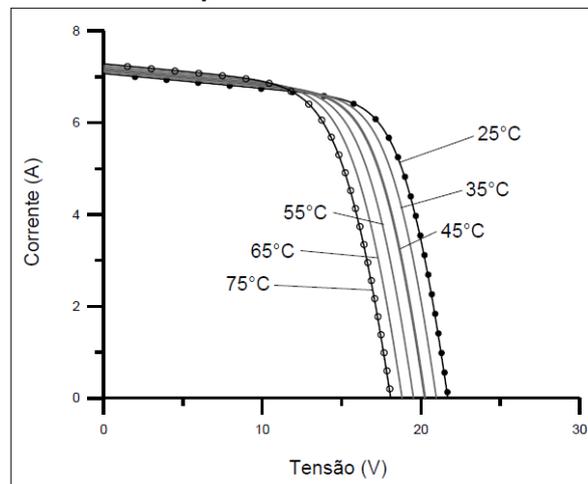
eficiência do painel fotovoltaico (CASARO & MARTINS, 2008; PINHO & GALDINO, 2014). A influência do nível de irradiação solar e da temperatura sobre a corrente e tensão gerada pelo painel fotovoltaico podem ser observadas no Gráfico 2 e Gráfico 3, respectivamente. No Gráfico 4 verifica-se a influência da temperatura do painel fotovoltaico em sua eficiência.

Gráfico 2 – Características de painel fotovoltaico de acordo com irradiação solar



Fonte: Casaro & Martins (2008)

Gráfico 3 – Características de painel fotovoltaico de acordo com temperatura

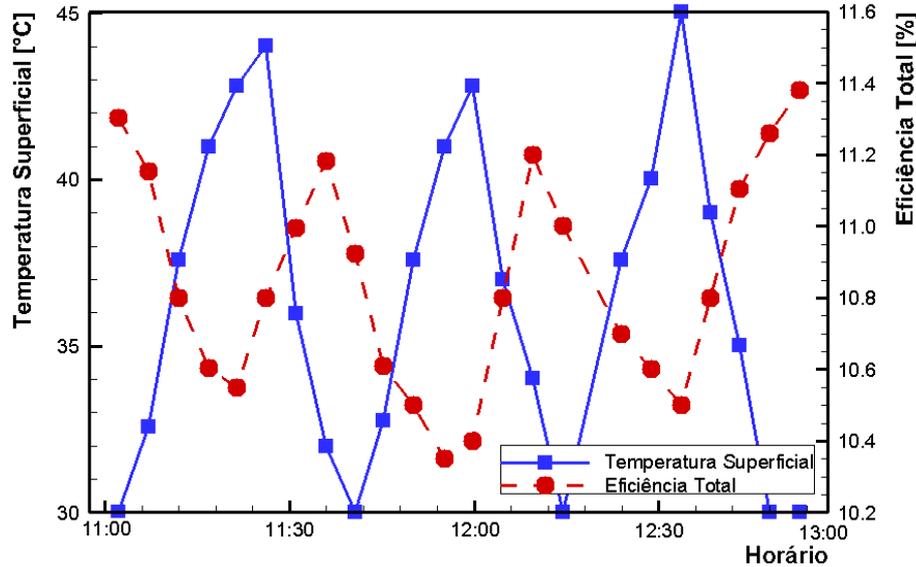


Fonte: Pinho & Galdino (2014)

Como pode-se observar pelo Gráfico 2, com o aumento da radiação solar que atinge as células fotovoltaicas ocorre um aumento tanto na tensão como na corrente gerada, sendo significativo nos valores de corrente, o que aumenta a potência gerada pelo painel fotovoltaico. Enquanto que pelo Gráfico 3, verifica-se que ocorre um leve aumento na corrente gerada com aumento da temperatura na região de baixas tensões, porém ao mesmo tempo ocorre um decréscimo mais significativo na tensão

gerada, fazendo com que assim se reduza a potência elétrica gerada pelo painel fotovoltaico e, conseqüentemente, reduza também sua eficiência.

Gráfico 4 – Influência da temperatura na eficiência de um painel fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Hallal et al. (2020)

A partir do Gráfico 4, verifica-se que a eficiência do painel aumenta com o decréscimo da temperatura e vice-versa. Nesse caso específico, o coeficiente de temperatura do painel fotovoltaico calculado foi de $0,9\%/^{\circ}\text{C}$, o que indica que a cada acréscimo de 1°C na temperatura superficial do painel fotovoltaico ocorre um decréscimo de $0,9\%$ em sua eficiência (HALLAL et al., 2020).

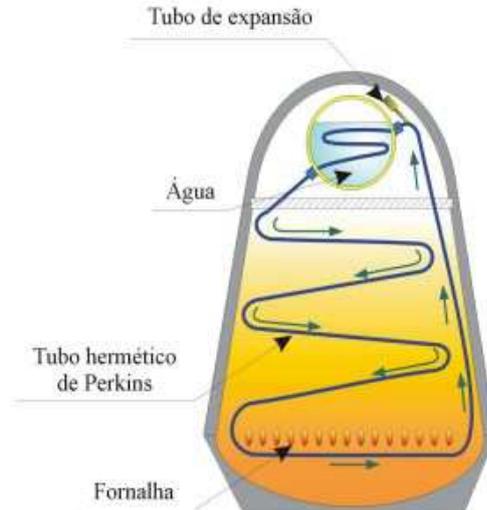
2.5 Contextualização histórica e aplicação de termossifões

O conceito inicial de termossifões pode ser atribuído às patentes de A.M. Perkins e J. Perkins em meados de 1800. Essas patentes referiam-se a um dispositivo denominado de *Tubo de Perkins* que utilizava uma ou duas fases de um líquido contido em um tubo para transportar calor de uma fornalha a um tanque de armazenamento de água, como pode ser observado na Figura 9 (PETERSON, 1994; REAY, KEW & MCGLEN, 2014; MANTELLI, 2021).

Uma das principais aplicações do *Tubo de Perkins* nesse século foi nos dispositivos denominados de *Fornos de Perkins*. Nesses fornos, o calor das chamas de uma fornalha aquece a água no interior dos tubos, atingindo a evaporação. O vapor desloca-se até a extremidade do tubo onde sofre a condensação devido à transferência de calor entre o tubo e a câmara de cozimento. Este circuito possui uma alta eficiência e economia, justificando seu uso nos dias atuais. Um esquema do

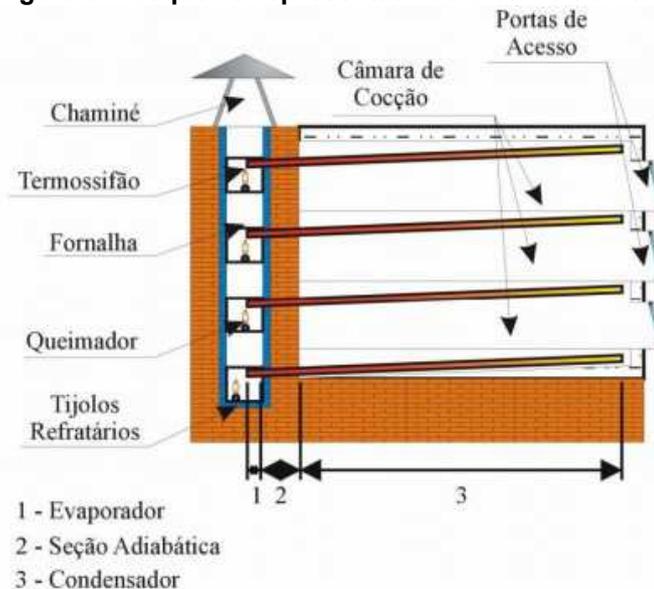
Aquecedor e do *Forno de Perkins* podem ser observados na Figura 5 e Figura 6 (PETERSON, 1994; REAY, KEW & MCGLEN, 2014; MANTELLI, 2021).

Figura 5 – Esquema representativo do Aquecedor de Perkins



Fonte: Mantelli (2009)

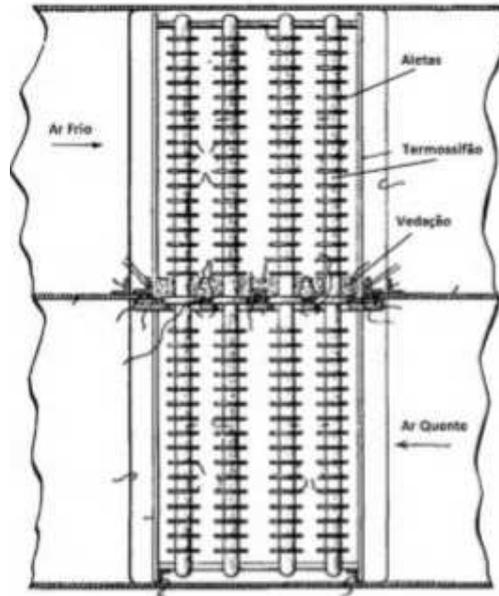
Figura 6 – Esquema representativo do Forno de Perkins



Fonte: Mantelli (2009)

O termossifão da forma como é conhecido atualmente foi apresentado pela primeira vez na Patente *US #1725906*, de 27 de agosto de 1929, proposta por *F.W. Gay*, em que um certo número de tubos verticais foi arranjado com o evaporador localizado abaixo do condensador. Esse dispositivo consistiu na base para o desenvolvimento da tecnologia atual de termossifões e tubos de calor. A proposta de *Gay* está apresentada na Figura 7 (PETERSON, 1994; REAY, KEW; MCGLEN, 2014).

Figura 7 – Esquema representativo do dispositivo de F.W. Gay



Fonte: Adaptado de Reay, Kew & McGlen (2014)

Termossifões podem ser amplamente aplicados no ambiente industrial. Um exemplo de aplicação é a recuperação de calor em um sistema de gases de exaustão, pré-aquecendo o ar em trocadores de calor. Também são muito utilizados em lugares de frio extremo para trocar calor com a parte mais quente do solo, podendo auxiliar em manter estradas operantes no inverno e até mesmo aquecer ambientes. Além disso, em regiões frias contendo linhas de transporte de óleos, os termossifões atuam captando calor do oleoduto e transferindo para o ambiente externo, reduzindo o calor que a base recebe e transfere ao solo, evitando o descongelamento e instabilidade da fundação (AGUIAR, 2016; ESPIRITO SANTO, 2017).

Os termossifões também são utilizados em coletores solares à vácuo, que são altamente eficazes e aplicáveis para aquecimento de água para uso diário, ambientes e piscinas. Outro ramo de aplicação é a secagem e desidratação de alimentos e tecidos, além do controle térmico de eletroeletrônicos (KRAMBECK *et al.*, 2019).

2.6 Princípio de funcionamento de um termossifão

Um termossifão é um tubo de calor assistido por gravidade utilizado para melhorar a transferência de calor em várias aplicações. A característica principal de um termossifão é o uso do calor latente de vaporização de seu fluido de trabalho para transmitir calor a altas taxas em distâncias consideráveis com pequena diminuição de temperatura. Suas vantagens são flexibilidade, construção simples e fácil controle

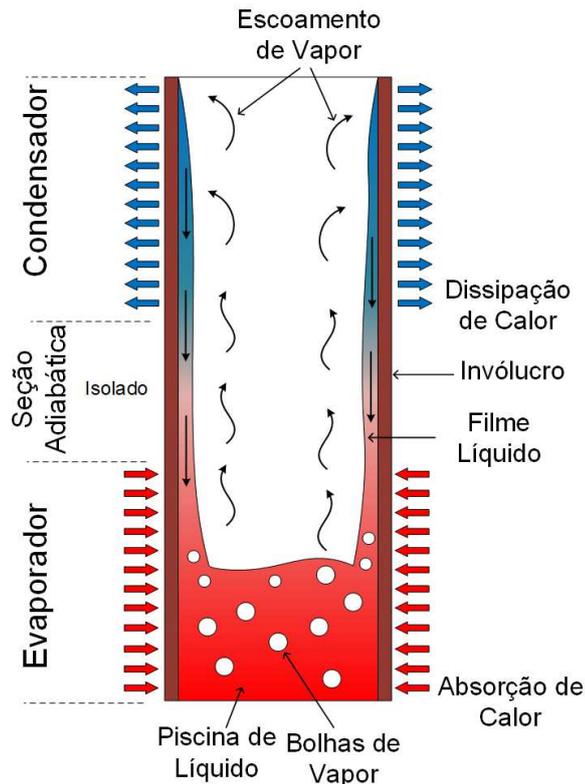
sem potência de bombeamento externo (AKBASRZADEH; WADOWSKI, 1996; REAY; KEW; McGLEN, 2014).

Tanto um termossifão quanto um tubo de calor consistem basicamente em um tubo metálico oco, evacuado, onde certa quantidade de fluido de trabalho é inserida. A principal diferença entre esses dispositivos passivos de transferência de calor é que o tubo de calor é revestido internamente por uma estrutura porosa que tem como intuito carregar o fluido de trabalho, ao passo que o meio de transporte desse fluido em um termossifão é baseado em gradientes de pressão e na ação da gravidade (PETERSON, 1994).

Um termossifão possui três regiões com funções distintas em sua operação. Essas regiões são chamadas de evaporador, seção adiabática e condensador. O evaporador, a região inferior do tubo, é aquecido por uma fonte quente e o fluido de trabalho é submetido a um processo de evaporação. O vapor gerado, devido à diferença de pressão, move-se para a região mais fria que se encontra na região superior do tubo (condensador). No condensador, o vapor gerado no evaporador perde energia na forma de calor para a fonte fria e é condensado, ocasionando o retorno do fluido de trabalho no estado líquido para o evaporador pela ação da gravidade, fechando o ciclo termodinâmico. A seção adiabática está localizada entre o evaporador e o condensador. Nessa seção, não há transferência de calor entre o termossifão e o ambiente externo. Em alguns casos, a seção adiabática está ausente (MANTELLI, 2021). Um diagrama esquemático do princípio de funcionamento do termossifão é mostrado na Figura 8.

Devido ao fato de o dispositivo ser evacuado antes do preenchimento com o fluido de trabalho, o processo de evaporação e condensação ocorre a temperaturas inferiores ao que ocorreria em pressão atmosférica. Isso faz com que esse dispositivo apresente uma maior eficiência de troca térmica do que outros dispositivos baseados puramente em troca de calor condutiva e convectiva, uma vez que os coeficientes de transferência de calor em mudança de fase são superiores aos coeficientes condutivos e convectivos.

Figura 8 – Diagrama esquemático de um termossifão



Fonte: Autoria própria (2022)

2.7 Principais componentes de um termossifão

Os termossifões possuem basicamente dois componentes, o invólucro e o fluido de trabalho. Tais componentes são abordados com mais detalhes nas seções subsequentes.

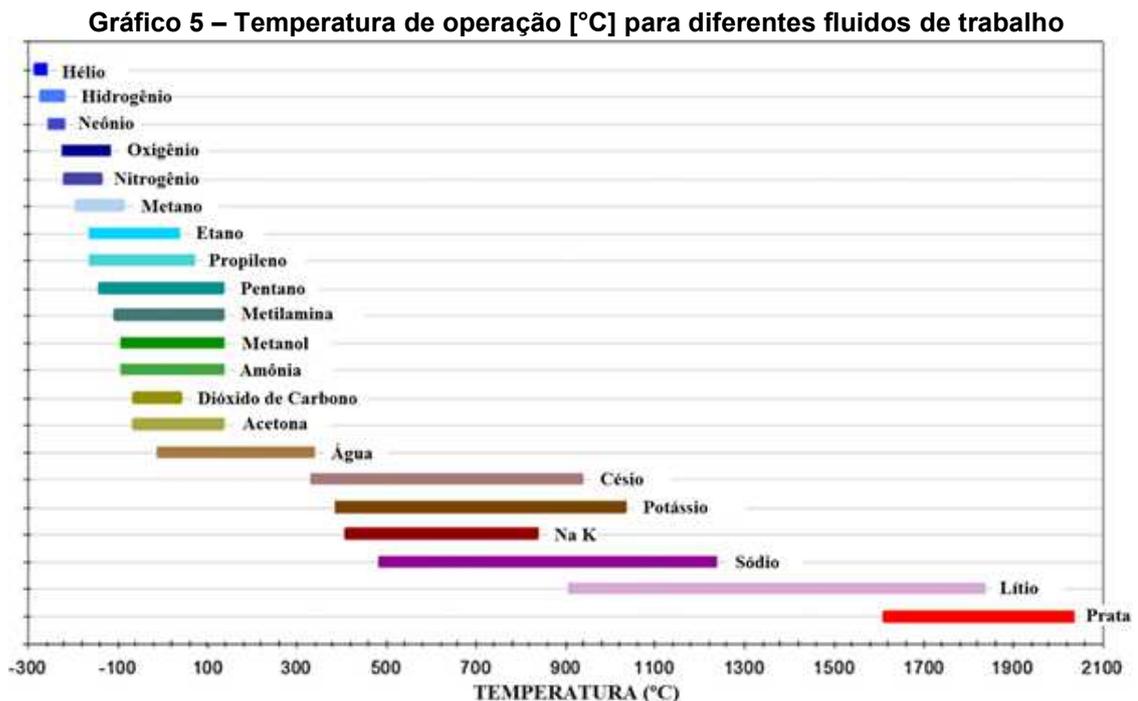
2.7.1 Invólucro

A função do invólucro é isolar o fluido de trabalho do ambiente externo. Para isso ele deve ser à prova de vazamentos, além de ser capaz de manter o diferencial de pressão em seu interior e permitir a transferência de calor para o fluido de trabalho e também pelo fluido de trabalho (ZOHURI, 2016).

As principais características necessárias para o material do invólucro consistem na sua compatibilidade com o fluido de trabalho, apresentar resistência suficiente para suportar a pressão relacionada à saturação do fluido, possuir elevada condutividade térmica e elevada resistência à corrosão, possuir baixa porosidade para evitar a difusão do vapor, além de facilitar a fabricação do termossifão, seja pela sua maleabilidade, soldabilidade ou usinabilidade (PETERSON, 1994; ZOHURI, 2016).

2.7.2 Fluido de trabalho

A seleção de um fluido de trabalho requer atenção, uma vez que é um parâmetro que influencia diretamente na funcionalidade do termossifão. Para a escolha é importante observar a sua faixa de temperatura de operação, pressão de vapor, estabilidade, toxicidade, condutividade térmica e a compatibilidade química entre o fluido de trabalho e o material do invólucro do termossifão, sendo a faixa de temperatura de operação uma das primeiras considerações que devem ser feitas na escolha do fluido de trabalho. As temperaturas críticas são estabelecidas para que o fluido de trabalho não chegue a temperaturas próximas ao ponto crítico do fluido e também abaixo de seu ponto triplo. (PETERSON, 1994; REAY, KEW; McGLEN, 2014; ZOHURI, 2016). As faixas de temperatura de operação para diversos fluidos de trabalho podem ser observadas no Gráfico 5.



Fonte: Nishida (2016)

A temperatura do ponto triplo da água é de aproximadamente 0,01°C, ao passo que a temperatura de seu ponto crítico é de aproximadamente 374°C. Com isso, ao observar o Gráfico 5, verifica-se que a faixa de temperatura de operação da água está contida entre esses dois valores extremos.

Quadro 1 – Lista de materiais recomendados para o invólucro em função do fluido de trabalho

Fluido de Trabalho	Recomendado	Não Recomendado
Acetona	Aço Inoxidável Alumínio Cobre Sílica	—
Água	Aço Inoxidável 347 Cobre Monel	Aço Carbono Aço Inoxidável Inconel Níquel Sílica
Amônia	Aço Carbono Aço Inoxidável Alumínio Níquel	Cobre
Metanol	Aço Inoxidável Cobre Sílica	Alumínio
Potássio	Aço Inoxidável Inconel	Titânio
Sódio	Aço Inoxidável Inconel	Titânio

Fonte: Reay, Kew & McGlen (2014)

2.7.3 Figura de mérito

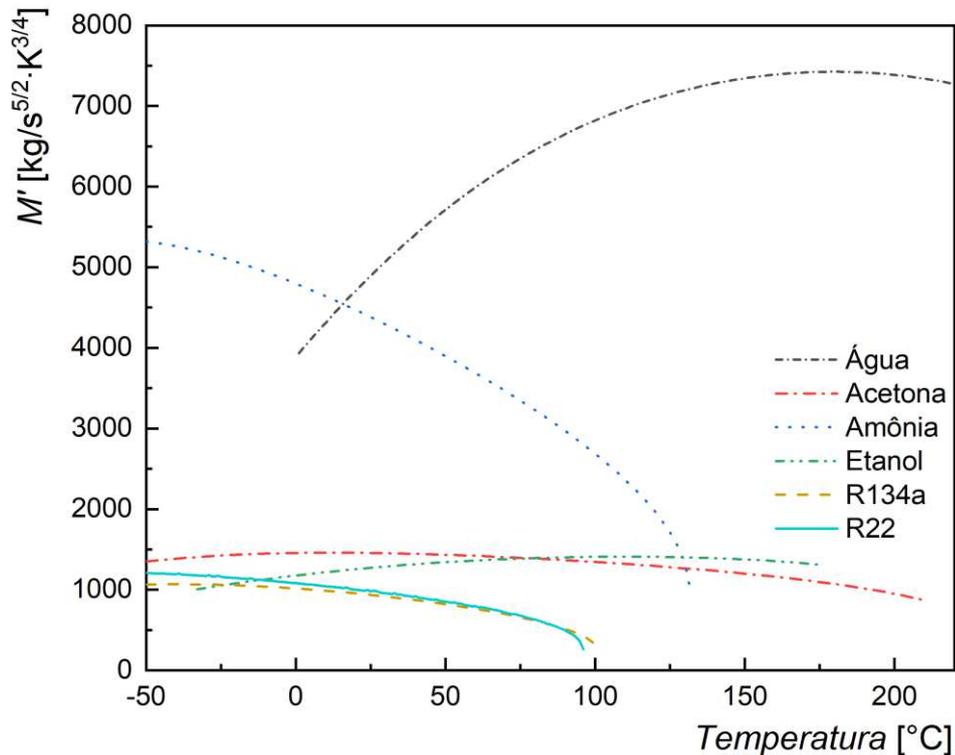
Conhecendo qual fluido é compatível com o material do invólucro, um dos principais fatores a se levar em consideração para a escolha do fluido de trabalho é a Figura de Mérito (M'), parâmetro que relaciona diretamente as propriedades do fluido de trabalho com uma capacidade máxima de transporte de calor a uma determinada faixa de temperatura para termossifões (MANTELLI, 2021). A Figura de Mérito pode ser determinada pela Equação (1):

$$M' = \left(\frac{h_{lv} k_l^3 \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

em que h_{lv} consiste no calor latente de vaporização do fluido, k_l , ρ_l e μ_l representam a condutividade térmica, massa específica e viscosidade dinâmica da fase líquida do fluido de trabalho, respectivamente.

O Gráfico 6 apresenta valores de Figura de Mérito em função da temperatura para diferentes fluidos de trabalho.

Gráfico 6 – Figura de Mérito de alguns fluidos de trabalho



Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir do Gráfico 6, conhecendo-se as condições de operação do termossifão, torna-se possível identificar qual fluido de trabalho tenderá a apresentar melhores resultados tratando-se da transferência de calor pelo fluido de trabalho, ou seja, sabendo as temperaturas de operação do termossifão, seleciona-se preferencialmente o fluido que apresenta maior valor de Figura de Mérito.

2.8 Limites operacionais

Apesar de serem dispositivos de transferência de calor muito eficientes, alguns aspectos operacionais geram limitações no desempenho dos termossifões. Tais limitações são denominadas limites operacionais e são discutidos nas seções subsequentes.

2.8.1 Limite viscoso

O limite viscoso pode ser atingido quando as forças viscosas ultrapassam os gradientes de pressão provocados pela evaporação e condensação. Em consequência, o gradiente de pressão pode não ser suficiente para gerar fluxo de vapor, que se estanca. Esse fenômeno tende a ocorrer quando as temperaturas e as

pressões de vapor são muito baixas (PETERSON, 1994; REAY; KEW; MCGLEN, 2014; MANTELLI, 2021). Esse limite operacional foi abordado por Busse (1973) e pode ser calculado a partir da Equação (2):

$$q_{m\acute{a}x,visc} = d_i^2 h_v A_v \left(\frac{P_v \rho_v}{64 \mu_v l_{ef}} \right), \quad (2)$$

em que d_i representa o diâmetro interno do termossifão, P_v , ρ_v e μ_v correspondem à pressão, massa específica e viscosidade dinâmica do vapor do fluido de trabalho, respectivamente, l_{ef} representa o comprimento efetivo do termossifão (Equação (3)), sendo que, l_{adiab} , l_{evap} e l_{cond} representam o comprimento da seção adiabática, evaporador e condensador, respectivamente, e A_v corresponde à área do vapor (área de seção transversal interna do invólucro do termossifão).

$$l_{ef} = l_{adiab} + \frac{(l_{evap} + l_{cond})}{2}. \quad (3)$$

Um trabalho experimental apresentado na *Engineering Science Data Unit* (ESDU) mostrou que o fluxo de vapor pode ser limitado pelo gradiente de pressão que ocorre entre a saída do evaporador e a pressão mínima existente no condensador. Sendo assim determinou-se que a razão do gradiente de pressão de vapor pela pressão de vapor deve ser menor que 0,1 como mostra a Equação (4) (PETERSON, 1994).

$$\frac{\Delta P_v}{P_v} < 0,1. \quad (4)$$

2.8.2 Limite sônico

Quando a velocidade de vapor aumenta a ponto de atingir a velocidade do som, o vapor, que normalmente se encontra no centro do termossifão, é submetido a uma onda de choque que dificulta sua passagem para o condensador. Quando isso ocorre o termossifão fica bloqueado, ou seja, uma redução na temperatura do condensador não apresenta efeito sobre a temperatura do evaporador (MANTELLI, 2021). O limite sônico pode ser calculado pela Equação (5) desenvolvida em Busse (1973).

$$q_{m\acute{a}x,s\acute{o}nico} = 0,474h_{IV}A_v(P_v\rho_v)^{1/2}. \quad (5)$$

2.8.3 Limite de arrasto

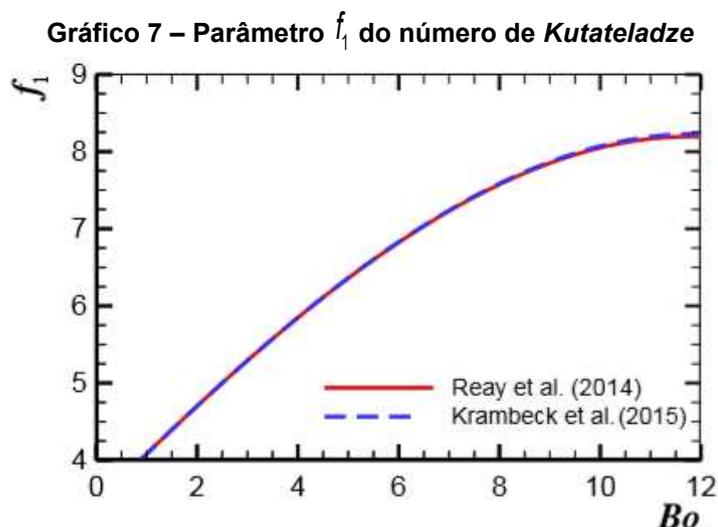
O limite de arrasto refere-se principalmente à inibição do retorno do líquido ao evaporador ocasionada por um fluxo contracorrente e a força cisalhante viscosa na interface líquido-vapor. Quando ocorre um aumento do fluxo de vapor, eleva-se a temperatura causando uma instabilidade do fluxo de líquido. Em alguns casos pode ocorrer o arrasto do líquido novamente ao condensador causando um aumento substancial na taxa de circulação de líquido e limitando o fluxo axial de calor (MANTELLI, 2021). De acordo com Brost (1996), o limite de arrasto pode ser determinado pela Equação (6):

$$q_{m\acute{a}x,arrasto} = f_1 f_2 f_3 h_{IV} \rho_v^{1/2} [g(\rho_l - \rho_v) \sigma]^{1/4}, \quad (6)$$

em que g corresponde à aceleração da gravidade, ρ_l representa a massa específica da fase líquida, σ é a tensão superficial do fluido e $f_1 f_2 f_3$ correspondem ao Número de *Kutateladze*, que correlaciona as forças de arrasto com as forças de atrito.

O parâmetro f_1 é função do Número de *Bond* (Bo), sendo correlacionado inicialmente por Reay, Kew & McGlen (2014) como pode ser visto no Gráfico 7, em que a curva de ajuste, Equação (7), foi obtida por Krambeck *et al.* (2015) no intervalo entre $1 \leq Bo < 10$ com desvios menores do que 0,82% por:

$$f_1 = -0,025Bo^2 + 0,726Bo + 3,359. \quad (7)$$



Fonte: Krambeck *et al.* (2015)

O número de *Bond* é apresentado na Equação (8) e expressa uma relação entre as forças de tensão superficial e a força gravitacional.

$$Bo = d_i \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

O parâmetro f_2 é função de um parâmetro adimensional k_p (Equação (9)). As Equações (10) e (11) apresentam os valores de f_2 em função de k_p .

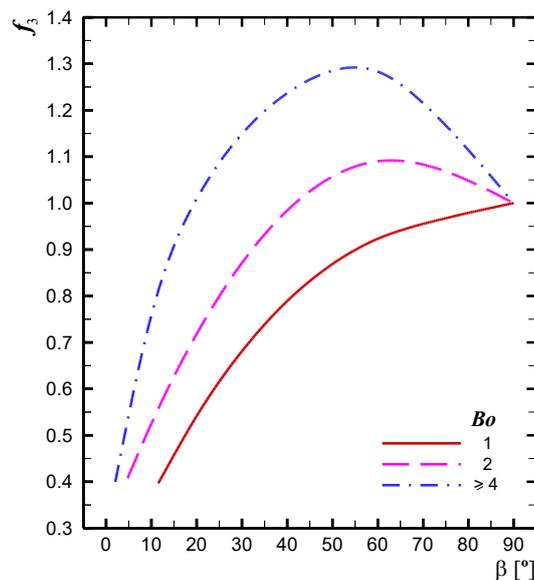
$$k_p = \frac{P_v}{[g(\rho_l - \rho_v)\sigma]^{1/2}}, \quad (9)$$

$$f_2 = k_p^{-0,17} \text{ para } k_p \leq 4 \times 10^4, \quad (10)$$

$$f_2 = 0,165 \text{ para } k_p > 4 \times 10^4. \quad (11)$$

Finalmente, o parâmetro f_3 mostra a influência que a inclinação (β) do termossifão tem no limite de arrasto. Na posição vertical, $f_3 = 1$, ao passo que as demais posições desse parâmetro foram correlacionadas por Krambeck *et al.* (2016), sendo apresentadas no Gráfico 8, com desvios inferiores a 2,4%. As Equações (12), (13) e (14) apresentam valores de f_3 em função de β .

Gráfico 8 – Parâmetro f_3 do número de Kutateladze



Fonte: Krambeck *et al.* (2016)

$$f_3 = -0,00012\beta^2 + 0,01962\beta + 0,19110 \text{ para } Bo = 1, \quad (12)$$

$$f_3 = -0,00019\beta^2 + 0,02472\beta + 0,30621 \text{ para } Bo = 2, \quad (13)$$

$$f_3 = -0,00026\beta^2 + 0,02836\beta + 0,52326 \text{ para } Bo \geq 4. \quad (14)$$

2.8.4 Limite de ebulição

O limite de ebulição pode ser atingido quando a ebulição do fluido de trabalho, que normalmente ocorre na piscina localizada no evaporador, passa a ocorrer também na película de fluido que retorna do condensador e está na parede do invólucro. As bolhas de vapor geradas se unem formando uma película de vapor que isola termicamente a parede do termossifão, não ocorrendo retorno de líquido para o evaporador. Dessa forma, o termossifão passa a operar com evaporador seco, fazendo com que a temperatura da parede do tubo aumente, podendo atingir a temperatura de fusão do material do invólucro (MANTELLI, 2021). Esse limite foi descrito por Brost (1996) e pode ser expresso pela Equação (15).

$$q_{m\acute{a}x,ebu} = 0,12h_{lv}\rho_v^{1/2}[g(\rho_l - \rho_v)\sigma]^{1/4}. \quad (15)$$

2.9 Metodologia de projeto de termossifões

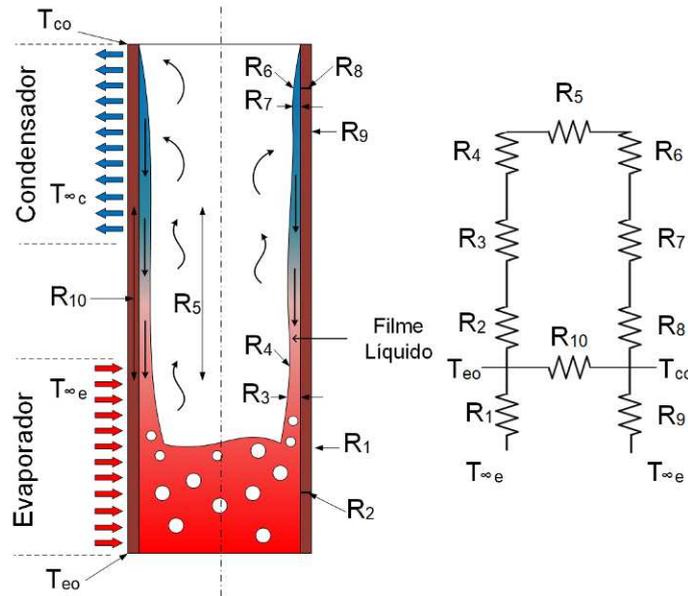
A queda de temperatura entre o evaporador e o condensador de um termossifão é um dos principais parâmetros a ser levado em consideração no projeto desse dispositivo passivo de transferência de calor. Isso pode ser obtido a partir da analogia de sistemas térmicos com circuitos elétricos, utilizando-se de resistências térmicas (PETERSON, 1994). Com isso, o gradiente de temperaturas pode ser determinado pela Equação (16):

$$\Delta T_a = qR_{th}, \quad (16)$$

em que ΔT_a corresponde ao gradiente de temperaturas, q representa a carga térmica aplicada ao termossifão e R_{th} a resistência térmica total do dispositivo.

A Figura 9 apresenta as resistências térmicas contidas em um termossifão.

Figura 9 – Identificação das resistências térmicas de um termossifão



Fonte: Autoria própria (2022)

Utilizando o mesmo conceito de associação de resistências elétricas em série e paralelo, o valor da resistência térmica total de um termossifão (R_{th}) pode ser obtido pela Equação (17), sendo que cada resistência é discutida nas seções subsequentes. Após a descrição de cada resistência térmica, é apresentada a sequência de cálculos a serem realizados para se projetar um termossifão.

$$R_{th} = R_1 + \left[(R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8)^{-1} + R_{10}^{-1} \right]^{-1} + R_9, \quad (17)$$

2.9.1 Resistência entre meio externo e parede

As resistências R_1 e R_9 representam as resistências térmicas convectivas nas regiões do evaporador e condensador, respectivamente (PETERSON, 1994). Elas podem ser determinadas pelas Equações (18) e (19):

$$R_1 = \frac{1}{h_{e,evap} A_{evap}}, \quad (18)$$

$$R_9 = \frac{1}{h_{e,cond} A_{cond}}, \quad (19)$$

em que $h_{e,evap}$ e $h_{e,cond}$ representam os coeficientes convectivos externos ao evaporador e condensador, respectivamente, e A_{evap} e A_{cond} correspondem às áreas externas do evaporador e condensador, respectivamente.

2.9.2 Resistências de condução pela parede

As resistências R_2 e R_8 representam as resistências térmicas de condução na região do evaporador e do condensador, respectivamente (PETERSON, 1994). Elas podem ser determinadas pelas Equações (20) e (21):

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2\pi l_{evap} k_s}, \quad (20)$$

$$R_8 = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2\pi l_{cond} k_s}, \quad (21)$$

em que d_e representa o diâmetro externo do termosifão e k_s corresponde à condutividade térmica do material que compõe o invólucro.

2.9.3 Resistências de condensação e ebulição

As resistências R_3 e R_7 correspondem às resistências térmicas referentes à mudança de fase do fluido de trabalho no evaporador e no condensador, respectivamente (PETERSON, 1994). A resistência relacionada à ebulição no evaporador deve ser analisada em duas partes de acordo com Groll & Rösler (1992). A primeira parte corresponde à evaporação da película de líquido nas laterais do tubo (R_{3f} – Equação (22)) e a segunda à evaporação do líquido contido na piscina (R_{3p} – Equação (24)).

$$R_{3f} = \frac{0,345q_e^{1/3}}{d_i^{4/3} g^{1/3} l_{evap} \varphi_2^{4/3}}, \quad (22)$$

$$\varphi_2 = \left(\frac{h_l k_l^3 \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4}. \quad (23)$$

Na Equação (22), q_e representa um calor estimado (Equação (28)), ao passo que na Equação (23) k_l corresponde à condutividade térmica da fase líquida do fluido de trabalho.

$$R_{3p} = \left(\frac{1}{g^{0,2} \varphi_3 q_e^{0,4} (\pi d_l l_{evap})^{0,6}} \right), \quad (24)$$

$$\varphi_3 = \left(\frac{\rho_l^{0,65} k_l^{0,3} C_{p,l}^{0,7}}{\rho_v^{0,25} h_{lv}^{0,4} \mu_l^{0,1}} \right) \left(\frac{P_v}{P_{atm}} \right)^{0,23}. \quad (25)$$

Na Equação (25) $C_{p,l}$ representa o calor específico à pressão constante da fase líquida do fluido, P_v diz respeito à pressão do vapor (obtida na temperatura de saturação T_v – Equação (31)) e P_{atm} corresponde à pressão atmosférica. O valor de R_3 pode então ser obtido pela Equação (26):

$$R_3 = R_{3p} RP + (1 - RP) R_{3f}, \quad (26)$$

em que RP corresponde à razão de preenchimento do termosifão, que consiste na razão entre volume de fluido de trabalho e volume interno do evaporador, como pode ser observado na Equação (27).

$$RP = \frac{V_l}{V_{evap}}. \quad (27)$$

Visando a obtenção do valor do calor estimado (q_e), utiliza-se a Equação (28), em que ΔT_a é determinado pela Equação (29).

$$q_e = \frac{\Delta T_a}{(R_1 + R_2 + R_8 + R_9)}, \quad (28)$$

$$\Delta T_a = (T_{\infty,e} - T_{\infty,c}) - \Delta T_h. \quad (29)$$

Na Equação (29), $T_{\infty,e}$ e $T_{\infty,c}$ representam a temperatura do meio externo ao evaporador e condensador, respectivamente, ao passo que ΔT_h corresponde à diferença de temperatura hidrostática média no termosifão, que é determinada pela Equação (30).

$$\Delta T_h = \left(\frac{T_v - T_p}{2} \right) RP. \quad (30)$$

Na Equação (30) T_v corresponde à temperatura do vapor (temperatura de saturação – Equação (31)) e T_p representa a temperatura da piscina, que é obtida por meio da pressão da piscina (P_p – Equação (32)).

$$T_v = T_{\infty,c} + \left(\frac{R_8 + R_9}{R_1 + R_2 + R_8 + R_9} \right) (T_{\infty,e} - T_{\infty,c}), \quad (31)$$

$$P_p = P_v + \rho_l g R P l_{\text{evap}} \text{sen}(\beta). \quad (32)$$

A resistência térmica de condensação R_7 é determinada pela Equação (33).

$$R_7 = \frac{0,345 q_e^{1/3}}{d_i^{4/3} g^{1/3} l_{\text{cond}} \phi_2^{4/3}}, \quad (33)$$

2.9.4 Resistência térmica do material do invólucro

A resistência R_{10} representa a resistência térmica de condução axial ao longo do invólucro e pode ser determinada pela Equação (34), em que A_t representa a área de seção transversal do tubo e l_i o comprimento do evaporador preenchido com fluido de trabalho.

$$R_{10} = \frac{[l_{\text{adiab}} + 0,5(l_i + l_{\text{cond}})]}{A_t k_s}. \quad (34)$$

Brost (1996) indica um critério que, ao ser cumprido, permite que R_{10} possa ser desconsiderado, uma vez que dessa forma o calor não é transportado de forma eficiente axialmente pela parede do termosifão. Tal critério é apresentado na Equação (35).

$$\frac{R_{10}}{R_2 + R_3 + R_5 + R_7 + R_8} > 20. \quad (35)$$

2.9.5 Demais resistências térmicas

As resistências R_4 e R_6 representam as resistências térmicas na interface líquido-vapor no evaporador e no condensador, respectivamente, ao passo que R_5 representa a resistência térmica associada à queda de temperatura de saturação

entre o evaporador e o condensador. Tais resistências, ao se realizar uma análise de grandeza se apresentam muito pequenas em relação às demais resistências, podendo então serem desprezadas no projeto dos termosifões.

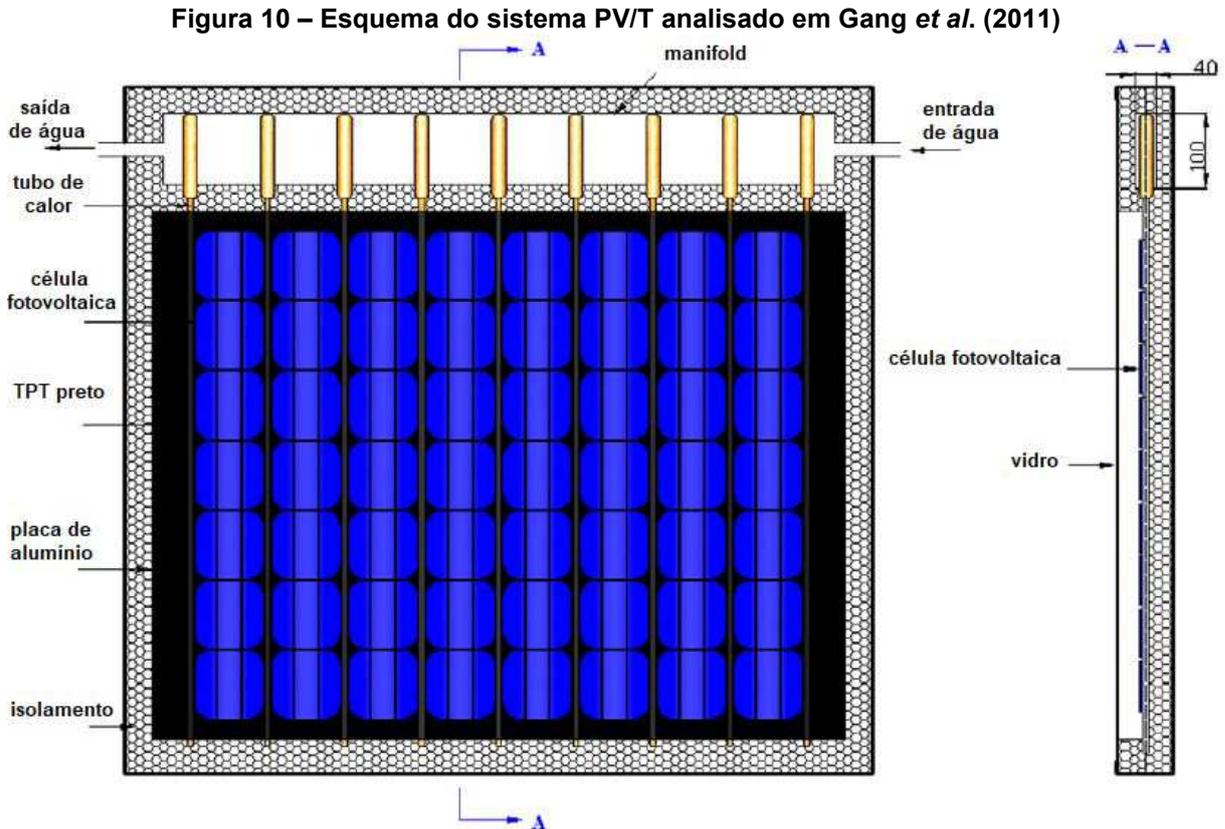
2.9.6 Etapas do projeto térmico de um termosifão

As etapas envolvidas no projeto térmico de um termosifão são:

- **Etapa #1:** Especificar os parâmetros de projeto (l_{evap} , l_{cond} , l_{adiab} , d_e , d_i , β , $h_{e,evap}$, $h_{e,cond}$, RP , k_s , $T_{\infty,e}$ e $T_{\infty,c}$);
- **Etapa #2:** Calcular R_1 (Equação (18)), R_2 (Equação (20)), R_8 (Equação (21)) e R_9 (Equação (19));
- **Etapa #3:** Estimar a temperatura do vapor T_v (Equação (31));
- **Etapa #4:** Calcular as propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho na temperatura de saturação T_v (P_v , ρ_l , ρ_v , h_{lv} , μ_l , μ_v , σ , k_l e $C_{p,l}$);
- **Etapa #5:** Calcular a pressão na base da piscina P_p (Equação (32));
- **Etapa #6:** Calcular a diferença de temperatura hidrostática média ΔT_h (Equação (30));
- **Etapa #7:** Calcular ΔT_a (Equação (29));
- **Etapa #8:** Calcular q_e (Equação (28));
- **Etapa #9:** Calcular R_3 (Equação (26)), R_7 (Equação (33)), R_{10} (Equação (34)) e R_{th} (Equação (17));
- **Etapa #10:** Calcular o valor da carga térmica q (Equação (16));
- **Etapa #11:** Comparar q e q_e . Caso os valores estejam muito distantes, assumir que q corresponde ao novo valor de q_e e repetir os passos a partir da Etapa #9 até que os valores de q e q_e convirjam.
- **Etapa #12:** Comparar o valor de q com os limites operacionais para viabilização do projeto. Caso q seja maior que qualquer um dos limites operacionais, torna-se necessário realizar alterações no projeto do termosifão e refazer todo o processo.

2.10 Estado da arte

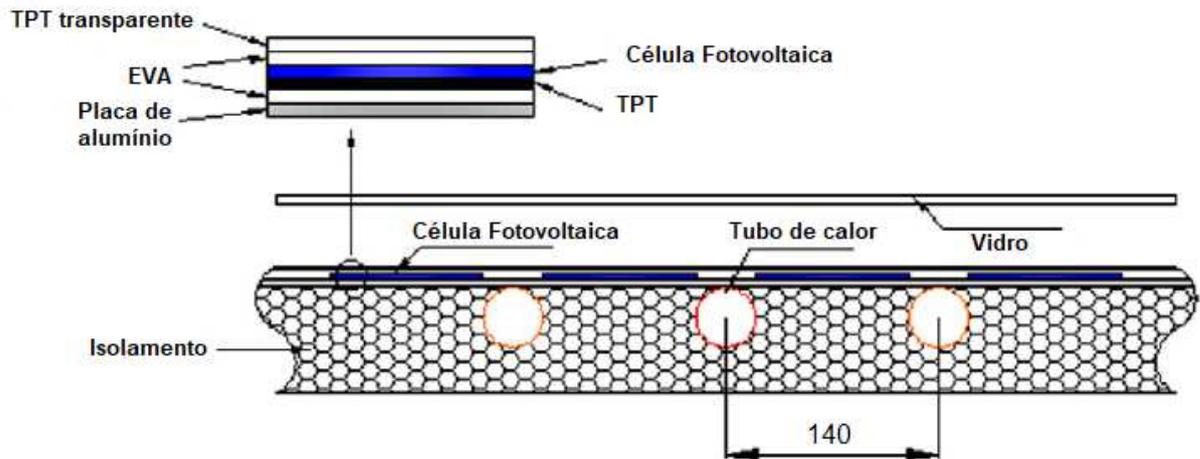
Gang *et al.* (2011) realizaram um estudo numérico/experimental acerca de um sistema fotovoltaico/térmico (PV/T) utilizando termossifões. O sistema PV/T analisado pode ser observado na Figura 10 e Figura 11.



Fonte: Adaptado de Gang *et al.* (2011)

Uma placa de alumínio com dimensões de 962mm x 1260mm e 1,16mm de espessura foi utilizada como base do painel fotovoltaico. Células fotovoltaicas (silício monocristalino) foram laminadas sobre a placa de alumínio, utilizando uma camada de TPT preto (Tedlar – Poliéster – Tedlar) entre os dois componentes. De forma a proteger as células fotovoltaicas de poeira e chuva, foi adicionada uma chapa de vidro temperado na estrutura (GANG *et al.*, 2011).

Figura 11 – Seção transversal do sistema PV/T analisado em Gang *et al.* (2011)



Fonte: Adaptado de Gang *et al.* (2011)

Ao todo nove termosifões foram utilizados no sistema PV/T, possuindo um evaporador com diâmetro externo de 8mm, espessura de parede de 0,7mm e comprimento de 1000mm, enquanto o condensador apresenta 24mm de diâmetro, 1mm de espessura de parede e 120 mm de comprimento. O evaporador foi soldado na placa de alumínio correspondente à base do painel, enquanto o condensador foi inserido em um *manifold* (GANG *et al.*, 2011).

O teste foi executado na cidade de Dongguan, no sul da China, onde quatro sistemas PV/T foram conectados em paralelo em relação ao escoamento da água, posicionados em um ângulo de inclinação de 30° com a horizontal e com uma vazão volumétrica de água entre 0,090L/s e 0,092L/s (GANG *et al.*, 2011).

Para a análise numérica, um modelo matemático composto por seis principais equações foi desenvolvido, levando em consideração o balanço de energia na placa de vidro, balanço de energia no módulo fotovoltaico, condução unidimensional na base do painel fotovoltaico, balanço de energia no termosifão, balanço de energia no *manifold* e balanço de energia no reservatório de água. Para a solução numérica do problema, o sistema PV/T foi dividido em pequenas regiões, utilizando o Método das Diferenças Finitas (GANG *et al.*, 2011).

Os resultados numéricos mostraram boa concordância com os resultados experimentais ao se analisar as temperaturas de entrada e saída da água, calor fornecido para a água, temperaturas das células fotovoltaicas e base do painel fotovoltaico, temperaturas das regiões do evaporador e condensador, além de energia elétrica gerada e eficiência elétrica, apresentando diferenças relativas menores ou iguais a $\pm 5,0\%$. A geração de calor média e também de eletricidade média em função

da área do sistema PV/T foram de $276,9 \text{ W/m}^2$ e $62,3 \text{ W/m}^2$, respectivamente, correspondendo a eficiências de 41,9% e 9,4%. A eficiência média baseada na Segunda Lei da Termodinâmica para o sistema PV/T foi de 6,8%, com uma irradiação solar média de 661 W/m^2 (GANG *et al.*, 2011).

Gang *et al.* (2012) realizaram uma análise paramétrica e de desempenho de um sistema PV/T. A construção do aparato para testes experimentais e também o desenvolvimento do modelo numérico foram baseados em Gang *et al.* (2011), sendo realizadas algumas alterações construtivas em relação às dimensões do sistema. Para a base do painel fotovoltaico foi utilizada uma placa de alumínio com dimensões de 780mm x 1270mm e espessura de 1,16mm. Nove tubos de calor de cobre ranhurados e preenchidos com água foram unidos à base do painel, possuindo evaporador com 1300mm e condensador de 90mm. A distância entre centros de dois tubos de calor adjacentes foi de 80mm.

O teste foi realizado na cidade de Hefei, na região central da China. Foram utilizados dois sistemas PV/T conectados em paralelo, com um ângulo de inclinação de 45° com a horizontal. Para validação do modelo numérico, uma vazão volumétrica de água entre 9,9L/min a 10,2L/min foi utilizada. Após a validação, o modelo foi utilizado para analisar a influência da vazão mássica de água, da razão entre área contendo células fotovoltaicas e área total do painel fotovoltaico no desempenho do sistema, do espaçamento entre termossifões e também o uso de diferentes revestimentos de absorção solar na base do painel (GANG *et al.*, 2012).

Os resultados mostraram que a diferença relativa entre os valores obtidos experimental e numericamente foram na ordem de 8% para a geração de eletricidade e eficiência elétrica, e de 20% para a geração de calor e eficiência térmica. As eficiências totais de Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica para o sistema PV/T foram de 51,5% e 7,1%, respectivamente (GANG *et al.*, 2012).

Foi constatado que o aumento da vazão de água no *manifold* resultou no aumento da geração de calor, eletricidade, e também das eficiências de Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Ao se aumentar a razão entre área contendo células fotovoltaicas e área total do painel fotovoltaico, ou seja, uma maior cobertura da área do painel com células fotovoltaicas, resultou no aumento da geração de eletricidade e também das eficiências do sistema, porém reduziu a geração de energia térmica (GANG *et al.*, 2012).

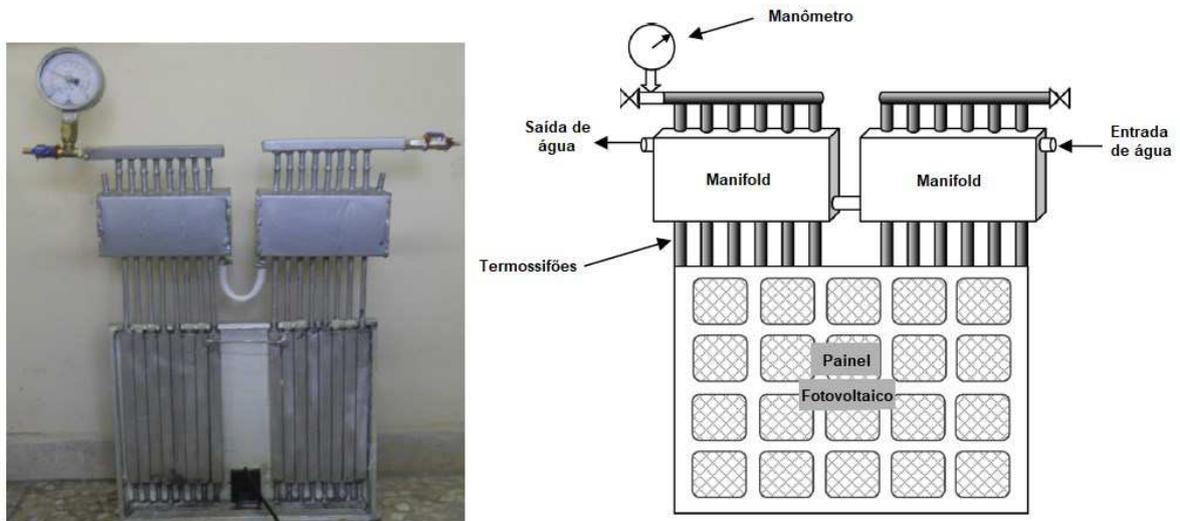
Em relação aos espaçamentos entre tubos de calor, verificou-se que todos os parâmetros do sistema são aumentados com a redução de espaçamento e consequente adição de novos termossifões. Por fim, verificou-se que o uso de revestimentos de absorção solar no painel aumentou a geração de energia térmica e também eficiências, porém reduziu os níveis de geração de eletricidade (GANG *et al.*, 2012).

Moradgholi, Nowee & Abrishamchi (2014) incorporaram termossifões em um painel fotovoltaico comercial de forma a desenvolver um sistema PV/T. O objetivo do estudo consistiu em comparar a temperatura e eficiência elétrica do sistema PV/T com um painel fotovoltaico convencional (20W), assim como avaliar as eficiências de Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica do sistema PV/T.

Para esse estudo, foram utilizados ao todo 16 termossifões no sistema. A região do evaporador possui comprimento de 350mm e foi feita a partir de lingotes planos de alumínio, possuindo um furo de 8mm de diâmetro em seu interior. A seção adiabática e o condensador dos termossifões também foram feitas de alumínio com tubos de mesmo diâmetro interno do evaporador, possuindo comprimentos de 130mm e 100mm, respectivamente. Os condensadores foram inseridos em um *manifold* de alumínio composto por duas caixas de capacidade de 2L conectadas entre si por uma mangueira. A Figura 12 ilustra a montagem do sistema PV/T analisado (MORADGHOLI, NOWEE & ABRISHAMCHI, 2014).

Para a realização dos testes experimentais, dois painéis fotovoltaicos idênticos, com e sem a incorporação de termossifões, foram posicionados em uma inclinação de 30° com a horizontal e 40° com a horizontal no período da primavera e verão, respectivamente, na cidade de Mashhad, no Irã. No período da primavera, metanol foi utilizado como fluido de trabalho dos termossifões, enquanto que no verão, acetona foi utilizada. Os dados de temperatura dos painéis fotovoltaicos, temperatura de entrada e saída da água de resfriamento, e potência elétrica gerada foram coletados com intervalos de 15 minutos entre os horários de meio-dia e 13h, horário de maior incidência de irradiação solar no local (MORADGHOLI, NOWEE & ABRISHAMCHI, 2014).

Figura 12 – Sistema PV/T sem isolamento – Moradgholi, Nowee & Abrishmachi (2014)



Fonte: Adaptado de Moradgholi, Nowee & Abrishamchi (2014)

Tratando-se dos resultados experimentais, verificou-se que o uso de termossifões reduziu em até 15°C a temperatura do painel fotovoltaico, resultando em um acréscimo de 1,10W e 1,26 W de potência elétrica gerada pelo sistema PV/T na primavera e no verão, respectivamente, correspondendo a um aumento de 0,72% e 0,88% (MORADGHOLI, NOWEE & ABRISHAMCHI, 2014).

Em relação às eficiências, o sistema PV/T apresentou um acréscimo de 15,30% e 44,38% de eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica em relação ao painel fotovoltaico convencional nos períodos da primavera e do verão, respectivamente. Comparando as duas estações, a eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica foi maior no período da primavera, já que esse período apresentou menores temperaturas ambientes (MORADGHOLI, NOWEE & ABRISHAMCHI, 2014).

Hu *et al.* (2016) analisaram experimentalmente a influência da inclinação em dois sistemas PV/T, um utilizando termossifões, e outro utilizando tubos de calor contendo uma malha metálica (*wire-mesh*). O sistema PV/T utilizado para análise possui as mesmas dimensões do sistema PV/T utilizado por Gang *et al.* (2012), apresentado na Figura 10 e Figura 11.

Os testes foram realizados em um EDL (*Enthalpy Difference Laboratory*), permitindo o controle de temperatura e umidade do ambiente, temperatura da água de circulação, inclinação do painel fotovoltaico e também irradiação solar. A temperatura ambiente foi fixada em 25°C, assim como a temperatura de início da água

de circulação. A vazão mássica de água foi mantida em 0,033kg/s e a irradiação solar em 650W/m² a partir de um simulador solar. Os painéis fotovoltaicos foram posicionados paralelamente ao simulador solar, sendo analisadas inclinações de 10° a 70° com a horizontal, com um passo de 10°. Os testes experimentais foram executados até que a temperatura de água no reservatório ultrapassasse 40°C (HU *et al.*, 2016).

Os resultados mostraram que o sistema PV/T contendo termossifões é mais sensível a variações em sua inclinação. Em inclinação abaixo de 20° o desempenho térmico dos termossifões é muito baixo, uma vez que o princípio de funcionamento desse dispositivo é dependente da ação da força da gravidade (HU *et al.*, 2016).

Foi possível verificar que a energia média na forma de calor fornecida para água diminui ao longo do tempo para todas as inclinações, e o sistema contendo termossifões forneceu, em média, uma quantidade de calor ligeiramente maior que o sistema contendo tubos de calor entre as inclinações de 20° a 70°, atingindo temperaturas finais no reservatório de água 0,5°C a 2,0°C maiores. Já para a inclinação de 10°, o sistema contendo termossifões apresentou um acréscimo de apenas 3,8°C na temperatura final do reservatório, contra um acréscimo de 16,5°C a partir do sistema contendo tubos de calor. A maior eficiência térmica para os dois casos foi obtida para a inclinação de 40°, e a geração de energia elétrica não apresentou diferenças significativas entre os dois sistemas para todas as inclinações analisadas (HU *et al.*, 2016).

Moradgholi, Nowee & Farzaneh (2018) realizaram um novo estudo acerca da incorporação de termossifões em um painel fotovoltaico comercial, utilizando nanofluido de óxido de alumínio (Al₂O₃)/metanol como fluido de trabalho. O aparato experimental utilizado para o estudo é o mesmo apresentado na Figura 12, ao passo que os procedimentos foram os mesmos utilizados em Moradgholi, Nowee & Abrishamchi (2014).

A razão de preenchimento dos termossifões (30%, 40%, 50% e 60%) e também a concentração de nanopartículas de Al₂O₃ no nanofluido (1,0%, 1,5% e 2,0% em massa) foram investigadas. Os resultados mostraram que a razão de preenchimento de 50% e concentração de nanopartículas de 1,5% apresentaram o melhor desempenho para o sistema PV/T, reduzindo em 14,52°C a temperatura do painel fotovoltaico em comparação à um painel fotovoltaico convencional, e gerando 1,42W a mais de potência elétrica. As eficiências elétrica, de primeira e segunda lei,

em comparação ao painel fotovoltaico convencional, foram aumentadas em ordens de 1,0%, 27,3% e 1,1% respectivamente, mostrando que o nanofluido atua satisfatoriamente de forma a aumentar a eficiência de um painel fotovoltaico convencional (MORADGHOLI, NOWEE & FARZANEH, 2018).

Zhang *et al.* (2019) realizaram o projeto, construção e estudo experimental de um sistema PV/T utilizando termossifões. Um modelo numérico para o sistema proposto foi desenvolvido e validado em um dia ensolarado e em um dia nublado, permitindo uma análise de sensibilidade sobre o sistema, incluindo os efeitos do fluxo de massa, dimensões do evaporador e condensador do termossifão, além da largura do *manifold* e o fluido de trabalho dos termossifões.

Ilustrações do aparato experimental utilizado podem ser observadas na Figura 10 e Figura 11, sendo utilizadas as mesmas dimensões que as utilizadas em Gang *et al.* (2011). Os testes experimentais foram realizados na cidade de Hefei na China, localizada em uma zona subtropical. Quatro sistemas PV/T foram colocados em série, orientados para o sul e em uma inclinação de 30° com a horizontal, correspondendo à latitude da cidade (ZHANG *et al.*, 2019).

Ao validar o modelo numérico com dados experimentais, tratando-se de um dia ensolarado, os resultados experimentais apresentaram diferenças relativas com os resultados numéricos de 0,9%, 3,3% e 1,8% para a temperatura da água de circulação, geração de eletricidade e temperatura da região do evaporador dos termossifões, respectivamente, para valores de irradiação solar acima de 250W/m². Para o dia nublado, as diferenças relativas foram de 0,4%, 14,5% e 3,6%, respectivamente. Apesar de apresentar alta diferença relativa para a geração de eletricidade, em média, os resultados experimentais e numéricos para o dia todo apresentaram diferença de 4,5% (ZHANG *et al.*, 2019).

A partir do modelo numérico validado, verificou-se que o desempenho fototérmico e fotovoltaico do sistema aumenta com o aumento da vazão mássica de água, o diâmetro do condensador e o número de termossifões. A taxa de aumento de desempenho diminuiu com vazões volumétricas maiores que 0,075L/s e diâmetro de condensador maior que 24mm. Ao aumentar o comprimento do condensador, primeiramente o desempenho térmico aumenta, reduzindo em sequência. Já o desempenho fotovoltaico foi diretamente proporcional ao tamanho do condensador, sendo então recomendado um comprimento de 12mm para um maior desempenho geral do sistema (ZHANG *et al.*, 2019).

Verificou-se que o aumento da largura do *manifold* reduziu o desempenho fotovoltaico e fototérmico. Além disso, o diâmetro do evaporador e fluido de trabalho não apresentaram influência significativa sobre o sistema PV/T. Dessa forma, recomenda-se o uso de R134a para regiões frias e água para as demais regiões (ZHANG *et al.*, 2019).

Brahim & Jemni (2021) realizaram um estudo paramétrico em um sistema PV/T utilizando termossifões preenchidos com acetona. Os principais parâmetros que afetam os desempenhos térmicos e elétricos, e também a eficiência do sistema PV/T, tais como velocidade do vento, radiação solar incidente, temperatura de entrada da água, número de termossifões e área da superfície coletora foram estudados utilizando um modelo matemático. O sistema PV/T foi analisado considerando condições climáticas na Tunísia, e o modelo matemático foi validado a partir de resultados experimentais e de uma análise de balanço de energia. A Figura 13 ilustra o sistema PV/T estudado.

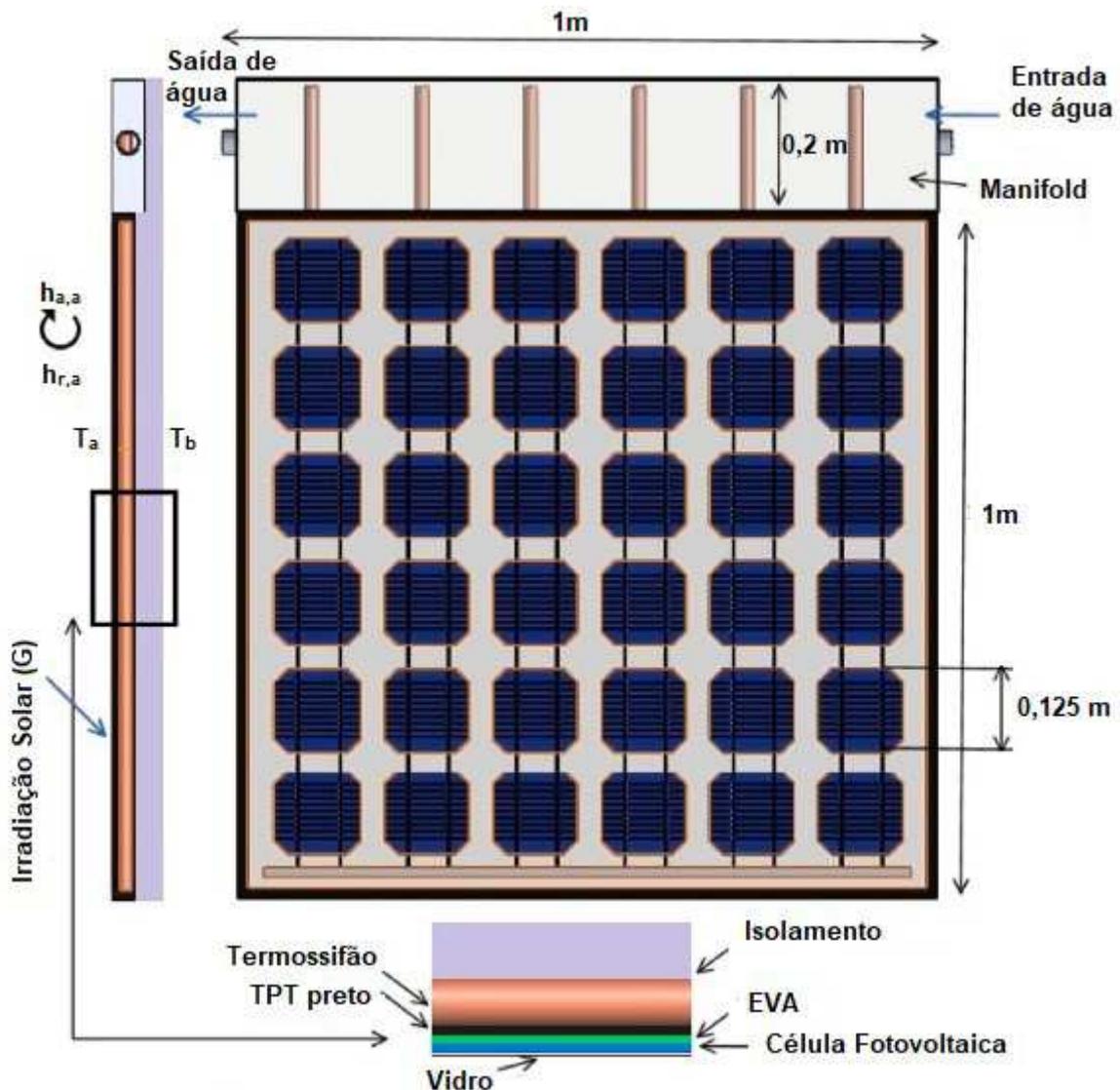
Os termossifões utilizados foram construídos em tubos de cobre com diâmetros interno e externo de 0,0247m e 0,0260m, respectivamente, contendo 1,0m de evaporador e 0,2m de condensador. O fluido de trabalho utilizado foi acetona, com razão de preenchimento de 30%. Ao todo 6 termossifões foram utilizados (BRAHIM & JEMNI, 2021).

Os resultados mostraram que o aumento da velocidade do vento contribuiu para a redução de temperatura das células fotovoltaicas e conseqüente aumento da eficiência elétrica do sistema, porém acarretou no aumento da troca térmica do sistema com o ambiente, reduzindo assim a temperatura de saída da água de circulação e também a eficiência térmica. Já a radiação solar incidente, seu aumento resultou no acréscimo da temperatura das células fotovoltaicas e também no aumento da temperatura de água, porém reduziu as eficiências térmica e elétrica. A eficiência elétrica aumentou à medida que aumenta o número de termossifões, mas há um número ideal de termossifões de cerca de 10, após o qual diminui conforme o coeficiente de transferência de calor convectivo no coletor decresce (BRAHIM & JEMNI, 2021).

Menores temperaturas de entrada da água de circulação tenderam a aumentar a eficiência elétrica do sistema e, comparado a um sistema PV/T convencional, que não utiliza termossifões, apenas água circulando, o sistema PV/T

com termossifões apresentaram ganhos máximos de eficiência térmica e elétrica de 21,9% e 14,2%, respectivamente (BRAHIM & JEMNI, 2021).

Figura 13 – Sistema PV/T – Brahim & Jemni (2021)



Fonte: Adaptado de Brahim & Jemni (2021)

Zhang *et al.* (2021) realizaram um estudo experimental e numérico acerca da influência da inclinação de um sistema PV/T em seu desempenho térmico. O sistema PV/T utilizado no estudo possui as mesmas dimensões e construção do apresentado em Gang *et al.* (2012).

Os testes experimentais foram realizados em um EDL, mantendo a temperatura ambiente constante em 25°C, a radiação incidente no sistema em 650W/m² a partir de um simulador solar, uma vazão mássica de água de 0,033kg/s e uma temperatura inicial da água corrente em 25°C. Os testes foram executados para

inclinações entre 10° e 70°, com o simulador solar paralelo ao sistema PV/T. O fim dos testes foi atingido ao se ultrapassar a temperatura de 40°C no reservatório de água (ZHANG *et al.*, 2021).

Uma modelagem 3D do desempenho de termossifões foi realizada para investigar o comportamento desses em diferentes inclinações. Os resultados da simulação mostraram que a espessura do filme líquido dentro do condensador e do evaporador se estabilizam em um valor constante em condição inclinada. A resistência térmica do condensador em relação ao filme diminui primeiro e depois aumenta com o ângulo de inclinação, enquanto o evaporador mostra uma tendência oposta à do condensador. A resistência térmica geral do termossifão é determinada principalmente pelo evaporador enquanto que a resistência do condensador é determinada principalmente pela altura efetiva da piscina de líquido (ZHANG *et al.*, 2021).

Tanto os resultados experimentais do sistema PV/T quanto a modelagem 3D dos termossifões indicou que o ângulo de inclinação que resulta em um melhor desempenho térmico foi o de 40°. Os dados da simulação 3D foram inseridos em uma modelagem numérica do sistema PV/T como um todo, que foi validado com os resultados experimentais, apresentando boa concordância com tais resultados para inclinações maiores ou iguais a 20°, se apresentando como uma boa opção para prever o desempenho térmico de um sistema PV/T em diferentes inclinações (ZHANG *et al.*, 2021).

2.10.1 Lacunas

A partir da revisão de artigos da literatura, algumas lacunas puderam ser observadas no estado da arte.

Primeiramente, verifica-se que os trabalhos experimentais realizados utilizando-se termossifões em sistemas PV/T foram todos realizados em países localizados no Hemisfério Norte do globo Terrestre, como China, Irã e Tunísia, não sendo constatados trabalhos realizados em países localizados no Hemisfério Sul. Com isso, o presente trabalho vem a preencher essa lacuna de forma a realizar tais investigações experimentais em um país localizado no hemisfério sul e com clima sub tropical.

Com relação aos trabalhos apresentados, percebe-se que apenas dois trabalhos realizaram a adaptação de um painel fotovoltaico comercial para um sistema PV/T utilizando termossifões, ao passo que os demais trabalhos consistiram na

construção total do sistema PV/T. Com isso, o presente trabalho tende a somar como mais uma investigação da adaptação de um painel fotovoltaico comercial para um sistema PV/T utilizando termossifões.

Além disso, foi utilizada uma forma de meio absorvedor não distinta dos trabalhos presentes na literatura, consistindo em barras chatas de alumínio contendo furos no plano de sua espessura de forma a permitir a inserção da região do evaporador nessas furações, ao passo que nos outros trabalhos os termossifões foram soldados em chapas de alumínio, ou então fabricados a partir do processo de fundição de lingotes de alumínio.

Em relação aos termossifões, nesse trabalho foi realizada uma investigação do sistema PV/T contendo uma pequena quantidade desses dispositivos, sendo um total de 4, ao passo que o mínimo utilizado nos trabalhos da literatura foi um total de 6 termossifões. Também ressalta-se que nesse trabalho foi realizada a seleção dos termossifões com base em suas dimensões e sua razão de preenchimento, seleção essa não constatada nos trabalhos da literatura.

Por fim, tratando-se da influência da vazão de fluido na região do condensador, apenas investigações numéricas foram realizadas na literatura, ao passo que nesse trabalho foi realizada uma análise experimental desse parâmetro, utilizando duas vazões volumétricas distintas.

3 METODOLOGIA

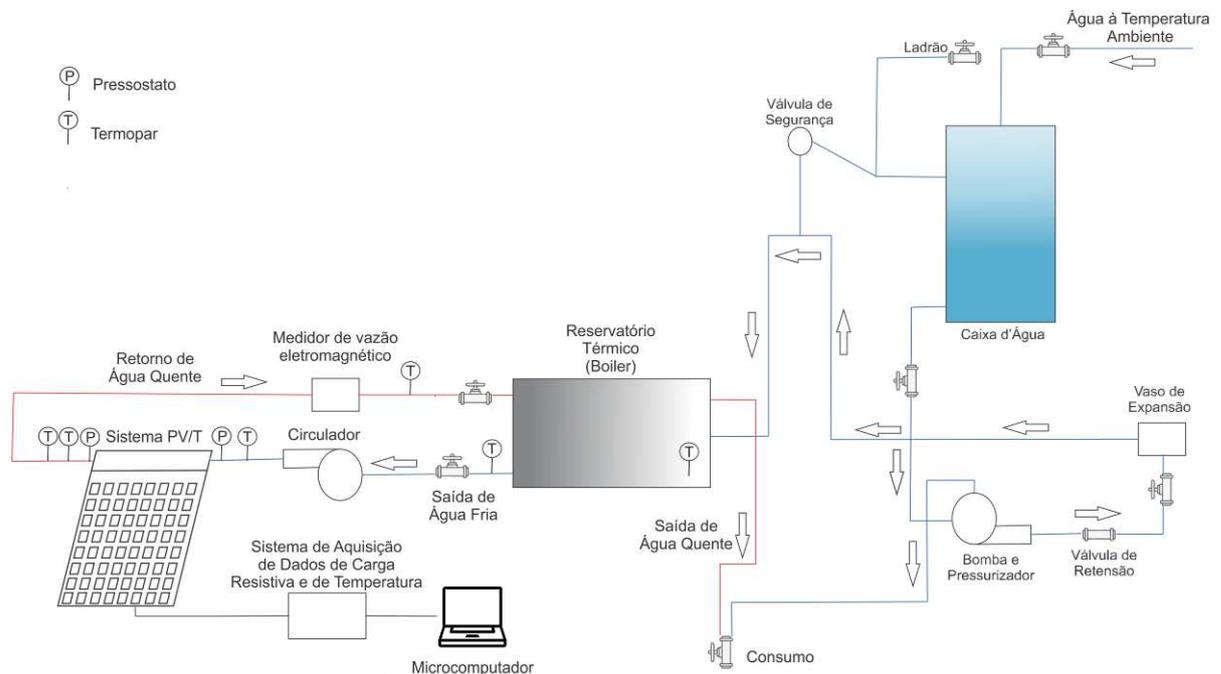
Nesse capítulo são apresentados os materiais utilizados, o aparato experimental e a metodologia aplicada para execução dos testes experimentais do sistema híbrido fotovoltaico/térmico.

Essa pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem qualitativa-quantitativa e de caráter exploratório, que utiliza procedimentos técnicos do tipo experimental.

3.1 Aparato experimental

A representação esquemática do aparato experimental pode ser observada na Figura 14. Tal aparato pode ser separado basicamente em três sistemas distintos, sendo eles o sistema de circulação, o sistema híbrido fotovoltaico/térmico, e um sistema de aquisição de dados de carga resistiva, que são descritos em detalhes nas seções subsequentes.

Figura 14 – Representação esquemática do aparato experimental



Fonte: Autoria Própria (2022)

3.1.1 Sistema de circulação

O sistema de circulação fechado tem como objetivo fornecer e armazenar água para o sistema PV/T, e está localizado em um mezanino metálico interno do

Laboratório de Energia Solar (LabSOLAR) no Bloco J1 da UTFPR/Ponta Grossa. O sistema é composto por uma caixa d'água *Fortlev™* com capacidade de 310 litros (1), um reservatório térmico (*boiler*) *Ribersol™* com capacidade de 100 litros com tanque em aço inoxidável 304 e revestimento em poliuretano expandido de 540mm de diâmetro (2), um conjunto (3) bomba (*Hioda™ HP500AH*, 1/2HP) e pressostato (*Laspa™ LS-8*), um vaso de expansão *Hioda™* com capacidade de 24 litros (4), válvula de segurança com manômetro (5), painel elétrico contendo controlador *Tholz™ TLZ* (6) e válvula de retenção (7), como pode ser observado na Fotografia 1.

Fotografia 1 – Sistema de circulação fechado



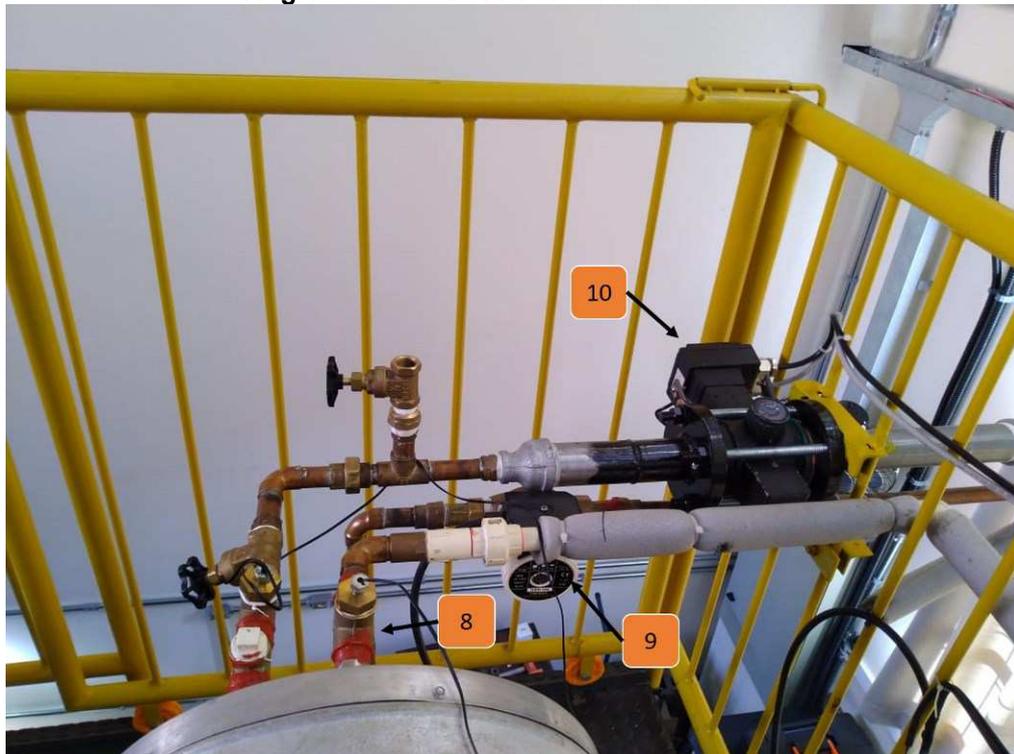
Fonte: Aurtoria Própria (2022)

A caixa d'água tem como função simular o funcionamento de uma residência, atuando como reservatório para fornecimento de água para todo o sistema. Ao sair do reservatório a água passa por um sistema bomba-pressostato que possui como função pressurizar a rede de água fria do sistema de circulação, permitindo o preenchimento do reservatório térmico (*boiler*). O pressostato atua de forma a ligar e desligar a bomba, ligando-a quando há um desequilíbrio de pressão na rede e desligando-a no estado de equilíbrio, evitando que a bomba rode a seco. Toda a tubulação da rede de água fria é feita com tubo de PVC soldável *Tigre™* de 25mm de diâmetro.

Antes de chegar ao reservatório térmico (*boiler*) a água fria passa pelo vaso de expansão, que atua como um equipamento de segurança e proteção, tendo como função absorver e regularizar qualquer variação de pressão brusca no sistema, enchendo em picos de pressão e esvaziando em quedas de pressão, suavizando tais variações. Além disso, uma válvula de segurança é utilizada para evitar que a rede trabalhe a pressões maiores que 4bar.

Na outra extremidade do reservatório térmico (*boiler*) encontram-se a saída de água para o sistema híbrido, o retorno da água e também a saída de água para o consumo (8). Na saída de água utiliza-se um circulador *Hioda™ HBS/100* (9), responsável pela circulação de água na rede quente do sistema, ao passo que no retorno de água utiliza-se um medidor de vazão eletromagnético *Krohne™* (10), como pode ser observado na Fotografia 2. As tubulações utilizadas para saída e retorno de água são de cobre com 22mm de diâmetro, ao passo que a tubulação do consumo é feita em tubo *Aquaterm Tigre™*.

Fotografia 2 – Circulador e medidor de vazão.

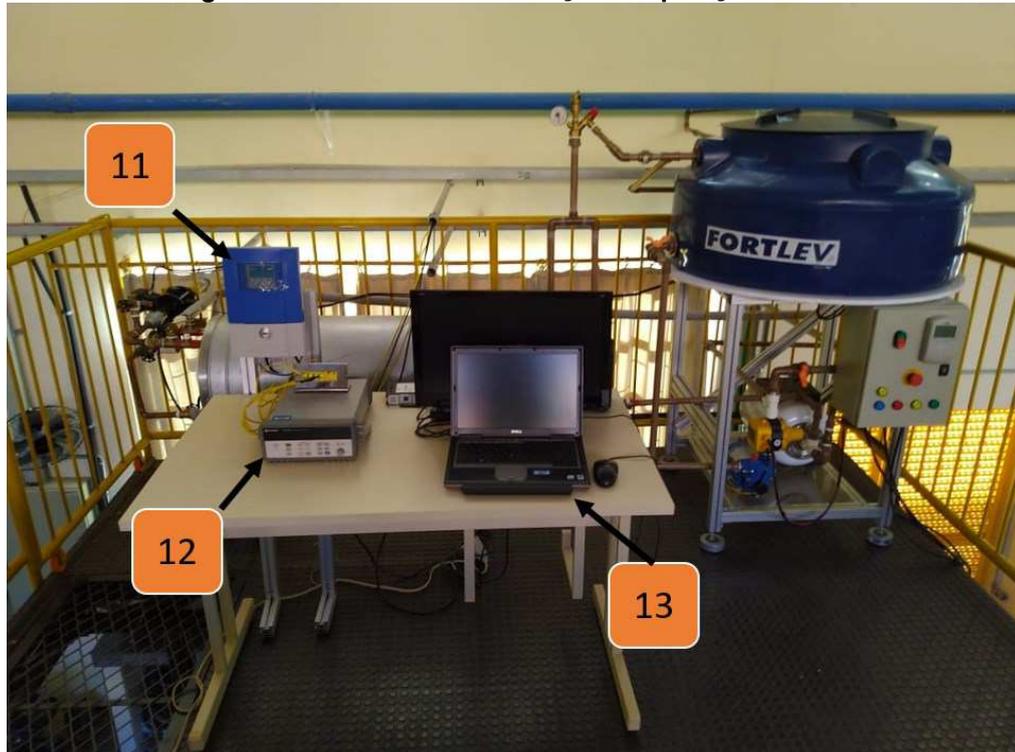


Fonte: Autoria Própria (2022)

A Fotografia 3 apresenta um panorama geral do sistema de circulação fechado, em que também se observa o sistema de aquisição de dados do medidor de vazão *Krohne™* IFC 300 (11), um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A

com um multiplexador de 20 canais (12) e um *notebook Dell™* (13). A partir do *notebook* e do sistema de aquisição de dados *Agilent™* foi realizada a aquisição dos dados de temperatura e pressão antes e após o sistema híbrido, como observado na Figura 14.

Fotografia 3 – Sistema de circulação e aquisição de dados



Fonte: Autoria Própria (2022)

As tubulações de saída e retorno da água seguem até o pátio solar no exterior do bloco, possuindo registros em suas extremidades. Tais tubulações devem então ser conectadas a mangueriras que estão conectadas no sistema híbrido, permitindo a saída e retorno da água ao reservatório térmico. O pátio solar do LabSOLAR pode ser observado na Fotografia 4.

Todas as tubulações da rede quente possuem isolamento térmico com isotubos de lã de rocha e uma camada de alumínio refletivo. Dessa forma procura-se reduzir efeitos externos de troca térmica no percurso da água que não sejam decorrentes do sistema híbrido fotovoltaico/térmico.

Para a execução dos testes experimentais do sistema PV/T, o reservatório térmico foi preenchido com água utilizando o sistema bomba/pressostato, atingindo uma pressão de aproximadamente 4bar. De forma a evitar vazamentos, a torneira de consumo foi aberta, drenando água até a despressurização do reservatório. A

circulação de água para o sistema PV/T foi realizada pelo circulador instalado na tubulação de saída do reservatório.

Fotografia 4 – Pátio solar do LabSOLAR



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Mais informações sobre o sistema de circulação de água podem ser encontradas em Perosso (2020).

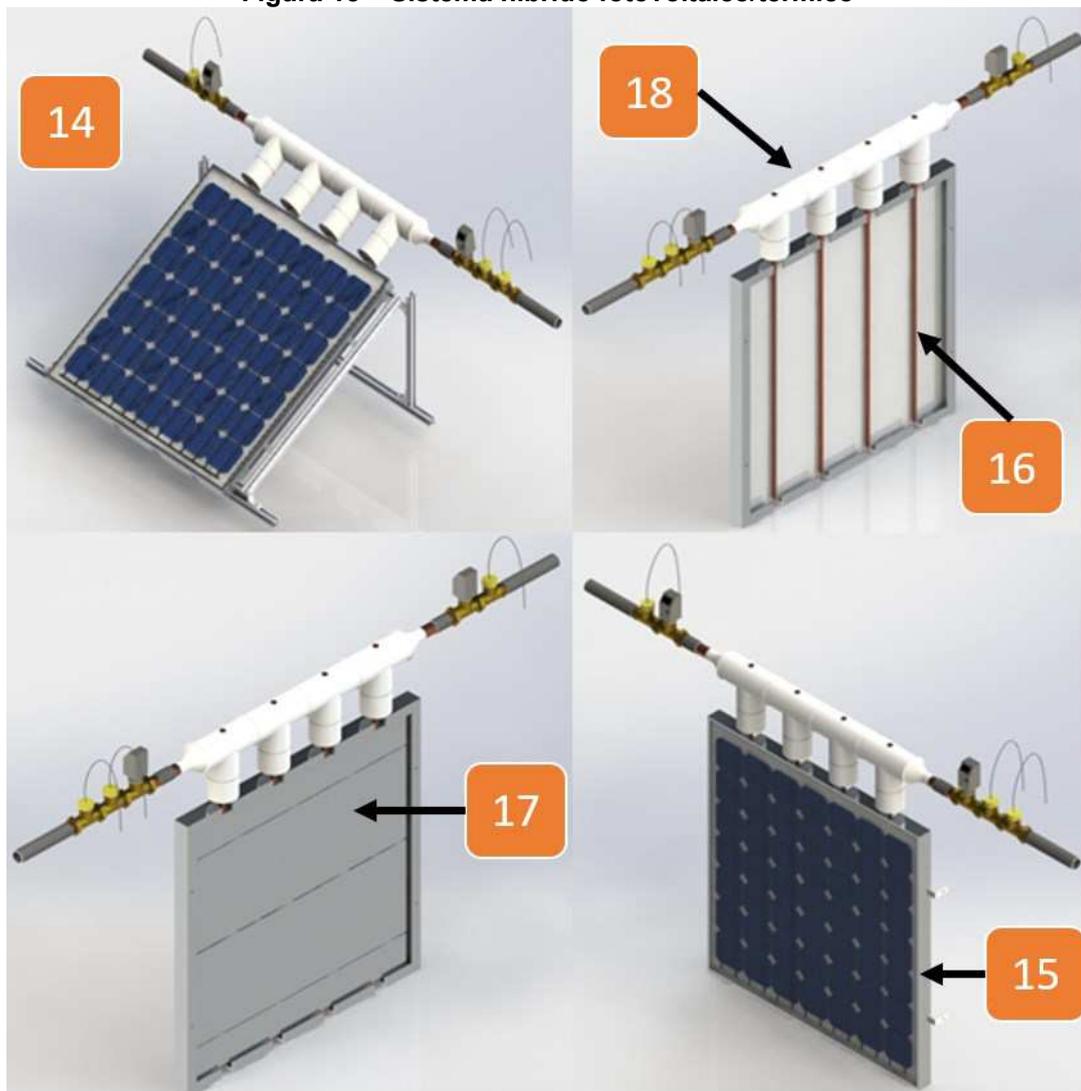
3.1.2 Sistema híbrido fotovoltaico/térmico

A Figura 15 esboça o projeto de sistema PV/T (14). Esse foi composto por um painel fotovoltaico *Resun™ RSM060P* (15), termossifões (16), meio absorvedor (barras chatas de alumínio – 17) e um sistema de circulação de água (*manifold*) composto por três soldáveis de PVC com 60 milímetros de diâmetro (18).

O condensador de cada termossifão foi inserido no sistema de circulação (*manifold* composto por três de PVC conectados entre si através de tubulações). Por meio de reduções e mangueiras conectou-se o sistema às tubulações ligadas ao reservatório térmico, permitindo assim a circulação de água. Nas duas extremidades do sistema híbrido são posicionados termopares do tipo K *Omega Engineering™* e também transdutores de pressão *IFM™ PN2024* a fim de se verificar as temperaturas de entrada e saída da água que escoam pelo sistema e também a queda de pressão apresentada por esse.

Em relação à operação desse sistema, o mesmo foi posicionado em cima do mezanino metálico externo presente no pátio solar do LabSOLAR, evitando assim que a superfície superior do painel fotovoltaico possua áreas sombreadas. A região do evaporador dos termossifões foi inserida no meio absorvedor, colocado em contato direto com a superfície posterior do painel fotovoltaico de forma a absorver calor. A seção adiabática encontra-se entre o painel fotovoltaico e o sistema de circulação, e foi isolada para evitar troca de calor com o ambiente.

Figura 15 – Sistema híbrido fotovoltaico/térmico



Fonte: Autoria Própria (2022)

3.2 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico utilizado foi da marca *Resun™* modelo *RSM060P*. A Tabela 1 apresenta um resumo de suas especificações com testes realizados a 25°C

e irradiação solar de 1000W/m². Esse painel fotovoltaico possui certificado INMETRO de eficiência Classe C e é composto por 36 células de silício policristalino.

Tabela 1 – Especificações técnicas do painel fotovoltaico

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência de Saída	60±3	[W]
Eficiência	12,92	[%]
Tensão em Potência Máxima	18,54	[V]
Corrente em Potência Máxima	3,36	[A]
Tensão em Circuito Aberto	22,68	[V]
Corrente em Circuito Aberto	3,75	[A]
Temperatura Nominal da Célula	45±2	[°C]
Coefficiente de Temperatura Para Potência Máxima	-0,39	[%/°C]
Temperatura de Operação	-40 a 85	[°C]

Fonte: Resun™ (2022)

3.3 Termossifões

Foram dois os parâmetros utilizados para seleção dos termossifões utilizados no sistema PV/T. Primeiramente realizou-se uma investigação sobre a influência do diâmetro de suas seções em seu desempenho térmico. Após a identificação de melhor configuração desse parâmetro geométrico, analisou-se a influência da razão de preenchimento no desempenho térmico desses dispositivos.

Os termossifões foram fabricados com cobre *ASTM B75*, liga 122, utilizando água destilada como fluido de trabalho. A seleção da água como fluido de trabalho foi realizada com base em sua Figura de Mérito – Gráfico 6. A seção do evaporador possui comprimento de 610mm, correspondente ao comprimento da base do painel fotovoltaico, ao passo que a seção adiabática e o condensador apresentam comprimentos de 160mm e 60mm, respectivamente, possuindo comprimento total de 830mm. O comprimento do condensador corresponde ao diâmetro interno do tê de PVC utilizado como *manifold*.

A Tabela 2 apresenta as dimensões utilizadas para construção de cada termossifão. Foram utilizados tubos de cobre comerciais sem costura de diâmetro externo de 3/8" e 1/2", ambos com 0,79mm de espessura de parede. Para essa primeira investigação, utilizou-se como razão de preenchimento 50% do volume do evaporador, correspondendo a aproximadamente 15,2mL para os Termossifões A e B, e 29,5mL para o Termossifão C. O processo de construção dos termossifões pode ser encontrado no APÊNDICE A.

Tabela 2 – Dimensões dos termossifões [mm]

Termossifão	Evaporador		Seção adiabática		Condensador	
	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo	Diâmetro Interno
A	9,52	7,94	9,52	7,94	9,52	7,94
B	9,52	7,94	9,52	7,94	12,70	11,11
C	12,70	11,11	12,70	11,11	12,70	11,11

Fonte: Autoria Própria (2022)

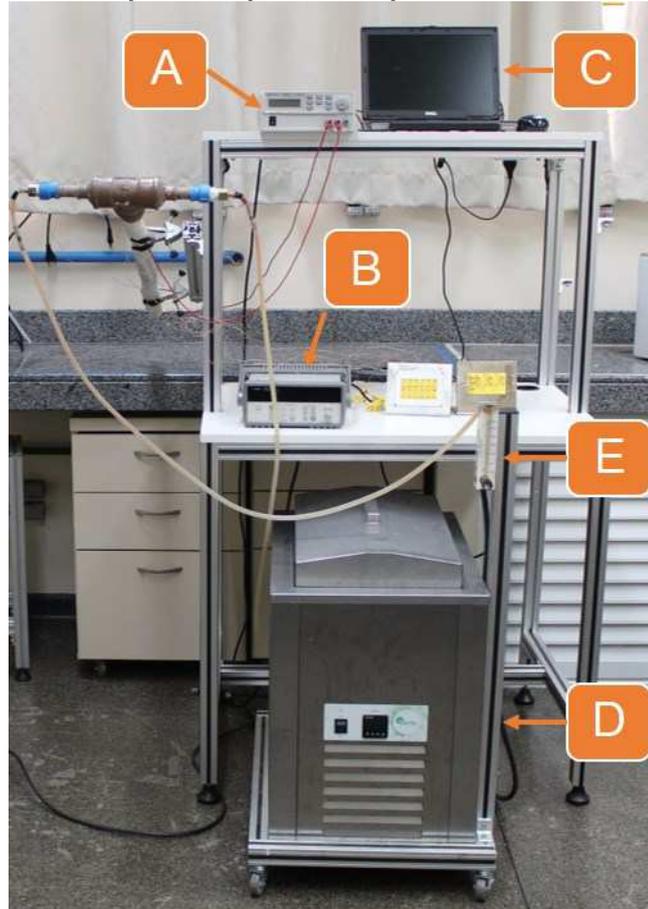
3.3.1 Teste experimental dos termossifões

O aparato experimental utilizado para os testes individuais dos termossifões é mostrado na Fotografia 5 e foi composto por uma fonte de alimentação *Agilent™ U8002A* (A), um sistema de aquisição de dados *Agilent™ 34970A* com um multiplexador de 20 canais (B), um microcomputador portátil *Dell™* (C), um banho ultratermostático *LimaTec™ LT204* (D), e um medidor de vazão de área variável *Omega Engineering™ FL-2051* com válvula reguladora (E).

Para a execução dos testes experimentais em cada termossifão, primeiramente toda extensão da extremidade do evaporador até o tampão do *manifold* foi coberta com uma fita termosensível *Kapton™*, tomando-se o cuidado para não deixar bolhas de ar entre a fita e o tubo de cobre. Após isso, uma fita resistiva *Omega Engineering™* de liga níquel-cromo foi enrolada em todo o comprimento do evaporador, buscando espaçamentos iguais a cada volta e sendo fixada utilizando fita isolante.

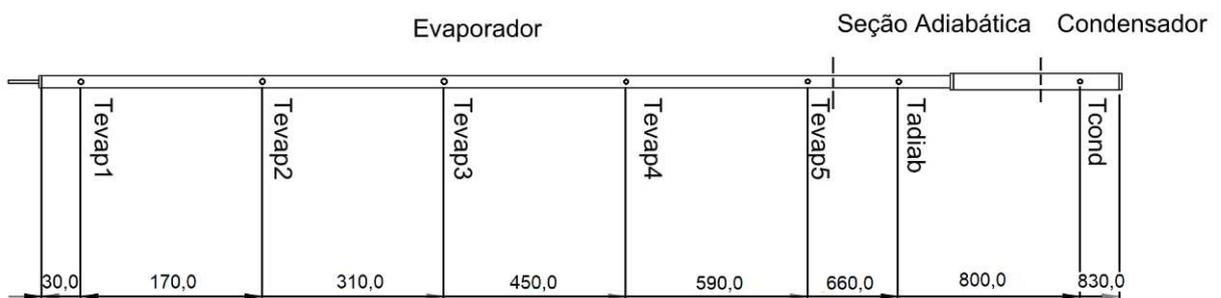
Termopares do tipo K *Omega Engineering™* foram posicionados ao longo do dispositivo, evitando seu contato com a fita resistiva. Ao todo foram utilizados 9 termopares, 5 igualmente espaçados no evaporador (T_{evap1} , T_{evap2} , T_{evap3} , T_{evap4} e T_{evap5}), 1 na seção adiabática (T_{adiab}), 1 no condensador (T_{cond}), e 2 termopares para coletar temperatura de entrada (T_{ent}) e saída (T_{sai}) da água no *manifold*. A Figura 16 ilustra o posicionamento dos termopares ao longo do termossifão. Todos os termopares foram calibrados a partir do método comparativo em relação a um termômetro de mercúrio. A descrição do processo de soldagem e calibração dos termopares encontra-se no APÊNDICE B.

Fotografia 5 – Aparato experimental para testes de termossifões



Fonte: Autoria Própria (2022)

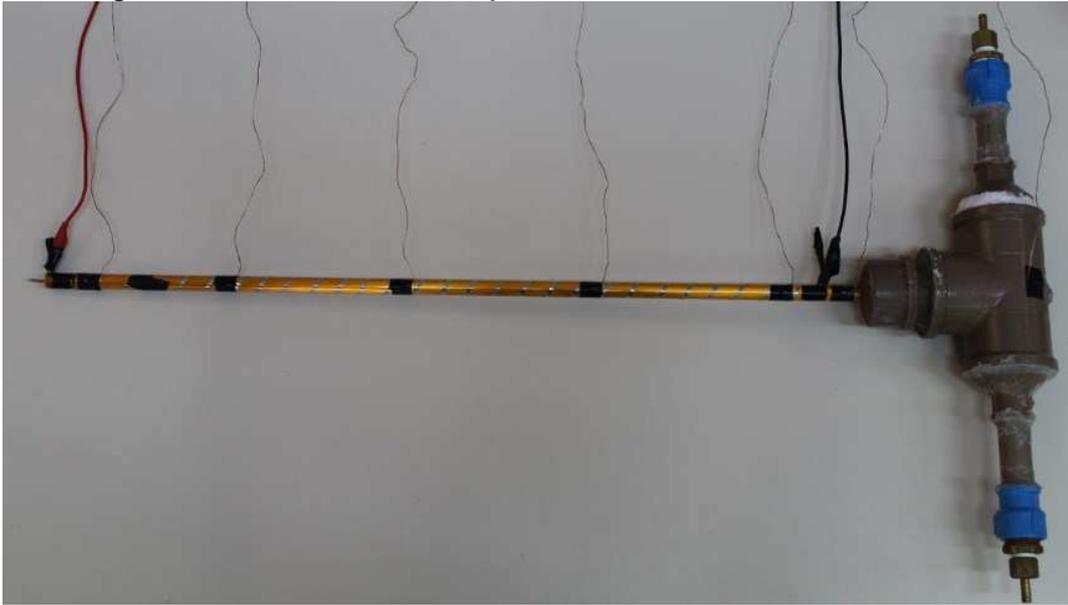
Figura 16 – Posicionamento dos termopares no termossifão [mm]



Fonte: Autoria Própria (2022)

A fita resistiva foi conectada à fonte de alimentação por meio de cabos banana-jacaré, sendo a conexão isolada utilizando fita isolante. A Fotografia 6 ilustra a fita termossensível, a fita resistiva, termopares e cabos banana-jacaré no termossifão. Ressalta-se que o evaporador e a seção adiabática foram isolados do ambiente externo com isolamento térmico de fibra cerâmica e uma camada de polietileno para evitar trocas térmicas com o ambiente.

Fotografia 6 – Fita resistiva, termopares e cabos conectados ao termossifão

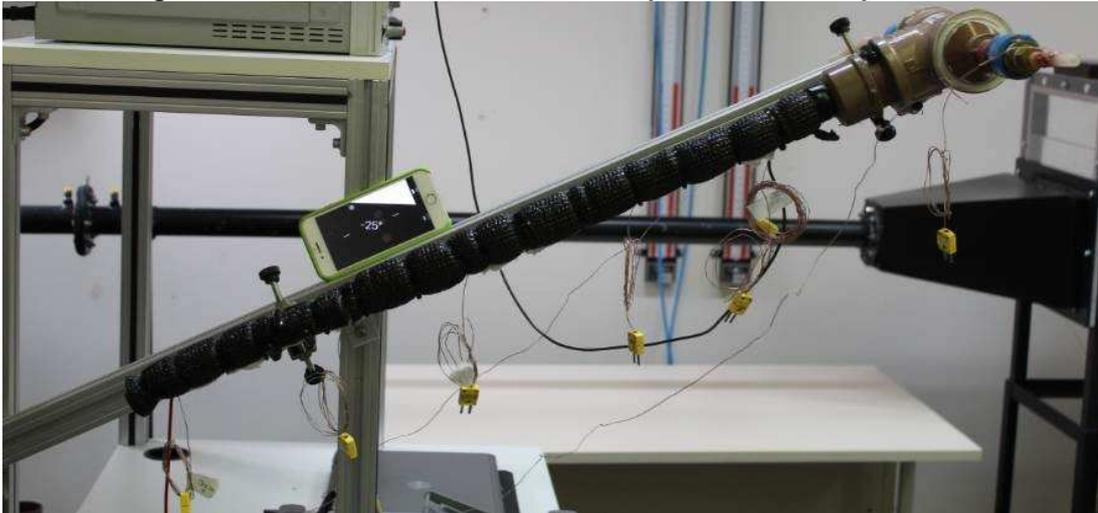


Fonte: Aatoria Própria (2022)

Levando em conta o fato de que a inclinação ideal para operação de painéis fotovoltaicos é igual à latitude da região em que se irá utilizar esses painéis fotovoltaicos, o termossifão foi posicionado em uma posição a 25° da horizontal (evaporador abaixo do condensador) correspondente à latitude da cidade de Ponta Grossa/PR: $25^\circ 05' 42''$ Sul. A Fotografia 7 ilustra o isolamento das regiões do evaporador e seção adiabática, e também a orientação do termossifão durante a execução dos testes experimentais.

Os testes experimentais consistiram em simular o funcionamento do termossifão a partir do aquecimento do evaporador e resfriamento do condensador. O aquecimento foi realizado a partir do Efeito *Joule* resultante da dissipação de potência elétrica proveniente da fonte de alimentação sobre a fita resistiva metálica, ao passo que o resfriamento foi realizado a partir do escoamento de uma vazão de $1,0\text{L}/\text{min}$ de água a uma temperatura de $18,0^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, fornecido pelo banho ultratermostatizado, conectado aos espigões do *manifold* do termossifão a partir de mangueiras flexíveis de silicone. O ambiente também foi mantido a $18,0^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ por um sistema de ar condicionado *Rheem*TM.

Fotografia 7 – Isolamento do termossifão e posicionamento para testes.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Foram realizados testes experimentais para cargas térmicas variando de 10W, 20W, 30W, 40W e 50W, sendo aplicada cada carga térmica por um período de aproximadamente 30 minutos. Dados de temperatura foram coletados pelo sistema de aquisição de dados a cada 10 segundos, e os testes foram realizados em duplicata para verificação de repetibilidade.

Com os dados de temperatura do evaporador e do condensador e também com o valor da carga térmica aplicada em cada teste, torna-se possível, a partir da Equação (36), determinar a resistência térmica para cada termossifão, em que se considera as temperaturas médias nas regiões do evaporador (T_{evap}) e condensador (T_{cond}), e também a carga térmica aplicada (q_{th}). O termossifão que apresentar menor valor de resistência térmica é considerado o ideal para o uso no sistema híbrido.

$$R_{th} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q_{th}}. \quad (36)$$

Após a verificação de qual termossifão apresentou o melhor desempenho térmico (A, B ou C), construíram-se mais 3 termossifões com as dimensões do termossifão de melhor desempenho, de forma a se realizar testes de razão de preenchimento, sendo essas 30%, 40%, 50% e 60% do volume do evaporador, repetindo-se a metodologia de testes para verificar qual razão de preenchimento apresentou o melhor desempenho térmico, finalizando a seleção dos termossifões.

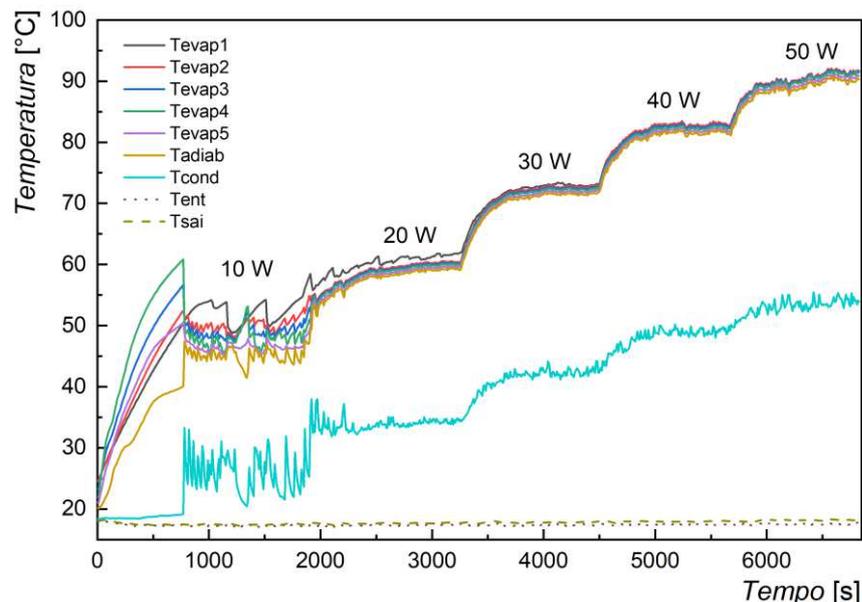
3.3.2 Resultado da seleção dos termossifões

Essa seção apresenta os principais resultados obtidos durante esse estudo, incluindo a seleção de termossifões, o desempenho do sistema de aquisição de dados de cargas resistivas e o desempenho do sistema PV/T em comparação a um painel fotovoltaico comercial.

3.3.2.1 Influência do diâmetro das seções

Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11 apresentam a distribuição de temperatura em função do tempo e da carga térmica aplicada para os Termossifões A, B e C, respectivamente.

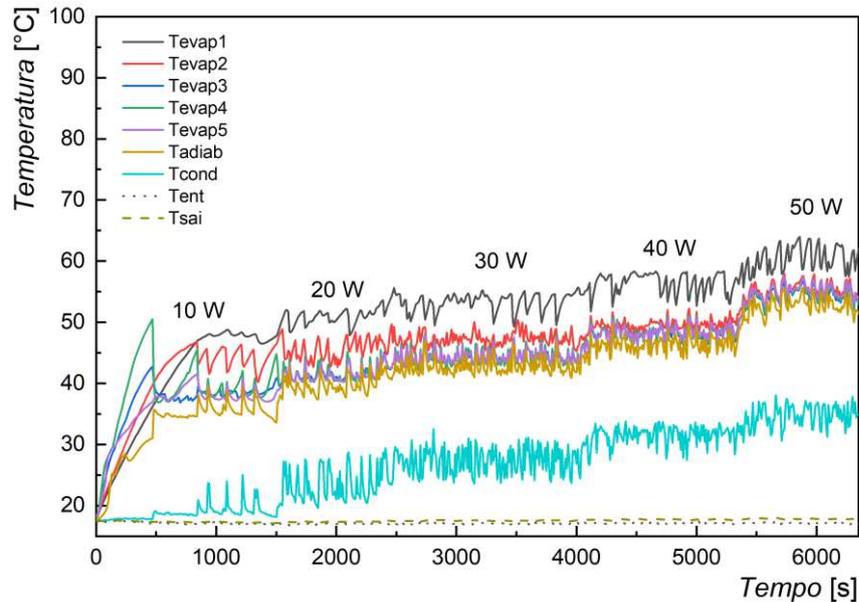
Gráfico 9 – Distribuição de temperatura versus tempo para o Termossifão A



Fonte: Autoria Própria (2022)

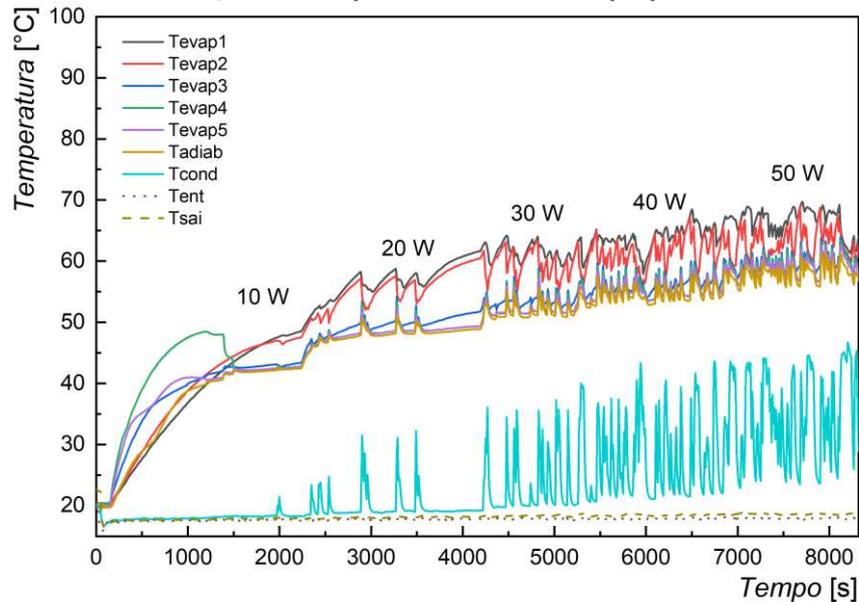
Observando o Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11 é possível perceber o comportamento esperado para um termossifão. Inicialmente as temperaturas de todas as regiões estão em equilíbrio, aumentando a partir da aplicação da carga térmica até que um estado de equilíbrio fosse atingido (regime quase permanente). Para todas as cargas térmicas a região do evaporador apresentou maiores temperaturas que a seção adiabática, que também apresentou maiores temperaturas que a região do condensador. Além disso, a temperatura de saída da água no *manifold* foi maior que a de entrada, indicando que os dispositivos conseguiram realizar a transferência de calor entre as suas regiões.

Gráfico 10 – Distribuição de temperatura versus tempo para o Termossifão B



Além disso, é possível perceber que o Termossifão A apresentou as maiores temperaturas em suas regiões para todas as cargas térmicas aplicadas, sendo um possível indicativo de que esse dispositivo foi o que apresentou pior desempenho térmico entre os três termossifões testados experimentalmente, já que maiores temperaturas indicam que o dispositivo acumulou uma quantidade maior de energia. Entre os três dispositivos passivos de transferência de calor testados, o Termossifão B apresentou as menores temperaturas em todas as suas regiões.

A partir do comportamento das temperaturas no evaporador e condensador é possível identificar o funcionamento dos dispositivos, caracterizados pela ebulição em gêiser. Esse processo de ebulição se inicia pela formação de pequenas bolhas de vapor na piscina de líquido na região do evaporador. As pequenas bolhas coalescem em uma bolha maior que, por gradientes de pressão, ascende em elevada velocidade para a região do condensador, carregando consigo uma grande quantidade de energia. Com isso, devido à energia transportada, tornam-se notáveis picos de temperatura na região do condensador, simultâneos a quedas bruscas de temperatura no evaporador (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Gráfico 11 – Distribuição de temperatura versus tempo para o Termossifão C

Fonte: Autoria Própria (2022)

Pelo Gráfico 9 é possível notar que esse efeito foi mais visível nas menores cargas térmicas aplicadas (10W e 20W), apresentando um comportamento mais estável para as demais cargas térmicas. Isso pode ser justificado pelo fato de que nas menores cargas térmicas a ebulição precisa de um tempo maior para ocorrer, o que faz com que, ao coalescer, as bolhas ascendam para a região com maior velocidade e resultem em uma mudança abrupta da temperatura nas duas regiões da extremidade do dispositivo, como evidenciado experimentalmente em Oliveira *et al.* (2021).

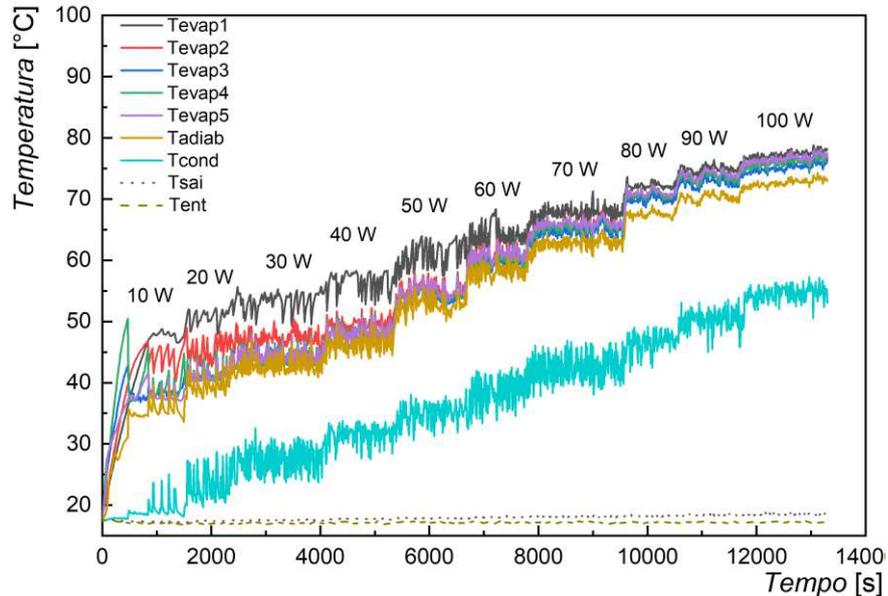
Para os outros dois termossifões o efeito gêiser pode ser observado para todas as cargas térmicas aplicadas. Uma possível hipótese para tal fato é a maior quantidade de líquido na região do evaporador desses dispositivos, esperando-se que para cargas térmicas maiores o efeito gêiser seja menos aparente.

O Termossifão B possui uma maior transferência de calor na região do condensador devido à sua maior área em relação ao Termossifão A, resultando então em maior condensação e retorno de fluido para o evaporador. Ao permanecer com uma maior quantidade de fluido nessa região, o processo de evaporação ocorre de forma mais lenta, fato que também ocorre no Termossifão C que apresenta maior diâmetro em todas as suas regiões.

Essa hipótese foi verificada ao se aplicar uma maior quantidade de carga térmica nos Termossifões B e C. O Gráfico 12 e Gráfico 13 apresentam o

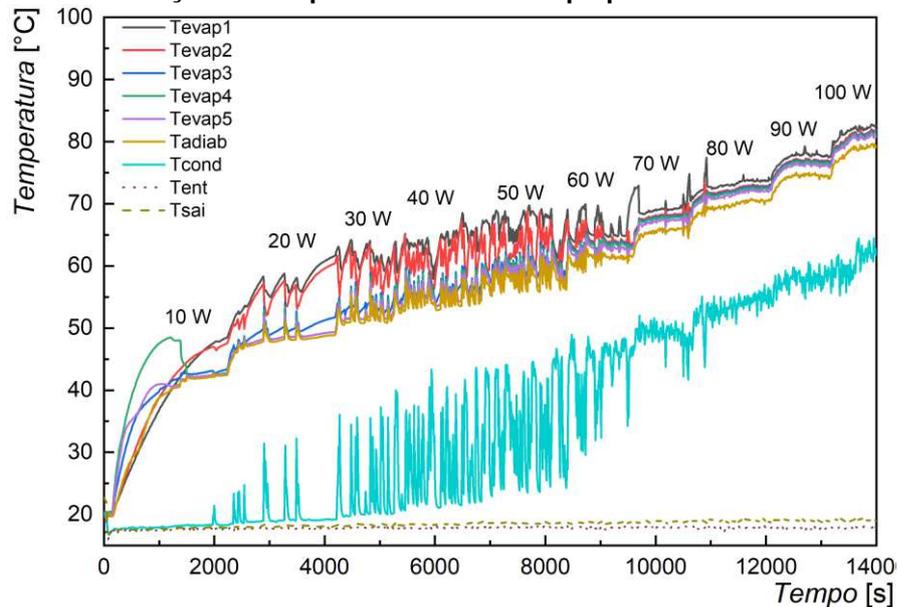
comportamento para os Termossifões B e C para cargas térmicas até 100W, respectivamente.

Gráfico 12 – Distribuição de temperaturas versus tempo para o Termossifão B até 100W



Fonte: Autoria Própria (2022)

Gráfico 13 – Distribuição de temperatura versus tempo para o Termossifão C até 100W

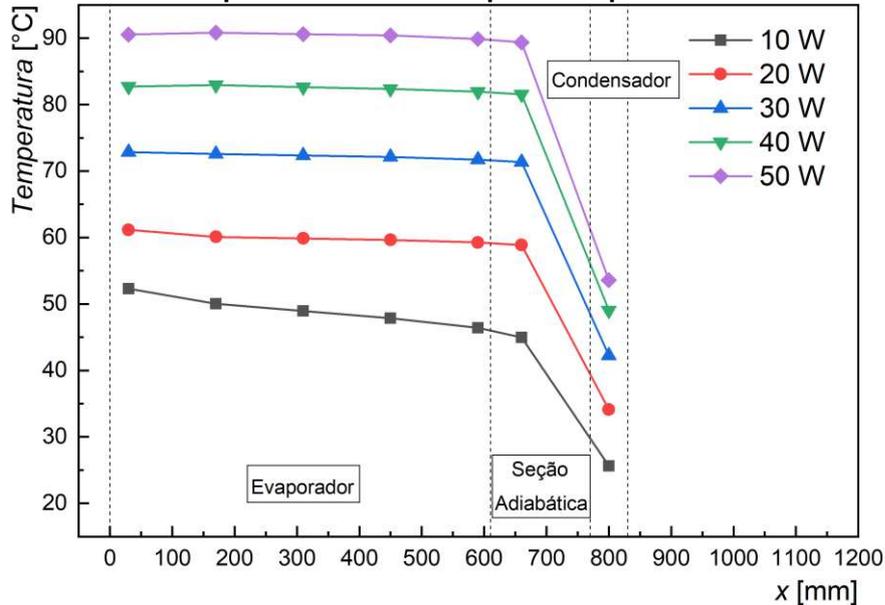


Fonte: Autoria Própria (2022)

Como é possível perceber a partir desses gráficos, os comportamentos das temperaturas das seções dos termossifões passaram a se apresentar de maneira mais estável para as cargas térmicas mais altas, assim como evidenciado para o Termossifão A, indicando que a ebulição ocorreu em menor quantidade de tempo.

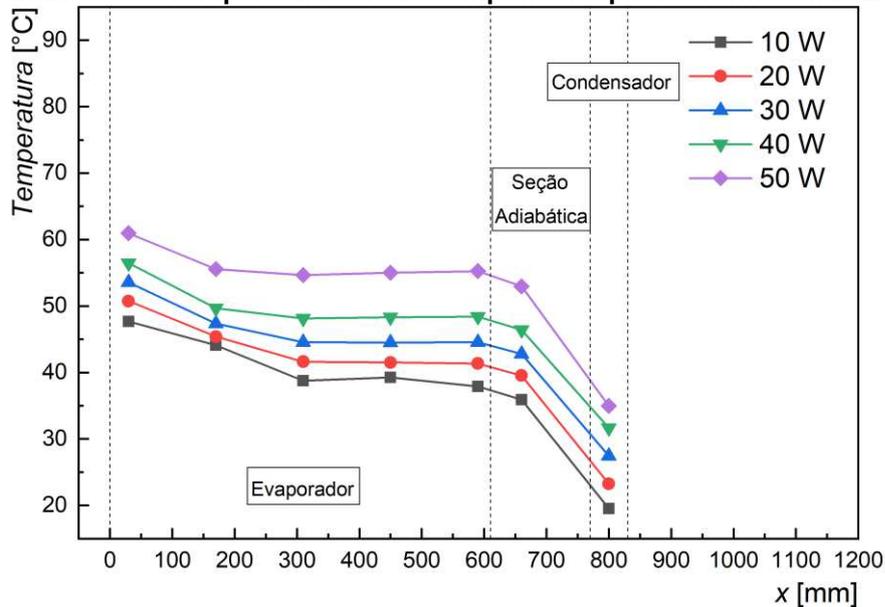
Gráfico 14, Gráfico 15 e Gráfico 16 apresentam a distribuição de temperatura em função do comprimento e da carga térmica aplicada para os Termossifões A, B e C, respectivamente.

Gráfico 14 – Temperatura versus comprimento para o Termossifão A



Fonte: Autoria Própria (2022)

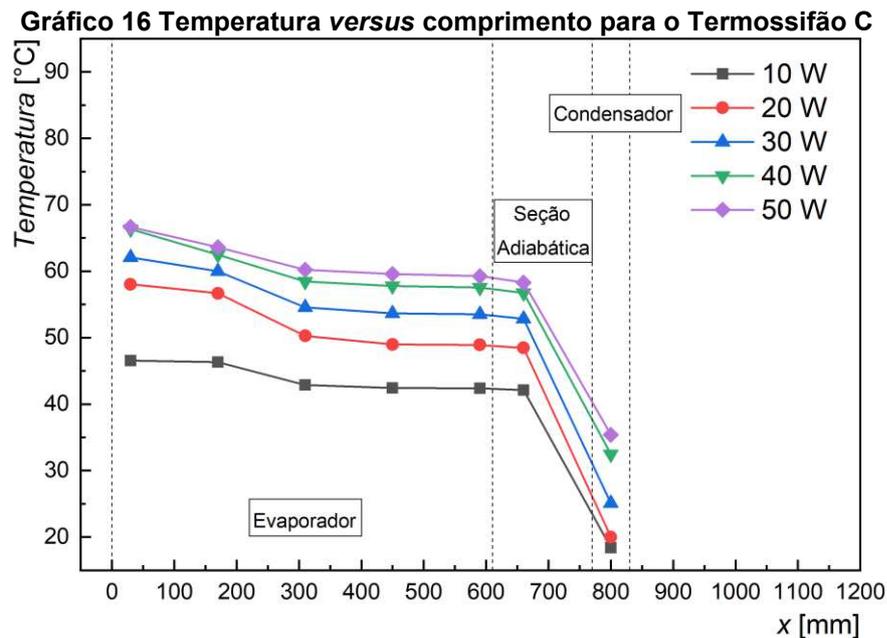
Gráfico 15 – Temperatura versus comprimento para o Termossifão B



Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir do Gráfico 14, Gráfico 15 e Gráfico 16 é possível perceber que os termossifões se apresentaram como esperado, uma vez que a região do evaporador se apresenta quase de forma isotérmica, o esperado para um processo de mudança de fase. Além disso, verifica-se que o isolamento na seção adiabática cumpriu seu

papel ao manter as temperaturas dessa região próximas à temperatura da região do evaporador. É possível notar que, além de apresentar menores temperaturas em todas as regiões, o Termossifão B apresentou menor diferença de temperatura entre evaporador e condensador, o que é um indicativo de que esse dispositivo passivo apresentou melhor desempenho térmico entre os três termossifões testados.

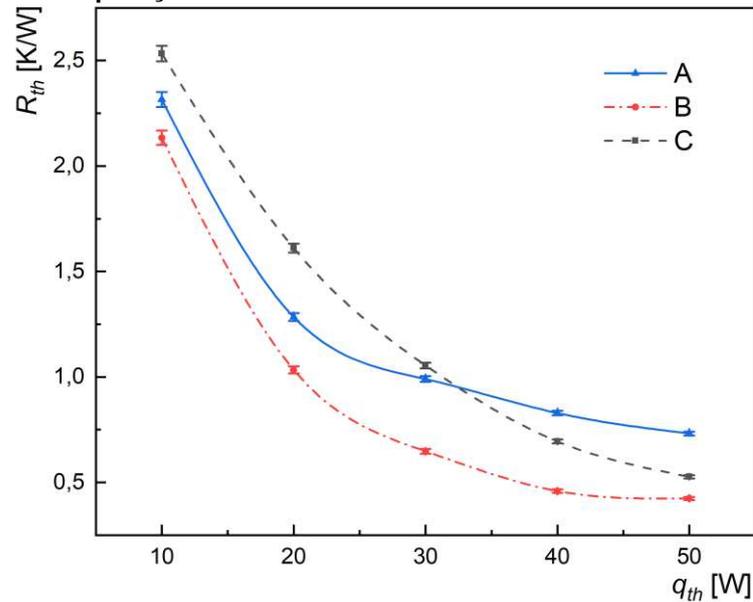


Esse fato pode ser confirmado a partir da análise da resistência térmica dos dispositivos, apresentada no Gráfico 17 e calculada a partir da Equação (36). Verifica-se a partir dessa figura que, para os três termossifões, a resistência térmica apresentou a tendência de diminuir com o aumento da carga térmica aplicada, o que era esperado pela Equação (36), já que a resistência térmica é inversamente proporcional à carga térmica aplicada.

Pode-se perceber que o Termossifão B apresentou menor resistência térmica que os demais termossifões testados para todas as cargas térmicas aplicadas, corroborando com as análises da distribuição de temperatura *versus* tempo e temperatura *versus* comprimento e indicando que esse é o dispositivo passivo de transferência de calor com melhor desempenho entre os três testados.

Dessa forma, pode-se agora realizar a análise acerca da razão de preenchimento no desempenho térmico do Termossifão B, finalizando a seleção de termossifões para o sistema PV/T.

Gráfico 17 – Comparação da resistência térmica entre os Termossifões A, B e C

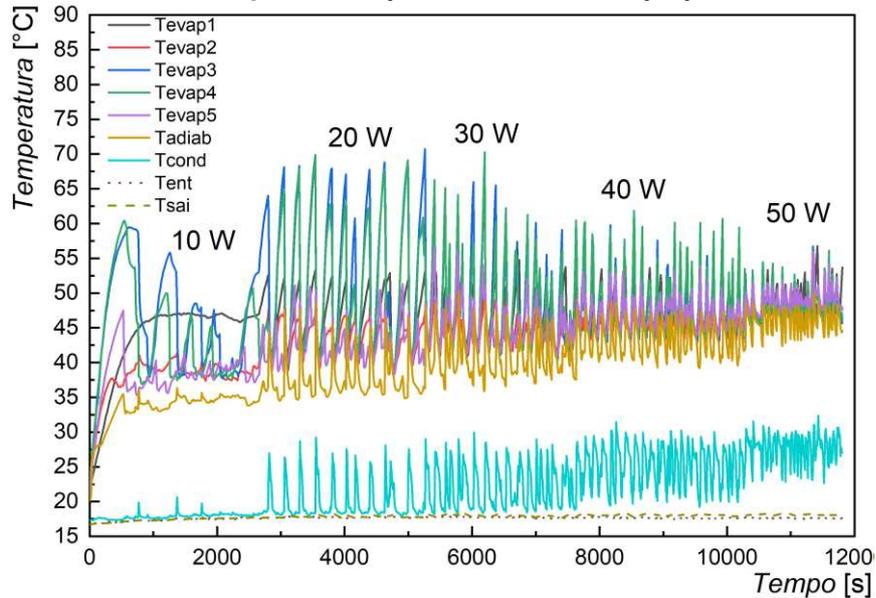


Fonte: Autoria Própria (2022)

3.3.2.2 Influência da razão de preenchimento

Gráfico 18, Gráfico 19 e Gráfico 20 apresentam a distribuição de temperatura *versus* tempo para as razões de preenchimento de 30%, 40% e 60%, respectivamente, considerando o Termossifão B.

Gráfico 18 – Distribuição de temperatura *versus* tempo para a RP de 30%

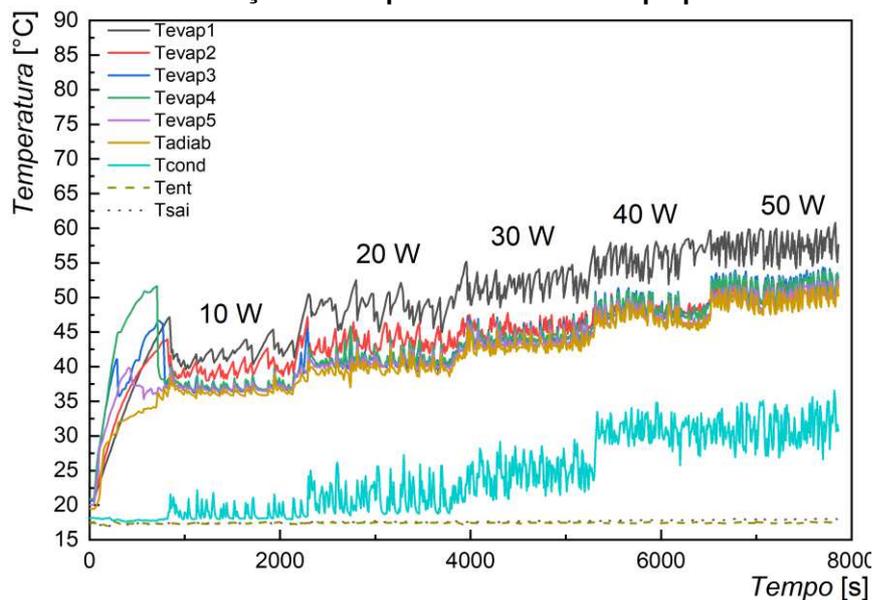


Fonte: Autoria Própria (2022)

Pelo Gráfico 18 percebe-se que o Termossifão B com RP de 30% não apresentou comportamento semelhante ao com RP de 50%, atingindo temperaturas muito superiores em suas regiões e não apresentando relação entre temperatura e

carga térmica aplicada. Uma possível hipótese para esse comportamento é a falta de fluido de trabalho no evaporador, uma vez que esse dispositivo é o que apresenta a menor quantidade de fluido de trabalho entre todos os testados. A falta de fluido de trabalho ocasiona um superaquecimento da região do evaporador, já que a região apresenta pouco fluido de trabalho para realizar o transporte de energia dessa região para as demais regiões do dispositivo. No momento em que ocorre o retorno do fluido de trabalho condensado do condensador, ocorre o resfriamento da região, ocasionando os diversos picos e vales de temperatura observados nessa figura.

Gráfico 19 – Distribuição de temperatura versus tempo para a RP de 40%



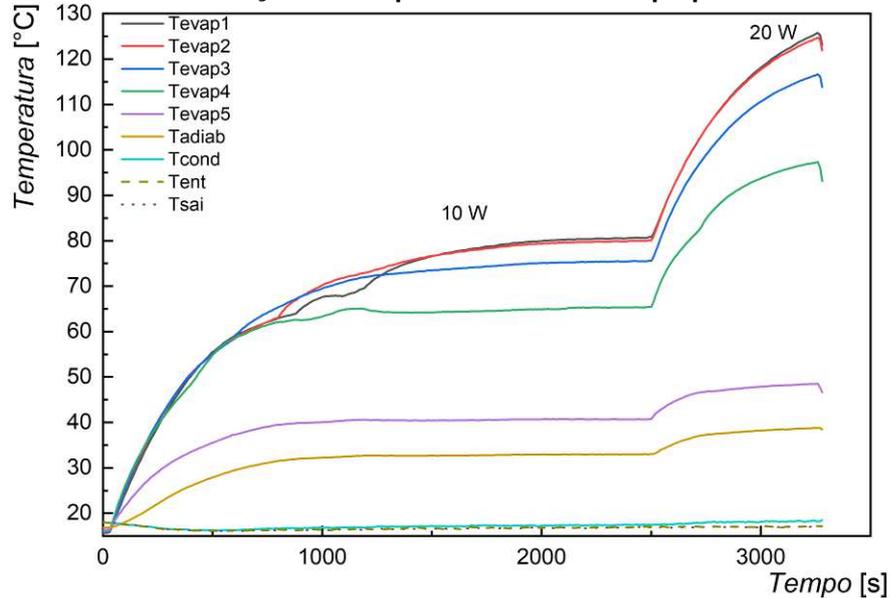
Fonte: Autoria Própria (2022)

Pelo Gráfico 19 é possível notar que o Termossifão B com RP de 40% apresentou comportamento similar ao do Termossifão B com RP de 50%. No entanto, ao observar a Gráfico 20 é possível perceber que o dispositivo passivo preenchido com RP de 60% alcançou temperaturas muito elevadas já para as duas primeiras cargas térmicas, além de que não ocorreu a transferência de energia entre as regiões do termossifão, ou seja, o dispositivo não entrou em funcionamento.

Uma possível justificativa para esse fato é que o Termossifão B com razão de preenchimento de 60% apresentava uma maior quantidade de fluido de trabalho no evaporador, levando mais tempo para evaporar, fazendo com que as bolhas ascendessem para o condensador com uma velocidade muito alta. Na transição entre região adiabática e condensador, a velocidade alta somada à constrição do fluxo de fluido de trabalho devido à conexão entre as regiões do termossifão com diferentes

diâmetros, pode ter impedido o retorno de fluido de trabalho para o evaporador, fazendo com que o evaporador operasse seco, fenômeno chamado de “dry out” (MANTELLI, 2021).

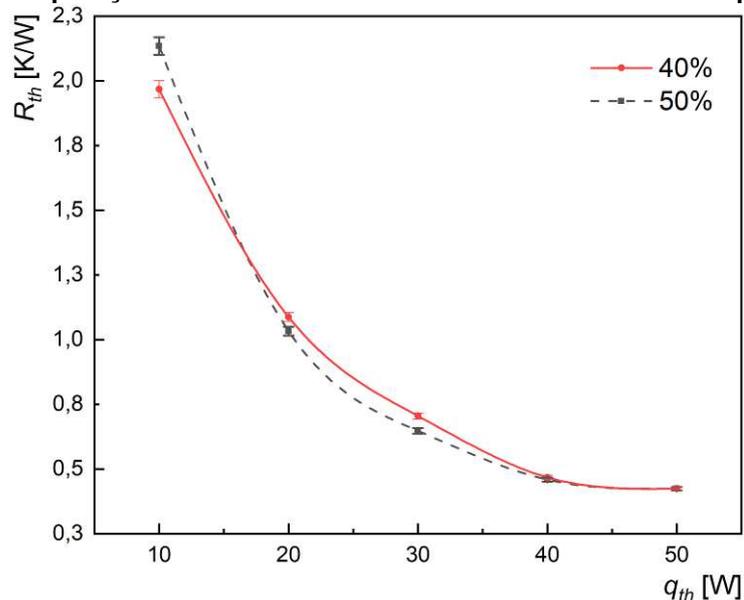
Gráfico 20 – Distribuição de temperatura versus tempo para a RP de 60%



Fonte: Autoria Própria (2022)

Dessa forma, ao verificar o comportamento destoante dos Termossifões B com razões de preenchimento de 30% e 60%, a seleção da razão de preenchimento foi realizada entre os dispositivos com RP de 40% e 50%, a partir de suas resistências térmicas (Gráfico 21).

Gráfico 21 – Comparação das resistências térmicas entre as razões de preenchimento



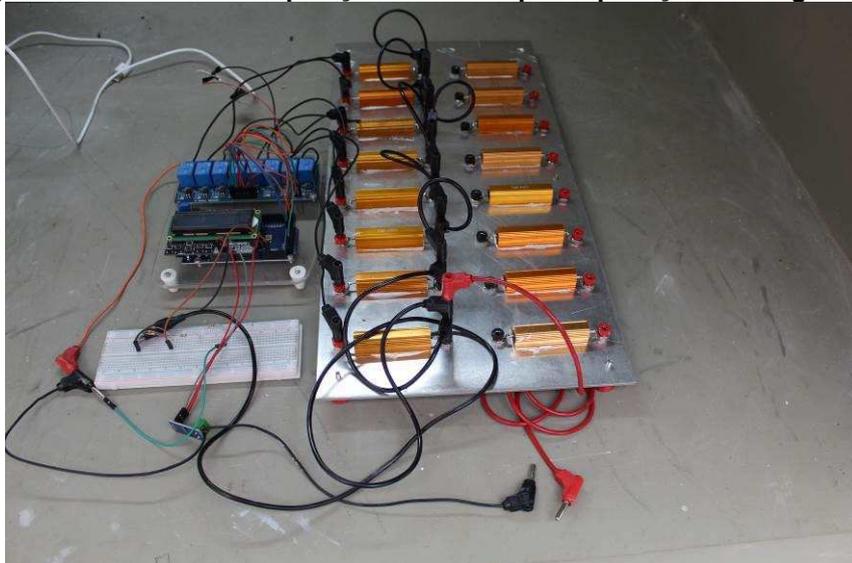
Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 21 apresenta a comparação da resistência térmica entre os Termossifões B com razões de preenchimento de 40% e 50%. Como é possível notar, com exceção da carga térmica de 10W, o termossifão com razão de preenchimento de 50% apresentou valores de resistência térmica menores ou iguais ao termossifão com RP de 40%. Sendo assim, a razão de preenchimento de 50% foi selecionada como a razão de preenchimento a ser utilizada nos termossifões do sistema PV/T, previamente selecionados do tipo B. Esse resultado corroborou com o resultado Moradgholi, Nowee & Farzaneh (2018) em sua investigação sobre a razão de preenchimento dos termossifões.

3.4 Sistema de aquisição de dados para aplicação de cargas

Para se obter curvas de tensão, corrente e potência de geradores elétricos se torna necessário aplicar diferentes cargas ao gerador. Para tal, a fim de se obter valores de tensão e corrente para o painel fotovoltaico e, conseqüentemente, obter suas curvas características e valores de potência, foi desenvolvido um sistema de associação e comutação de resistores para aplicação de cargas resistivas variáveis aos painéis fotovoltaicos. O sistema pode ser observado na Fotografia 8.

Fotografia 8 – Sistema de aquisição de dados para aplicação de carga resistiva



Fonte: Autoria Própria (2022)

Além da associação e comutação dos resistores utilizaram-se sensores para aquisição dos parâmetros necessários à obtenção da potência do painel. O sistema completo pode ser separado em 6 componentes principais, sendo eles: um banco de

resistores, um módulo relé de 5V com 8 canais, uma placa *Arduino™ Mega 2560*, um sensor de corrente ACS712 5A, um divisor de tensão e uma fonte de 5V. Para facilitar as conexões, o banco de resistores foi montado utilizando bornes para conexões de pinos do tipo banana, e os resistores foram colocado sobre uma placa de alumínio, utilizando-se pasta térmica no contato desses para facilitar a troca térmica.

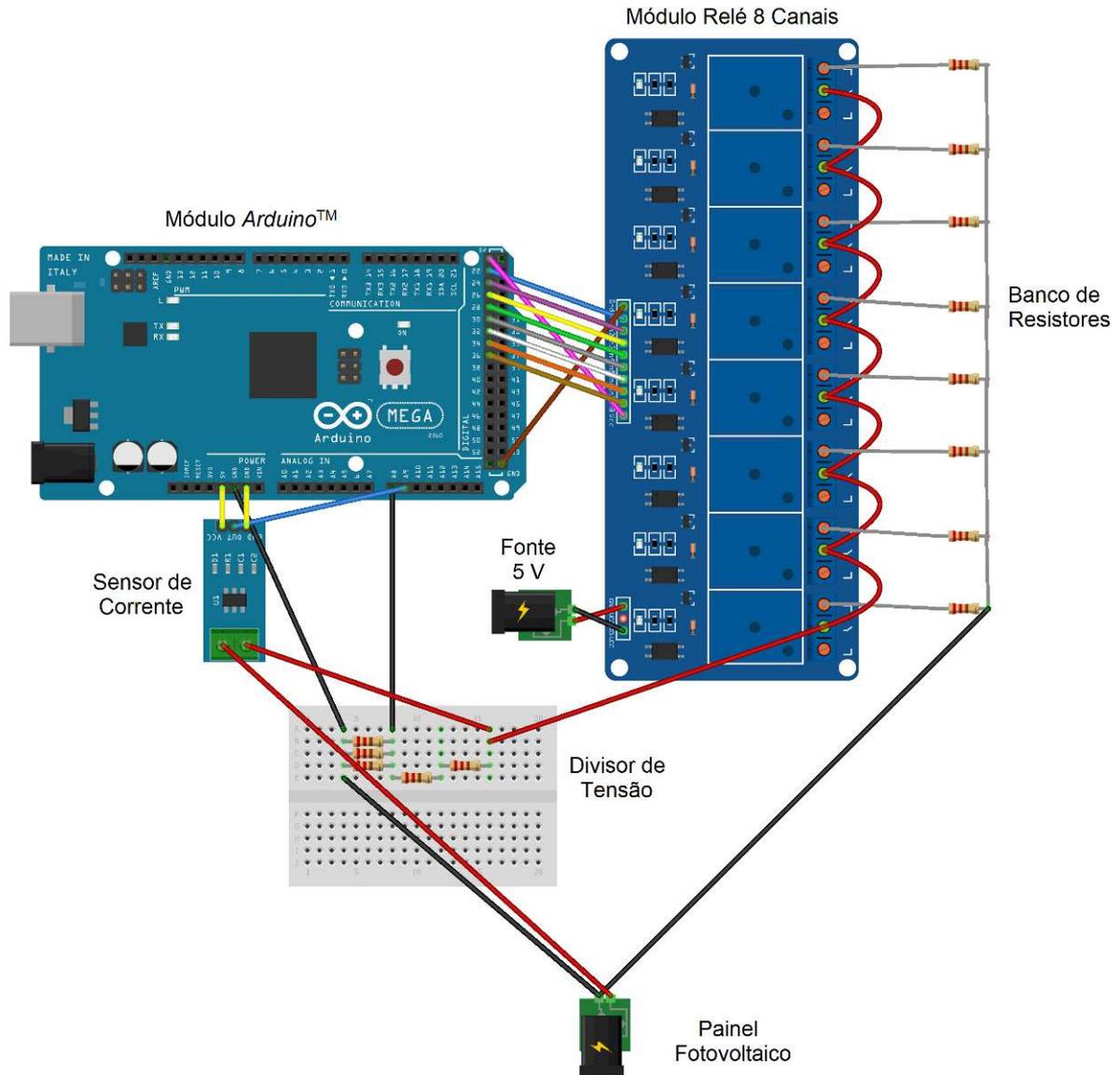
A Figura 17 ilustra as conexões realizadas entre os componentes, sendo escolhido como padrão a coloração preta para o positivo e vermelha para o negativo. As conexões entre cada componente serão detalhadas na sequência.

O princípio de funcionamento do sistema consiste na comutação de cargas resistivas às quais se aplicou a tensão do painel fotovoltaico, permitindo então que se obtenha a curva característica do mesmo. A comutação de cargas resistivas foi obtida a partir do módulo relé de 8 canais e 8 resistores de 100W de potência. Cada resistor foi ligado individualmente em cada canal do módulo relé de forma que, quando os oito canais estivessem ativos, todos os resistores estariam associados em paralelo. Uma vez que os canais podem ser ligados ou desligados individualmente, são dois os estados possíveis para cada resistor, resultando assim em um total de 2^8 combinações/resistências possíveis, ou seja, 256 valores distintos de carga resistiva.

Assim, a partir de uma programação em *Arduino™*, foi possível variar a resistência equivalente da associação de resistores (carga resistiva) ao se ativar diferentes canais do módulo relé em cada instante de tempo, podendo-se obter valores de tensão e corrente do painel fotovoltaico aplicado a diferentes cargas resistivas. Para facilitar a aquisição de dados, foi adicionado um display LCD *shield* com teclado ao módulo *Arduino™*. A programação em *Arduino™*, assim como a calibração do sistema de aquisição está apresentada em detalhes no APÊNDICE C.

Cada leitura a partir do sistema fornece dados de tensão [V], corrente [A] e potência [W] do painel fotovoltaico. Foram selecionados 24 valores distintos de resistências elétricas que foram obtidos a partir de associações variadas de resistores definidos por uma sequência de 8 dígitos de 0 ou 1, indicando ligado ou desligado, respectivamente. A aquisição de dados leva um tempo total de 45 segundos.

Figura 17 – Esquema das ligações elétricas do sistema de aquisição de dados



Fonte: Autoria Própria (2022)

A potência (P_{ele}) é calculada a partir da Equação (37), correspondendo à multiplicação entre a tensão (V) e a corrente (I) do painel fotovoltaico.

$$P_{ele} = VI. \quad (37)$$

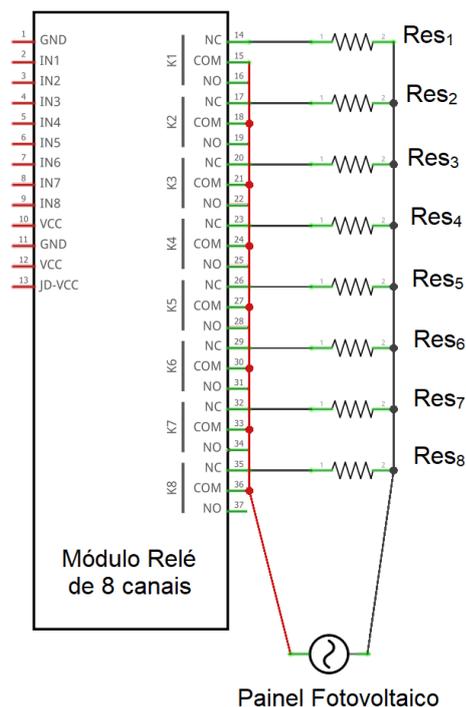
As conexões entre o painel fotovoltaico e o sistema de aquisição foram realizadas a partir de cabos com conectores do tipo banana, facilitando assim a conexão, já que para alternar entre a aquisição de dados do sistema PV/T e do painel convencional basta desconectar os cabos de um painel e realizar a conexão com o outro.

Os principais resultados obtidos a partir do sistema de aquisição de dados desenvolvido, assim como a análise desses, podem ser encontrados no APÊNDICE D.

3.4.1 Conexão entre resistores

A Figura 18 detalha as conexões entre os resistores e os canais do módulo relé. Cada módulo relé possui três pinos para conexão, o comum (*COM*), normalmente fechado (*NC*) e normalmente aberto (*NO*). Cada resistor foi conectado ao pino *NC* dos canais do módulo relé, assim como também foram conectados entre si. Para realizar a associação em paralelo entre os resistores, os pinos *COM* de cada canal do módulo relé foram conectados entre si. Ao estar ativado, a conexão existente em cada canal ocorre entre os pinos *COM* e *NC*, enquanto que, ao desativar o canal, essa conexão é desfeita, e é a conexão *COM-NO* que passa a estar energizada.

Figura 18 – Conexão entre resistores e módulo relé



Fonte: Autoria Própria (2022)

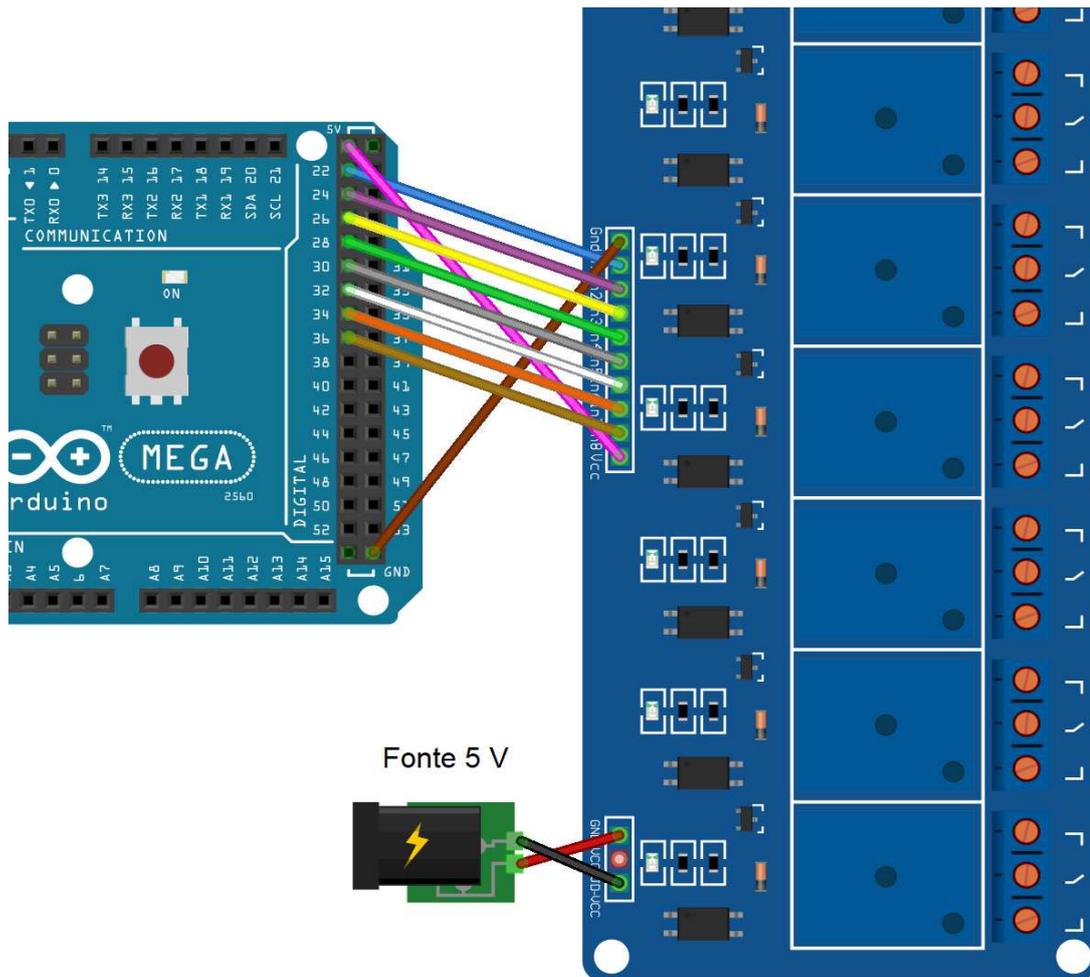
Foram utilizados resistores de 100W de potência com um casco de alumínio, com resistências variando entre 100,47 Ω e 1,15 Ω (Res₁ = 100,47 Ω ; Res₂ = 47,96 Ω ; Res₃ = 14,84 Ω ; Res₄ = 7,80 Ω ; Res₅ = 4,83 Ω ; Res₆ = 4,14 Ω ; Res₇ = 3,50 Ω e; Res₈ = 1,15 Ω), assim, em um caso em que os canais 1 e 7 estejam ativos, a resistência equivalente fornecida pelo sistema seria de aproximadamente 3,38 Ω . Os resistores

foram conectados ao polo positivo do painel fotovoltaico, ao passo que os pinos *COM* foram conectados ao polo negativo.

3.4.2 Conexões do módulo relé

A Figura 19 detalha as conexões do módulo relé com o controlador *Arduino*TM e com a fonte 5V.

Figura 19 – Conexões do módulo relé



Fonte: Aatoria Própria (2022)

A fonte 5V foi utilizada para fornecer energia elétrica ao módulo relé, evitando assim consumo excessivo de carga fornecida pelo controlador *Arduino*TM. Utilizou-se um carregador de celular bivolt USB 5V para tal alimentação, sendo conectado o polo positivo no pino *JD-VCC* e o polo negativo no pino *GND*.

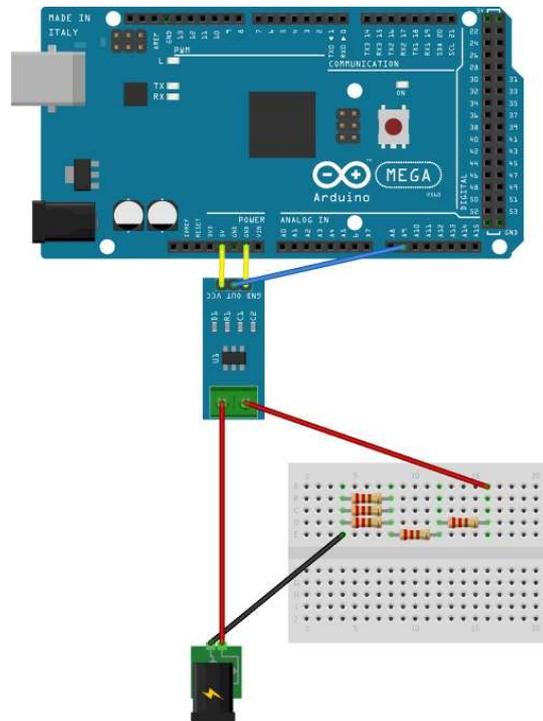
Em relação à conexão módulo relé e controlador, as conexões realizadas foram: *GND-GND*, *5 V-VCC*, *IN1-22*, *IN2-24*, *IN3-26*, *IN4-28*, *IN5-30*, *IN6-32*, *IN7-34*, *IN8-36*, em que as portas 22 a 36 correspondem a portas digitais do controlador, e os

pinos IN1 a IN8 correspondem ao pino de sinal de cada canal do módulo relé, ocorrendo a partir da energização desses pinos a ativação de cada canal.

3.4.3 Sensor de corrente

A Figura 20 detalha as conexões do sensor de corrente utilizado. O sensor foi alimentado pelo controlador *Arduino*TM a partir da conexão *VCC-5V*, e aterrado a partir da conexão *GND-GND*. O pino *OUT*, correspondente ao pino que fornece a leitura da corrente do sistema, foi conectado ao pino analógico *A9* do controlador. O sensor foi conectado em série com o polo negativo do painel fotovoltaico e o divisor de tensão, de forma a realizar a leitura da corrente fornecida pelo painel.

Figura 20 – Conexões do sensor de corrente

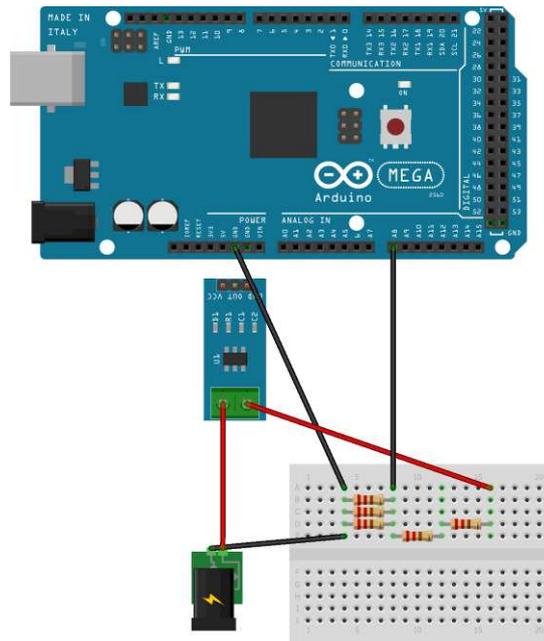


Fonte: Autoria Própria (2022)

3.4.4 Divisor de tensão

A Figura 21 detalha as conexões realizadas com o divisor de tensão. Esse divisor tem como função elevar o valor máximo de leitura de tensão realizada pelo controlador *Arduino*TM, uma vez que o controlador tem capacidade de leitura de 0V até 5V, que é realizada nas entradas analógicas da placa, a qual possui uma precisão de 10 bits.

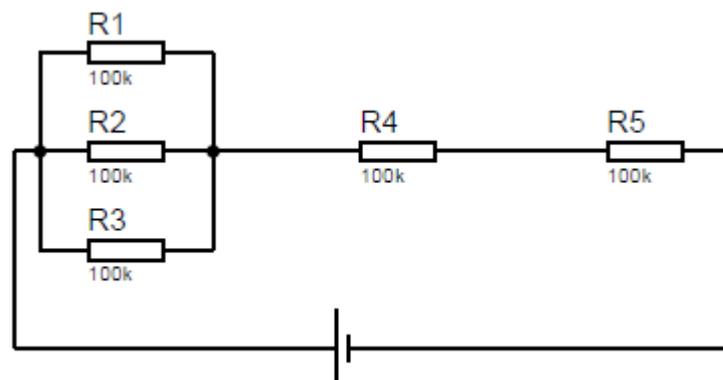
Figura 21 – Conexões do divisor de tensão



Fonte: Autoria Própria (2022)

O divisor é composto por 5 resistores de resistência de $100\text{k}\Omega$ e, como pode ser observado na Figura 22, consiste em dois resistores em série entre si, em série com outros três resistores em paralelo entre si.

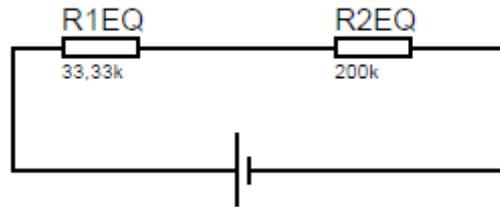
Figura 22 – Configuração dos resistores



Fonte: Autoria Própria (2022)

Essa associação de resistores pode ser simplificada ao se realizar a associação em paralelo entre os resistores R_1 , R_2 e R_3 , obtendo R_{1eq} , e entre os resistores R_4 e R_5 , obtendo R_{2eq} , como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Associação dos resistores



Fonte: Autoria Própria (2022)

Os valores de $33,33\text{k}\Omega$ e $200\text{k}\Omega$ foram obtidos a partir da associação de resistores em série e paralelo, apresentadas nas Equações (38) e (39), respectivamente.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \dots + \frac{1}{Rn} \right), \quad (38)$$

$$R_{eq} = R1 + R2 + \dots + Rn. \quad (39)$$

Considerando o sistema da Figura 23, dois resistores em série conectados a uma fonte de energia, sabe-se que a tensão fornecida pela fonte (U_{total}) será igual à soma da tensão dos dois resistores (U_1 e U_2) (Equação (40)). Sabe-se também, da Lei de *Ohm*, que a tensão é igual à resistência multiplicada pela corrente (I) sobre o componente (Equação (41)).

$$U_{total} = U_1 + U_2, \quad (40)$$

$$U_n = R_n I. \quad (41)$$

Substituindo a Equação (40) na Equação (41), obtém-se a Equação (42).

$$U_{total} = I(R1 + R2), \quad (42)$$

$$I = \frac{U_{total}}{R1 + R2}.$$

A partir da substituição do valor de I da Equação (41) na Equação (42), torna-se possível avaliar a tensão sobre cada elemento do sistema, como pode ser observado na Equação (43).

$$U_n = \frac{R_n U_{total}}{R1 + R2}. \quad (43)$$

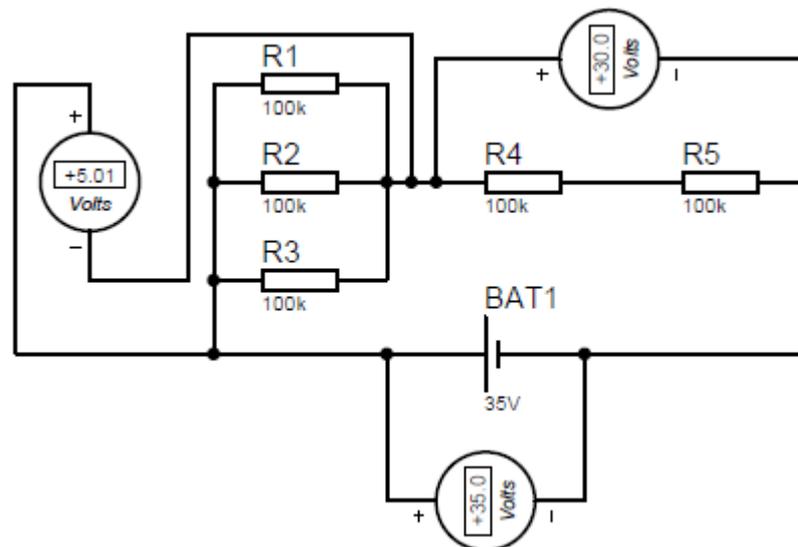
Dessa forma, o divisor de tensão desenvolvido teve como objetivo de, a partir da medida de tensão sobre o resistor $R1_{eq}$, obter o valor da tensão total fornecida pelo painel fotovoltaico. Como pode ser observado na Equação (44), para se obter a tensão total, deve-se multiplicar o valor de tensão medido em $R1_{eq}$ por sete, permitindo então que fossem realizadas leituras de tensão até 7 vezes maiores do que a máxima permitida pelo controlador *Arduino*TM, fato esse verificado a partir de uma simulação com o programa computacional *Proteus*TM 8, apresentada na Figura 24.

$$U_1 = \frac{R1}{R1 + R2} U_{total},$$

$$U_{total} = \frac{U_1 (R1 + R2)}{R1}, \quad (44)$$

$$U_{total} = \frac{U_1 (33,33 + 200)}{33,33} = 7U_1.$$

Figura 24 – Simulação do divisor de tensão



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para realizar a leitura da tensão sobre o $R1_{eq}$, uma de suas extremidades foi aterrada a partir de um pino *GND* do controlador, enquanto a outra extremidade foi conectada ao pino analógico *A8*, como pode ser observado na Figura 21.

3.5 Meio absorvedor

Como visto no Tópico 2.10, grande parte dos trabalhos desenvolvidos sobre sistemas PV/T consistiram na construção do sistema desde o princípio, sendo realizada a adaptação de um painel fotovoltaico comercial apenas nos trabalhos de Moradgholi, Nowee & Abrishamchi (2014) e Moradgholi, Nowee & Farzaneh (2018).

Nos estudos em que o sistema foi todo construído, os termossifões foram soldados em uma chapa de alumínio que continha as células fotovoltaicas em sua outra superfície. Para o presente estudo esse procedimento de soldagem dos termossifões torna-se inviável ao se considerar alguns fatores.

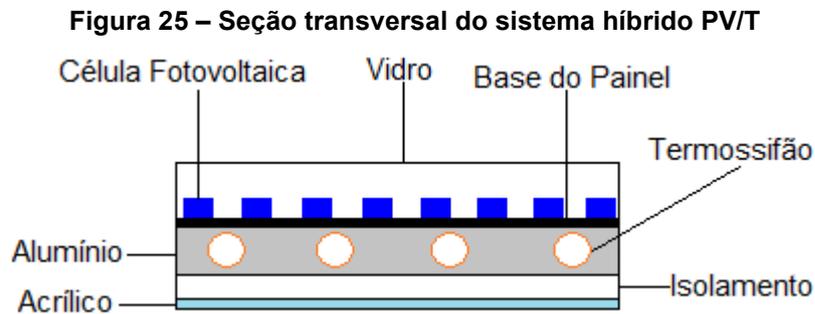
Todos os termossifões desse presente estudo foram construídos a partir da brasagem dos componentes com estanho, logo, soldar o dispositivo pode ocasionar a fusão do estanho presente nas junções entre componentes, permitindo a entrada de ar no interior dos termossifões e afetando seu desempenho térmico. Além disso, devido à presença de água no interior dos dispositivos, o processo de solda pode elevar a temperatura a um ponto em que a pressão do fluido exceda a resistência interna do invólucro, ocasionando seu rompimento.

Uma solução seria realizar a soldagem do invólucro em uma chapa de alumínio e, posteriormente, realizar todo o processo de montagem, evacuação e preenchimento dos termossifões. Apesar de ser uma opção viável, essa opção impossibilita a realização de testes individuais nos termossifões a fim de verificar seu comportamento e desempenho térmico, uma vez que é dificultado o processo de aquecimento descrito no Tópico 3.3.1.

Nos trabalhos de Moradgholi, Nowee & Abrishamchi (2014) e Moradgholi, Nowee & Farzaneh (2018), em que foram realizadas adaptações de um painel fotovoltaico convencional para um sistema PV/T, assim como realizado no presente estudo, construíram-se termossifões a partir de lingotes planos de alumínio pelo processo de fundição, que requer elevado uso de energia em fornos de fundição e também medidas de segurança para ser executado, tornando esse processo inviável.

Dessa forma o presente estudo visou implementar uma nova proposta de meio absorvedor de mais fácil construção. Essa proposta consistiu em utilizar barras chatas de alumínio com furos transversais para inserção dos termossifões, de forma que o alumínio fique em contato com a parte de trás do painel fotovoltaico, absorvendo seu calor, e transferindo esse calor aos termossifões presentes em seu interior. A

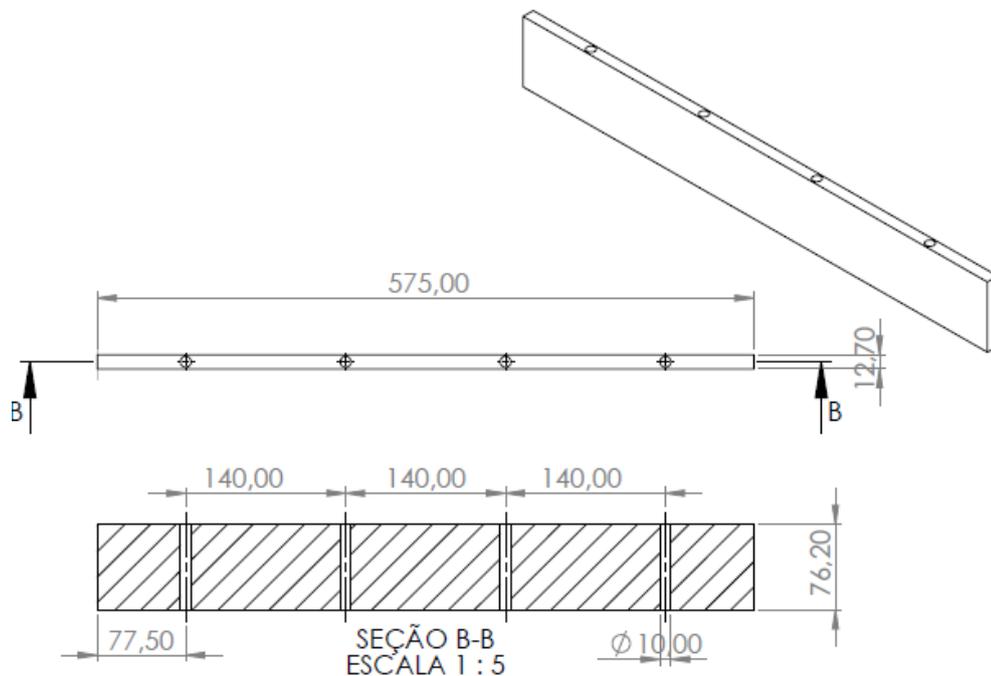
Figura 25 apresenta a seção transversal do sistema composto pelo painel fotovoltaico, meio absorvedor e os termossifões, evidenciando o posicionamento de cada elemento.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Foram utilizadas ao todo 8 barras chatas de alumínio contendo 3" (76,2mm) de altura e 1/2" (12,7mm) de espessura, como pode ser observado na Figura 26. Foram feitas 4 furações em cada barra de forma a permitir a utilização de 4 termossifões. A distância entre centros dos furos foi realizada conforme as dimensões dos têis de PVC utilizados no *manifold*.

Figura 26 – Barras chatas de alumínio



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para obter barras conforme a Figura 26, primeiramente foi realizado o corte de uma barra chata de 6m de comprimento em pedaços contendo 585mm cada

utilizando uma serra fita. Feito isso, os oito pedaços foram posicionados em uma fresadora utilizando uma morsa.

Para deixar todas as barras com a mesma dimensão foi realizada a operação de fresamento lateral em ambos os lados das barras, conforme pode ser observado na Fotografia 9, obtendo assim todas as peças com a mesma dimensão de 575mm de comprimento.

Fotografia 9 – Fresamento lateral das barras de alumínio



Fonte: Autoria Própria (2022)

Após a operação de fresamento lateral foi realizada a furação das barras. Primeiramente, com uma broca de aço rápido (HSS) de 4mm de diâmetro, foram realizadas as quatro furações em cada barra, utilizando a mesa de coordenadas da fresadora para posicionamento correto. O processo de furação pode ser observado na Fotografia 10.

Posteriormente, utilizou-se uma broca de aço rápido de 8mm e repetiu-se o processo de furação utilizando as mesmas coordenadas dos furos anteriores. Por fim, para garantir que o centro dos furos estava simétrico em relação às laterais das barras, posicionaram-se individualmente as barras chatas na fresadora e, a partir de uma fresa topo de aço rápido, alargaram-se os furos para o diâmetro de 10mm.

Fotografia 10 – Furação das barras de alumínio

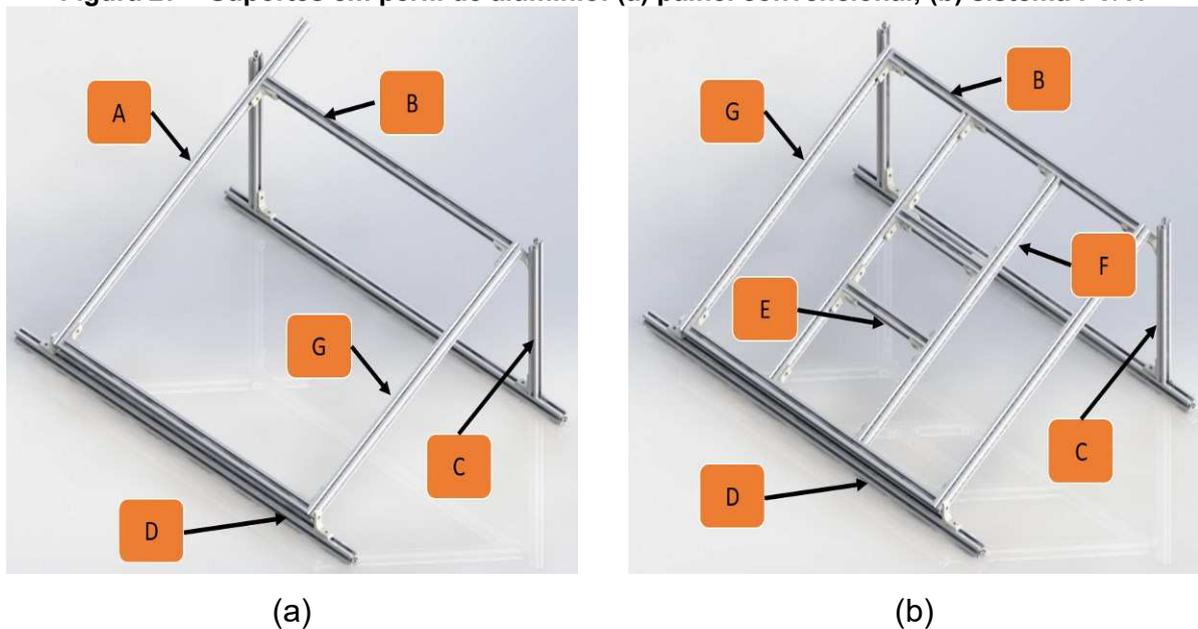


Fonte: Autoria Própria (2022)

3.6 Montagem do sistema PV/T

Para poder realizar o posicionamento dos painéis fotovoltaicos na inclinação correta, foram construídos dois suportes em perfil estrutural de alumínio 20mm x 20mm. A Figura 27 mostra os suportes utilizados.

Figura 27 – Suportes em perfil de alumínio: (a) painel convencional; (b) sistema PV/T.



(a)

(b)

Fonte: Autoria Própria (2022)

Para o suporte do painel fotovoltaico convencional foi utilizada uma barra com comprimento de 740mm (A), duas barras de 660mm (B), duas barras de 305mm (C), duas barras de 900mm (D) e uma barra de 620mm (G). Para o suporte do sistema PV/T foram adicionadas duas barras de 220mm (E) e duas barras de 580mm (F), além de ser retirada a barra de 740mm e adicionada uma nova barra de 620mm. As barras E e F foram adicionadas de forma a dar suporte ao meio absorvedor e favorecer o contato desse com o painel fotovoltaico devido à pressão exercida pelo peso do sistema PV/T.

Todas as conexões entre as barras foram realizadas utilizando cantoneiras de alumínio 38mm x38mm x15mm, parafusos M6 e porca quadrada para perfil 20mm x20mm com canal de 8mm. A inclinação dos suportes foi dada a partir das conexões entre as barras D-G e C-G, obtendo uma inclinação de 25° com a horizontal.

A Fotografia 11 evidencia a montagem do painel fotovoltaico comercial no suporte. A montagem foi realizada também a partir de cantoneiras que foram posicionadas em furações previamente existentes na estrutura de alumínio do painel fotovoltaico. Além disso, pode ser verificado na parte de trás do painel fotovoltaico a ligação elétrica realizada a partir de dois cabos do tipo banana no compartimento contendo os contatos do painel fotovoltaico.

Fotografia 11 – Painel fotovoltaico comercial no suporte

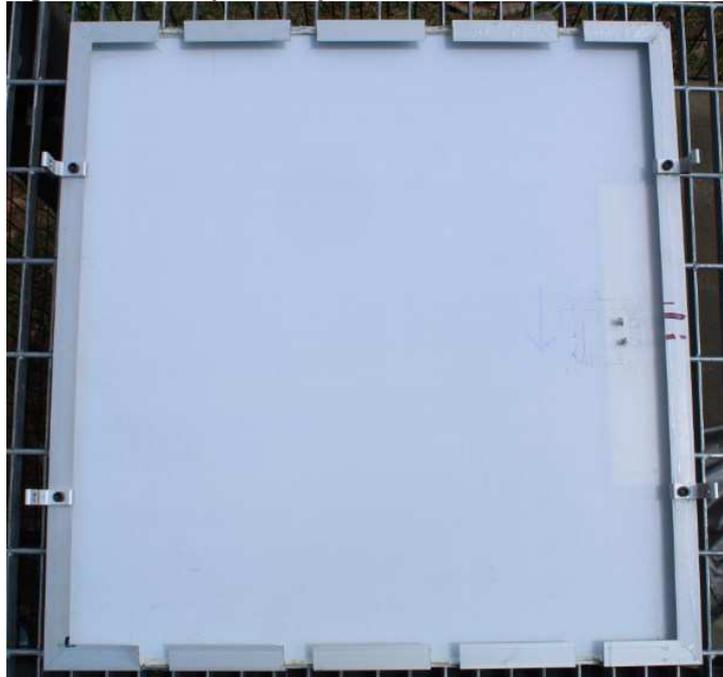


Fonte: Autoria Própria (2022)

Para realizar a montagem do sistema PV/T, primeiramente foi retirado o compartimento de plástico presente na parte de trás do painel fotovoltaico comercial que tem como objetivo realizar o isolamento dos contatos elétricos. Além disso, foram realizados rasgos na armação de alumínio exterior ao painel fotovoltaico de forma a permitir a passagem dos termossifões. Todos os adesivos foram retirados, e a superfície foi limpa utilizando álcool isopropílico. A Fotografia 12 ilustra o preparo do painel fotovoltaico.

Na base do painel fotovoltaico foram posicionados cinco termopares do tipo K *Omega Engineering*TM, sendo um no centro do painel e quatro nas extremidades. Como pode ser observado na Figura 28, o posicionamento dos termopares em relação às extremidades foram de 102,5mm das extremidades superior e inferior, e 42,5mm das laterais do painel. Os mesmos posicionamentos foram adotados para aquisição de dados de temperatura do painel fotovoltaico convencional.

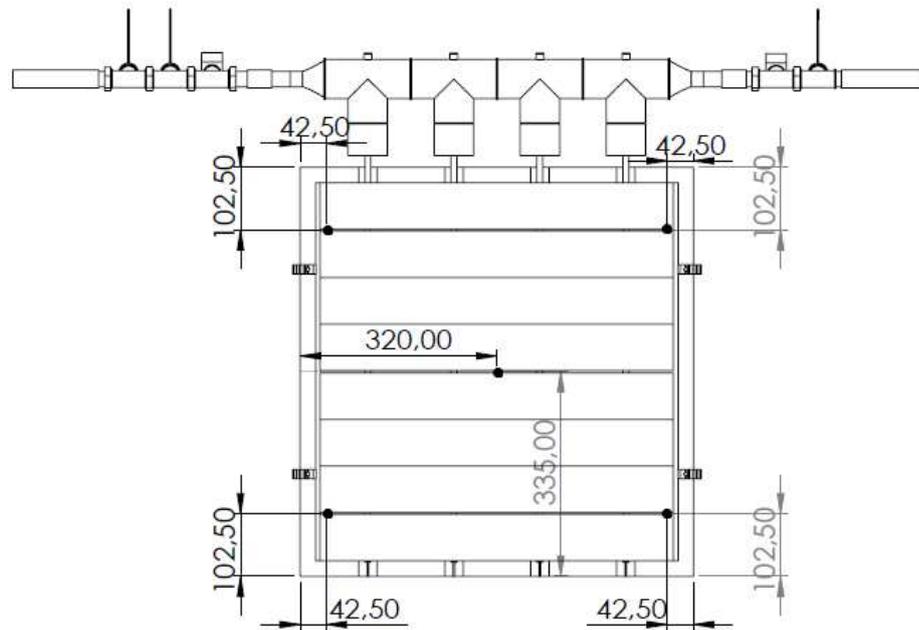
Fotografia 12 – Preparo do painel fotovoltaico do sistema PV/T



Fonte: Aatoria Própria (2022)

O *manifold* foi montado a partir dos tês de PVC utilizados na região dos condensadores dos termossifões. Os tês foram conectados entre si por tubulações de PVC de 60mm de forma que a distância entre centros dos termossifões fosse de 140mm. Para evitar vazamentos, as conexões de PVC foram cobertas com uma massa plástica automotiva utilizando catalisador para cura.

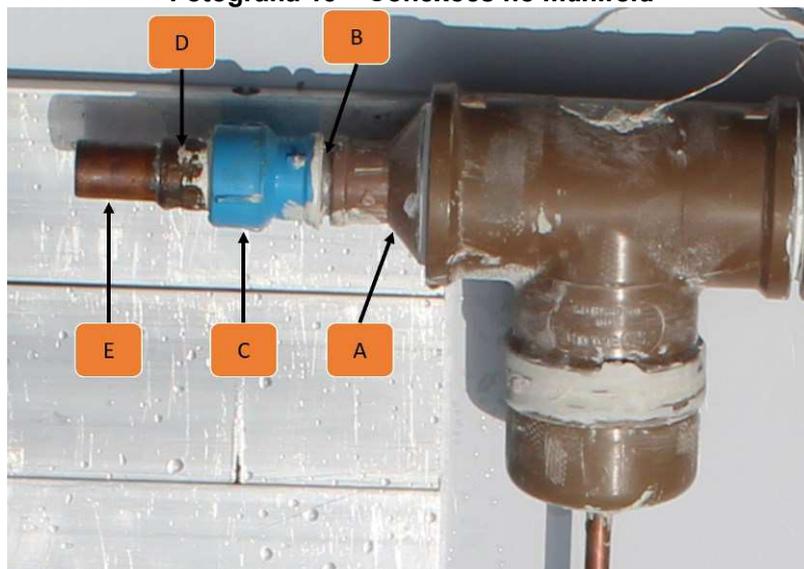
Figura 28 – Posicionamento dos termopares na base do painel fotovoltaico.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Nos tês dos termossifões das pontas foram utilizadas reduções internas de PVC soldável de 60mm para 25mm (A), reduções essas que foram conectadas a tubos de PVC de 25mm (B). Na outra extremidade dos tubos de PVC foram conectadas luvas soldáveis de 25 mm com bucha de latão de 3/4" (C). A partir de conector de latão de 3/4" para 22 mm(D), foi brasada uma tubulação de cobre de 22mm de diâmetro (E) na extremidade do *manifold*, como pode ser observado na Fotografia 13.

Fotografia 13 – Conexões no *manifold*



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para melhorar a troca térmica entre a base do painel fotovoltaico e as barras de alumínio, uma fina camada de pasta térmica foi aplicada sobre a base do painel fotovoltaico (Fotografia 14). A pasta térmica aplicada consistiu em uma mistura em proporção de 50%/50% em massa de uma pasta térmica *Thermagic*TM ZF-12 (12W/mK) e uma pasta térmica *Implastec*TM (1,2W/mK).

Fotografia 14 – Aplicação de pasta térmica na base do painel fotovoltaico



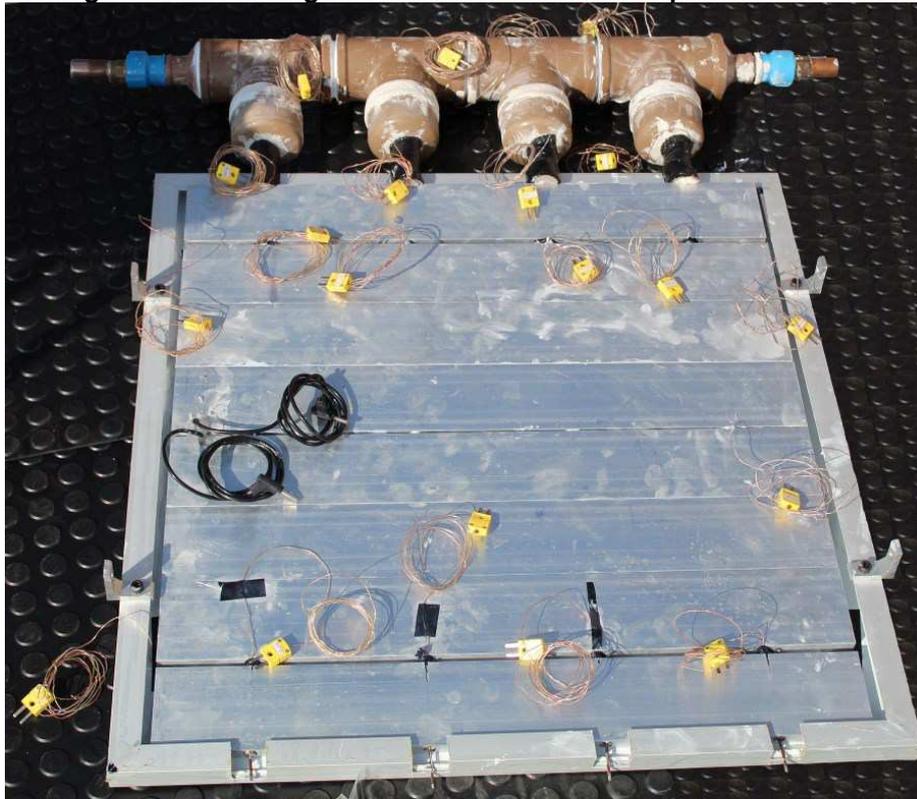
Fonte: Autoria Própria (2022)

Os termossifões foram inseridos no meio absorvedor, sendo utilizada pasta térmica no contato entre os termossifões e o alumínio para melhorar a resistência térmica de contato. Foram colocados dois termopares na região do evaporador, um termopar na seção adiabática e outro no condensador de cada termossifão. A posição dos termopares em relação à extremidade do evaporador foi de 77,50mm, 542,50mm, 652,50mm e 800,00mm. A seção adiabática foi isolada com isolamento térmico de fibra cerâmica e uma camada de polietileno.

Após a montagem dos termossifões no interior do meio absorvedor, o conjunto foi posicionado em contato com a base do painel fotovoltaico. Foram realizados dois rasgos nas duas barras centrais do meio absorvedor de forma a permitir acesso aos dois terminais elétricos do painel fotovoltaico. A Fotografia 15 ilustra o posicionamento do meio absorvedor com os termossifões no painel fotovoltaico. Percebe-se por essa figura o posicionamento dos termopares, assim como os cabos do tipo banana soldados aos terminais elétricos do painel fotovoltaico. As conexões elétricas foram isoladas do meio absorvedor utilizando silicone acético.

Para evitar trocas térmicas com o ambiente e visar que a maior parte do calor absorvido pelo alumínio fosse transferido aos termossifões, o meio absorvedor foi isolado com uma manta de isolamento de fibra cerâmica. De forma a manter todos os componentes em contato, colocou-se uma chapa de acrílico sobre o isolamento, permitindo que o suporte apresentado na Figura 27 (b) pressionasse todos os componentes uns contra os outros, finalizando a montagem do sistema PV/T.

Fotografia 15 – Montagem do meio absorvedor no painel fotovoltaico



Fonte: Autoria Própria (2022)

A Fotografia 16 evidencia a montagem do sistema PV/T em seu suporte, assim como a manta de isolamento térmico utilizada.

Fotografia 16 – Sistema PV/T montado em seu suporte



Fonte: Autoria Própria (2022)

3.7 Procedimento experimental

Os testes experimentais do sistema híbrido fotovoltaico/térmico ocorreram em comparação com um painel fotovoltaico convencional do mesmo modelo operando sob as mesmas condições. Os dois painéis fotovoltaicos foram posicionados sobre o mezanino metálico externo existente no pátio solar do LabSOLAR em uma posição a 25° da horizontal correspondente à latitude da cidade de Ponta Grossa/PR: $25^\circ 05' 42''$ Sul, além de estar posicionado para o norte geográfico. A Fotografia 17 ilustra o posicionamento dos painéis fotovoltaicos.

Para a coleta de dados de temperatura de entrada e saída de água no *manifold* foram inseridos termopares do tipo K *Omega Engineering*TM pela tubulação de cobre acoplada aos tês de forma que o termopar ficasse posicionado entre a redução interna de 60mm para 25mm e a luva soldável de 25mm. O *manifold* foi conectado ao sistema de circulação utilizando mangueiras de borracha de 7/8" de diâmetro, resistente a temperaturas de até 100°C e 20bar de pressão.

A irradiação solar (G) foi medida utilizando um piranômetro *Kipp & Zonen*TM *CMP3* posicionado na mesma inclinação e orientação dos painéis fotovoltaicos, como pode ser observado na Fotografia 17. Para aferição da queda de pressão no *manifold* foram utilizados transdutores de pressão *IFM*TM PN2024.

Fotografia 17 – Posicionamento dos painéis fotovoltaicos durante os testes



Fonte: A autoria Própria (2022)

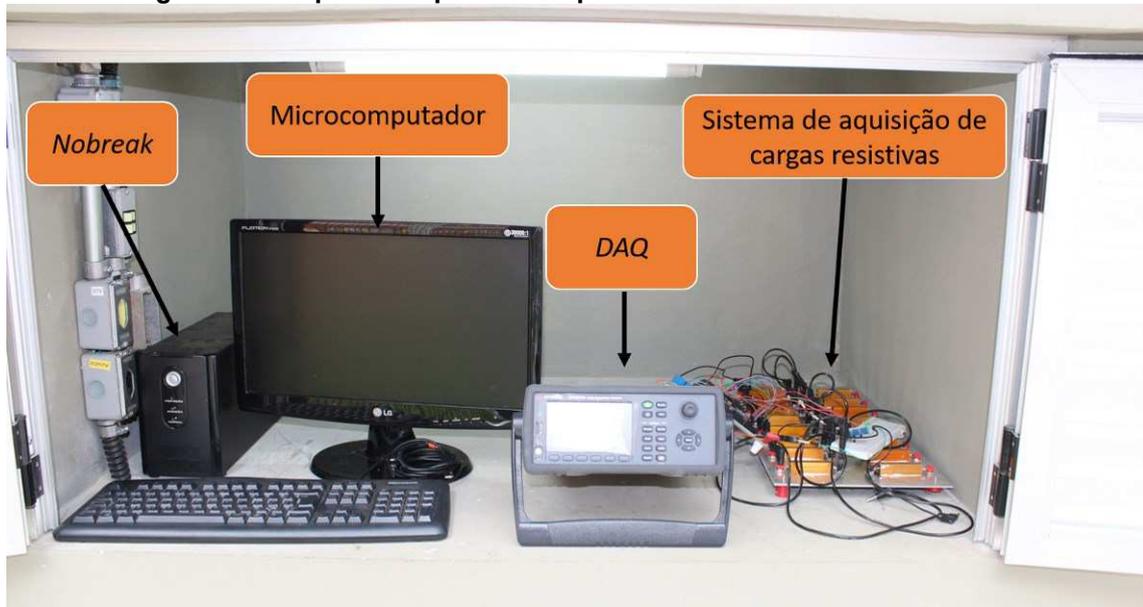
A aquisição de dados de temperatura dos termopares e de irradiação solar do piranômetro foram realizadas a partir de um sistema de aquisição de dados (DAQ) *Keysight™ DAQ970A* utilizando dois multiplexadores de 20 canais. O sistema de aquisição de dados foi conectado a um microcomputador, onde foi utilizado o programa computacional *Keysight™ BenchVue*. A Fotografia 18 ilustra todo o aparato experimental utilizado para coleta de dados, composto também por um *nobreak NHS™* e o sistema de aquisição de dados de cargas resistivas.

Os testes experimentais foram realizados para duas vazões volumétricas de água distintas no *manifold* e em três dias distintos. A vazão volumétrica de 6,5L/min foi utilizada nos dias 25/11/2021 (nublado) e 30/11/2021 (ensolarado), ao passo que a vazão volumétrica de 1,5L/min foi utilizada no dia 01/12/2021 (ensolarado). A água do reservatório térmico foi renovada em cada dia de teste de forma que a temperatura de entrada da água fosse igual à temperatura da água proveniente da rede de água do bloco.

O procedimento dos testes consistiu em, primeiramente, realizar a limpeza dos painéis fotovoltaicos utilizando álcool isopropílico de forma a retirar qualquer sujidade que pudesse afetar o desempenho fotovoltaico dos painéis. Tomou-se o cuidado para que não houvessem sombreamentos em ambos os painéis fotovoltaicos.

Para avaliar majoritariamente a influência do sistema PV/T no aquecimento da água de circulação, o *manifold* foi coberto com uma manta refletiva de forma a reduzir a absorção da irradiação solar nessa região.

Fotografia 18 – Aparato experimental para coleta de dados do sistema PV/T



Fonte: Autoria Própria (2022)

A coleta de dados iniciou no período das 09h30min da manhã, período em que ambos os painéis fotovoltaicos possuíam suas áreas totalmente atingidas pela irradiação solar. A aquisição de dados de temperatura e irradiação solar foi realizada a cada 5 segundos a partir desse horário, ao passo que a aquisição de dados de tensão, corrente e potência dos painéis fotovoltaicos foi realizada a cada 30 minutos. Os painéis fotovoltaicos foram mantidos em circuito aberto durante a execução dos testes, sendo conectados ao sistema de aquisição de dados de carga resistiva apenas no momento da coleta de dados. Os testes foram finalizados no período das 16h30min.

3.8 Redução de dados

Os principais parâmetros utilizados para análise do desempenho dos painéis fotovoltaicos foram as eficiências de Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica e a temperatura da base dos painéis fotovoltaicos. As análises de eficiência seguiram o exposto no trabalho de Moradgholi, Nowee & Farzaneh (2018).

A eficiência energética (Primeira Lei) do sistema híbrido (η_{pvt}) considera duas parcelas, a eficiência elétrica (η_{el}) e a eficiência térmica (η_{th}). As Equações (45), (47) e (48) apresentam tais eficiências, respectivamente, em que A_{pv} corresponde à área que contém células fotovoltaicas, A_c corresponde à área total do painel fotovoltaico, P_{max} representa a potência máxima gerada, Q é a quantidade de calor recuperada por meio do aquecimento da água e G é a irradiância solar. Para o painel fotovoltaico convencional, a eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica foi calculada desconsiderando o termo η_{th} da Equação (45).

$$\eta_{pvt} = \eta_{th} + \xi \eta_{el}, \quad (45)$$

$$\xi = \frac{A_{pv}}{A_c}, \quad (46)$$

$$\eta_{th} = 100 \frac{Q}{GA_c}, \quad (47)$$

$$\eta_{el} = 100 \frac{P_{max}}{GA_{pv}}. \quad (48)$$

A quantidade de calor recuperado pode ser calculada a partir da Equação (49), em que \dot{m} representa a vazão mássica de água, C_a seu calor específico e $T_{a,s}$ e $T_{a,e}$ as temperaturas de entrada e saída, respectivamente (MORADGHOLI, NOWEE & FARZANEH, 2018).

$$Q = \dot{m} C_a (T_{a,s} - T_{a,e}). \quad (49)$$

Tratando-se da eficiência exergética, considerando a Segunda Lei da Termodinâmica, a exergia referente à luz solar (Ex_{sol}) pode ser determinada pela Equação (50), onde T_{amb} representa a temperatura do ambiente e T_{sol} corresponde à temperatura da radiação solar de 6000K. A exergia elétrica (Ex_e) pode ser calculada pela Equação (51) (MORADGHOLI, NOWEE & FARZANEH, 2018).

$$Ex_{sol} = G \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}} \right), \quad (50)$$

$$Ex_e = P_{max}. \quad (51)$$

Para determinação da exergia térmica do sistema (Ex_{th} – Equação (54)) deve-se considerar as exergias de fluxo na entrada e saída do *manifold*, apresentadas nas Equações (52) e (53), respectivamente, em que h_o , T_o e s_o correspondem à entalpia, temperatura e entropia do estado de referência (ambiente), V representa a velocidade do escoamento e z a componente de altura.

$$\dot{I}_{ent} = \dot{m} \left[h_o - T_o (s_{ent} - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz \right], \quad (52)$$

$$\dot{I}_{sai} = \dot{m} \left[h_o - T_o (s_{sai} - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz \right], \quad (53)$$

$$\dot{I}_{th} = \dot{I}_{ent} - \dot{I}_{sai}. \quad (54)$$

Realizando a subtração entre as Equações (53) e (52) considerando que a velocidade e altura do escoamento na entrada e saída são iguais, obtém-se a Equação (55).

$$\dot{I}_{th} = \dot{m} \left[-T_o (s_{sai} - s_{ent}) \right]. \quad (55)$$

A diferença de entropia entre os estados de saída e entrada pode ser obtida a partir da primeira equação “ Tds ”, apresentada na Equação (56), em que u representa a energia interna, P a pressão e v o volume específico do estado.

$$Tds = du + Pdv, \quad (56)$$

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T}.$$

Realizando a integração de ambos os lados da Equação (56) em função dos estados de entrada e saída e, sabendo que a variação do volume específico para uma

substância incompressível é igual a zero, e que a variação da energia interna pode ser obtida a partir do calor específico do fluido, obtém-se a Equação (57), considerando o calor específico constante com a temperatura. Como a água trata-se de um fluido incompressível, não se torna necessário realizar a distinção entre calor específico a volume ou pressão constante.

$$\int_{ent}^{sai} ds = \int_{ent}^{sai} \frac{du}{T},$$

$$du = C_a dT,$$

$$s_{sai} - s_{ent} = \int_{T_{ent}}^{T_{sai}} \frac{C_a dT}{T}, \quad (57)$$

$$s_{sai} - s_{ent} = C_a \ln \left(\frac{T_{sai}}{T_{ent}} \right).$$

Da mesma forma, a variação de entalpia também pode ser escrita em função do calor específico do fluido, como pode ser observado na Equação (58).

$$dh = C_a dT,$$

$$\int_{ent}^{sai} dh = \int_{ent}^{sai} C_a dT, \quad (58)$$

$$h_{sai} - h_{ent} = C_a (T_{sai} - T_{ent}).$$

Substituindo-se as Equações (57) e (58) na Equação (55) obtém-se a exergia térmica do escoamento de fluido no *manifold*, apresentada na Equação (59).

$$Ex_{th} = r \left[\left(T_{a,s} - T_{a,e} \right) - T_{amb} \ln \frac{T_{a,s}}{T_{a,e}} \right]. \quad (59)$$

Eltaweel, Abdel-Rehim & Attia (2020) complementam que as irreversibilidades ocasionadas pela perda de carga no *manifold* também devem ser consideradas no cálculo da exergia térmica do sistema, como apresentado na Equação (60).

$$Ex_{th} = r \left[\left(T_{a,s} - T_{a,e} \right) - T_{amb} \ln \frac{T_{a,s}}{T_{a,e}} \right] - \frac{(\Delta P)}{\rho}. \quad (60)$$

Tratando-se da eficiência exergética do sistema híbrido (ε_{pvt}), essa também é baseada nas parcelas elétrica (ε_e) e térmica (ε_{th}), sendo essas apresentadas nas Equações (61), (62) e (63), respectivamente. A eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica para o painel fotovoltaico convencional foi determinada desconsiderando o termo ε_{th} da Equação (61) (MORADGHOLI, NOWEE & FARZANEH, 2018).

$$\varepsilon_{pvt} = \varepsilon_{th} + \xi \varepsilon_e, \quad (61)$$

$$\varepsilon_e = \frac{Ex_e}{A_{pv} Ex_{sol}}, \quad (62)$$

$$\varepsilon_{th} = \frac{Ex_{th}}{A_c Ex_{sol}}. \quad (63)$$

3.9 Incertezas experimentais

Resultados de medições experimentais carregam consigo uma incerteza de medição, logo, torna-se necessário a verificação da propagação das incertezas de medições individuais de forma a estimar a incerteza de um resultado obtido a partir de medidas experimentais (PEDOTT, 2012).

A análise de incertezas foi feita a partir do programa computacional *Engineering Equation Solver*TM (*EES*TM), que leva em consideração o Método de Propagação de Incertezas descrito em Taylor & Kuyatt (1994), na Nota Técnica NIST 1297 (*National Institute of Standards and Technology* – Instituto Nacional de Normas e Tecnologia), intitulada “*Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*” – “Diretrizes para Avaliar e Expressar a Incerteza dos Resultados da Medição INNNT”.

Supondo que as medidas individuais não estão relacionadas e são aleatórias, a incerteza U_Y de um resultado $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ com medidas em x_1, x_2, \dots, x_n pode

ser determinada pela Equação (64), em que U_{x_i} representa a incerteza da variável x_i (*Engineering Equation Solver Contents*).

$$U_y = \sqrt{\left\{ \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial x_j} \right)^2 U_{x_j}^2 \right] \right\}}. \quad (64)$$

Dessa forma, considerando-se a Equação (36), por exemplo, em que a resistência térmica (R_{th}) é calculada em função da temperatura média no evaporador (T_{evap}) e condensador (T_{cond}) e da carga térmica aplicada (q_{th}), a incerteza resultante dos valores de resistência térmica pode ser determinada pela Equação (65).

$$U_{R_{th}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial R_{th}}{\partial T_{evap}} \right)^2 U_{T_{evap}}^2 + \left(\frac{\partial R_{th}}{\partial T_{cond}} \right)^2 U_{T_{cond}}^2 + \left(\frac{\partial R_{th}}{\partial q_{th}} \right)^2 U_{q_{th}}^2 \right]}, \quad (65)$$

$$U_{R_{th}} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{q_{th}} \right)^2 U_{T_{evap}}^2 + \left(-\frac{1}{q_{th}} \right)^2 U_{T_{cond}}^2 + \left(\frac{T_{cond} - T_{evap}}{q_{th}^2} \right)^2 U_{q_{th}}^2 \right]}. \quad (66)$$

Realizando as derivadas parciais, obtém-se a Equação (66). Como a temperatura média no evaporador é determinada a partir da média de 5 medições de temperatura, $U_{T_{evap}}$ deve ser determinada também a partir da Equação (64), como pode ser verificado na Equação (67).

$$T_{evap} = \frac{T_{evap1} + T_{evap2} + T_{evap3} + T_{evap4} + T_{evap5}}{5},$$

$$U_{T_{evap}} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{5} \right)^2 U_{T_{evap1}}^2 + \left(\frac{1}{5} \right)^2 U_{T_{evap2}}^2 + \left(\frac{1}{5} \right)^2 U_{T_{evap3}}^2 + \left(\frac{1}{5} \right)^2 U_{T_{evap4}}^2 + \left(\frac{1}{5} \right)^2 U_{T_{evap5}}^2 \right]} \quad (67)$$

O Quadro 2 apresenta os valores de incerteza considerados para cada variável utilizada nos cálculos aqui descritos. Para o paquímetro, termômetro de mercúrio e a escala milimetrada, a incerteza foi considerada como a metade da menor escala de leitura, ao passo que para os demais instrumentos foi considerado o

informado na literatura ou então em fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes. Para os termopares e o sistema de aquisição de dados de cargas resistivas, considerou-se como incerteza a mesma dos instrumentos utilizados em sua calibração, realizada pelo método comparativo.

Quadro 2 – Incertezas de medida

Parâmetro	Instrumento	Incerteza	Unidade
Comprimento	Escala Milimétrica	$\pm 0,5$	mm
Corrente	Multímetro	$\pm 2\% + 0,00001$	A
Corrente	Sistema de Aquisição de carga Resistiva	$\pm 2\% + 0,00001$	A
Diâmetro	Paquímetro	$\pm 0,025$	mm
Irradiação Solar	Piranômetro	$\pm 3\%$	W/m ²
Potência	Fonte de Potência	$\pm 1\%$	W
Pressão	Transdutor de Pressão	± 4	kPa
Temperatura	Termômetro de Mercúrio	$\pm 0,25$	°C
Temperatura	Termopar do Tipo K	$\pm 0,25$	°C
Tensão	Multímetro	$\pm 0,5\% + 0,01$	V
Tensão	Sistema de Aquisição de carga Resistiva	$\pm 0,5\% + 0,01$	V
Velocidade	Medidor de Vazão	$\pm 0,3\% + 2$	mm/s

Fonte: Autoria Própria (2022)

A propagação de incertezas para um resultado de eficiência do sistema PV/T e painel fotovoltaico comercial pode ser observada no APÊNDICE E.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa seção apresenta os principais resultados obtidos durante esse estudo, incluindo a seleção de termossifões, o desempenho do sistema de aquisição de dados de cargas resistivas e o desempenho do sistema PV/T em comparação a um painel fotovoltaico comercial.

4.1 Sistema PV/T

Para a análise do sistema PV/T em comparação com um painel fotovoltaico comercial foram executados testes experimentais com vazões volumétricas de 6,5L/min e 1,5L/min de água no *manifold*.

4.1.1 Vazão volumétrica de 6,5L/min

Para a vazão volumétrica de 6,5L/min foram realizados testes experimentais em dois dias, um dia ensolarado e um dia nublado.

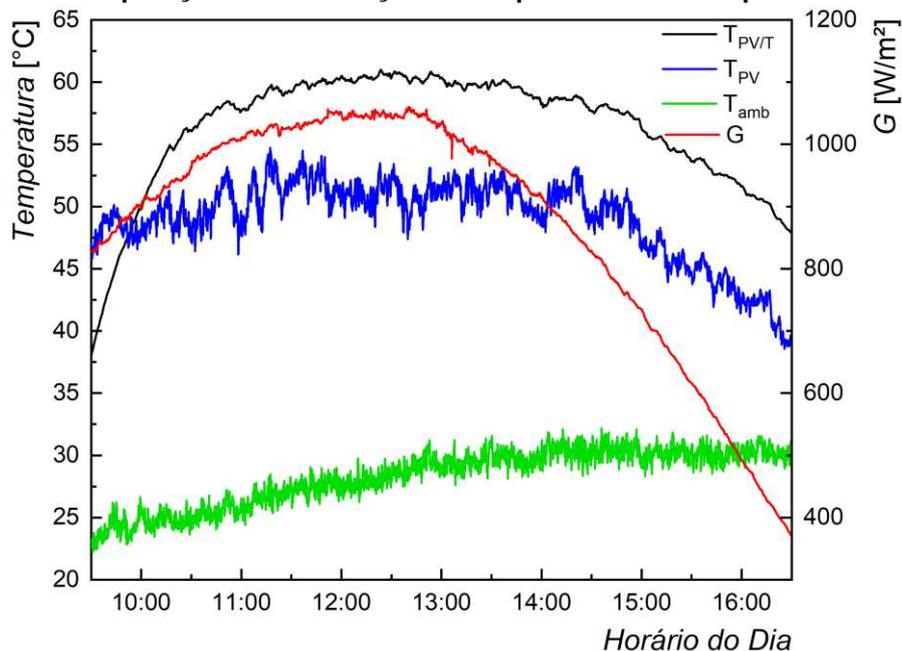
4.1.1.1 Dia ensolarado

O Gráfico 22 apresenta os resultados de temperatura da base do painel fotovoltaico que compõe o sistema PV/T ($T_{PV/T}$), temperatura da base do painel fotovoltaico comercial (T_{PV}), temperatura ambiente (T_{amb}) e irradiação solar (G) ao longo do dia. Como é possível perceber, a irradiação solar apresentou um comportamento estável ao longo do dia, com poucas variações abruptas em seu valor devido à ausência de nuvens.

Pelo Gráfico 22 observa-se que a temperatura da base dos dois painéis fotovoltaicos apresentaram um comportamento semelhante ao da irradiação solar. Com exceção do início do teste, a temperatura da base do painel fotovoltaico do sistema PV/T foi maior que a temperatura da base do painel fotovoltaico comercial ao longo do dia todo. A temperatura máxima atingida pelo sistema PV/T foi de $61,00^{\circ}\text{C} \pm 0,25^{\circ}\text{C}$, ao passo que a maior temperatura do painel fotovoltaico comercial foi de $54,72^{\circ}\text{C} \pm 0,25^{\circ}\text{C}$.

É possível perceber também que a temperatura do painel fotovoltaico comercial apresentou maiores variações ao longo do dia, ao contrário do sistema PV/T, ou seja, a temperatura do sistema PV/T foi menos sensível a fenômenos como rajadas de vento, por exemplo.

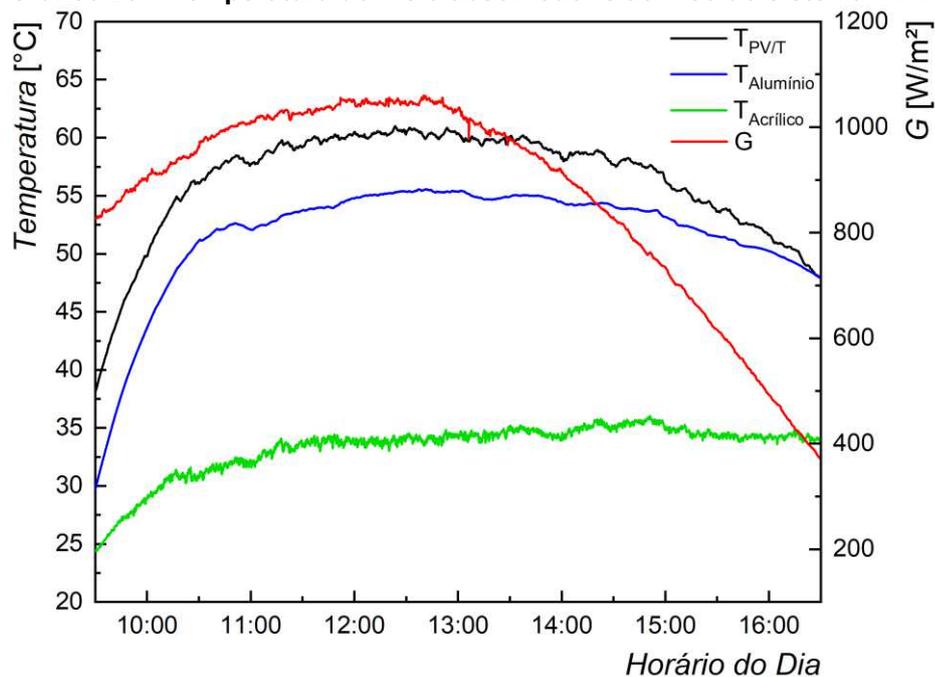
Gráfico 22 – Comparação de distribuição de temperatura entre os painéis fotovoltaicos



Fonte: Autoria Própria (2022)

Esses dois fatos relacionados à maior temperatura, e também um perfil de temperatura mais estável, podem estar diretamente relacionados com o meio absorvedor utilizado e também o número de termossifões. O Gráfico 23 apresenta a temperatura do meio absorvedor (alumínio) e da chapa de acrílico que compõe o sistema PV/T.

Gráfico 23 – Temperatura do meio absorvedor e acrílico do sistema PV/T



Fonte: Autoria Própria (2022)

Ao analisar a Gráfico 23 percebe-se que o meio absorvedor cumpriu seu papel em absorver parte do calor do painel fotovoltaico, já que manteve sua temperatura próxima à temperatura do painel fotovoltaico ao longo do dia, apresentando uma diferença média de temperatura de aproximadamente $4,56^{\circ}\text{C}$. Apesar disso, nota-se que no momento do dia com os menores valores de irradiação solar a temperatura das barras de alumínio se aproxima à temperatura do painel fotovoltaico.

Levando isso em consideração, e também o fato de que o painel fotovoltaico comercial, que possui todas as superfícies expostas ao ambiente externo, apresentou uma temperatura menor que o sistema PV/T, chegou-se à conclusão de que a dissipação de calor do painel fotovoltaico para o ambiente externo foi maior do que a quantidade de calor que o número de termossifões utilizado foi capaz de absorver das barras de alumínio e dissipar para a água corrente. Com isso, o conjunto meio absorvedor e termossifões atuou de forma semelhante a um reservatório térmico, contribuindo para que a temperatura do sistema PV/T fosse mais alta que a temperatura do painel fotovoltaico comercial já que todo o sistema apresentou uma maior capacitância térmica em relação ao painel fotovoltaico comercial.

Pelo Gráfico 23 ainda é possível verificar que o isolamento utilizado entre o meio absorvedor e a chapa de acrílico atuou de maneira satisfatória, mantendo uma diferença de temperatura média entre as duas superfícies de aproximadamente $18,48^{\circ}\text{C}$.

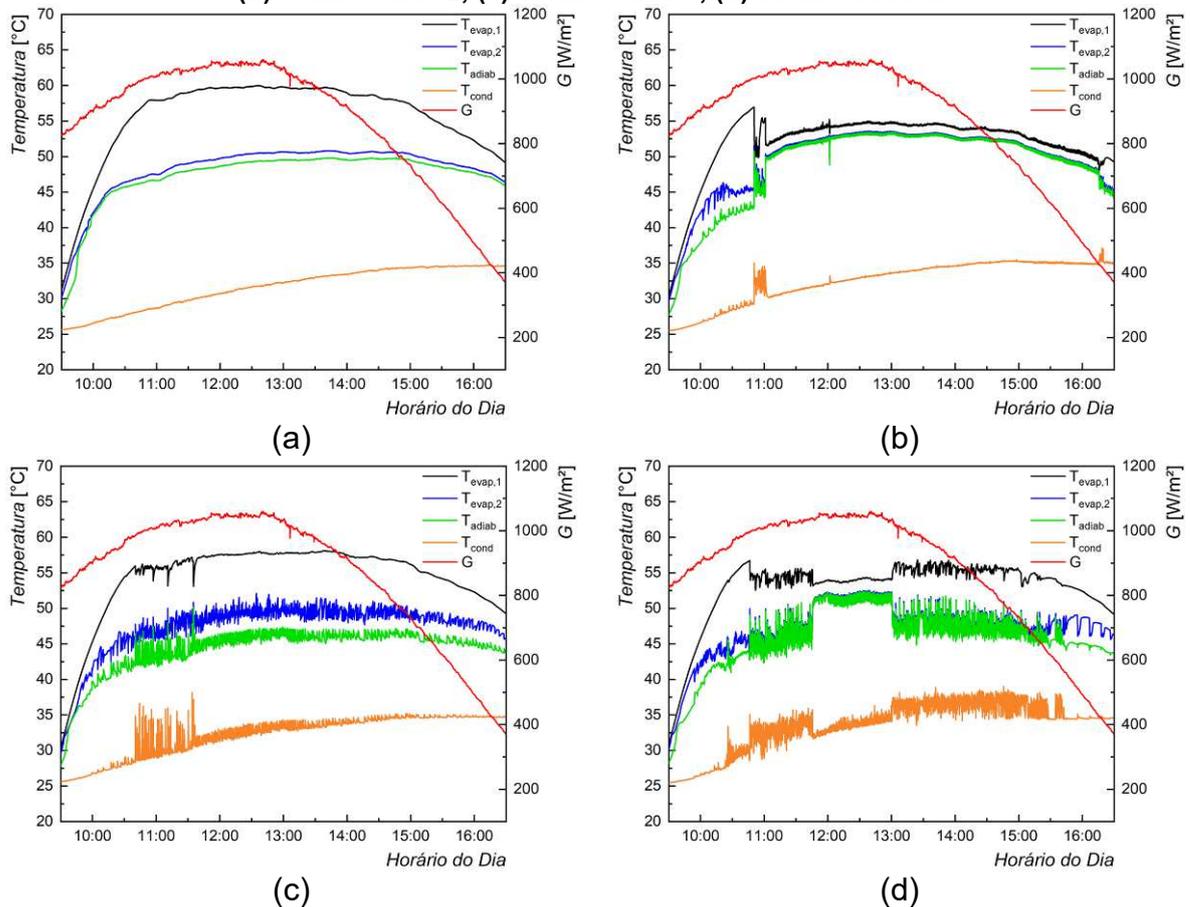
O Gráfico 24(a), (b), (c) e (d) mostra a temperatura das diferentes regiões dos termossifões do sistema PV/T, sendo o Termossifão 1 posicionado mais próximo à entrada de água, e o Termossifão 4 mais próximo à saída de água do *manifold*.

A distribuição de temperatura ao longo dos termossifões assemelhou-se ao comportamento de temperatura do meio absorvedor e também da base do painel fotovoltaico. O início do funcionamento dos termossifões ocorreu próximo às 11h e ao atingir temperaturas próximas a 50°C , assim como ocorrido nos testes experimentais em laboratório apresentados no Gráfico 15.

As temperaturas no evaporador foram maiores que as temperaturas na seção adiabática, que por sua vez também foi maior que as temperaturas no condensador. Ao final do dia, percebe-se que todas as temperaturas convergiram para uma temperatura próxima à temperatura do condensador. Além disso, para alguns dos dispositivos passivos, principalmente os Termossifões 3 e 4, torna-se possível a

visualização do efeito de ebulição em gêiser, o que mostra que os termosifões conseguiram transferir energia entre as suas regiões.

Gráfico 24 – Temperaturas dos termosifões do sistema PV/T: (a) Termossifão 1; (b) Termossifão 2; (c) Termossifão 3; (d) Termossifão 4.

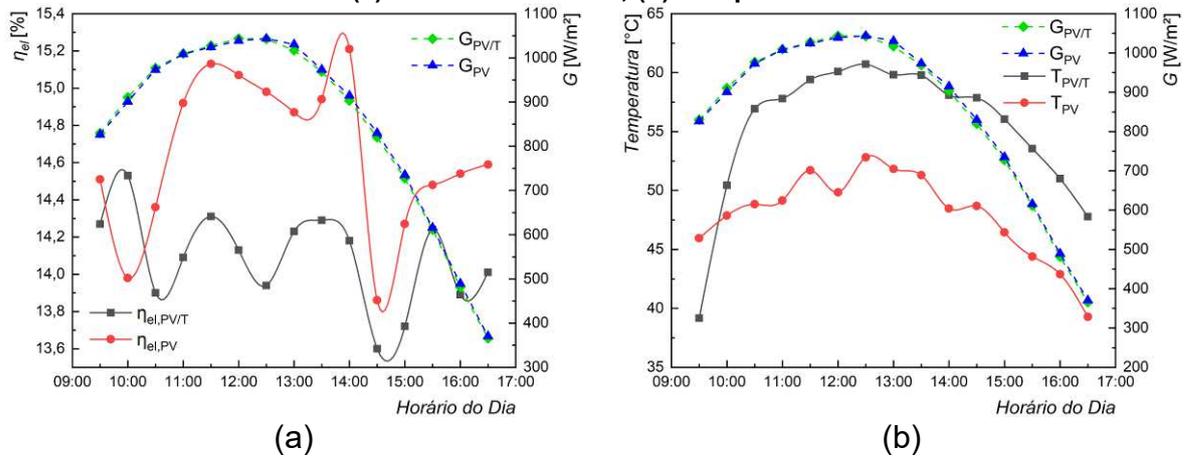


Fonte: Aatoria Própria (2022)

Tratando-se da eficiência elétrica (η_{el}), o Gráfico 25(a) apresenta os valores de eficiência ao longo do dia para o sistema PV/T e o painel fotovoltaico comercial, ao passo que o Gráfico 25(b) apresenta os valores de temperatura para os dois painéis fotovoltaicos no instante da coleta de dados de potência.

Como é possível observar a partir da Gráfico 25(a) e (b), na grande maioria dos pontos de coleta de dados o sistema PV/T apresentou menor valor de eficiência elétrica que o painel fotovoltaico comercial, apresentando uma eficiência elétrica média de aproximadamente 14,09%, ao passo que o painel comercial apresentou eficiência elétrica média de aproximadamente 14,65%. Os menores valores de eficiência elétrica foram resultantes da temperatura mais elevada do painel fotovoltaico que compõe o sistema PV/T, comportamento concordante com o que foi apresentado no Tópico 2.4.4.

**Gráfico 25 – Comparação entre sistema PV/T e painel fotovoltaico comercial:
(a) Eficiência Elétrica; (b) Temperatura**

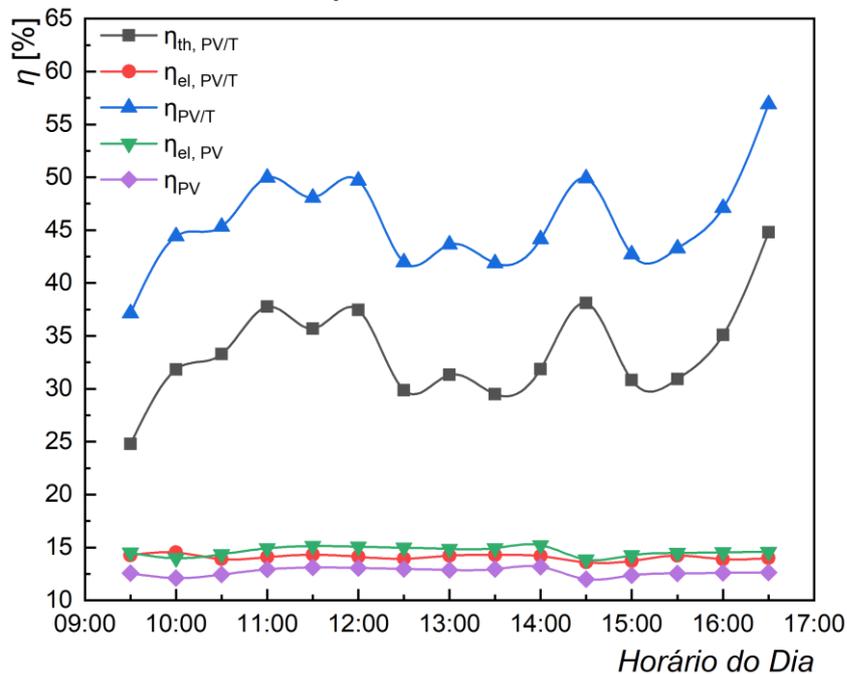


Ao contrário do que foi apresentado no Gráfico 4, a partir do Gráfico 25 não é possível estabelecer uma relação concreta entre a temperatura de cada painel fotovoltaico e sua eficiência, uma vez que a temperatura não é a única variável de influência no desempenho de um painel fotovoltaico em condições reais de teste.

O Gráfico 26 apresenta as eficiências de Primeira Lei da Termodinâmica para o sistema PV/T e o painel fotovoltaico comercial, envolvendo a eficiência térmica (η_{th}), elétrica (η_{el}) e total ($\eta_{PV/T}$) do sistema PV/T, elétrica e total (η_{PV}) do painel fotovoltaico comercial.

Como mencionado anteriormente e apresentado no Gráfico 25(a), o painel fotovoltaico comercial apresentou maiores valores de eficiência elétrica que o sistema PV/T. Apesar disso, ao considerar a eficiência térmica, verifica-se no Gráfico 26 que a eficiência total do sistema PV/T foi superior que a do painel comercial em todos os pontos de aquisição de dados. É possível verificar que, a partir das 11h, horário aproximado em que se torna evidente o processo de mudança de fases nos termossifões, ocorreu um aumento do valor de eficiência térmica do sistema PV/T.

Gráfico 26 – Eficiências de Primeira Lei para vazão volumétrica de 6,5L/min em dia ensolarado



Fonte: Autoria Própria (2022)

Nota-se ainda que, a partir das 15h, o valor de η_{th} começa a se elevar. Isso ocorre pelo fato de que, ao mesmo tempo em que se tem uma redução dos valores de irradiação solar incidente no painel fotovoltaico, o meio absorvedor ainda possui uma elevada energia armazenada, assim como visto no Gráfico 23. Então, apesar de receber uma quantidade menor de energia, o sistema ainda é capaz de fornecer uma elevada quantidade de energia à água corrente no *manifold*, resultando em valores elevados de eficiência térmica e energética do sistema.

Dessa forma foi verificado que, apesar de não possuir a capacidade de dissipar energia o suficiente para resfriar o painel fotovoltaico, o conjunto meio absorvedor e termossifões agiu de forma satisfatória no objetivo de adaptar um painel fotovoltaico comercial para geração de duas formas de energia, elétrica e térmica. Considerando todo o período do dia, o sistema PV/T apresentou uma eficiência total média de aproximadamente 45,75%, enquanto o painel fotovoltaico comercial apresentou uma eficiência total média de aproximadamente 12,69%.

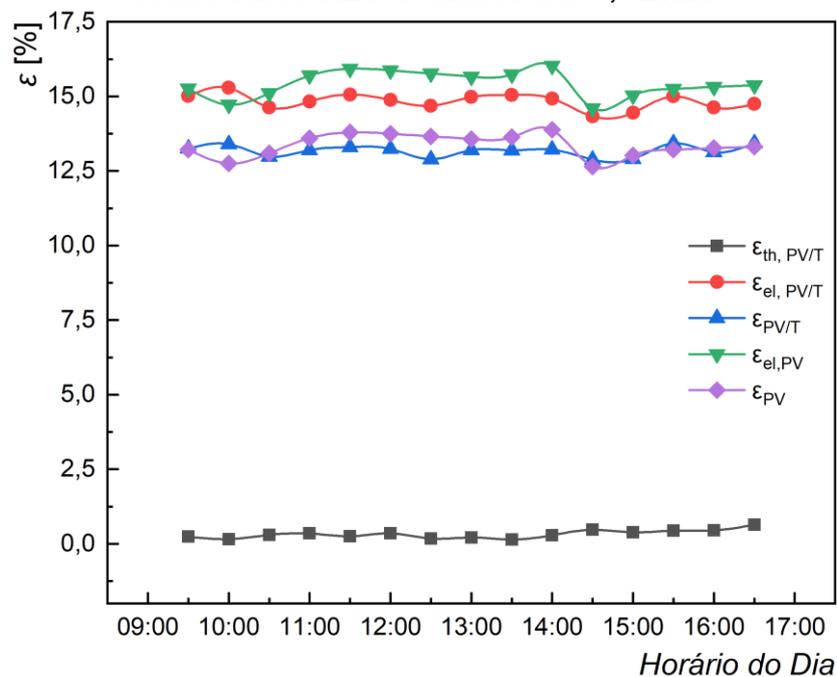
Tratando-se da eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica, o Gráfico 27 fornece os resultados de eficiência exérgica térmica (ϵ_{th}), elétrica (ϵ_{el}) e total do sistema PV/T ($\epsilon_{PV/T}$), e também elétrica e total do painel fotovoltaico comercial (ϵ_{PV}). A queda de pressão foi desconsiderada no cálculo da eficiência exérgica térmica (ϵ_{th}), uma vez que os valores de queda de pressão no sistema foram inferiores à menor

escala dos transdutores de pressão utilizados, obtendo assim valores de pressão iguais na entrada e saída do *manifold*.

É possível perceber pelo Gráfico 27 que os valores de eficiência térmica foram muito menores que os valores obtidos para a eficiência elétrica. Isso se deve, assim como constatado por Gang *et al.* (2011), à baixa temperatura de entrada da água no *manifold*, assim como pela temperatura ambiente, que aumenta de forma gradativa ao longo do dia e se mantém próxima à temperatura da água escoando pelo sistema PV/T.

Também verifica-se no Gráfico 27 que a eficiência de Segunda Lei do painel fotovoltaico comercial foi maior que a do sistema PV/T, devido principalmente ao fato de que esse valor de eficiência é predominantemente influenciado pela parcela elétrica da eficiência, já que a parcela térmica possui baixa contribuição. Como mencionado anteriormente, por possuir menores temperaturas, o painel fotovoltaico comercial apresentou maior geração de potência elétrica, e conseqüentemente maior eficiência exergética total. Considerando o período do dia todo, o sistema PV/T apresentou uma eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica média de aproximadamente 13,18%, ao passo que o painel fotovoltaico comercial apresentou uma eficiência média de aproximadamente 13,36%.

Gráfico 27 – Eficiências de Segunda Lei para o sistema PV/T e painel fotovoltaico considerando vazão volumétrica de 6,5 L/min

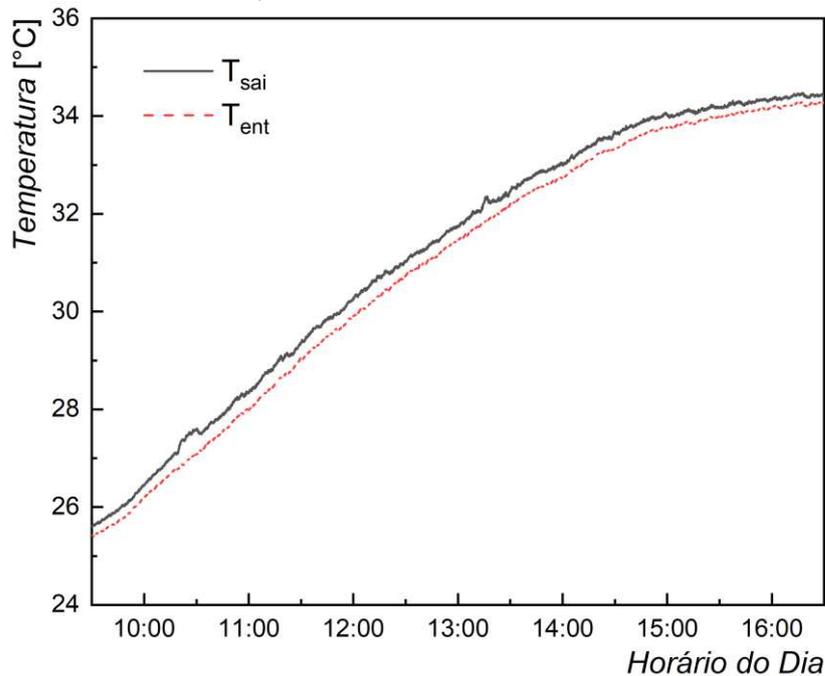


Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 28 apresenta os resultados da temperatura de entrada e saída da água de circulação no *manifold* ao decorrer do teste experimental. Como é possível observar, durante todo o período de testes a temperatura de saída da água foi maior do que a de entrada. A temperatura de entrada da água no início do teste foi de $25,42^{\circ}\text{C} \pm 0,25^{\circ}\text{C}$, atingindo um máximo de aproximadamente $34,47^{\circ}\text{C} \pm 0,25^{\circ}\text{C}$, encerrando o teste a $34,42^{\circ}\text{C} \pm 0,25^{\circ}\text{C}$.

Os valores de temperatura e irradiação solar utilizados para cálculo para todos os dias de teste experimentais podem ser encontrados em quadros no APÊNDICE E.

Gráfico 28 – Temperaturas de entrada e saída da água no *manifold* para vazão volumétrica de 6,5L/min no dia ensolarado

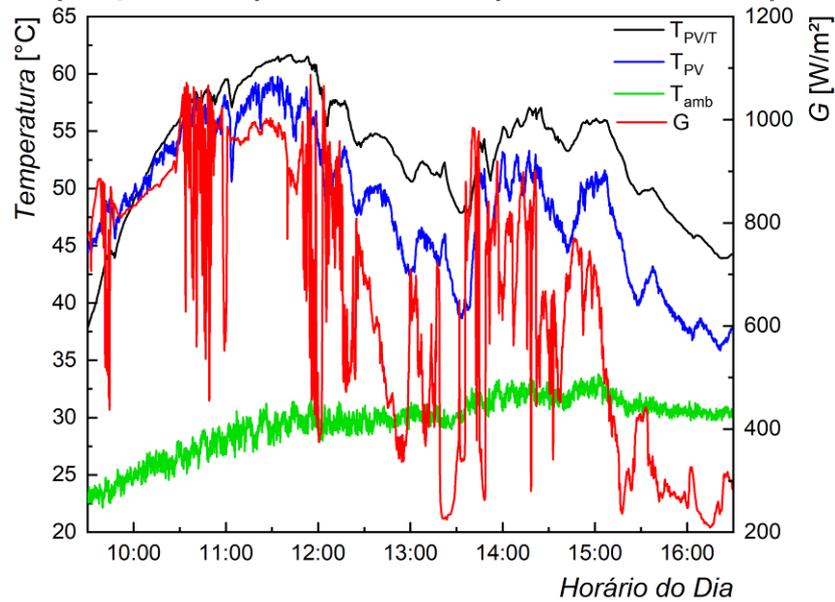


Fonte: Aatoria Própria (2022)

4.1.1.2 Dia nublado

O Gráfico 29 apresenta os resultados de distribuição de temperatura do painel fotovoltaico comercial e do sistema PV/T, além da temperatura ambiente e irradiação solar para o dia nublado. Como é possível perceber, ao contrário do dia ensolarado, a irradiação solar variou ao longo de todo o dia devido à presença de várias nuvens no céu. A temperatura dos painéis fotovoltaicos acompanhou o comportamento da irradiação solar ao longo de todo o dia, sendo que o painel fotovoltaico do sistema PV/T se manteve em temperaturas superiores ao painel fotovoltaico comercial.

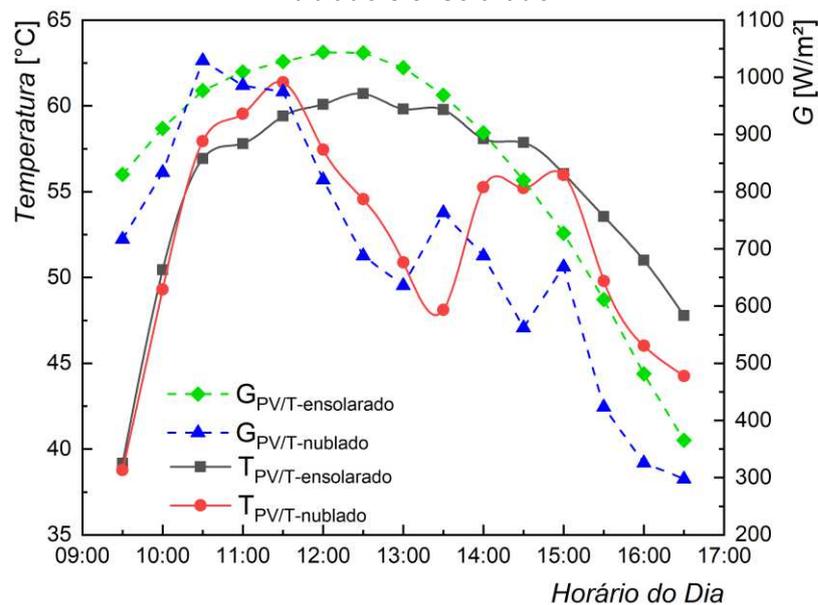
Gráfico 29 – Comparação de temperaturas entre os painéis fotovoltaicos para o dia nublado



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 30 apresenta uma comparação da temperatura do painel fotovoltaico que compõe o sistema PV/T nos dias nublado e ensolarado.

Gráfico 30 – Comparação da temperatura do painel fotovoltaico do sistema PV/T nos dias nublado e ensolarado



Fonte: Autoria Própria (2022)

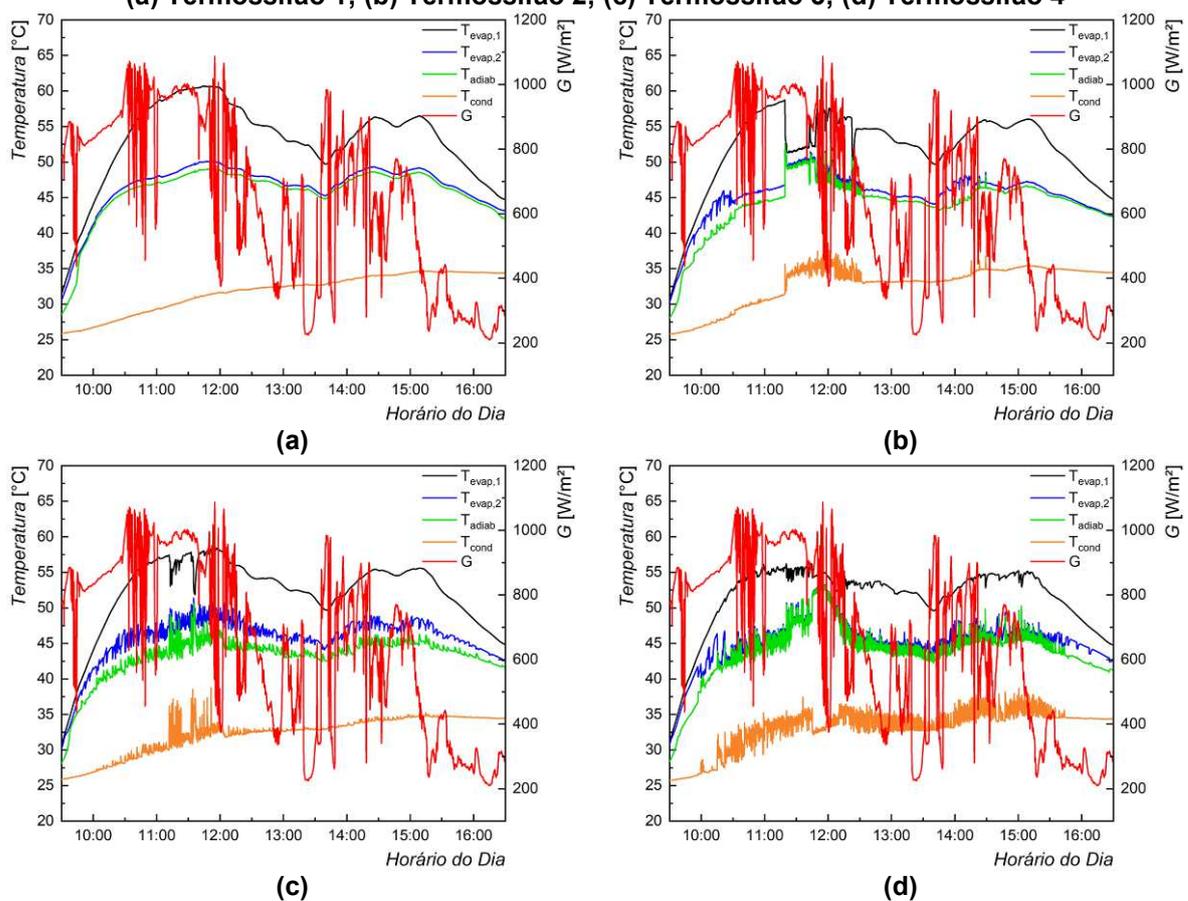
Como é possível perceber pelo Gráfico 30, com exceção do início do dia, em que ocorreu uma incidência de maior valor de radiação solar, o sistema PV/T apresentou menores temperaturas no dia nublado em relação ao dia ensolarado, o

que já era esperado pela menor quantidade de energia fornecida ao painel fotovoltaico.

O Gráfico 31 apresenta a temperatura das regiões dos termossifões utilizadas no sistema PV/T no dia nublado. Nota-se que todos os termossifões apresentaram o comportamento esperado. No início do dia, período de maior irradiação solar, os termossifões tiveram o início de seu funcionamento em uma temperatura próxima a 50°C, sendo que seus perfis de temperatura acompanharam o comportamento da temperatura do painel fotovoltaico do sistema PV/T ao longo do dia. Ao final do dia, todas as temperaturas convergiram para uma temperatura próxima à da região do condensador.

O Gráfico 32 apresenta a comparação de eficiência elétrica entre o sistema PV/T nos dias ensolarado e nublado.

Gráfico 31 – Temperaturas dos termossifões do sistema PV/T no dia nublado:
(a) Termossifão 1; (b) Termossifão 2; (c) Termossifão 3; (d) Termossifão 4



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 33 apresenta os resultados de eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica para os dois dias de teste em condições meteorológicas reais.

Gráfico 32 – Comparação de eficiência elétrica do sistema PV/T nos dias nublado e ensolarado

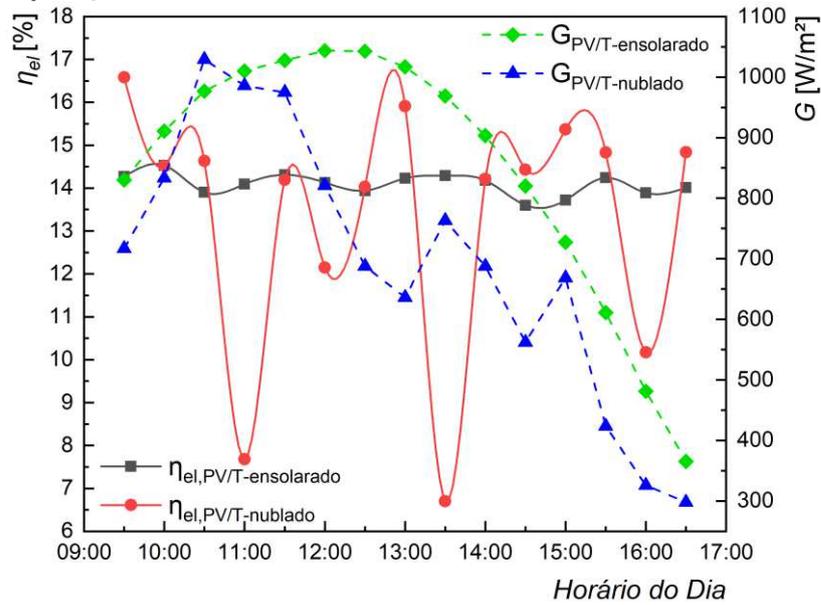
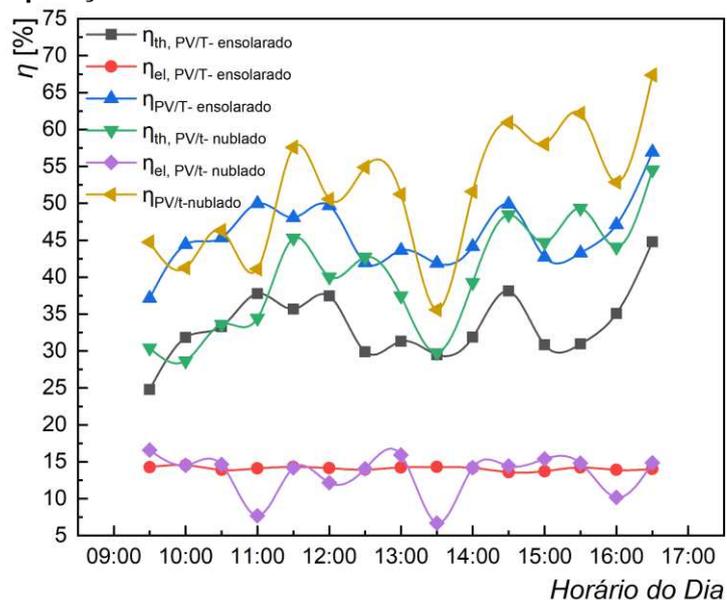


Gráfico 33 – Comparação das eficiências de Primeira Lei nos dias nublado e ensolarado

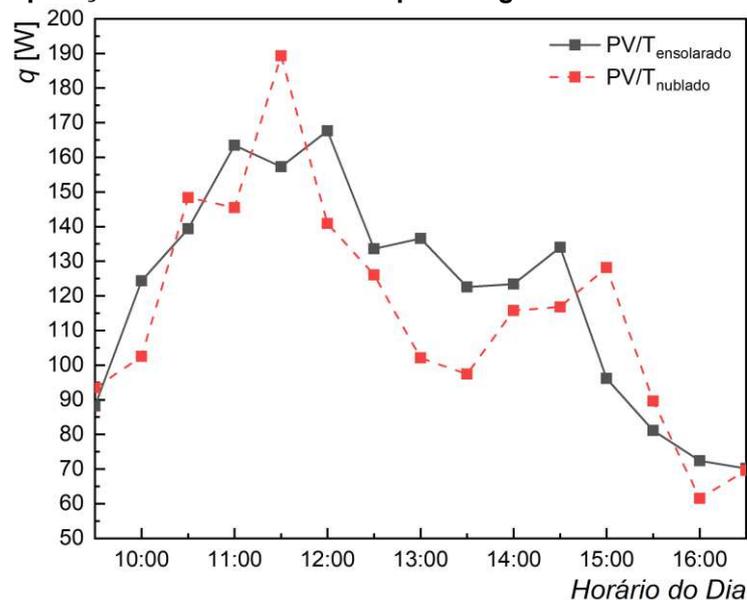


A partir do Gráfico 32 é possível notar que os valores de eficiência elétrica para o dia ensolarado apresentaram uma certa constância, ao passo que os valores para o dia nublado apresentaram variações significativas ao longo do dia. Ao longo do dia os dois casos analisados alternaram em relação a qual apresentou a maior eficiência, muito devido às variações de temperatura e irradiação solares observadas no dia nublado, tornando assim difícil a tarefa de definir com clareza qual condição de teste experimental resultou em um maior desempenho elétrico do sistema PV/T. Em

termos médios, ao longo do dia o sistema PV/T em condição ensolarada apresentou uma η_{el} média de aproximadamente 14,09%, ao passo que em condições nubladas apresentou η_{el} média de aproximadamente 13,35%.

Ao contrário dos resultados de eficiência elétrica, em que não se pode definir qual condição resultou em melhor desempenho, a partir do Gráfico 33 fica claro que a condição de teste em dia nublado resultou em maiores eficiências térmica e total para o sistema PV/T. Esse fato é condizente com os resultados encontrados em Brahim & Jemni (2021). Isso pode ser explicado a partir do Gráfico 34, que apresenta o calor transferido para a água corrente no *manifold* nas duas condições analisadas. As eficiências térmicas e de primeira lei médias para o sistema PV/T sob condições ensolaradas e o sistema sob condições nubladas foram de aproximadamente 33,54%, 45,75%, 40,19% e 51,75%, respectivamente.

Gráfico 34 – Comparação do calor transferido para a água nos dias nublado e ensolarado



Fonte: Autoria Própria (2022)

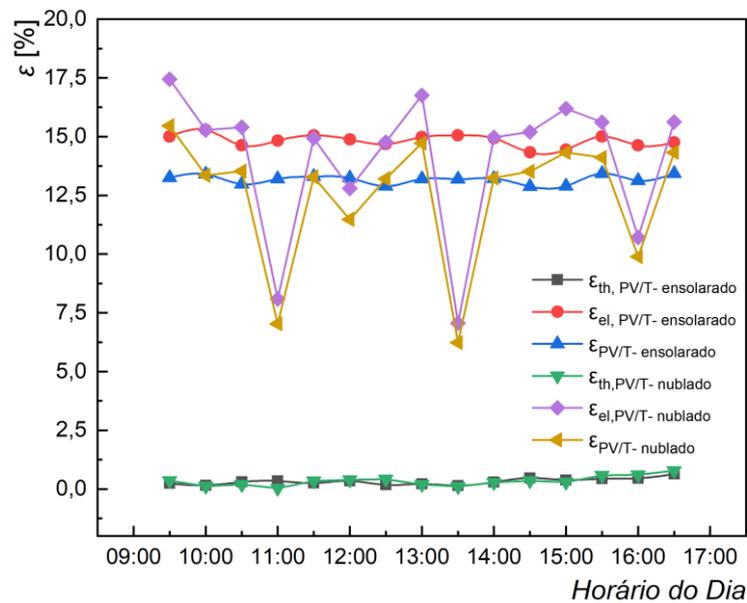
O Gráfico 34 mostra que, mesmo que o valor de irradiância solar incidente no sistema PV/T no dia nublado é menor, a quantidade de calor transferida para a água corrente no *manifold* nos dois dias é bastante próxima, o que indica que a quantidade de termossifões utilizada no sistema PV/T possui um limite de quantidade de calor que consegue retirar do meio absorvedor e transferir para a água em aquecimento.

Esse fato corrobora com a hipótese levantada na discussão do Gráfico 22 e Gráfico 23, em que seria necessária uma maior quantidade de termossifões para poder reduzir a temperatura do sistema PV/T abaixo da temperatura do painel

fotovoltaico comercial, uma vez que o meio absorvedor manteve-se com uma grande quantidade de energia acumulada ao longo do dia.

O Gráfico 35 apresenta os resultados de eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica para o sistema PV/T nas duas condições analisadas. Como é possível notar, torna-se difícil verificar qual caso apresentou melhor desempenho em relação a sua eficiência exergética, muito devido à sua dependência da parcela elétrica de geração de energia. O sistema PV/T no dia nublado apresentou maiores valores de eficiência térmica, muito devido à menor temperatura ambiente observada no dia do teste experimental.

Gráfico 35 – Comparação das eficiências de Segunda Lei para os sistemas PV/T nos dias nublado e ensolarado



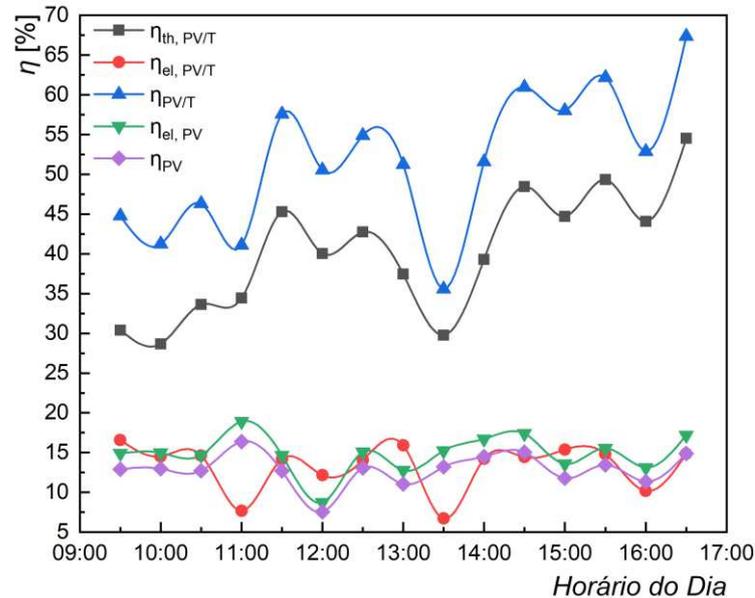
Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 36 apresenta a comparação da eficiência de primeira lei entre o sistema PV/T e o painel fotovoltaico comercial para o dia nublado, ao passo que a Gráfico 37 apresenta os resultados de eficiência de segunda lei.

Pelo Gráfico 36 é possível verificar que o comportamento foi muito semelhante ao teste do dia ensolarado, em que o painel fotovoltaico comercial apresentou maior eficiência elétrica, porém o sistema PV/T apresentou maior eficiência total ao longo do dia devido à alta contribuição da parcela térmica de eficiência. Já ao se observar o Gráfico 37 é possível perceber que os dois painéis fotovoltaicos alternaram entre si ao longo do dia em relação a qual painel fotovoltaico apresentou a maior eficiência,

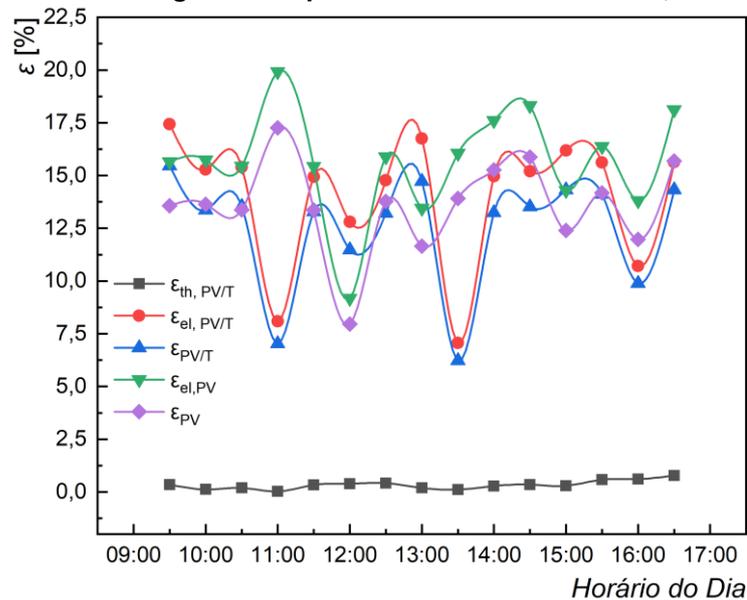
muito devido às altas variações de irradiação solar observadas durante a execução do teste.

Gráfico 36 – Eficiências de Primeira Lei para vazão volumétrica de 6,5L/min em dia nublado



Fonte: Autoria Própria (2022)

Gráfico 37 – Eficiências de Segunda Lei para vazão volumétrica de 6,5L/min em dia nublado



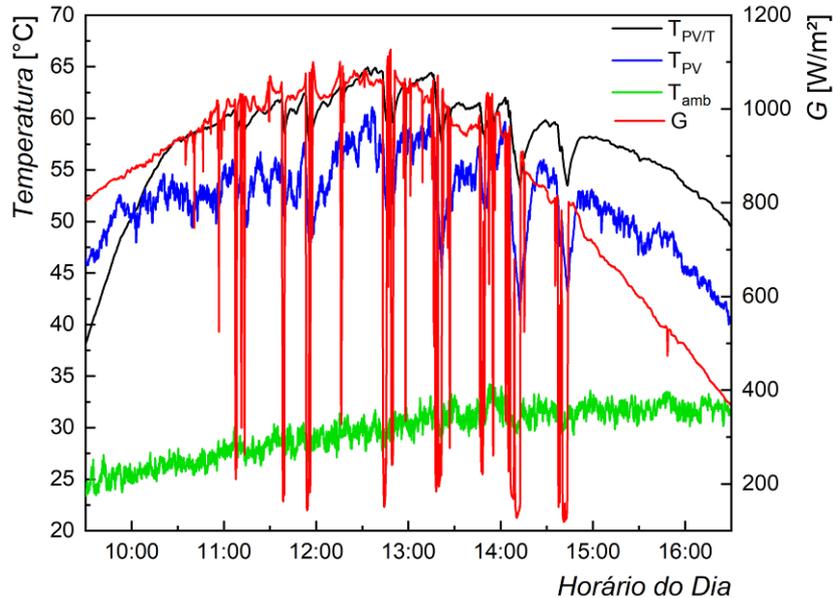
Fonte: Autoria Própria (2022)

4.1.2 Vazão volumétrica de 1,5L/min

O Gráfico 38 apresenta os resultados da distribuição de temperatura do painel fotovoltaico comercial e do sistema PV/T, além da temperatura ambiente e irradiação solar considerando a vazão volumétrica de 1,5L/min. Como é possível notar, os

valores de irradiação solar apresentaram certas variações momentâneas ao longo do dia devido à presença de algumas nuvens.

Gráfico 38 – Temperaturas e irradiação solar para a vazão volumétrica de 1,5L/min



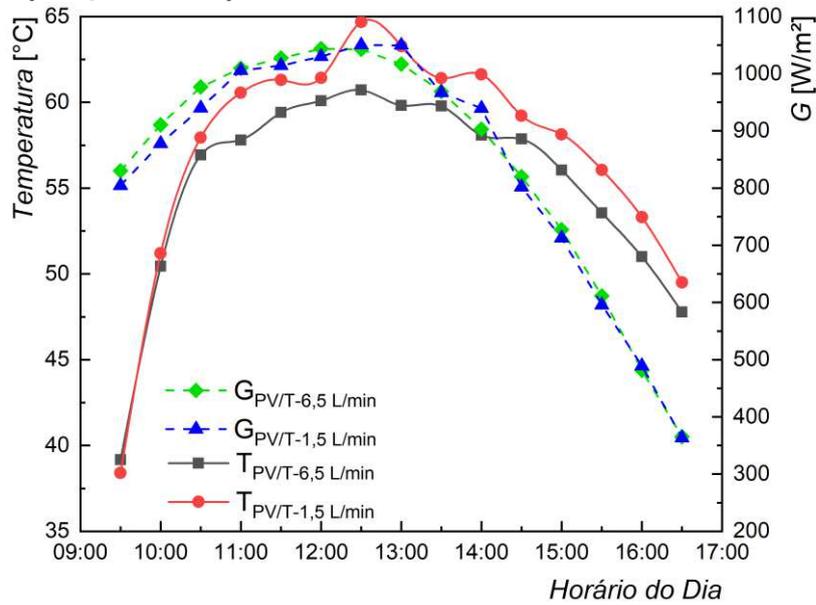
Fonte: Autoria Própria (2022)

As temperaturas dos painéis fotovoltaicos acompanharam o comportamento da irradiação solar, com a temperatura do sistema PV/T sempre superior à temperatura do painel fotovoltaico comercial. A temperatura ambiente apresentou a tendência de aumentar ao longo do dia.

O Gráfico 39 apresenta a comparação da temperatura do sistema PV/T submetido às vazões volumétricas de 1,5 L/min e 6,5 L/min (ensolarado).

É possível notar pelo Gráfico 39 que, mesmo para valores próximos de irradiação solar, o sistema PV/T submetido à vazão volumétrica de 1,5L/min apresentou maiores temperaturas que o sistema submetido a uma vazão volumétrica de 6,5L/min, sendo um possível indicativo de que, em uma menor vazão de água no *manifold*, o sistema apresentou pior desempenho térmico e também elétrico.

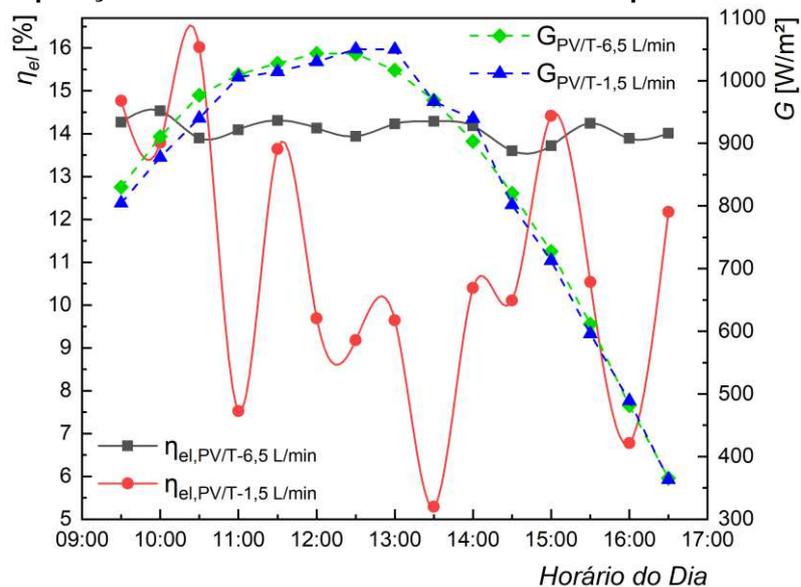
Gráfico 39 – Comparação da temperatura do sistema PV/T com diferentes vazões volumétricas



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 40 apresenta a comparação da eficiência elétrica do sistema PV/T para as diferentes vazões volumétricas utilizadas. Como é possível observar, entre as duas condições testadas o sistema PV/T submetido à vazão volumétrica de 6,5L/min teve a tendência de apresentar maiores valores de eficiência elétrica, muito devido à sua menor temperatura em relação ao sistema submetido à menor vazão volumétrica. As eficiências elétricas médias para as vazões de 6,5 L/min e 1,5 L/min foram de aproximadamente 14,09% e 10,93% respectivamente.

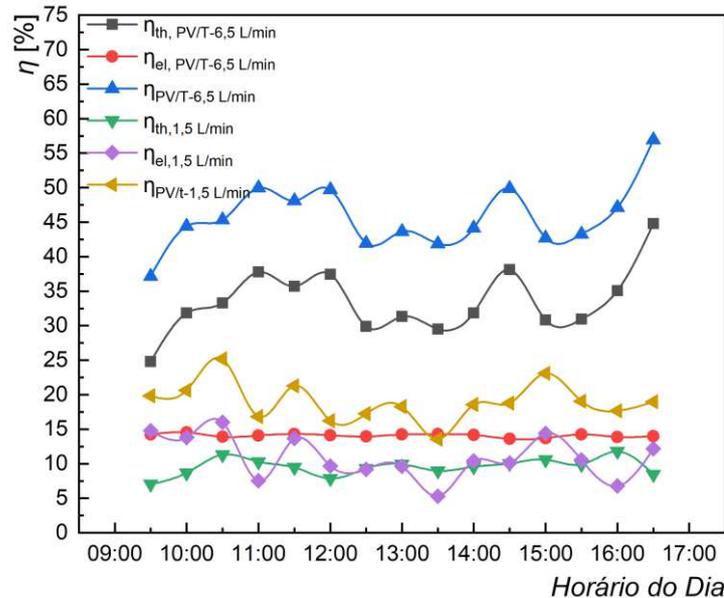
Gráfico 40 – Comparação da eficiência elétrica do sistema PV/T para as vazões volumétricas



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 41 apresenta a comparação das eficiências de Primeira Lei da Termodinâmica entre os sistemas PV/T submetidos às diferentes vazões volumétricas.

Gráfico 41 – Comparação das eficiências de Primeira Lei para o sistema PV/T submetido a diferentes vazões volumétricas



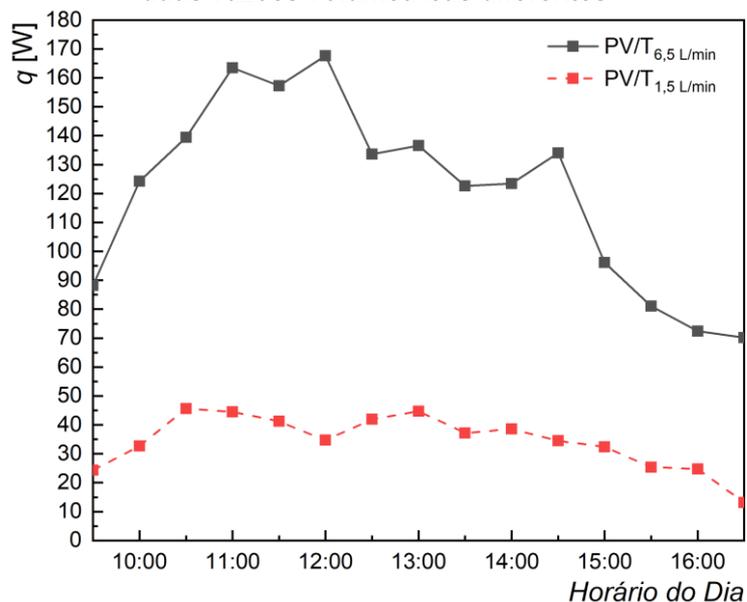
Fonte: Autoria Própria (2022)

Pelo Gráfico 41 confirma-se o que era esperado. Assim como apresentou maior eficiência elétrica, o sistema PV/T submetido à maior vazão volumétrica apresentou maior eficiência térmica, resultado em uma maior eficiência total em todos os pontos de coleta de dados. Percebe-se que o desempenho térmico do sistema PV/T é diretamente afetado pela vazão de água no *manifold*, já que na maior parte do dia de teste a eficiência térmica do sistema PV/T submetido à menor vazão volumétrica foi menor inclusive do que a parcela elétrica de eficiência do sistema PV/T submetido à maior vazão volumétrica de água no *manifold*. As eficiências térmicas e de primeira lei médias para o sistema PV/T submetido a vazões volumétricas de 6,5 L/min e 1,5 L/min foram de aproximadamente 33,54%, 45,75%, 9,55% e 19,02%, respectivamente.

O Gráfico 42 apresenta a comparação entre os valores de energia na forma de calor transferido para a água corrente no *manifold* do sistema PV/T nos dois casos analisados. É possível perceber que o calor transferido no caso de menor vazão volumétrica foi muito inferior ao caso de maior vazão volumétrica. Esse fato se deve à influência da velocidade do escoamento no coeficiente de transferência de calor por

convecção forçada entre os condensadores e a água corrente, uma vez que o número de *Nusselt* é diretamente proporcional ao número de *Reynolds*, dependente da velocidade do escoamento.

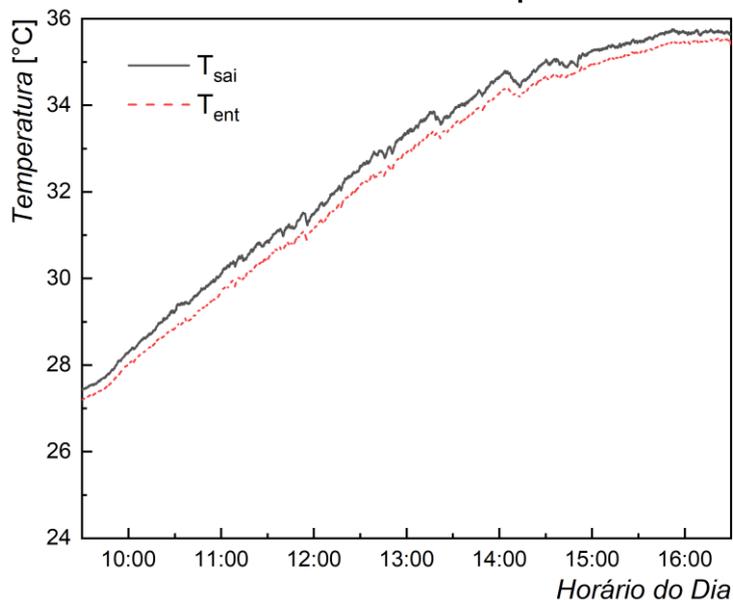
Gráfico 42 – Comparação do calor transferido para a água no *manifold* pelo sistema PV/T em duas vazões volumétricas diferentes



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 43 apresenta a distribuição de temperaturas de entrada e saída da água no *manifold* para a vazão volumétrica de 1,5L/min. Ao se comparar com o Gráfico 28, percebe-se que a diferença de temperatura entre a entrada e saída foi ligeiramente maior para a vazão volumétrica de 1,5L/min em relação à vazão volumétrica de 6,5L/min.

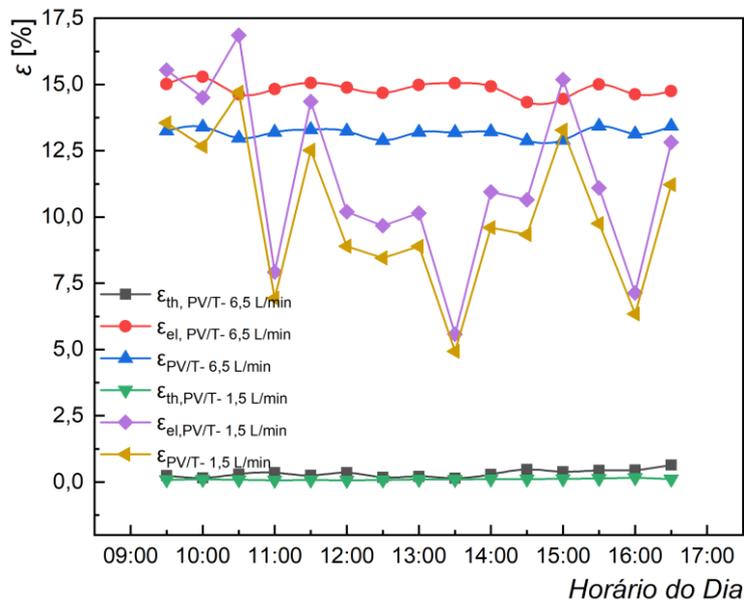
Gráfico 43 – Temperaturas de entrada e saída no manifold para vazão volumétrica de 1,5L/min



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 44 apresenta os resultados de eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica para os sistemas submetidos a diferentes vazões volumétricas de água corrente no manifold.

Gráfico 44 – Comparação das eficiências de Segunda Lei para o sistema PV/T submetidos a diferentes vazões volumétricas

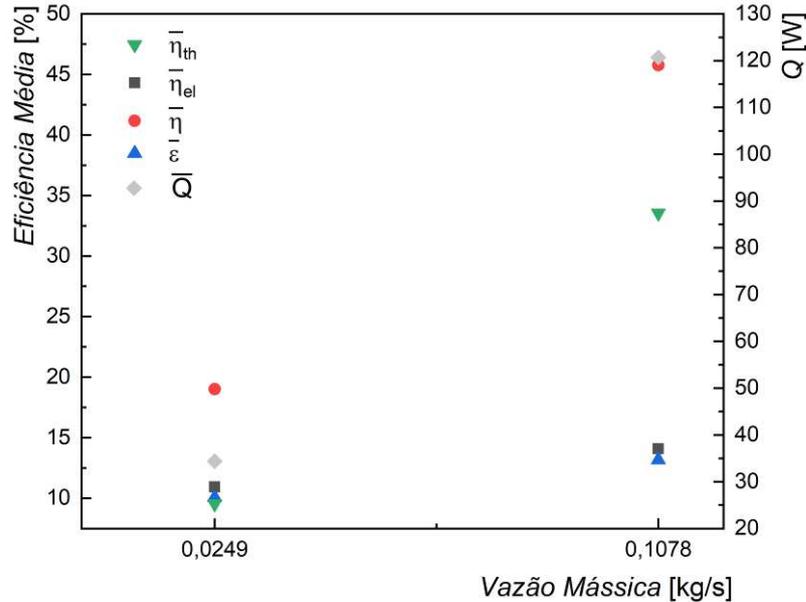


Fonte: Autoria Própria (2022)

Assim como evidenciado anteriormente, o sistema PV/T apresentou melhor desempenho térmico, elétrico e total em relação à eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica quando submetido à vazão volumétrica de 6,5L/min, o que pode ser observado no Gráfico 44.

O Gráfico 45 apresenta uma comparação dos resultados de eficiência térmica média ($\overline{\eta}_{th}$), eficiência elétrica média ($\overline{\eta}_{el}$), eficiência de primeira lei média ($\overline{\eta}$), eficiência de segunda lei média ($\overline{\varepsilon}$) e calor médio (\overline{Q}) em função da vazão mássica de água no *manifold*.

Gráfico 45 - Influência da vazão mássica nos parâmetros do sistema PV/T

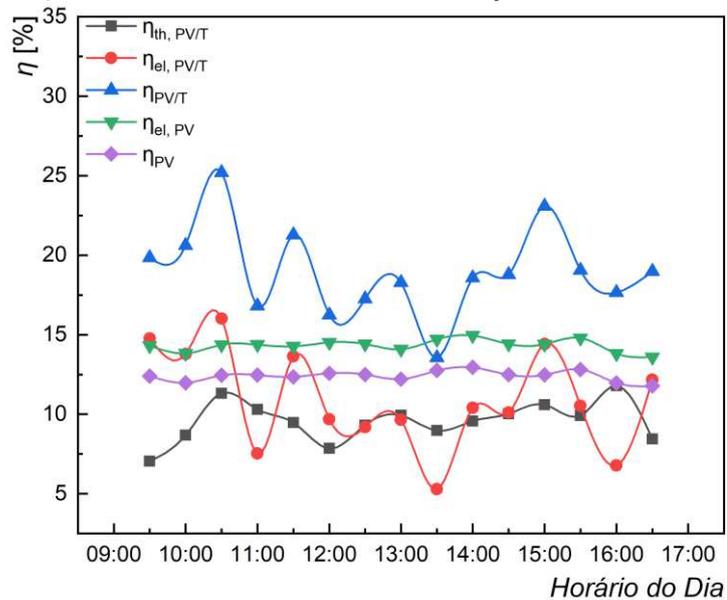


Fonte: Autoria Própria (2022)

Esses resultados experimentais envolvendo os desempenhos fotovoltaico e fototérmico do sistema PV/T em função da vazão mássica de água corroboram com os resultados obtidos a partir de simulações em Gang *et al.* (2012) e Zhang *et al.* (2019), em que foi constatado que o aumento da vazão acarreta em uma melhora nos desempenhos elétrico e térmico do sistema PV/T.

O Gráfico 46 apresenta a comparação da eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica entre o sistema PV/T e o painel fotovoltaico comercial para o dia nublado, ao passo que o Gráfico 47 apresenta os resultados de eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica.

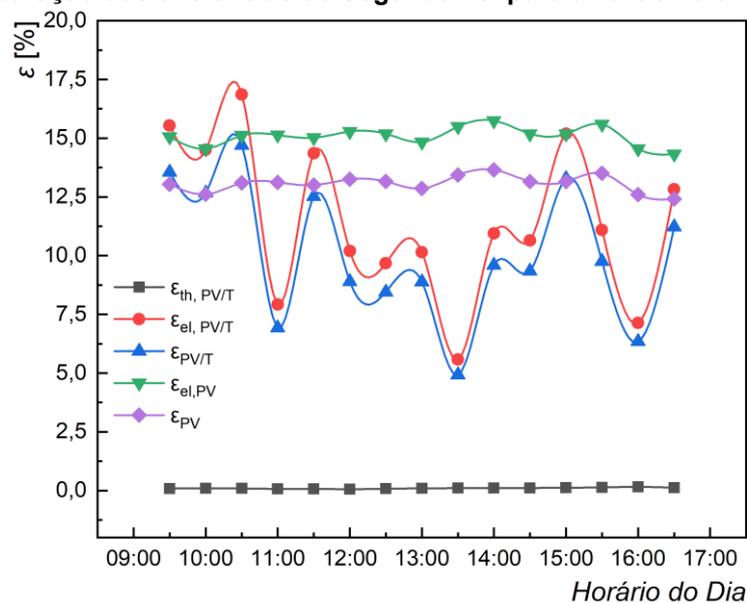
Gráfico 46 – Comparação das eficiências de Primeira Lei para a vazão volumétrica de 1,5L/min



Fonte: Autoria Própria (2022)

Pelo Gráfico 46 é possível verificar que o comportamento foi muito semelhante aos testes com a vazão volumétrica de 6,5 L/min, em que o painel fotovoltaico comercial apresentou maior eficiência elétrica, porém, mesmo apresentando eficiência térmica inferior ao verificado para outros casos, o sistema PV/T apresentou maior eficiência total ao longo do dia devido à soma das parcelas elétrica e térmica de eficiência.

Gráfico 47 – Comparação das eficiências de Segunda Lei para a vazão volumétrica de 1,5L/min



Fonte: Autoria Própria (2022)

Já ao se observar o Gráfico 47 é possível perceber que, em geral, o painel fotovoltaico comercial apresentou maior eficiência total de segunda lei em relação ao sistema PVT, assim como verificado para o teste com vazão volumétrica de 6,5 L/min em dia ensolarado, muito devido à maior contribuição da parcela elétrica em relação à térmica sobre a eficiência de segunda lei.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo experimental apresentou o desenvolvimento de um sistema híbrido fotovoltaico/térmico para geração de energia elétrica e térmica a partir da adaptação de um painel fotovoltaico comercial utilizando termossifões.

A seleção dos termossifões foi realizada com base em dois principais parâmetros: diâmetro das seções e razão de preenchimento com fluido de trabalho. Para a adaptação do painel fotovoltaico comercial, a região do evaporador dos termossifões foi inserida em um meio absorvedor composto por barras chatas de alumínio contendo furos passantes no plano de sua espessura.

Os testes experimentais do sistema PV/T foram realizados em comparação com um painel fotovoltaico comercial de mesmas especificações, orientados em uma inclinação de 25° com a horizontal e com sua face voltada ao norte geográfico.

Os resultados mostraram que a melhor configuração para os termossifões consistiu em um termossifão com diâmetro de 3/8" no evaporador e seção adiabática, e 1/2" no condensador (Termossifão B), preenchido com água destilada a uma razão de preenchimento de 50% do volume do evaporador.

Ao ser comparado com um painel fotovoltaico comercial, o sistema PV/T apresentou uma temperatura média de 56,34 °C, ao passo que o painel comercial apresentou uma temperatura média de 49,00 °C, indicando que a combinação termossifões e meio absorvedor não foi capaz de absorver quantidade de calor o suficiente para realizar o resfriamento do painel fotovoltaico.

Por apresentar uma temperatura mais elevada, o sistema PV/T apresentou menor valor de eficiência elétrica que o painel fotovoltaico comercial, apresentando uma eficiência elétrica média de aproximadamente 14,09%, ao passo que o painel comercial apresentou eficiência elétrica média de aproximadamente 14,65%.

Apesar disso, ao se considerar a parcela térmica, o sistema PV/T apresentou uma eficiência total média de aproximadamente 45,75%, enquanto o painel fotovoltaico comercial apresentou uma eficiência total média de aproximadamente 12,69%, cumprindo o objetivo de elevar a eficiência do dispositivo e também possibilitar a geração de dois tipos de energia distintos, elétrica e térmica.

Tratando-se da eficiência de Segunda Lei da Termodinâmica, o sistema PV/T apresentou uma eficiência média de aproximadamente 13,18%, ao passo que o painel fotovoltaico comercial apresentou uma eficiência média de aproximadamente 13,36%.

Ao se comparar o sistema PV/T em condições meteorológicas nubladas e ensolaradas, verificou-se que o sistema PV/T apresentou menores temperaturas em uma condição nublada, assim como uma maior eficiência térmica, corroborando com a hipótese de que o número de termossifões utilizados no meio absorvedor apresenta um limite de calor possível a ser retirado do painel fotovoltaico, uma vez que as taxas de transferência de calor fornecidas para a água no *manifold* foram muito próximas para os dois casos, mesmo com uma menor energia fornecida ao sistema em uma condição nublada.

Em termos médios, ao longo do dia o sistema PV/T em condição ensolarada apresentou uma η_{el} média de aproximadamente 14,09%, ao passo que em condições nubladas apresentou η_{el} média de aproximadamente 13,35%. As eficiências térmicas e de primeira lei médias para o sistema PV/T sob condições ensolaradas e o sistema sob condições nubladas foram de aproximadamente 33,54%, 45,75%, 40,19% e 51,75%, respectivamente.

Analisando-se a influência da vazão volumétrica de água no *manifold*, verificou-se que, ao utilizar a menor vazão volumétrica, de 1,5L/min, o painel fotovoltaico do sistema PV/T manteve-se em uma maior temperatura (acréscimo médio de aproximadamente 1,35 °C), apresentando menores eficiências elétricas e térmicas, como consequência. As eficiências elétricas médias para as vazões de 6,5 L/min e 1,5 L/min foram de aproximadamente 14,09% e 10,93% respectivamente.

Tratando-se da Primeira Lei da Termodinâmica, As eficiências térmicas e de primeira lei médias para o sistema PV/T submetido a vazões volumétricas de 6,5 L/min e 1,5 L/min foram de aproximadamente 33,54%, 45,75%, 9,55% e 19,02%, respectivamente.

De forma geral, verificou-se que o mecanismo de transferência de calor utilizado não foi o suficiente para realizar o resfriamento do painel fotovoltaico e elevar sua eficiência elétrica. Além disso, o aumento de vazão mássica de água no *manifold* contribuiu positivamente para o desempenho térmico e elétrico do sistema.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros é destacada a investigação do sistema PV/T utilizando uma maior quantidade de termossifões no meio absorvedor, passível de ser realizada a partir de novas furações nas barras de alumínio e substituição do

manifold. Em relação ao *manifold*, além de se permitir o uso de novos termosifões, pode-se investigar a influência de sua largura no desempenho térmico do sistema.

Novos testes podem ser realizados de forma a se investigar o desempenho do sistema ao longo de todo o ano e em estações do ano diferentes, verificando a influência da irradiação solar e também qual é o melhor posicionamento do sistema.

Uma investigação com um maior número de vazões volumétricas de água no *manifold* pode ser feita de forma a verificar se existe um ponto ótimo de vazão para o sistema.

Investigações podem ser feitas com os painéis fotovoltaicos expostos a cargas durante todo o tempo, ao invés de em circuito livre, já que a própria geração de energia do painel fotovoltaico contribui para o seu aquecimento.

Pode-se realizar uma análise de viabilidade do sistema PV/T em comparação a um painel fotovoltaico operando em conjunto com um coletor solar de mesma área de absorção de energia que o sistema PV/T, levando-se em conta a energia gerada em função da área utilizada, assim como a energia gerada em função do custo de instalação dos sistemas.

REFERÊNCIAS

ADAMS, S.; KLOBODU, E. K. M.; APIO, A. Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. **Renewable Energy**, v. 125, p. 755–767, 2018.

AGUIAR, V. M. **Influência da Razão de Preenchimento e da Inclinação no Desempenho Térmico de Termossifões**. 2016. 135 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.

AKBARZADEH, A.; WADOWSKI, T. Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. **Applied thermal engineering**, Elsevier, v. 16, n. 1, p. 81–87, 1996.

ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos**. Dez. 2008. 152 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, dez. 2008.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008. 236 p.

ALVES, T. A.; KRAMBECK, L.; SANTOS, P. H. Dias dos. Heat pipe and thermosyphon for thermal management of thermoelectric cooling. In: **Bringing thermoelectricity into reality**. IntechOpen London, UK, 2018. p. 353–373.

EPE. **Balço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro, Brasil. Empresa de Pesquisa Energética, 2021. 268 p.

BERMANN, C. Crise ambiental e as energias renováveis. **Ciência e Cultura**, v. 60, n. 3, p. 20-29, 2008.

BRAHIM, T.; JEMNI, A. Parametric study of photovoltaic/thermal wickless heat pipe solar collector. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 239, p. 114236, 2021.

BRAUN, M. *et al.* Photovoltaic self-consumption in Germany: using lithium-ion storage to increase self-consumed photovoltaic energy. In: **24th European Photovoltaic Solar Energy Conference (PVSEC)**, Hamburg, Germany. 2009;

BRIDGWATER, A. V. The production of biofuels and renewable chemicals by fast pyrolysis of biomass. **International Journal of Global Energy Issues**, v. 27, n. 2, p. 160-203, 2007.

BROST, O. **Closed Two Phase Thermosyphons**, Class Notes. EMC/UFSC Florianópolis, Brazil, 1996.

BUSSE, C. A. Theory of the ultimate heat transfer limit of cylindrical heat pipes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 16, n. 1, p. 169-186, 1973.

CARNEIRO, J. A. O. **Módulos fotovoltaicos: Características e associações**. fev. 2010. 18 p. Monografia (Mestrado) — Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, fev. 2010.

- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. **Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 3, p. 141-146, 2008.
- CUNHA, E. A. A. *et al.* Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, 2019.
- ELTAWHEEL, M.; ABDEL-REHIM, A. A.; ATTIA, A. AA. Energetic and exergetic analysis of a heat pipe evacuated tube solar collector using MWCNT/water nanofluid. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 22, p. 100743, 2020.
- ESPIRITO SANTO, M. do. **Análise Experimental de Diferentes Configurações de Termossifões para Aplicação em Coletor Solar**. dez. 2017. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, dez. 2017.
- FREITAS, S. S. A. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. nov. 2008. 104 p. Dissertação (Mestrado) de Doutorado – Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Bragança, Portugal, nov. 2008.
- GANG, P. *et al.* A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system. **Solar energy**, v. 85, n. 5, p. 911-921, 2011.
- GANG, P. *et al.* Performance study and parametric analysis of a novel heat pipe PV/T system. **Energy**, v. 37, n. 1, p. 384-395, 2012.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.
- GRASSL, H. Climate change is accelerating, but we must slow it down rapidly. In: **Clean Power from Deserts: The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security**. 4.ed. 2009. p. 11–15.
- GROLL, M.; RÖSLER, S. Operation principles and performance of heat pipes and closed two-phase thermosyphons. **Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics**, v. 17, n. 2, p. 91–151, 1992.
- HALLAL, J.; HAMMOUD, M.; MOUSSA, T. Experimental optimization of the si photovoltaic panels cooling system on maximum allowable temperature criteria. **Renewable Energy Focus**, Elsevier, v. 35, p. 178–181, 2020.
- HENTSCHEL, M.; KETTER, W.; COLLINS, J. Renewable energy cooperatives: Facilitating the energy transition at the port of rotterdam. **Energy policy**, Elsevier, v. 121, p. 61–69, 2018.
- HU, M. *et al.* Experimental study of the effect of inclination angle on the thermal performance of heat pipe photovoltaic/thermal (pv/t) systems with wickless heat pipe and wire-meshed heat pipe. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 106, p. 651–660, 2016.
- IEA. **Key World Energy Statistics**. Paris, França, 2021. 81 p.
- KABIR, Ehsanul *et al.* Solar energy: Potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 894-900, 2018.

KRAMBECK, L.; VANAT, K.J.; SANTOS, P.H.D.; ANTONINI ALVES, T. Uma Correlação do Número de Kutateladze Para Termossifões Verticais. In: **Anais do XXII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**. Rio de Janeiro, 2015.

KRAMBECK, L.; VANAT, K. J.; SANTOS, P. H. D. ; ALVES, T. A. . Uma Correlação do Número de Kutateladze para Termossifões Inclinados. **Boletim técnico da faculdade de tecnologia de São Paulo**, v. 42, p. 103, 2016.

LACERDA, K. A. **Remodelagem de uma usina sucroalcooleira para incremento da cogeração de energia com aproveitamento do palhiço**. jul. 2015. 161 p. Ilha Solteira, 161 p., 2015. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, jul. 2015.

LIMA, M. A. *et al.* Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100504, 2020.

MACHADO, P. L. O., *et al.* Comparison of the experimental performance of a thermosyphon with its thermal design. In: **Proceedings of the 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT**. Rio de Janeiro, 2020.

MANTELLI, M. B.H. **Curso sobre Tubos de Calor e Termossifões**, Notas de Aula. UFSC, Florianópolis, 2009;

MANTELLI, M.B.H. Thermosyphon Technology for Industrial Applications. Chapter 11, In: Vasiliev L.L. and Kakaç S. (Eds.), **Heat pipes and solid sorption transformations: fundamentals and practical applications**. CRC Press, Boca Raton, USA, 54 p., 2013;

MANTELLI, M.B.H. **Thermosyphons and Heat Pipes: Theory and Applications**. Springer International Publishing, 2021.

MARTINS, M. D. S. S. B. **Sistemas de aproveitamento da energia do mar**. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. 2009.

MORADGHOLI, M.; NOWEE, S. M.; ABRISHAMCHI, I. Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal (PV/T) system. **Solar Energy**, v. 107, p. 82–88, 2014.

MORADGHOLI, M.; NOWEE, S. M.; FARZANEH, A. Experimental study of using Al₂O₃/methanol nanofluid in a two phase closed thermosyphon (TPCT) array as a novel photovoltaic/thermal system. **Solar Energy**, v. 164, p. 243-250, 2018.

NISHIDA, F. B. **Desenvolvimento de tubos de calor com microranhuradas fabricadas por eletroerosão a fio**. jan. 2016. 158 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, jan. 2016.

OLIVEIRA, d. S. D. et al. Experimental study of hydrodynamic parameters regarding on geyser boiling phenomenon in glass thermosyphon using wire-mesh sensor. **Thermal Science**, n. 00, p. 221–221, 2021.

OLSON, D. G. *et al.* Recent progress in consolidated bioprocessing. **Current opinion in biotechnology**, v. 23, n. 3, p. 396-405, 2012.

PACHECO, F. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, v. 149, p. 4-11, 2006.

PEDOTT, A. **Metrologia e ensaios**. Notas de Aula: UFRGS, Porto Alegre, 2012.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, Brasil. INPE, 2.ed. 2017. 80p.

PEROSSO, J. V. M. **Montagem de um sistema de circulação fechado de água para testes experimentais em coletores solares**. dez. 2020. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, dez. 2020.

PETERSON, G. P. **An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Application**. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1994.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, v. 1, 2014. 530 p.

PINTO, M. A. **Utilização de painéis solares fotovoltaicos no segmento residencial**. 2015. 48 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

PORTAL SOLAR. **Tudo sobre a eficiência do painel solar**. 2022. Site Portal Solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-eficiencia-do-painel-solar.html> . Acesso em: 7 jan. 2022.

REAY, D. A.; KEW, P. A.; MCGLEN, R. J. **Heat Pipes: Theory, Design and Applications**. 6 ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014. 251p.

RUSSO, G. M. **Influência do fluido de trabalho no desempenho térmico de termossifões**. dez. 2017. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, dez. 2017.

SALAMONI, I. T. *et al.* **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. 2009. 200 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SHAHBAZ, M. *et al.* The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index. **Energy**, Elsevier, v. 207, p. 118162, 2020.

SILVA, I. T. da. **Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

SILVA, R. A. d.; AZEVEDO, F. F. d. O desenvolvimento do setor eólico no brasil e no mundo. **Formação (Online)**, v. 28, n. 53, 2021.

TAYLOR, B. N.; KUYATT, C. E. **Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results**. Gaithersburg, USA, 1994.

TINOCO, H de L. *et al.* Uma Contribuição para o Desenvolvimento Sustentável: Estudo Experimental da Influência da Temperatura de Operação sobre a Eficiência Energética de um Painel Solar Fotovoltaico. In **Sustentabilidade e Responsabilidade Social em Foco**. Possion, Belo Horizonte, v. 5, 2018, p. 60-68.

VIALLI, A. **Fotovoltaica lidera entre as fontes de geração instaladas no mundo em 2019 e cresce 1.400% na década**. 2020. Site Portal Solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/fotovoltaica-lidera-entre-as-fontes-de-geracao-instaladas-no-mundo-em-2019-e-cresce-1-400-na-decada.html#:~:text=A%20energia%20fotovoltaica%20foi%20a,adicionada%20globalmente%20no%20ano%20passado> . Acesso em: 01 dez. 2020.

WATTS, A. W. **The wisdom of insecurity: A message for an age of anxiety**. Vintage, 1951.

ZHANG, T. *et al.* Experimental, study and design sensitivity analysis of a heat pipe photovoltaic/thermal system. **Applied Thermal Engineering**, v. 162, p. 114318, 2019.

ZHANG, T. *et al.* Experimental study and numerical validation on the effect of inclination angle to the thermal performance of solar heat pipe photovoltaic/thermal system. **Energy**, v. 223, p. 120020, 2021.

ZOHURI, B. **Heat Pipe Design and Technology**. Springer, 2016.

APÊNDICE A - Construção dos termossifões e dimensões das tampas e conexão de cobre

A metodologia de fabricação dos termossifões (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, processo de evacuação e preenchimento com o fluido de trabalho), ensaios experimentais e análise térmica dos termossifões foram realizadas levando em consideração as informações contidas em Antonini Alves *et al.* (2018).

Os materiais utilizados para construção dos termossifões consistiram em tubos de cobre de diâmetros externos de 3/8" e 1/2", tubo capilar de cobre com diâmetro interno de 0,064", duas tampas de cobre confeccionadas via processo de usinagem, possuindo diâmetro maior igual ao diâmetro externo dos tubos de cobre e menor diâmetro igual ao diâmetro interno, e uma conexão de cobre para permitir a junção de tubos de diâmetros distintos. Com exceção dos tubos de cobre, todos os demais componentes são apresentados na Fotografia 19. Na tampa de cobre a ser posicionada na extremidade do evaporador foi realizado um furo de 2,5mm de diâmetro, de forma a permitir a passagem do tubo capilar.

O primeiro passo consistiu no corte dos tubos de cobre nas dimensões desejadas. Para os Termossifões A e C foram cortados os tubos de diâmetros correspondentes com uma dimensão de 830mm, enquanto que para o Termossifão B cortou-se um tubo de 3/8" com 700mm de comprimento, e outro de 1/2" com 127,5mm de comprimento.

O segundo processo consistiu na limpeza. Primeiramente todos os componentes foram limpos utilizando água e sabão de forma a se retirar sujidades superficiais. Posteriormente o invólucro teve seu interior limpo utilizando-se de acetona a fim de retirar qualquer sujidade e oleosidade presente em seu interior. Esse processo consistiu em tampar uma das extremidades do invólucro e inserir acetona em seu interior, realizando o processo de limpeza a partir de agitação manual. Após a limpeza com acetona, o excesso de acetona foi retirado a partir de um enxágue com água destilada.

Fotografia 19 – Componentes de um termossifão

Fonte: A autoria Própria (2022)

Os demais componentes, de menores dimensões, foram submetidos a um banho ultrassônico *Kondentech™* permanecendo submersos por trinta minutos em acetona a uma temperatura próxima de 40°C, conforme pode ser observado na Fotografia 20. Por fim, as extremidades do invólucro e os demais componentes foram submersos em uma solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄ de 0,1M) por um tempo inferior a um minuto. Esse processo de limpeza é necessário para garantir a molhabilidade do fluido de trabalho, a eliminação de impurezas e melhorar a qualidade do vácuo, evitando a formação de gases não condensáveis no interior do dispositivo.

Após o processo de limpeza, foi executado o processo de montagem. Para tal, utilizando-se de um maçarico portátil e estanho, foi realizada a brasagem das tampas nas extremidades do invólucro e também do capilar na tampa que contém um furo em seu centro. A conexão de cobre do Termossifão B foi brasada entre os tubos de diâmetros distintos (Fotografia 21).

Fotografia 20 – Limpeza dos componentes por banho ultrassônico



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Para verificar se a brasagem foi realizada de forma correta, executou-se o teste de estanqueidade (Fotografia 22). Esse consistiu em inserir o termossifão montado em um recipiente com água ao passo que ar foi bombeado em seu interior por meio de uma bomba de deslocamento positivo manual. Caso houvesse alguma falha, bolhas de ar iriam surgir mostrando as falhas na brasagem, o que tornaria o termossifão incapacitado para operar.

Fotografia 21 – Processo de montagem dos termossifões



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Fotografia 22 – Teste de estanqueidade

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Com o teste de estanqueidade realizado, procedeu-se para a evacuação do termostifão (Fotografia 23). Para isso, foi utilizada uma bomba de vácuo *EOS Value™* modelo *i260SV*, que foi conectada ao termostifão por meio de uma mangueira flexível de silicone em seu capilar, utilizando graxa de vácuo *Dow Corning™* nas conexões para ocorrer um acoplamento sem vazamentos. A bomba de vácuo foi mantida em funcionamento por 8 horas, momento em que o fluxo na mangueira foi interrompido com o auxílio de um *fôrceps* e a bomba foi desligada, como pode ser observado na Fotografia 24.

Fotografia 23 – Processo de evacuação

Fonte: Aatoria Própria (2022)

Fotografia 24 – Término do processo de evacuação

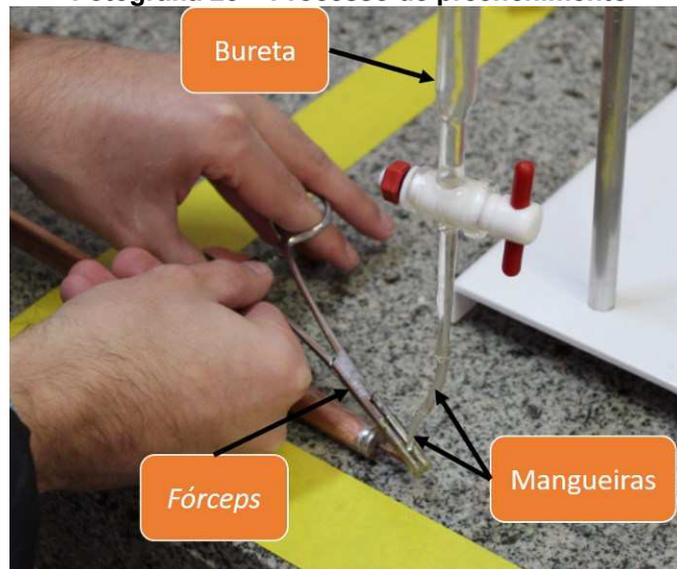
Fonte: Aatoria Própria (2022)

Após a evacuação, foi realizado o preenchimento do termossifão. Desconectou-se a mangueira de silicone da bomba de vácuo, ainda vedada pelo uso do *fórceps*, e o termossifão evacuado foi acoplado à uma bureta por meio da mangueira de silicone em sua extremidade. Tanto a mangueira de silicone conectada ao termossifão, quanto a conectada à bureta foram totalmente preenchidas com água destilada antes de realizar o acoplamento, evitando assim a presença de ar em seus interiores.

Com a bureta completamente preenchida com fluido de trabalho, a válvula da bureta foi aberta vagarosa e cuidadosamente para que não se formasse nenhuma bolha de ar nas conexões entre a bureta e o termossifão. O *fórceps* foi cuidadosamente aberto para drenar o fluido de trabalho até que o termossifão fosse carregado com a razão de preenchimento desejada. O processo de preenchimento pode ser observado na Fotografia 25.

Após a quantidade certa de fluido de trabalho ser carregada no termossifão o *fórceps* foi fechado, e então o capilar de cobre foi conformado com um alicate de pressão, bloqueando a entrada do ar. Ainda foi realizado o preenchimento da extremidade livre do capilar com estanho por meio de um processo de brasagem, completando a vedação do termossifão.

Fotografia 25 – Processo de preenchimento



Fonte: A autoria Própria (2022)

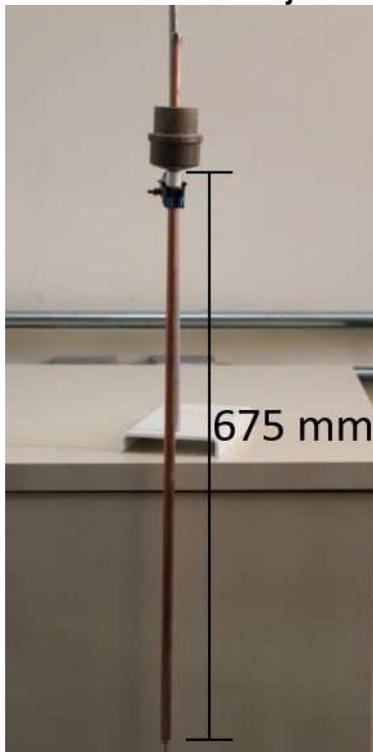
Para simular um *manifold*, foi utilizado um tê de PVC soldável de 60mm de diâmetro, duas reduções internas de PVC de 60mm para 25mm, dois pedaços de tubo de PVC com 25mm de diâmetro, um pedaço de tubo de PVC de 60mm de diâmetro com 75mm de comprimento e um tampão de PVC de 60mm. Primeiramente realizou-se a união do tampão de PVC com o tubo de PVC de 60mm utilizando cola para PVC. Posteriormente, realizou-se um furo no centro do tampão de PVC com diâmetro igual ao diâmetro externo do evaporador dos termossifões. Com auxílio de um suporte universal com garra e fita crepe, o conjunto tampão/tubo de PVC foi posicionado a 675mm da extremidade do evaporador, como mostrado na Fotografia 26.

De forma a evitar vazamentos para a região do evaporador, todo o conjunto tampão/tubo foi preenchido com resina para laminação (Fotografia 27), utilizando catalisador para acelerar o processo de cura. O conjunto foi totalmente preenchido com resina de forma a deixar apenas a região do condensador exposta, ou seja, a região resinada faz parte da seção adiabática do termossifão.

Para finalizar o sistema de circulação de água, realizou-se uma furação no centro do tê de PVC de mesmo diâmetro do condensador do dispositivo. Por essa furação foi passado um termopar do tipo K *Omega Engineering*TM, o qual foi fixado na metade do comprimento do condensador para aquisição de dados de temperatura dessa região. Após a total cura da resina, o tê foi acoplado ao conjunto tampão/tubo utilizando silicone acético na junção para vedação, deixando a tampa de cobre do

condensador exposta, permitindo assim que a água de circulação entre em contato apenas com a região do condensador que vai realizar trocas térmicas.

Fotografia 26 – Posicionamento do conjunto tampão/tubo de PVC



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Fotografia 27 – Preenchimento com Resina



Fonte: Aatoria Própria (2022)

Nas duas extremidades do tê de PVC foram acopladas, também utilizando silicone acético, reduções internas de PVC de 60mm para 25mm. Nas reduções foram

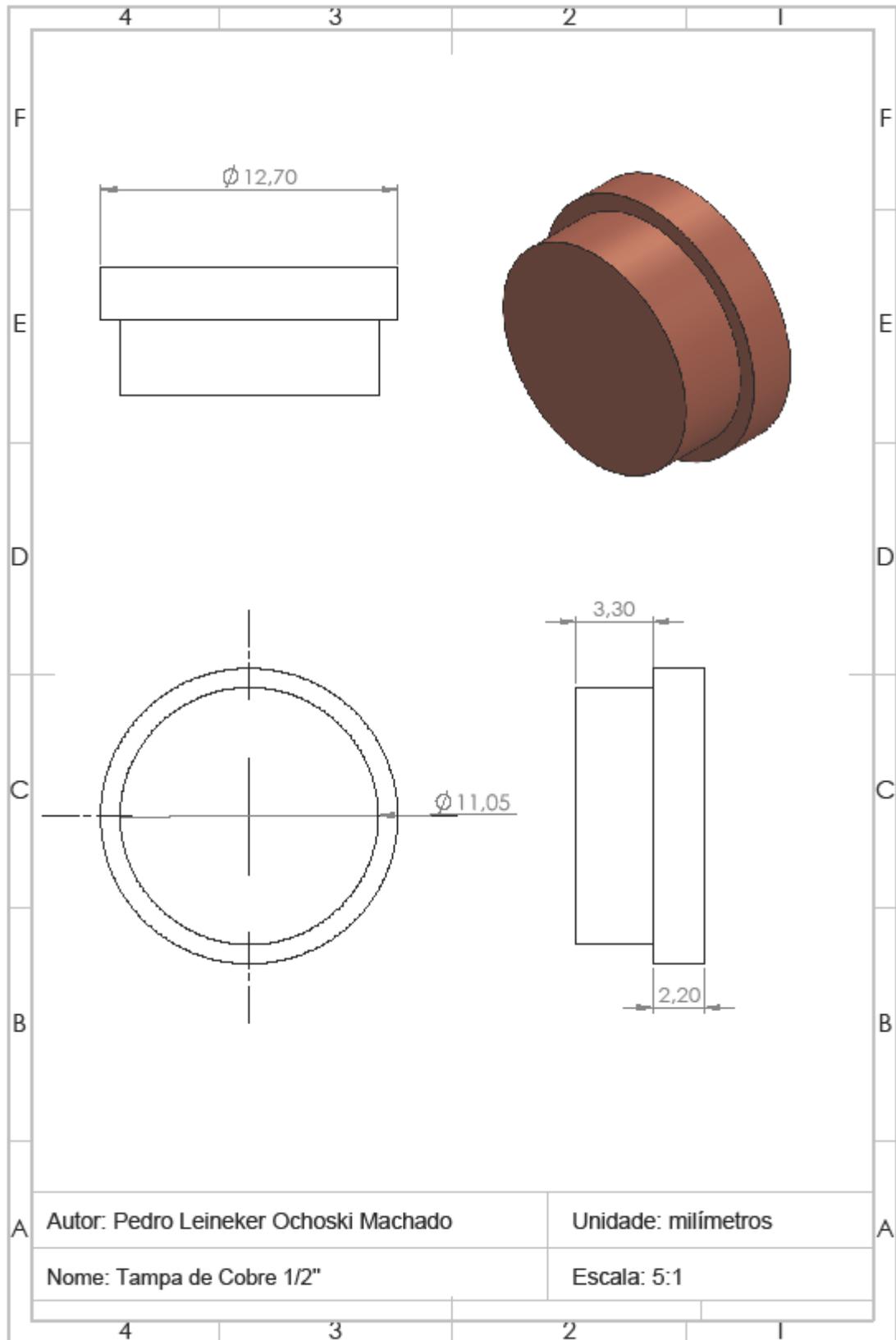
acoplados tubos de PVC de 25mm de diâmetro, contendo adaptações de 25mm para 3/4", permitindo o acoplamento de um espigão para que se possa realizar a conexão do *manifold* com mangueiras de silicone, permitindo a circulação de água. A montagem completa do sistema de circulação de água para o teste dos termossifões pode ser observada na Fotografia 28.

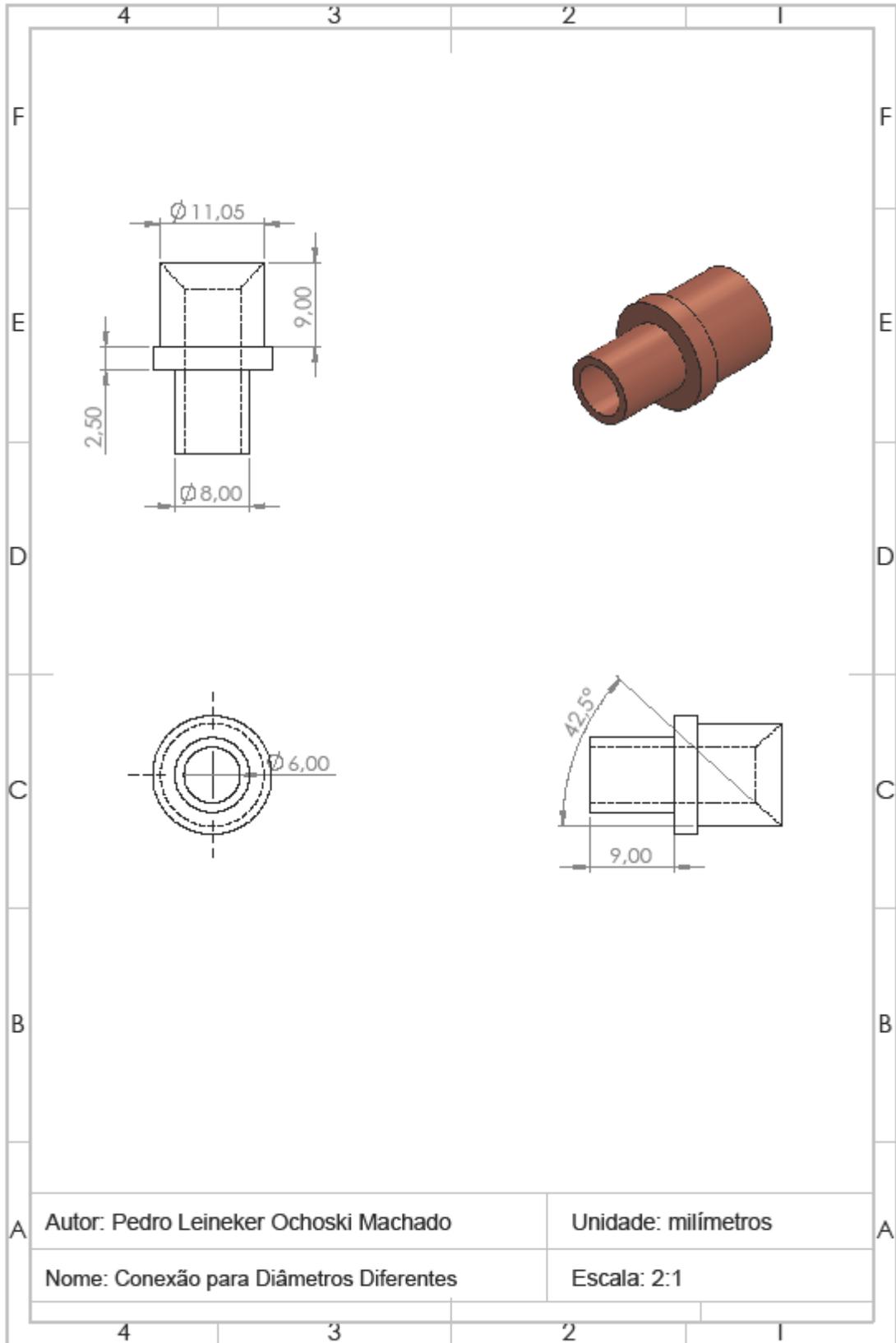
Fotografia 28 – Sistema de circulação de água para teste dos termossifões

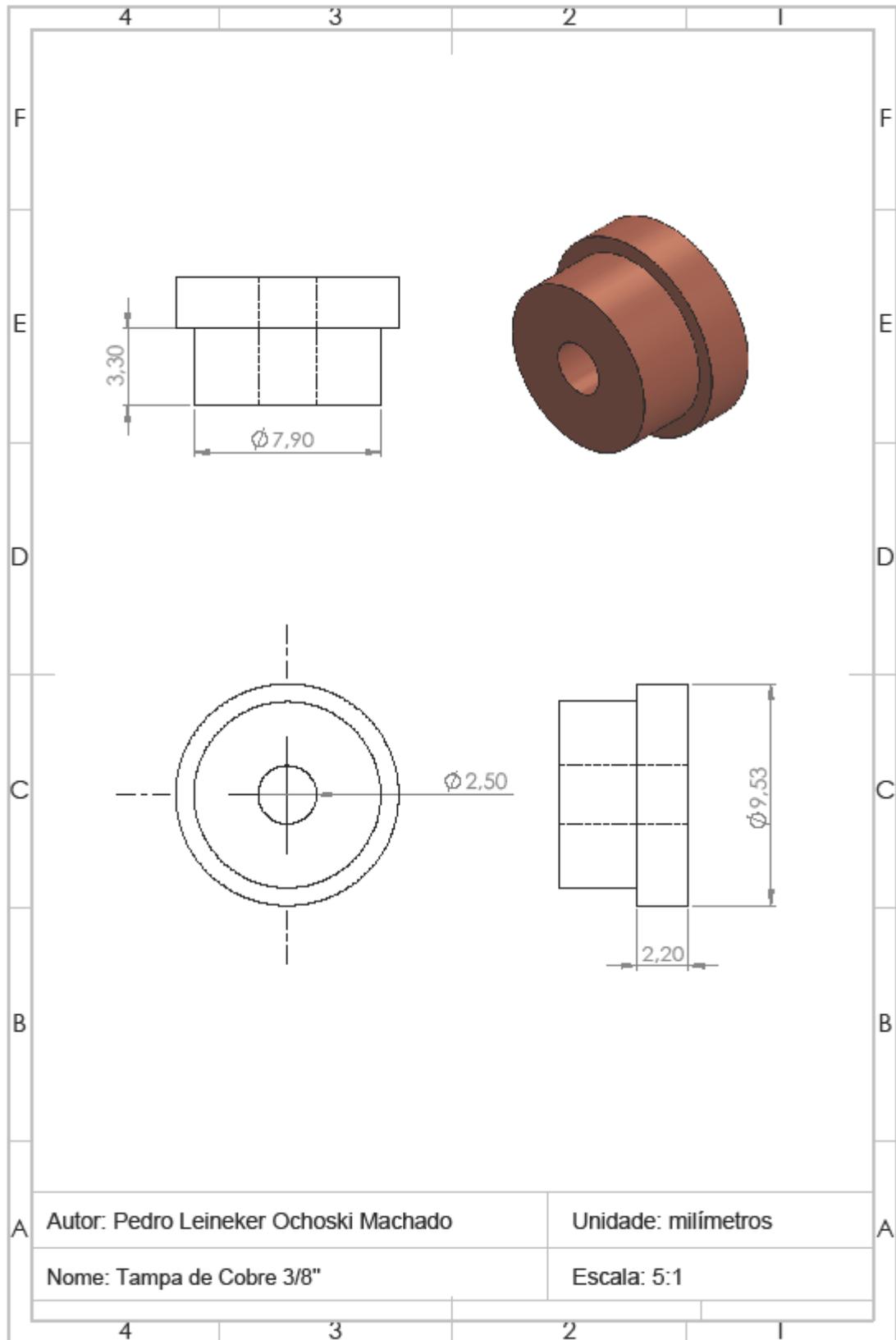


Fonte: Autoria Própria (2022)

Toda a metodologia utilizada para a construção de termossifões descrita nessa seção foi validada ao se comparar resultados de termossifões construídos a partir dessa metodologia com o projeto de termossifões apresentado na Seção 2.9. Os resultados dessa validação podem ser encontrados em Machado *et al.* (2020).







APÊNDICE B - Construção e calibração de termopares

Para a construção dos termopares foi utilizado cabo para termopar duplex isolado do tipo K *Omega Engineering*TM. Para realizar a junção dos materiais do termopar foi utilizado um soldador de termopar *Fine Wire and Thermocouple Welder Omega Engineering*TM.

Primeiramente, foi realizada a retirada do isolamento das extremidades do fio de termopar, deixando os materiais semicondutores expostos. Feito isso, utilizando uma chave de fenda de 1,4mm de diâmetro como base, os materiais semicondutores foram entrelaçados entre si para que se torne possível a junção desses, como pode ser observado na Fotografia 29.

Fotografia 29 – Entrelaçamento dos materiais semicondutores do termopar



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para realizar a soldagem, manteve-se um alicate metálico em contato com os materiais semicondutores e conectado ao equipamento de solda. A extremidade dos materiais semicondutores foi então colocada em contato com um eletrodo de cobre contido no soldador de termopar, ocasionando um curto circuito e o derretimento dos materiais metálicos, realizando a junção desses. Esse processo foi realizado no nível 5 de potência do equipamento e em atmosfera controlada com gás argônio. O processo de soldagem dos termopares pode ser observado na Fotografia 30.

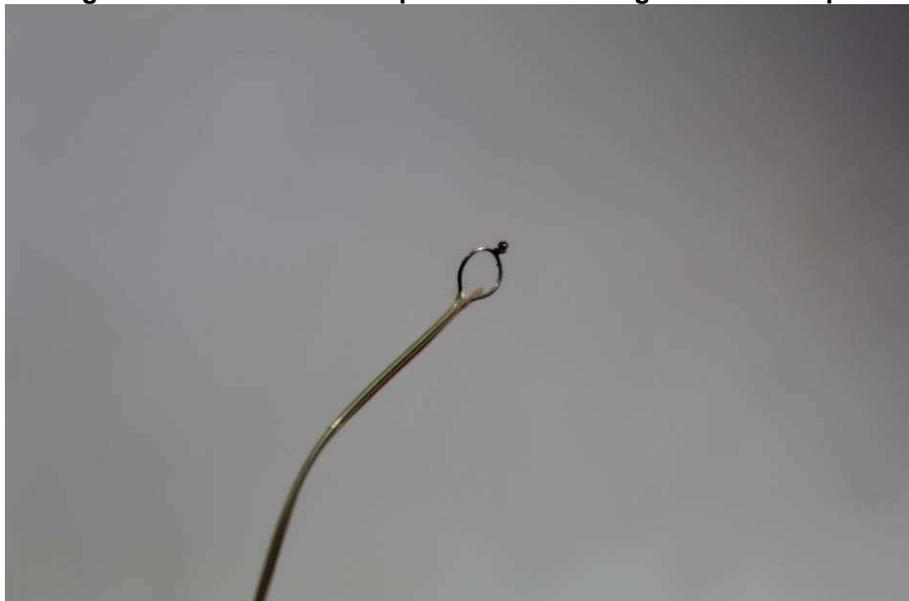
Fotografia 30 – Processo de soldagem do termopar



Fonte: Aatoria Própria (2022)

O resultado do processo de soldagem pode ser observado na Fotografia 31. A outra extremidade do fio de termopar foi conectada a um conector de termopar em miniatura *Omega Engineering*TM. Cada termopar foi testado individualmente, primeiramente verificando a resistência da junção entre os materiais semicondutores, e posteriormente sendo verificado seu comportamento ao ser submetido a variações de temperatura. Ao passar por esses testes preliminares, os termopares passaram por um processo de calibração.

Fotografia 31 – Resultado do processo de soldagem dos termopares



Fonte: Aatoria Própria (2022)

O processo de calibração foi feito a partir do método comparativo, comparando as leituras fornecidas pelos termopares com as leituras de um termômetro de mercúrio em diferentes temperaturas.

O termômetro utilizado foi um termômetro químico de líquido em vidro *IncoTerm*TM com enchimento em mercúrio. O termômetro possui escala de -10°C a 200°C e divisão de 0,5°C. Como é um instrumento analógico, sua incerteza corresponde à metade de sua menor escala, ou seja, o termômetro possui incerteza de $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

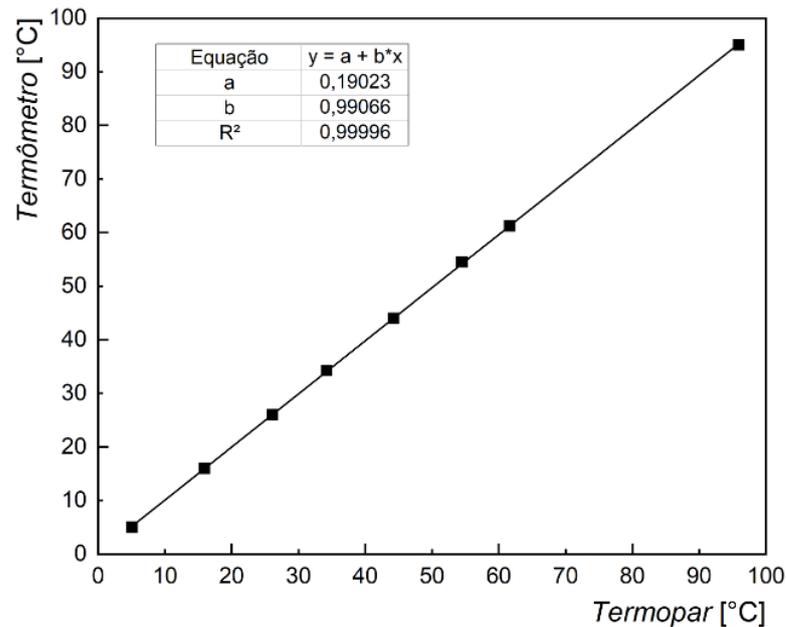
Para a calibração, os termopares e o termômetro foram submersos em água com temperatura controlada fornecida por um banho ultratermostatizado *LimaTec*TM *LT204*. Os termopares do tipo K foram imersos em água na mesma altura da coluna de líquido até que o termômetro mantivesse uma temperatura estável por um tempo de um minuto, sendo então coletadas 5 leituras de temperatura nos termopares a partir de um sistema de aquisição de dados *Keysight*TM *DAQ970A* e o programa computacional *Keysight*TM *BenchVue*. Foram realizadas leituras para 8 temperaturas diferentes entre 5°C e 95°C, faixa que abrangem as temperaturas esperadas durante a execução de testes experimentais com os termossifões e o sistema PV/T.

A partir das 5 leituras para cada temperatura, realizou-se a média dessas leituras e a posterior regressão dos dados de temperatura dos termopares em função da temperatura do termômetro. A Tabela 3 apresenta as leituras realizadas para um dos termopares e o Gráfico 48 apresenta a regressão entre os dados.

Tabela 3 – Exemplo de calibração de um termopar.

Termopar					Média	Termômetr
[°C]					[°C]	o [°C]
5,0987252	5,1125318	5,0740246	5,0617576	5,0240532	5,07421852	5,00
4	6	4	6	4	8	
15,875336	16,028960	16,107969	15,843911	15,901053	15,9514462	16,00
8	2	2	5	4	2	
26,049062	26,089043	26,075968	26,114278	26,139412	26,0935530	26,00
7	1	0	5	8	2	
34,185352	34,164495	34,185378	34,199656	34,303294	34,2076354	34,25
1	3	7	5	8	8	
44,211667	44,120581	44,258871	44,331941	44,387972	44,2622067	44,00
1	1	1	7	9	8	
54,335768	54,465632	54,569990	54,563661	54,486640	54,4843384	54,50
0	3	0	7	1	2	
61,385091	61,593522	61,709723	61,640736	61,914285	61,6486719	61,25
0	9	3	4	9	0	
96,148175	96,263992	95,872991	95,722878	95,533587	95,9083250	95,00
7	4	6	6	1	8	

Fonte: Autoria Própria (2022)

Gráfico 48 – Regressão linear dos dados de temperatura para calibração de um termopar

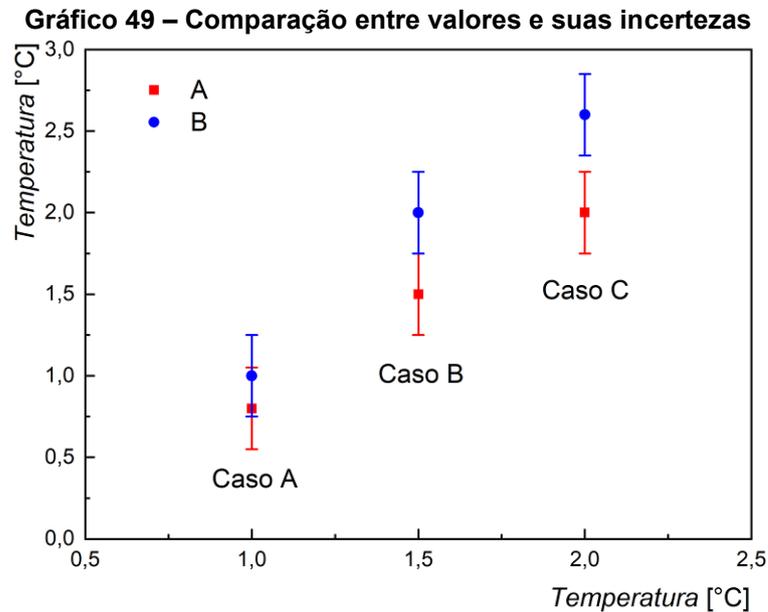
Fonte: Autoria Própria (2022)

Como é possível notar pelo Gráfico 48 os dados de temperatura obtidos pelo termopar e pelo termômetro apresentaram uma tendência linear entre si, com um $R^2 = 0,99996$. Agora, a partir da equação da equação de reta gerada pela regressão linear, pode-se validar o processo de calibração.

Para validar a calibração, os valores médios de leitura do termopar para cada temperatura analisada foram aplicados na equação da reta do Gráfico 48 e comparados com as leituras realizadas pelo termômetro. Como a calibração foi realizada pelo método comparativo, a incerteza das leituras do termopar pós calibração podem ser consideradas iguais à incerteza do instrumento utilizado para calibração, ou seja, $0,25^\circ\text{C}$.

Ao comparar o valor de duas variáveis que apresentam o mesmo valor de incerteza pode-se deparar com três casos distintos, como pode ser observado no Gráfico 49. No Caso A é possível perceber que as barras de incerteza das medidas das variáveis A e B estão se cruzando, então nesse caso a diferença entre os valores de A e B é menor que duas vezes a incerteza de cada medida. No Caso B, percebe-se que as barras de incerteza estão se encontrando em suas extremidades, logo a diferença entre os valores de A e B é igual a duas vezes a incerteza de cada medida. No Caso C, as barras de incerteza não se interceptam, logo, a diferença entre os valores de A e B é maior que o dobro da incerteza de cada medida.

Dessa forma, pode-se concluir que nos Casos A e B, em que as barras de incerteza se interceptam, os valores A e B podem ser considerados valores estatisticamente iguais, já que a variável A pode assumir qualquer valor que esteja contido entre suas barras de incerteza, assim como a variável B.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Assim, a partir da análise do Gráfico 49, a calibração dos termopares foi considerada validada para os termopares em que os valores das leituras de temperatura após calibração possuam uma diferença menor ou igual a duas vezes a incerteza dessa medida em relação aos valores medidos pelo termômetro de referência, ou seja, quando a diferença for de até $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da calibração de um termopar.

Termopar Calibrado [°C]	Termômetro de Referência [°C]	Diferença [°C]	Diferença [%]
5,217228296	5,00	0,217228296	4,344565914
15,99329777	16,00	-0,006702230	-0,041888937
26,04108298	26,00	0,041082977	0,158011450
34,07970447	34,25	-0,170295530	-0,497213226
44,04076826	44,00	0,040768257	0,092655129
54,16783407	54,50	-0,332165927	-0,609478766
61,26553925	61,25	0,015539251	0,025370206
95,20657766	95,00	0,206577657	0,217450165

Fonte: Autoria Própria (2022)

APÊNDICE C - Programação e calibração do sistema de aquisição de dados para aplicação de cargas resistivas

```

//PRE-TRATAMENTO
#include <LiquidCrystal.h> // Inclui biblioteca "LiquidCrystal.h"
float vetCorrente[100];

const int pinoSensor = A9; //PINO ANALÓGICO EM QUE O SENSOR ESTÁ CONECTADO

LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); // Define Pinos do Display
int delayTime = 100; //INTERVALO DE LEITURAS
int leituras = 10; // NÚMERO DE LEITURAS PARA SUAVIZAR OS RESULTADOS
//MODULO DE RELES
int Decimal = 0;
int Quociente = 0;
void ConverteParaBinarios();
int Vetor[9]; //CRIAR VETOR VAZIO COM 9 ESPAÇOS PARA SEQUÊNCIA BINÁRIA
float R[8]={100.47,47.96,14.84,7.80,4.83,4.14,3.50,1.15}; //RESISTENCIAS UTILIZADAS NA ASSOCIAÇÃO
int Portas[8]={22,24,26,28,30,32,34,36}; //PORTAS DIGITAIS A SEREM LIGADAS NO RELÉ
int j;
int k;
//TENSAO
int volt_st; //VARIÁVEL PARA LEITURA DA PORTA ANALÓGICA DO SENSOR DE TENSÃO
float volts; //ARMAZENAR O CÁLCULO PARA OBTENÇÃO DE TENSÃO
float average_volt = 0; //MÉDIA OBTIDA DO NÚMERO DE LEITURAS
void setup() {
  Serial.begin (9600);
  lcd.begin(16,2); //SETA A QUANTIDADE DE COLUNAS(16) E O NÚMERO DE LINHAS(2) DO DISPLAY.
  Serial.println("Posição Resistência(ohms) Tensão(V) Corrente(A) Potência (W)");
  for(j=0;j<=8;j++) {
    pinMode(Portas[j], OUTPUT);
    digitalWrite(Portas[j], LOW);
  }
}

void loop() {
  int cont=1;
  for(j=0;j<=255;j=j+cont){
    Decimal = j;
    cont=cont+j/10;
    ConverteParaBinarios();
    double Req = 0;
    for(k = 0; k<=8;k++) {
      if(Vetor[k]>0)
      {
        Req += 1.0/(Vetor[k]*R[k]);
        digitalWrite(Portas[k],HIGH);
      }
    }
    pinMode(20,OUTPUT);
    pinMode(21,OUTPUT);
    digitalWrite(20,LOW);
    digitalWrite(21,HIGH);
  }
  //TEMPO PARA ESTABILIZAR E REALIZAR LEITURA
  delay(500);
  Req=1/Req;
  //TRATAMENTO SENSOR DE VOLTAGEM
  volts = 0.0;

  for(int i = 0; i < 100; i++)

```

```

vetCorrente[i] = 0.0;

for (int i = 1; i <= leituras; i++)
{
volts += analogRead(A8); //LEITURA DA PORTA ANALOGICA A8

for(int k = 0; k < 100; k++)
{
vetCorrente[k] += analogRead(A9);
delayMicroseconds(100);
}

delay(100);

}
average_volt = volts / leituras;
average_volt = ((average_volt *35.0)/1024.0)*0.9856+0.2663;

double maior_Valor = 0;
double valor_Corrente = 0;

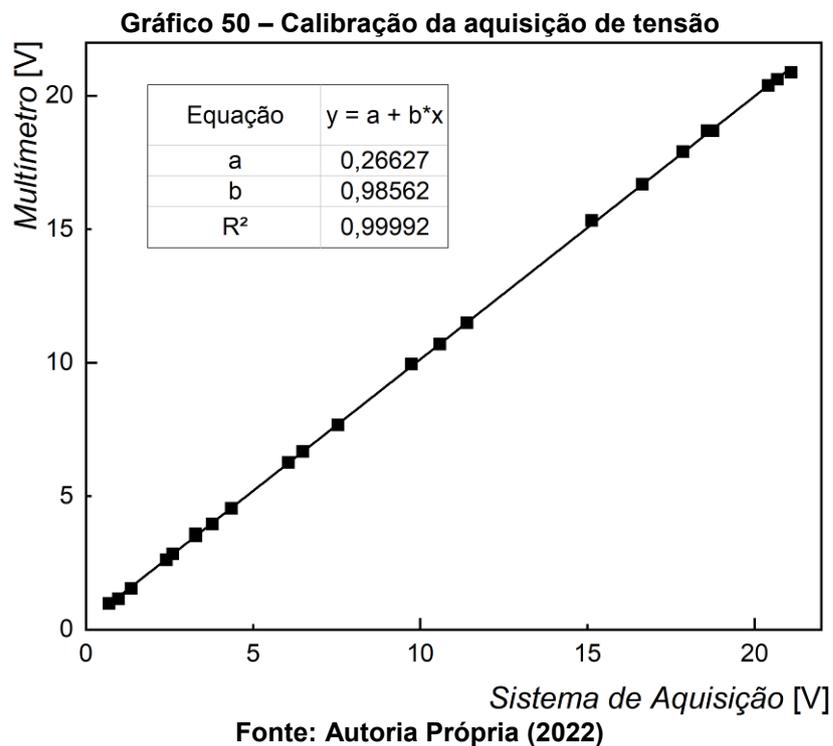
for(int i = 0; i < 100; i++)
{
if(maior_Valor < vetCorrente[i]/leituras)
{
maior_Valor = vetCorrente[i]/leituras;
}
}
maior_Valor = maior_Valor * 0.0048828125;
valor_Corrente = maior_Valor - 2.50;
valor_Corrente = valor_Corrente * 1000;
valor_Corrente = valor_Corrente /185;
valor_Corrente = (valor_Corrente / 1.41421356)*1.4406+0.1937;

Serial.print(Decimal);
Serial.print("\t");
Serial.print("\t");
Serial.print(Req);
Serial.print("\t");
Serial.print("\t");
Serial.print(average_volt,3);
Serial.print("\t");
Serial.print("\t");
Serial.print(valor_Corrente,3);
Serial.print("\t");
Serial.print("\t");
Serial.println(average_volt*valor_Corrente,3);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("DDP =");
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print(average_volt,3);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("CORRENTE =");
lcd.setCursor(10,1);
lcd.print(valor_Corrente,3);
delay(delayTime);
//DESLIGAR PORTAS
for(int k=0;k<=8;k++)

```

```
{
  Vetor[k]=0;
  digitalWrite(Portas[k],LOW);
}
delay(200);
}
}
//MANIPULACAO
void ConverteParaBinarios()
{
  Quociente = Decimal;
  int i = 1;
  if(Quociente > 1)
  {
    while(Quociente > 1)
    {
      Vetor[i-1] = Quociente % 2;
      Quociente = Quociente/2;
      i++;
    }
    Vetor[i-1] = Quociente;
  }
  else
  {
    Vetor[i-1] = Quociente % 2;
    Quociente = Quociente/2;
    i++;
    Vetor[i-1] = Quociente;
  }
}
```

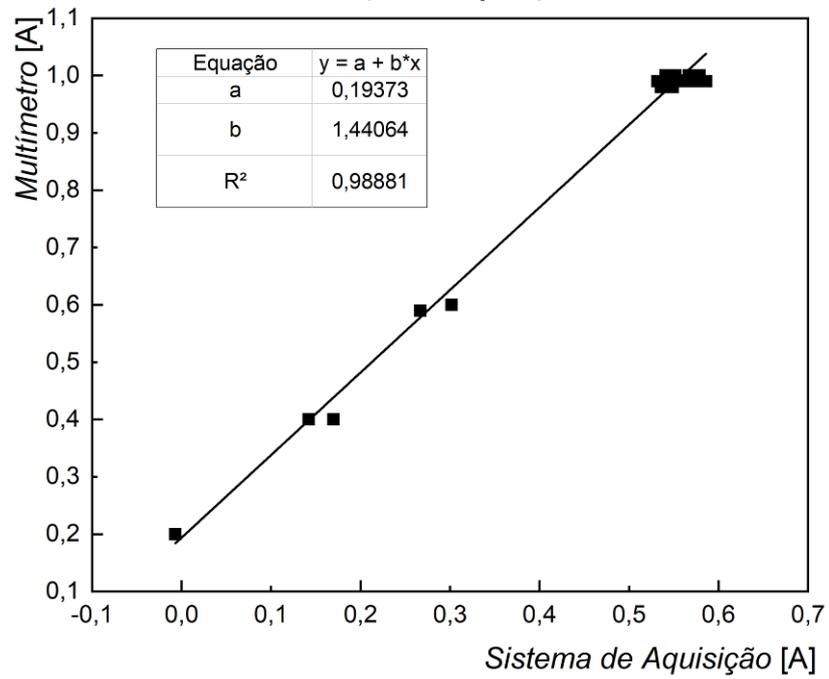
A calibração do sistema de aquisição ocorreu de forma semelhante à calibração dos termopares. Para a calibração da aquisição da tensão, um multímetro digital *Minipa*TM ET-2042E foi conectado em paralelo com o painel fotovoltaico comercial que também estava conectado ao sistema de aquisição de dados, sendo realizado um ciclo de leitura de dados. A partir da leitura dos dois dispositivos, foi realizada uma regressão dos dados para obtenção da curva de calibração, como pode ser observado no Gráfico 50.



Para o sensor de corrente o multímetro foi posicionado em série com o painel fotovoltaico que também estava conectado com o sistema de aquisição de dados. Após um ciclo de leitura de dados foi realizada a regressão dos valores de corrente obtidos pelo sistema de aquisição em função dos valores de corrente obtidos pelo multímetro, como pode ser observado no Gráfico 51.

Como pode ser visto pelo Gráfico 50 e Gráfico 51, ambas as regressões foram de carácter linear com um coeficiente de determinação R² próximo de 1, o que indica uma forte correlação entre os dados analisados.

Levando-se em consideração que a calibração foi realizada a partir do método comparativo, adotou-se como incerteza do sistema de aquisição de dados a mesma incerteza do multímetro digital.

Gráfico 51 – Calibração da aquisição de corrente

Fonte: Autoria Própria (2022)

APÊNDICE D - Principais resultados obtidos pelo sistema de aquisição de dados para aplicação de cargas resistivas

A Tabela 5 ilustra os dados dos painéis fotovoltaicos obtidos a partir do sistema de aquisição de dados de cargas resistivas. A primeira aquisição foi realizada com todos os canais do módulo relé desligados, ou seja, com o painel fotovoltaico em circuito aberto. As demais aquisições foram realizadas com diferentes associações entre os resistores utilizados no banco de resistores. Ressalta-se que a resistência equivalente do divisor de tensão utilizado também contribui na carga resistiva aplicada ao painel fotovoltaico, logo os valores de corrente não podem ser obtidos a partir da Lei de *Ohm* considerando a tensão coletada pelo sistema e a resistência equivalente resultante da associação dos resistores do banco de resistores.

Tabela 5 – Aquisição de dados dos painéis fotovoltaicos

Horário	Posição	Resistência [ohms]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]
14:02:06	0	inf	20,6	0,0	0,0
14:02:08	1	100,4	20,5	0,3	5,6
14:02:10	2	48,0	20,4	0,4	9,1
14:02:12	3	32,5	20,0	0,7	13,3
14:02:14	4	14,8	19,7	1,3	26,1
14:02:16	5	12,9	19,4	1,5	29,8
14:02:18	6	11,3	19,3	1,7	33,2
14:02:20	7	10,2	19,2	1,9	36,2
14:02:22	8	7,8	18,5	2,4	45,4
14:02:24	9	7,2	18,3	2,6	47,9
14:02:26	10	6,7	18,2	2,8	50,2
14:02:28	12	5,1	17,1	3,3	56,9
14:02:30	15	4,4	15,8	3,6	56,9
14:02:32	19	4,2	15,1	3,7	55,9
14:02:34	24	3,0	11,1	3,8	41,9
14:02:36	31	2,3	8,9	3,8	33,8
14:02:38	41	2,6	10,2	3,8	38,7
14:02:41	55	1,8	7,2	3,8	27,6
14:02:43	74	2,3	8,7	3,8	33,1
14:02:45	100	1,7	6,4	3,8	24,5
14:02:47	136	1,0	3,8	3,8	14,5
14:02:49	185	0,7	2,8	3,8	10,6
14:02:51	252	0,6	2,4	3,8	9,2

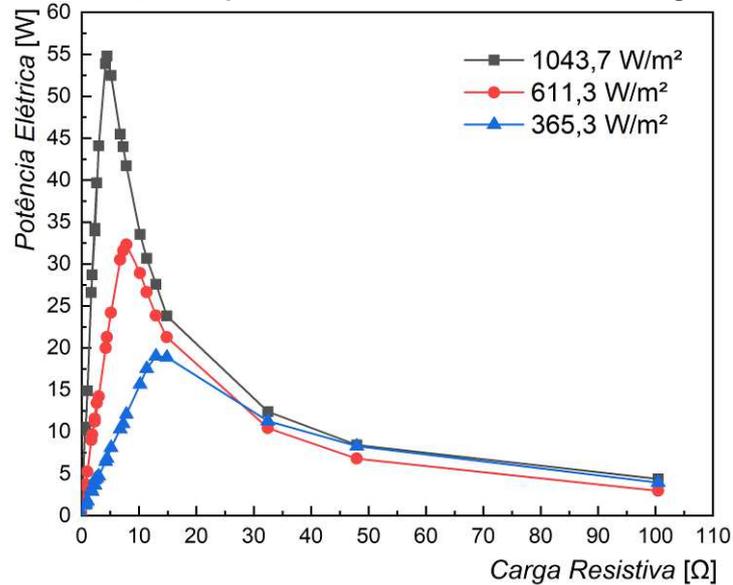
Fonte: Autoria Própria (2022)

Os dados apresentados na Tabela 5 ilustram a importância de se utilizar um sistema de aplicação de cargas em geradores elétricos, pois o valor de potência gerada varia de acordo com a carga aplicada e é necessária a obtenção do valor de máxima potência do dispositivo para poder determinar sua eficiência. Outra vantagem do sistema é a gravação do horário de cada aquisição, permitindo assim que a eficiência do dispositivo seja calculada de maneira correta a partir do valor de irradiância solar coletado no mesmo horário da aquisição da potência máxima.

Além disso, como pode ser observado no Gráfico 52, dependendo das condições às quais o gerador está submetido, nesse caso um painel fotovoltaico submetido a diferentes valores de irradiação solar, o valor de máxima potência pode

ser obtido com diferentes cargas resistivas. Percebe-se também que a faixa de valores de carga resistiva aplicada ao painel fotovoltaico foi suficiente para obter o valor de potência máxima mesmo em diferentes condições de irradiação solar.

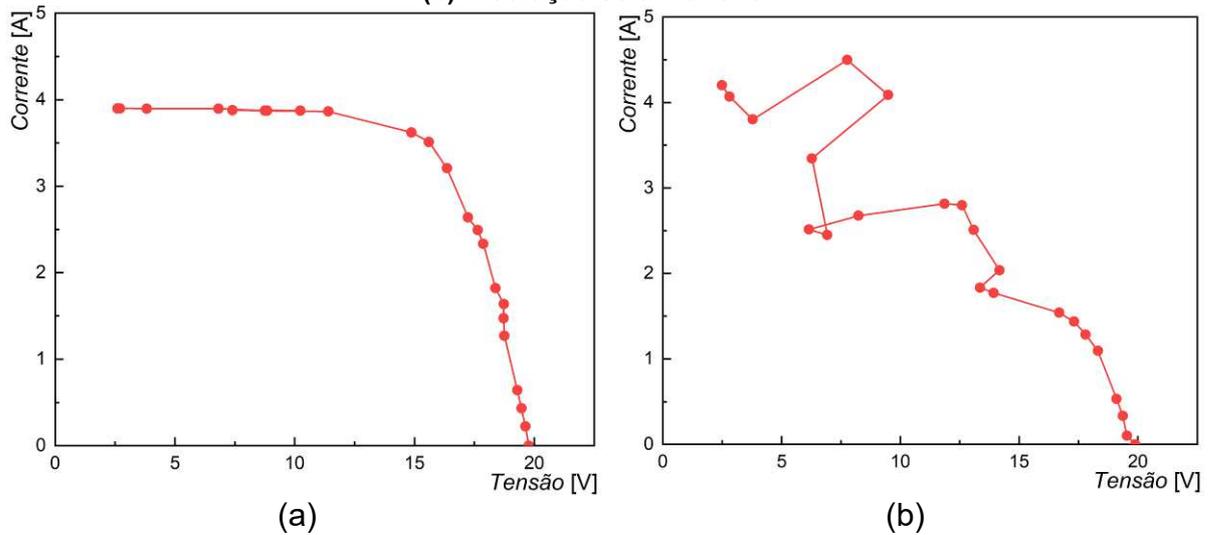
Gráfico 52 – Obtenção da potência máxima em diferentes cargas resistivas



Fonte: Autoria Própria (2022)

A curva característica do painel fotovoltaico pode então ser obtida a partir dos valores de tensão e corrente, como observado no Gráfico 53(a). Nota-se que a curva obtida no Gráfico 53 (a) apresentou um comportamento muito semelhante ao esperado e ilustrado no Gráfico 2, uma vez que essa curva foi obtida com valores de irradiação solar aproximadamente constantes. O Gráfico 53 (b) ilustra a aquisição de dados para um caso em que ocorrem variações bruscas na radiação solar incidente no painel fotovoltaico.

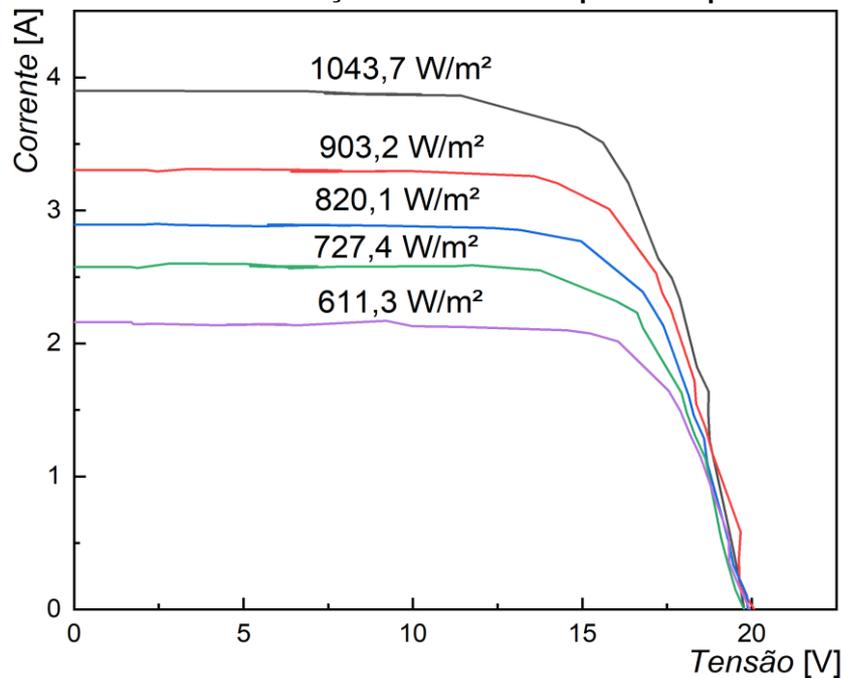
Gráfico 53 – Curva característica do painel fotovoltaico: (a) Irradiação solar constante; (b) Irradiação solar variável.



Fonte: Autoria Própria (2022)

O sistema de aquisição de dados também foi capaz de permitir a observação da curva característica do painel fotovoltaico sob a incidência de diferentes níveis médios de irradiação solar, como pode ser observado no Gráfico 54.

Gráfico 54 – Influência da irradiação solar no desempenho do painel fotovoltaico



Fonte: Autoria Própria (2022)

Mesmo os resultados do Gráfico 54 não sendo obtidos em condições controladas de temperatura e irradiação solar, o comportamento apresentado é muito semelhante ao apresentado no Gráfico 2, em que maiores valores de irradiação solar

tendem a elevar os valores de tensão e corrente do painel fotovoltaico, sendo o aumento mais significativo na corrente, elevando conseqüentemente sua potência.

Dessa forma, verificou-se que o sistema de aquisição de dados de cargas resistivas desenvolvido foi capaz de fornecer dados suficientes para realizar a análise de desempenho de um gerador elétrico, e também de ilustrar o seu comportamento quando exposto a diferentes condições, podendo ser utilizado para a análise do sistema PV/T proposta nessa Dissertação de Mestrado.

APÊNDICE E - Dados experimentais dos testes do sistema PV/T

A Tabela 6 apresenta os dados experimentais utilizados para os cálculos referentes ao sistema PV/T em dia ensolarado com vazão volumétrica de 6,5L/min. Os parâmetros com índice “1” correspondem aos dados do sistema PV/T, ao passo que os parâmetros com índice “2” correspondem ao painel fotovoltaico comercial.

Tabela 6 – Dados experimentais do sistema PV/T para a vazão volumétrica de 6,5L/min em dia ensolarado.

Horário	G ₁ [W/m ²]	P ₁ [W]	Tamb ₁ [K]	G ₂ [W/m ²]	P ₂ [W]	Tamb ₂ [K]	Tent [K]	Tsai [K]	T _{PV/T} [K]	T _{PV} [K]
09:30	830,02	44,01	295,80	826,25	44,53	295,96	298,45	298,65	312,18	318,95
10:00	910,70	49,15	297,94	900,92	46,80	298,66	299,23	299,50	323,44	320,88
10:30	976,74	50,45	297,87	973,23	51,91	298,04	300,31	300,62	329,93	321,84
11:00	1009,70	52,86	298,57	1008,28	55,88	298,42	301,02	301,39	330,80	322,15
11:30	1027,51	54,62	300,17	1024,34	57,58	300,68	302,03	302,38	332,40	324,71
12:00	1043,70	54,79	300,47	1038,79	58,16	300,40	302,97	303,34	333,09	322,84
12:30	1042,75	54,00	302,20	1043,67	58,07	301,29	303,77	304,07	333,71	325,82
13:00	1016,84	53,75	302,79	1030,70	56,94	302,76	304,62	304,92	332,83	324,83
13:30	968,89	51,43	303,94	973,42	54,04	302,56	305,26	305,53	332,78	324,30
14:00	903,19	47,57	303,31	914,88	51,70	302,39	305,80	306,07	331,08	321,47
14:30	820,11	41,44	302,92	829,83	42,72	303,66	306,38	306,67	330,86	321,69
15:00	727,45	37,07	303,21	735,39	39,00	302,13	306,76	306,98	329,05	319,44
15:30	611,27	32,33	302,92	615,91	33,14	303,07	306,99	307,17	326,56	317,40
16:00	481,34	24,83	303,46	489,66	26,46	303,66	307,16	307,33	324,00	315,90
16:30	365,34	19,01	303,17	370,29	20,07	303,38	307,29	307,45	320,78	312,28

Fonte: Autoria Própria (2022)

A Tabela 7 apresenta os dados experimentais utilizados para os cálculos referentes ao sistema PV/T em dia ensolarado com vazão volumétrica de 6,5L/min. Os parâmetros com índice “1” correspondem aos dados do sistema PV/T, ao passo que os parâmetros com índice “2” correspondem ao painel fotovoltaico comercial.

Tabela 7 – Dados experimentais do sistema PV/T para a vazão volumétrica de 6,5L/min em dia nublado

Horário	G ₁ [W/m ²]	P ₁ [W]	Tamb ₁ [K]	G ₂ [W/m ²]	P ₂ [W]	Tamb ₂ [K]	Tent [K]	Tsai [K]	T _{PV/T} [K]	T _{PV} [K]
09:30	716,83	44,15	295,60	777,94	43,04	295,85	298,78	298,98	311,76	317,94
10:00	833,57	44,96	298,42	833,48	46,32	297,61	299,55	299,77	322,30	322,68
10:30	1029,30	55,95	299,33	1066,36	58,12	299,83	300,78	301,10	330,94	328,72
11:00	985,68	28,11	301,59	593,78	41,74	300,43	301,65	301,98	332,53	329,97
11:30	974,70	51,38	301,04	982,90	53,50	302,25	302,98	303,40	334,37	331,69
12:00	821,00	37,06	301,46	954,58	30,90	303,66	304,14	304,46	330,45	323,34
12:30	687,70	35,83	301,98	683,20	38,30	303,16	304,69	304,97	327,56	322,95
13:00	635,97	37,60	303,80	614,60	29,16	303,26	305,18	305,41	323,88	315,88
13:30	763,13	19,01	304,51	341,46	19,34	303,73	305,50	305,72	321,11	312,88
14:00	687,63	36,29	304,02	642,84	39,93	303,57	305,97	306,22	328,27	325,95
14:30	562,15	30,12	304,57	569,55	36,79	305,03	306,55	306,81	328,22	321,97
15:00	668,53	38,17	305,28	702,79	35,45	304,91	307,05	307,33	328,97	323,65
15:30	423,55	23,33	303,92	416,84	24,06	303,99	307,25	307,45	322,79	313,64
16:00	325,81	12,31	303,26	255,99	12,47	303,26	307,24	307,37	319,02	310,41
16:30	297,84	16,42	303,08	257,17	16,43	303,76	307,18	307,33	317,26	311,22

Fonte: Autoria Própria (2022)

A Tabela 8 apresenta os dados experimentais utilizados para os cálculos referentes ao sistema PV/T com vazão volumétrica de 1,5L/min. Os parâmetros com

índice “1” correspondem aos dados do sistema PV/T, ao passo que os parâmetros com índice “2” correspondem ao painel fotovoltaico comercial.

Tabela 8 – Dados experimentais do sistema PV/T para a vazão volumétrica de 1,5L/min

Horário	G_1 [W/m ²]	P_1 [W]	T_{amb1} [K]	G_2 [W/m ²]	P_2 [W]	T_{amb2} [K]	T_{ent} [K]	T_{sai} [K]	$T_{PV/T}$ [K]	T_{PV} [K]
09:30	804,50	43,39	296,86	808,01	42,96	296,87	300,21	300,44	311,39	319,16
10:00	877,74	44,52	297,93	873,45	44,87	298,33	301,06	301,37	324,21	324,70
10:30	940,16	47,91	299,91	935,96	49,95	299,09	301,96	302,40	330,95	326,71
11:00	1005,67	51,23	301,13	1006,40	53,78	301,07	302,88	303,31	333,56	326,63
11:30	1014,13	51,78	301,62	1037,93	55,00	301,60	303,74	304,13	334,31	327,00
12:00	1030,01	52,19	302,30	1025,59	55,34	301,26	304,44	304,77	334,42	325,75
12:30	1050,45	52,43	303,17	1051,57	56,35	303,04	305,37	305,77	337,69	331,73
13:00	1049,86	53,07	303,40	1036,16	54,25	302,87	305,95	306,38	336,28	331,51
13:30	966,69	49,48	303,47	965,10	52,75	305,02	306,59	306,94	334,41	327,56
14:00	939,45	46,68	304,14	946,89	52,57	306,74	307,33	307,70	334,62	331,30
14:30	801,95	41,96	304,48	812,06	43,50	303,89	307,60	307,93	332,22	327,51
15:00	712,68	37,32	304,71	716,86	38,37	304,77	307,96	308,27	331,13	325,51
15:30	595,81	30,10	304,37	597,40	32,85	305,06	308,24	308,48	329,06	321,58
16:00	489,01	24,22	304,57	495,59	25,42	305,34	308,43	308,67	326,31	318,62
16:30	363,40	18,17	304,60	367,70	18,57	304,42	308,50	308,63	322,50	313,19

Fonte: Autoria Própria (2022)

O Quadro 3 apresenta os resultados de eficiências de Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica para o sistema PV/T e painel fotovoltaico comercial, além do calor fornecido para a água corrente no *manifold* para o teste experimental com vazão volumétrica de 6,5L/min, em condição ensolarada, ao meio dia.

Quadro 3 – Propagação de incertezas para os valores de eficiências

Parâmetro	Valor	Incerteza
$\eta_{th,PV/T}$ [%]	37,30	35,69
$\eta_{el,PV/T}$ [%]	14,13	0,51
$\eta_{PV/T}$ [%]	49,54	35,71
$\eta_{el,PV}$ [%]	15,07	0,55
η_{PV} [%]	13,06	0,48
$\varepsilon_{th,PV/T}$ [%]	0,35	0,34
$\varepsilon_{el,PV/T}$ [%]	14,88	0,54
$\varepsilon_{PV/T}$ [%]	13,23	0,58
$\varepsilon_{el,PV}$ [%]	15,87	0,58
ε_{PV} [%]	13,75	0,50
Q [W]	166,90	159,70

Fonte: Autoria Própria (2022)

Como é possível perceber pelo Quadro 3, a maior propagação de incerteza é verificada nos termos relacionados à parcela térmica. Esse fato pode ser justificado ao se observar a Equação (64), uma vez que o cálculo de Q envolve o calor específico C_a do fluido, que possui elevada grandeza.