

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**VINICIUS MARSON**

**Termorregulação de módulos fotovoltaicos: validação  
numérica de um sistema PV/BioPCM**

Ilha Solteira  
2025

**Vinicius Marson**

**Termorregulação de módulos fotovoltaicos: validação  
numérica de um sistema PV/BioPCM**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Ciências Térmicas

Orientadora: Profa. Assoc. Elaine Maria Cardoso

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel Bertacco dos Santos

Ilha Solteira

2025

## FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M373t Marson, Vinicius.  
Termorregulação de módulos fotovoltaicos: validação numérica de um sistema PV/BioPCM / Vinicius Marson. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
93 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2025

Orientador: Elaine Maria Cardoso  
Co-orientador: Gabriel Bertacco dos Santos  
Inclui bibliografia

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Material de mudança de fase. 3. Dinâmica dos fluidos computacional. 4. Termorregulação .



**Amanda Sertori dos Santos**

Bibliotecária - CRB/8-9061  
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao  
Usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Termorregulação de módulos fotovoltaicos: validação numérica de um sistema PV/BioPCM

**AUTOR: VINÍCIUS MARSON**

**ORIENTADORA: ELAINE MARIA CARDOSO**

**COORIENTADOR: GABRIEL BERTACCO DOS SANTOS**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, área: Ciências Térmicas pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. GABRIEL BERTACCO DOS SANTOS (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Documento assinado digitalmente  
GUILHERME BORGES RIBEIRO  
Data: 05/03/2025 11:29:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GUILHERME BORGES RIBEIRO (Participação Virtual)  
Divisão de Engenharia Mecânica / Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA



Prof. Dr. JOSÉ LUIZ LARA CRUZ (Participação Virtual)  
Laboratory of Thermal Engineering, Energy and Processes (LaTEP) / University of Pau and Pays de l'Adour - França

Ilha Solteira, 05 de março de 2025

## **AGRADECIMENTOS**

Ao apoio, carinho e dedicação incondicionais da minha família, obrigado por sempre me acompanhar, apoiar e incentivar ao longo de toda minha vida.

Às orientações críticas e incentivo da minha orientadora Profa. Elaine Maria Cardoso que juntamente com meus coorientadores Prof. João Batista Campos Silva e Prof. Gabriel Bertacco dos Santos, fizeram com que fosse possível o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e pessoas próximas, que, cada um a sua maneira, me auxiliaram e apoiaram de forma direta ou indireta.

Ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC/MCTI, Brasil) por prover recursos HPC do supercomputador SDumont, os quais contribuíram para os resultados mostrados nesse documento. URL: <http://sdumont.lncc.br>.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Projeto número 88882.461715/2019-01.

*"Science is not only a disciple of reason,  
but also one of romance and passion."*

***Stephen William Hawking***

## RESUMO

A operação eficiente de painéis fotovoltaicos (*photovoltaics*, PVs) é essencial para maximizar a conversão de energia e o desempenho geral do sistema. No entanto, os painéis são altamente sensíveis às variações de temperatura, o que pode afetar significativamente a produção de energia elétrica e a vida útil do sistema. Para mitigar esse problema, a integração de materiais de mudança de fase (*Phase Change Materials*, PCMs), especialmente os de base biológica (bioPCMs), em painéis fotovoltaicos tem emergido como uma solução promissora para a regulação térmica. Neste estudo, dois modelos numéricos transitórios de dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) foram propostos para prever o desempenho térmico de painéis fotovoltaicos. O primeiro modelo considera o painel sem sistema de resfriamento, enquanto o segundo avalia um sistema que combina o painel com um PCM de base biológica. Ambos os modelos, embora desenvolvidos em softwares diferentes, são baseados nas equações governantes de mecânica dos fluidos para transferência de calor e levam em conta condições ambientais transitórias, como temperatura ambiente, irradiação solar e velocidade do vento. A validação dos modelos foi realizada com base em dados experimentais, obtendo precisões médias de 93,5% e 96% na previsão das temperaturas médias do painel ao longo do dia para os modelos sem e com PCM, respectivamente. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade sobre o impacto do cálculo do escoamento de ar no entorno do painel. A análise revelou uma diferença de apenas 2,4% na temperatura do painel entre os modelos que consideram ou desconsideram o escoamento de ar, indicando que o uso de equações empíricas para a troca de calor convectiva é mais vantajoso, dada a significativa redução no custo computacional. Por fim, o modelo desenvolvido foi aplicado para avaliar a viabilidade de bioPCMs sob condições reais. Considerando o clima de Aparecida do Taboado, MS, Brasil, em 08/12/2021, dois bioPCMs foram analisados: ácido láurico (LA) e a mistura eutética de ácido láurico e ácido palmítico (LA:PA), de composição mássica 69:31. Os resultados indicaram reduções na temperatura máxima do painel de 3,4 °C e 11,2 °C para os bioPCMs LA e LA:PA, respectivamente, resultando em um aumento esperado de até 2,5% na energia elétrica gerada ao longo do dia, em comparação ao painel sem resfriamento.

**Palavras-chave:** energia solar fotovoltaica; material de mudança de fase; dinâmica dos fluidos computacional; termorregulação.

## ABSTRACT

The efficient operation of photovoltaic panels (PVs) is essential to maximize both energy conversion and the overall system performance. However, photovoltaic panels are highly sensitive to temperature variations, which can significantly affect their electrical output and lifespan. To address this issue, integrating phase change materials (PCMs) into photovoltaic panels has emerged as a promising approach for the thermal regulation of photovoltaic panels. In this study, two transient computational fluid dynamics (CFD) models were proposed to predict the thermal performance of photovoltaic panels. The first model considers the panel without a cooling system, while the second evaluates a system combining the panel with a bio-based PCM. Although developed using different software, both models are based on the governing equations of fluid mechanics for heat transfer and account for transient environmental conditions, such as ambient temperature, solar irradiation, and wind speed. The models were validated using experimental data, achieving average accuracies of 93.5% and 96% in predicting the panels' average temperatures throughout the day for the models without and with PCM, respectively. Additionally, a sensitivity analysis was conducted to assess the impact of modeling air flow around the panel. The analysis revealed a difference of only 2.4% in panel temperature predictions between the models that consider or disregard air flow, indicating that using empirical equations for convective heat transfer is more advantageous due to the significant reduction in computational cost. Finally, the developed model was applied to evaluate the feasibility of using bioPCMs under real-world conditions. Considering the climate of Aparecida do Taboado, MS, Brazil, on December 8, 2021, two bioPCMs were analyzed: lauric acid (LA) and the eutectic mixture of lauric and palmitic acids (LA:PA), with mass composition 69:31. The results indicated reductions in the panel's maximum operating temperature of 3.4 °C and 11.2 °C for the bioPCMs LA and LA:PA, respectively, resulting in an expected increase of up to 2.5% in the electrical energy generated throughout the day compared to the panel without a cooling system.

**Keywords:** solar photovoltaic energy; phase change material; computational fluid dynamics; thermoregulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estrutura de um módulo fotovoltaico. . . . .	19
Figura 2 –	Efeito da variação de temperatura das células na curva Corrente x Tensão para um módulo fotovoltaico de silício cristalino sob 1000 W/m <sup>2</sup> de irradiância. . . . .	20
Figura 3 –	Tipos de PCMs e suas categorias. . . . .	32
Figura 4 –	Esquema do painel fotovoltaico, considerando a camada equivalente. Dimensões em milímetros. . . . .	38
Figura 5 –	Domínio Computacional. . . . .	43
Figura 6 –	Domínio físico e condições de contorno. . . . .	44
Figura 7 –	Variação das condições de contorno. . . . .	45
Figura 8 –	Fator de forma associado a troca de calor por radiação entre elementos de superfície com áreas $dA_i$ e $dA_j$ . . . . .	46
Figura 9 –	Malha computacional associada ao caso do painel. . . . .	48
Figura 10 –	Fluxograma simplificado da estratégia de solução do PIMPLE. . . . .	49
Figura 11 –	Foto do experimento e esquema de tomada de temperatura. . . . .	53
Figura 12 –	Esquema do painel e o PCM. . . . .	53
Figura 13 –	Domínio Computacional. . . . .	57
Figura 14 –	Domínio físico e condições de contorno. . . . .	57
Figura 15 –	Variação das condições de contorno. . . . .	58
Figura 16 –	Vista geral da malha. . . . .	59
Figura 17 –	Vista aproximada da malha. . . . .	60
Figura 18 –	Perfis de temperatura ao longo da face superior do painel para análise de sensibilidade das dimensões do domínio. . . . .	67
Figura 19 –	Média das temperaturas do painel obtidas da simulação numérica $T_{sim}$ e experimentalmente $T_{exp}$ . . . . .	69

Figura 20 – Média das temperaturas do painel obtidas da simulação numérica $T_{sim}$ e experimentalmente $T_{exp}$ . . . . .	72
Figura 21 – Média das temperaturas internas no PCM obtidas da simulação numérica $T_{sim}$ e experimentalmente $T_{exp}$ . . . . .	72
Figura 22 – Temperatura média do painel fotovoltaico ao longo do dia para o Caso ar, Caso sem ar e os dados experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), bem como o desvio absoluto relativo a comparação de ambos os casos. . . . .	73
Figura 23 – Temperatura média interna no PCM ao longo do dia para o Caso ar, Caso sem ar e os dados experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), bem como o desvio absoluto relativo a comparação de ambos os casos. . . . .	74
Figura 24 – Fração líquida de PCM ao longo do dia para os caso ar e sem ar. . . . .	75
Figura 25 – Comparação entre a temperatura média do painel obtida experimental ( $T_{exp}$ ) (Silva <i>et al.</i> , 2022) e numericamente ( $T_{sim}$ ) ao longo do dia. . . . .	77
Figura 26 – Comparação entre a temperatura média do painel sem PCM ( $T_{PV}$ ), com ácido láurico (LA) ( $T_{PV/LA}$ ) e com a mistura eutética de ácido láurico e palmítico (LA:PA) ( $T_{PV/LA:PA}$ ), e a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ). . . . .	79
Figura 27 – Temperatura média de operação do painel sem PCM ( $T_{PV}$ ) e acoplado à mistura eutética de ácido láurico e palmítico (LA:PA) em várias espessuras ( $T_{PV/LA:PA}$ ). . . . .	80
Figura 28 – Comportamento da fração líquida de bioPCM ácido láurico (LA) e da mistura eutética de ácido láurico e palmítico (LA:PA) em várias espessuras. . . . .	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Principais resultados alcançados por sistemas de resfriamento ativo aplicados a painéis fotovoltaicos. . . . .	24
Tabela 2 –	Principais resultados alcançados por sistemas de resfriamento passivo aplicados a painéis fotovoltaicos. . . . .	29
Tabela 3 –	Principais resultados alcançados por sistemas de resfriamento combinado aplicados a painéis fotovoltaicos. . . . .	31
Tabela 4 –	Propriedades termofísicas de ácidos graxos. . . . .	34
Tabela 5 –	Propriedades termofísicas de alguns bioPCMs. . . . .	35
Tabela 6 –	Propriedades das diferentes camadas do painel e da camada equivalente. . .	38
Tabela 7 –	Dimensões dos domínios computacionais. . . . .	44
Tabela 8 –	Propriedades termofísicas dos PCMs: RT-42; ácido láurico (LA); e da mistura eutética de ácido láurico e ácido palmítico (LA:PA). . . . .	62
Tabela 9 –	<i>Grid Convergence Index</i> (GCI) para malha espacial, valores relativos às 13h.	68
Tabela 10 –	<i>Grid Convergence Index</i> (GCI) para passo de tempo, valores relativos às 13h.	68
Tabela 11 –	<i>Grid Convergence Index</i> (GCI) para malha espacial, valores relativos às 12h30.	70
Tabela 12 –	<i>Grid Convergence Index</i> (GCI) para passo de tempo, valores relativos às 12h30. . . . .	71
Tabela 13 –	<i>Grid Convergence Index</i> (GCI) para malha computacional. . . . .	78
Tabela 14 –	<i>Grid Convergence Index</i> (GCI) para passo de tempo. . . . .	78
Tabela 15 –	Energia elétrica produzida pelos painéis sem PCM e com bioPCMs LA e LA:PA durante o dia 08/12/2021 em Aparecida do Taboado, MS, Brasil. . .	82

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$	Expansividade térmica	[1/K]
$\beta$	Fração líquida	[-]
$\gamma$	Coefficiente de temperatura	[%/°C]
$\varepsilon$	Emissividade térmica	[-]
$\eta$	Eficiência de conversão energética	[-]
$\theta$	Ângulo	[-]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[kg/m s]
$\mu_t$	Viscosidade dinâmica turbulenta	[kg/m s]
$\wp$	Ordem de convergência	[-]
$\rho$	Massa específica	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\Re$	Constante dos gases ideais	[J/mol K]
$\tau$	Tensor das tensões viscosas	[kg/m s <sup>2</sup> ]
$\tau^R$	Tensor de Reynolds	[kg/m s <sup>2</sup> ]
$\phi$	Variável genérica do escoamento	[-]
$\Phi$	Termo de dissipação viscosa	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\Psi$	Termo de dissipação viscosa	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\omega$	Taxa específica de dissipação turbulenta	[1/s]

## LISTA DE SÍMBOLOS LATINOS

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$A_{mole}$	Constante da região mole	[-]
$b$	Distância lateral	[m]
$c_p$	Calor específico a pressão constante	[J/kg K]
$d_{PCM}$	Espessura do PCM	[cm]
$E_{PV}$	Energia produzida pelo painel	[Wh]
$F$	Fator de Forma	[-]
$F_s$	Fator de segurança	[-]
$f$	Valor genérico	[-]
$\mathbf{g}$	Vetor aceleração gravitacional	[m/s <sup>2</sup> ]
$Gr$	Número de Grashof	[-]
$h$	Distância superior e inferior	[m]
$h_{conv}$	Coefficiente de troca de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> K]
$H$	Entalpia	[J/kg]
$\mathbf{I}$	Matriz identidade	[-]
$k$	Energia cinética turbulenta	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$k_T$	Condutividade térmica	[W/m K]
$k_t$	Condutividade térmica turbulenta	[W/m K]
$L$	Comprimento do painel	[m]
$L_h$	Calor latente	[J/kg]
$l_d$	Distância a jusante	[m]
$l_u$	Distância a montante	[m]
$Nu$	Número de Nusselt	[-]
$p$	Pressão	[Pa]
$P$	Termo fonte relacionado a produção	[-]
$P_{PV}$	Potência produzida pelo painel	[W]
$q$	Taxa de calor	[W]
$q_{G_i}$	Taxa de calor absorvida pelo painel	[W]
$q_{conv}$	Taxa de calor convectiva	[W]
$q_{rad}$	Taxa de calor radiante	[W]

$\dot{q}_V$	Geração de calor volumétrica	[W/m <sup>3</sup> ]
$R$	Comprimento relativo às faces	[m]
$Re$	Número de Reynolds	[-]
$R_p$	Período de referência	[s]
$r$	Razão de refino	[-]
$r_c$	Índice de convergência	[-]
$S$	Termo fonte	[-]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura	[K]
$\mathbf{v}$	Vetor velocidade	[m/s]
$\mathbf{x}$	Espaço tridimensional	[m]
$y^+$	Distância adimensional à parede	[-]

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
bioPCM	Material de mudança de fase de base biológica
CFD	Fluidodinâmica computacional, do inglês <i>Computational Fluid Dynamics</i>
EVA	Etileno vinil acetato
GCI	Índice de convergência de malha, do inglês <i>Grid Convergence Index</i>
H.O.T.	Termos de ordens elevadas, do inglês <i>Higher Order Terms</i>
LA	Ácido láurico, do inglês <i>Lauric Acid</i>
LA:PA	Mistura eutética de ácido láurico e ácido palmítico
MVF	Método de Volumes Finitos
PCM	Material de mudança de fase, do inglês <i>Phase Change Material</i>
PV	Fotovoltaico, do inglês <i>photovoltaic</i>
PV/T	Sistemas fotovoltaicos/térmicos
PVF	Fluoreto de polivinila
p-Si	Silício policristalino
STC	Condições padrões de teste, do inglês <i>Standard Test Conditions</i>
URANS	Equações Transientes de Navier-Stokes com médias de Reynolds

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.</b>	<b>17</b>
1.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.</b>	<b>21</b>
2.1	ARREFECIMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	21
<b>2.1.1</b>	<b>Sistemas de resfriamento ativo</b>	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Sistemas de resfriamento passivo</b>	<b>23</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Sistemas de resfriamento combinado</b>	<b>28</b>
2.2	MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	30
<b>2.2.1</b>	<b>Parafínicos</b>	<b>33</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Ácidos graxos</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Sal hidratado e ligas metálicas</b>	<b>33</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Misturas Eutéicas</b>	<b>34</b>
<b>2.2.5</b>	<b>BioPCMs</b>	<b>34</b>
2.3	OBJETIVO	35
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.</b>	<b>37</b>
3.1	PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	37
<b>3.1.1</b>	<b>Problema físico e modelo matemático</b>	<b>37</b>
3.1.1.1	Equações governantes	38
3.1.1.2	Modelo de turbulência	39
3.1.1.3	Domínio computacional e condições de contorno	42
3.1.1.4	Modelo de radiação	44
<b>3.1.2</b>	<b>Formulação numérica</b>	<b>46</b>
3.1.2.1	Malha Computacional	47
3.1.2.2	Esquemas de Discretização	47
3.1.2.3	Estratégia de Solução	48

<b>3.1.3</b>	<b>Estimativa de erros e confiabilidade da solução</b>	50
3.1.3.1	Índice de convergência da malha	50
3.1.3.2	Índice de convergência temporal	52
3.2	PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS ACOPLADOS A PCM	52
<b>3.2.1</b>	<b>Problema físico e modelo matemático</b>	52
3.2.1.1	Equações governantes	54
3.2.1.2	Modelo de turbulência	56
3.2.1.3	Domínio computacional e condições de contorno	56
3.2.1.4	Modelo de radiação	57
<b>3.2.2</b>	<b>Formulação numérica</b>	58
3.2.2.1	Malha Computacional	58
3.2.2.2	Esquemas de Discretização	59
3.2.2.3	Estratégia de Solução	60
<b>3.2.3</b>	<b>Estimativa de erros e confiabilidade da solução</b>	61
<b>3.2.4</b>	<b>Critério de seleção do PCM e estimativa da espessura efetiva</b>	61
3.3	EXPLORANDO A NECESSIDADE DO DOMÍNIO AR	63
<b>3.3.1</b>	<b>Cálculo empírico do coeficiente de transferência de calor por convecção</b>	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.</b>	<b>66</b>
4.1	PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	66
<b>4.1.1</b>	<b>Domínio computacional</b>	66
<b>4.1.2</b>	<b>Malha computacional</b>	66
<b>4.1.3</b>	<b>Passo de tempo</b>	67
<b>4.1.4</b>	<b>Validação</b>	68
4.2	PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS ACOPLADOS A PCM	69
<b>4.2.1</b>	<b>Malha computacional</b>	70
<b>4.2.2</b>	<b>Passo de tempo</b>	70
<b>4.2.3</b>	<b>Validação</b>	71
4.3	EXPLORANDO A NECESSIDADE DO DOMÍNIO AR	72
<b>4.3.1</b>	<b>Temperatura média do painel fotovoltaico</b>	73
<b>4.3.2</b>	<b>Temperatura média interna do PCM</b>	74
<b>4.3.3</b>	<b>Fração líquida de PCM</b>	75
<b>4.3.4</b>	<b>Custo computacional</b>	76

4.4	DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA PV/BIOPCM . . . . .	76
4.4.1	Verificação das hipóteses . . . . .	77
4.4.2	Verificação da malha computacional e passo de tempo . . . . .	78
4.4.3	Temperatura do painel fotovoltaico . . . . .	79
4.4.4	Fração líquida de PCM . . . . .	81
4.4.5	Potência e energia elétrica produzidas . . . . .	81
5	CONCLUSÃO. . . . .	83
6	PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO TRABALHO. . . . .	85
	REFERÊNCIAS. . . . .	86

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, problemas como o aquecimento global e efeito estufa devido à queima de combustíveis fósseis ficam cada vez mais evidentes e alarmantes, gerando grande preocupação aos líderes mundiais e na comunidade científica como um todo. Esses problemas somados à demanda cada vez maior por energia elétrica faz com que haja grande interesse na geração de energia a partir de fontes renováveis. Nesse quesito o Brasil é referência mundial, produzindo 93% da oferta interna centralizada de eletricidade por meio de fontes renováveis em 2023 (CCEE, 2023).

Dentre as fontes de energia renováveis, em 2022, a energia solar atingiu 32 GW de potência instalada, ocupando o posto de terceira fonte de energia elétrica mais expressiva da matriz energética brasileira (ABSOLAR, 2023). Segundo o Balanço Nacional de Energia (BEN, 2023), em 2022, a energia solar representou 94,3% da quantidade total de energia gerada no contexto de mini e microgeração distribuída no Brasil. A mini e microgeração distribuídas são definidas segundo a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022:

**Microgeração distribuída.** central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras;

**Minigeração distribuída.** central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW, menor ou igual a 5 MW para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras.

Essas definições foram o principal fator motivador do grande crescimento da geração de energia fotovoltaica no país, pois com elas se permitiu gerar energia excedente e esse valor ser desconsiderado posteriormente no montante total do mês da conta de energia das residências, pequenas empresas e fazendas. Atualmente, 68% da capacidade instalada no país corresponde à geração distribuída (ABSOLAR, 2024). Contudo, muitas dessas instalações de energia solar não atingem o máximo desempenho em razão da alta temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos, o que afeta negativamente sua eficiência e vida útil (Santhakumari; Sagar, 2019).

A quantidade de energia fornecida pelo sol à Terra é suficiente para alimentar toda a demanda diária do planeta 10000 vezes, considerando o consumo global em 2000 que foi de 13 TW enquanto a superfície terrestre recebeu  $9,5 \times 10^4$  TW de energia solar (Machado; Miranda, 2015). Ou seja, a energia está sobrando excessivamente, e é de interesse global a utilização dessa fonte para abastecer a permanente evolução e demanda por eletricidade.

### 1.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Visto a importância da energia solar fotovoltaica para o Brasil e o mundo, é importante entender como essa funciona, suas vantagens e desvantagens e principais problemas, assuntos que serão abordados neste tópico.

Existem atualmente diferentes tipos de células fotovoltaicas, podendo-se listá-las por subdivisão em diferentes famílias de semicondutores:

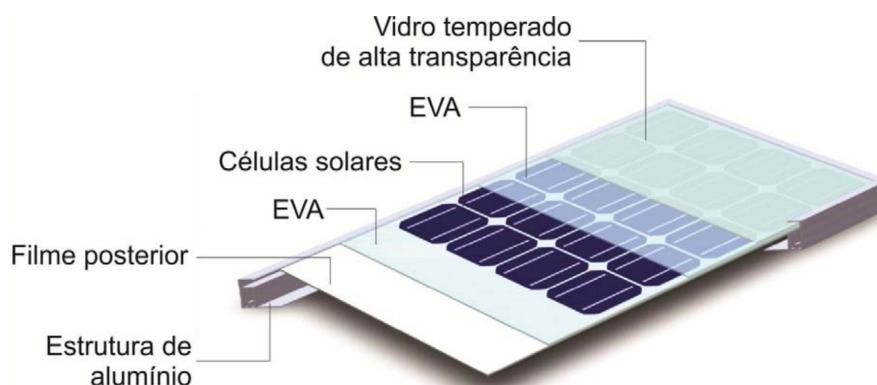
- Células multijunção
- Células de arseneto de gálio de junção única
- Células de silício cristalino
- Tecnologia de filme fino
- Energia fotovoltaica emergente.

Entre as categorias de células fotovoltaicas, destacam-se no mercado as células de silício cristalino que, por conta de sua popularização, evoluem cada vez mais os meios de produção da sua tecnologia, tornando-se a opção mais viável atualmente. Essas células se subdividem em três principais tipos: monocristalino, policristalino e silício amorfo. Em laboratórios, essas células chegam a até 27,6% de eficiência, e em 1999 já chegavam a 25% (Green, 2009); porém, comercialmente, esse número cai para 22,7% (Machado; Miranda, 2015).

Um típico módulo fotovoltaico é composto por várias células ligadas em série ou paralelo, encapsuladas dentro de uma estrutura composta por, basicamente, uma lâmina de vidro temperado, filme de Etileno Vinil Acetato (EVA) e estrutura de alumínio, como mostra a Figura 1.

Uma vez que os painéis fotovoltaicos comerciais só convertem, no melhor dos casos, 22,7% da energia proveniente da radiação solar em eletricidade, a energia remanescente é refletida ou convertida em energia térmica. Assim, cada painel tem a sua eficiência energética de

Figura 1 - Estrutura de um módulo fotovoltaico.



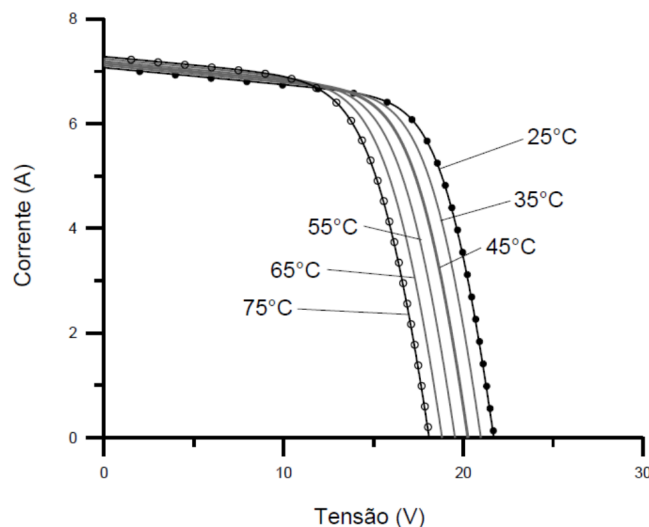
Fonte: Pinho and Galdino (2014)

conversão máxima, e essa é influenciada por fatores como os níveis de irradiação solar, o tipo de célula fotovoltaica e de materiais usados na construção dos painéis, além da temperatura de operação do painel (Ye *et al.*, 2014).

Já no que se refere ao desgaste dos painéis, este é influenciado por fatores ambientais, como umidade, temperatura e irradiância, sendo a temperatura um dos fatores determinantes para a degradação (Santhakumari; Sagar, 2019; Ogbomo *et al.*, 2018). Uma vez que a temperatura do painel aumenta, a tensão diminui de maneira significativa enquanto a corrente aumenta parcialmente. Por exemplo, em uma célula de silício cristalino, um aumento de 100 °C na temperatura induz uma variação da ordem de  $-0,2\text{ V}$  ( $-30\%$ ) na tensão e de  $0,2\%$  na corrente (Pinho; Galdino, 2014). O resultado é uma diminuição na potência gerada com o aumento da temperatura. Em painéis a base de silício cristalino o aumento de cada 1 °C acima da temperatura padrão de testes (STC) significa uma diminuição de 0,35 a 0,6%, da eficiência de conversão de energia (Mattei *et al.*, 2006). A Figura 2 mostra esse efeito.

Assim, fica evidente a necessidade de um sistema de resfriamento acoplado ao painel solar, com a intenção de solucionar os problemas advindos do aumento de temperatura. Existem, atualmente, diversas maneiras de se construir um sistema de resfriamento para painéis solares, que podem ser divididos em duas grandes categorias: sistema de resfriamento passivo e ativo. Um sistema de resfriamento passivo é aquele que não necessita de energia externa para seu funcionamento. Já um sistema de resfriamento ativo é aquele que necessita de uma fonte de energia externa para realizar sua função. Um importante parâmetro econômico é mensurar se, no caso do resfriamento ativo, o ganho energético por conta do resfriamento do painel é maior que a energia gasta para resfriá-lo (Dwivedi *et al.*, 2020).

Figura 2 - Efeito da variação de temperatura das células na curva Corrente x Tensão para um módulo fotovoltaico de silício cristalino sob  $1000 \text{ W/m}^2$  de irradiância.



Fonte: Silva (2021).

Técnicas de resfriamento passivo são classificadas em três categorias principais: resfriamento passivo com ar, resfriamento com água e resfriamento condutivo. As técnicas de resfriamento passivo podem incluir componentes extras como uma tubulação, recipiente ou um trocador para conduzir a convecção natural. Trocadores de calor passivos são considerados efetivos em reduzir a temperatura do painel, são relativamente fáceis de produzir e possuem bom custo benefício (Dwivedi *et al.*, 2020).

É evidente que se comparada a redução de temperatura causada por um trocador de calor passivo a um ativo, o segundo terá mais sucesso nessa missão. Porém, quando se trata de ganho energético, isso já não é mais uma realidade, já que o ganho energético líquido é aquele em que se subtrai o gasto de energia ao ganho. Por esse motivo, quando se trata de um método para reduzir a temperatura do painel com a intenção de se produzir mais energia, é mais vantajoso utilizar um método de resfriamento passivo (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023).

As técnicas de resfriamento passivo têm evoluído cada vez mais para sistemas complexos, que incluem dissipadores de calor, microcanais, trocadores de calor, materiais de mudança de fase (*phase change material*, PCM), nanofluidos, geradores termoelétricos ou combinações com outros sistemas. Dentre as diferentes formas de resfriamento passivo supracitadas, aquela que utiliza PCMs tem ganhado notável atenção, já que eles podem absorver uma quantidade crescente de calor em uma faixa de temperatura constante relativa à mudança de fase e, adicionalmente, podem servir como armazenamento de energia térmica e controle de temperatura (Ma; Li; Zhao, 2019).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um painel fotovoltaico comercial é composto por um conjunto de células fotovoltaicas. Aquela cuja temperatura é maior produzirá a menor quantidade de energia. É amplamente aceito que o principal método para resolver o problema mencionado é reduzir a temperatura das células em operação típica, resfriando os painéis com líquido ou ar (Ying *et al.*, 2024). Frequentemente, trocadores de calor são utilizados na parte posterior dos painéis, permitindo que as células fotovoltaicas operem a temperaturas mais baixas sem serem obstruídas pelo trocador.

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre os principais sistemas de arrefecimento de painéis fotovoltaicos, Seção 2.1. Em seguida, serão apresentados as principais categorias de materiais de mudança de fase (PCM) que são usados em trocadores de calor e armazenamento de energia, como em alguns dos sistemas fotovoltaicos/térmicos (PV/T), Seção 2.2.

### 2.1 ARREFECIMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Como mencionado na Seção 1.1 existem diversas maneiras de se construir um sistema de resfriamento para painéis solares, e essas são divididas em duas grandes categorias: sistemas de resfriamento passivo e ativo.

#### 2.1.1 Sistemas de resfriamento ativo

Sistemas de resfriamento ativo consomem energia externa para operarem, geralmente utilizando bombas ou ventiladores para manter a circulação de um fluido, diminuindo a temperatura do módulo fotovoltaico. Apesar de serem mais eficientes na tarefa de arrefecer o painel, é preciso considerar o balanço entre energia consumida para arrefecimento e ganho energético produzido pelo painel para que o sistema seja economicamente viável.

Os sistemas de resfriamento ativo incluem resfriamento a base de convecção forçada de fluidos, como o ar. Sendo assim, estudos foram realizados por diversos autores a fim de identificar a melhor configuração de diferentes instalações de sistemas de arrefecimento desse tipo. Por exemplo, Shrivastava *et al.* (2022) conduziram um experimento para identificar a configuração ótima de aletas e defletores em um escoamento confinado forçado de ar na parte posterior de um painel fotovoltaico. Para isso, foram testadas diferentes configurações. Os resultados obtidos indicam que a configuração com aletas longitudinais e defletores inclinados apresentam o melhor desempenho, devido à maior troca de calor com o ar. De maneira similar, Alsayah *et al.* (2019) tentaram encontrar numericamente a melhor configuração de defletores

de ar em escoamentos forçados na parte posterior do painel. Neste estudo, os autores indicam que os defletores de ar devem ser de alumínio e posicionados de modo inclinado para alcançar a maior taxa de troca de calor possível.

Buscando uma distribuição de temperatura mais uniforme na superfície do painel, bem como maior limpeza, capacidade térmica e extensão da vida útil do painel, o resfriamento ativo por fluxo de água está entre as técnicas de resfriamento mais populares (Bahaidarah *et al.*, 2013; Nižetić *et al.*, 2016; Mah *et al.*, 2019; Azimi; Basiri; Eslami, 2024). As técnicas de resfriamento a base de fluxo de água incluem sistemas como resfriamento evaporativo, camada de filme fino e pulverização.

Diversos estudos propuseram diferentes soluções de resfriamento utilizando a água como fluido de arrefecimento, como, por exemplo, Shahverdian *et al.* (2021) que por meio de uma otimização de múltiplos objetivos, aumentaram em 64,73% a produção de energia anual do sistema, mitigando perdas desnecessárias como o desligamento do sistema de arrefecimento em momentos de baixa incidência solar. Utilizando da técnica de pulverização de água nos painéis, foi constatado que pulverizar água na face frontal é mais vantajoso, sendo o desempenho do resfriamento muito próximo da pulverização em ambas as faces (Nižetić *et al.*, 2016). Ademais, há de se levar em consideração que a pulverização frontal faz com que o painel fique mais limpo, melhorando sua eficiência.

Outra solução bastante empregada é a utilização de água em uma camada de filme fino na superfície superior do painel, resultando em uma distribuição de temperatura das células fotovoltaicas mais uniformes dentre todas as formas de resfriamento ativo, além de possuir o efeito autolimpante (Mah *et al.*, 2019). Em Mah *et al.* (2019) foi investigado experimentalmente a vazão de água ótima em diferentes situações de irradiação global, constando que 6 L/min de água melhora em 15% a produção de potência do painel. Ademais, foi proposto pelo estudo a reutilização de águas provenientes de chuva para cobrir seu consumo e, dessa forma, assegurar a utilização do recurso com responsabilidade.

O método mais promissor, porém pouco explorado, de se controlar a absorção de calor excessivo com água é por meio da evaporação (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023). Estudos como Haidar, Orfi and Kaneesamkandi (2018) e Koohestani, Nižetić and Santamouris (2023) mostram o potencial dessa técnica ao alcançarem reduções na temperatura do painel da ordem de 10 °C, tendo alto custo-benefício e fácil implementação.

Existem ainda outras tecnologias envolvendo escoamento forçado de fluidos, como, por exemplo o impingimento de jato que empurra um fluido contra a parede da placa fotovoltaica formando uma fina camada limite térmica acelerando o processo de transferência de calor e minimizando a resistência de contato (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023).

Trocadores de calor ativos compostos de dissipadores de calor como microcanais, geradores termoelétricos e filtros espectrais envolvendo escoamento de fluidos são alguns dos exemplos de sistemas de resfriamento ativo mais complexos, envolvendo mudança de fase, nano fluidos e, eventualmente o aproveitamento da energia térmica remanescente. Maiores detalhes desses sistemas serão comentados na Seção 2.1.3.

Os principais resultados alcançados por sistemas de resfriamento ativo mencionados e não mencionados nessa Seção estão resumidos na Tabela 1.

É importante dizer que, de acordo com Azimi, Basiri and Eslami (2024), poucos estudos levam em consideração a energia consumida para o funcionamento do sistema de arrefecimento no cálculo do ganho de eficiência, como é o caso do estudo de Shahverdian *et al.* (2021). Por esse motivo, a comparação direta entre os números de ganho de eficiência contidos na Tabela 1 não é justa, já que aqueles estudos que não consideram o gasto energético (Li *et al.*, 2021; Shahverdian *et al.*, 2021; Mah *et al.*, 2019) se sobressaem de forma demasiada. Outro fato que o autor (Azimi; Basiri; Eslami, 2024) chama atenção é que grandes fluxos de massa levam a melhores taxas de arrefecimento, porém o ganho energético alcançado por esse arrefecimento nem sempre compensa o gasto para que esse fluxo se concretize.

Apesar da água ser um fluido mais eficiente que o ar no papel de arrefecer o painel, um importante fator a ser levado em consideração é a evaporação, tendo que ser reposta certa quantidade de água de tempos em tempos. Esse fator se agrava ainda mais nas regiões mais quentes do planeta, onde o recurso costuma ser escasso.

## **2.1.2 Sistemas de resfriamento passivo**

Em um sistema de resfriamento passivo, parte do calor é absorvido e dissipado por convecção ou circulação natural de um refrigerante para o meio ambiente sem exigir energia externa alguma para o funcionamento do sistema. Embora sistemas de resfriamento passivos sejam menos efetivos quando comparados com os sistemas de resfriamento ativo, o fato desses sistemas não consumirem energia extra faz com que seu custo-benefício seja da mesma ordem ou mesmo maior que o custo-benefício de sistemas ativo (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023).

Tabela 1 - Principais resultados alcançados por sistemas de resfriamento ativo aplicados a painéis fotovoltaicos.

<b>Referência</b>	<b>Técnica</b>	<b>Redução de temperatura</b>	<b>Ganho em eficiência elétrica</b>	<b>Condição</b>	<b>Localização</b>
Shrivastava <i>et al.</i> (2022)	Escoamento forçado de ar com aletas	Máximo de 9°C	Não mencionado	Experimental, condições ambientais	Srinagar, Índia
Li <i>et al.</i> (2021)	Ar comprimido	18 °C	14%	Experimental, em laboratório	—
Shahverdian <i>et al.</i> (2021)	Escoamento forçado de água	54%	64%	Numérico, condições variáveis	Tehran, Irã
Bahaidarah <i>et al.</i> (2013)	Escoamento forçado de água	7,3 °C	9%	Experimental, condições ambientais	Dhahran, Arábia Saudita
Nižetić <i>et al.</i> (2016)	Pulverização de água	26 °C	5,9%	Experimental, condições ambientais	Split, Croácia
Mah <i>et al.</i> (2019)	Filme fino de água	28 °C	15%	Experimental, condições ambientais	Malásia
Azimi, Basiri and Eslami (2024)	Filme fino de água	24 °C	8,1 %	Experimental, condições ambientais	Xiraz, Irã

Fonte: elaborado pelo autor.

Isso é, quando feito o balanço de ganho de energia elétrica causada pela redução de temperatura do painel, descontando a energia extra gasta para funcionamento do sistema, na maioria dos casos, o saldo é maior para um sistema passivo, já que o segundo termo é nulo.

As técnicas de resfriamento passivo utilizadas em painéis fotovoltaicos, incluem: arrefecimento por meio de fluidos como ar, água, fluidos de arrefecimento combinados com nanopartículas; arrefecimento por condução, incluindo estruturas como dissipadores de calor e materiais de mudança de fase; e, por fim, arrefecimento por radiação, incluindo filtros solares com comprimentos de onda específicos e alta emissividade (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023).

A técnica mais utilizada para redução da temperatura de painéis fotovoltaicos é o uso de fluidos que pode ser feito tanto na parte posterior quanto na parte frontal do painel. A seleção do fluido de trabalho depende das propriedades termofísicas, fatores essenciais para a eficiência de resfriamento e sua uniformidade. Em geral, sistemas que utilizam ar são menos efetivos quando comparados com os que utilizam água (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023). Porém, a água é um recurso valioso em áreas específicas do mundo; portanto, sua evaporação deve ser levada em consideração. Os sistemas de resfriamento passivo envolvendo escoamento de fluidos são de características mais simples quando comparados com aqueles de resfriamento ativo mencionados na Seção 2.1.1, já que não possuem a presença de bombas e ventiladores para o escoamento forçado.

A grande maioria dos painéis fotovoltaicos são arrefecidos de forma passiva pelo escoamento natural do ar, já que esse é o método mais simples possível de se evitar o superaquecimento das placas. Estudos como Mittelman, Alshare and Davidson (2009) e Smith *et al.* (2022) mostram que diferentes configurações de placas em fazendas solares podem fazer com que a troca de calor por convecção melhore em 80% e que mudanças simples, como o aumento da distância entre a placa; no caso residencial, a configuração do telhado pode ocasionar uma diminuição de 18 °C na temperatura média das células fotovoltaicas. Ou seja, simples mudanças na disposição dos painéis em sistemas usuais podem melhorar sua eficiência.

Como já mencionado outro fluido importante no que diz respeito ao arrefecimento de painéis fotovoltaicos é a água, já que possui alta capacidade térmica e é ecologicamente correto. Entretanto, a interação entre a água e o painel fotovoltaico deve ser estudada, já que ainda não está claro o impacto associado ao contato contínuo do fluido a longo prazo (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023). Diferentemente de sistemas de resfriamento ativo, os sistemas de

resfriamento passivo envolvendo água são de construção mais simples, dispensando a presença de bombas e outros componentes para que haja circulação forçada do fluido. Posto isso, é esperado um desempenho inferior — porém, há de se lembrar que não há necessidade de energia externa para o funcionamento desses sistemas.

O método passivo de resfriamento que utiliza o efeito evaporativo da água é o que melhor aproveita o potencial dissipativo de calor do fluido, aproveitando de sua capacidade de transferência de calor latente (Gharzi *et al.*, 2020). Um exemplo desses sistemas é mostrado no estudo de Chandrasekar *et al.* (2013), onde foi utilizado uma estrutura espiral de algodão úmido na parte posterior do painel, reduzindo sua temperatura em 20 °C.

Outra técnica de resfriamento passivo de painéis fotovoltaicos utilizando fluidos é a utilização de tubo de calor, que consistem em tubos feitos com materiais de alta condutividade térmica contendo fluidos em seu interior que conforme entram em contato com a superfície aquecida do painel evaporam e expandem, indo para uma região mais próxima a temperatura ambiente, condensando e reiniciando o ciclo. Embora sejam equipamentos de alto custo e geometrias complexas, é um sistema eficiente e compacto (Shittu *et al.*, 2019). Um exemplo desse sistema é o apresentado em Alizadeh *et al.* (2020), onde foram comparados numericamente sistemas fechados de tubo de calor passivos e ativos, obtendo um aumento máximo de 23 e 35% respectivamente em eficiência de conversão energética.

A completa imersão do painel fotovoltaico em um fluido é uma técnica de arrefecimento de alto desempenho (Gharzi *et al.*, 2020). Entretanto, essa técnica é bastante influenciada pelas propriedades de reflexão e transmitividade do fluido, já que as células fotovoltaicas precisam receber os raios solares para produzirem energia elétrica. Portanto, somente alguns fluidos podem ser utilizados para essa finalidade, como, por exemplo, água deionizada, álcool isopropílico, glicerol, acetato de etileno, entre outros (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023). Outro fator crítico a ser levado em consideração é a degradação do painel a longo prazo em contato com o fluido de trabalho. De acordo com Han, Wang and Zheng (2016), o uso de água deionizada não é adequado para esse tipo de sistema, pois ela absorve boa parte dos comprimentos de onda mais longos, e constataram que o óleo de silicone dimetil seria o fluido adequado, não degradando o painel em 180 dias de imersão.

Soluções compostas de sistemas de resfriamento de painéis fotovoltaicos passivos que utilizam majoritariamente a condução de calor também são bastante exploradas na literatura. Uma delas é a que utiliza estruturas de aletas, geralmente metálicas, na parte posterior do painel,

umentando a área de transferência de calor com o ar atmosférico e diminuindo, portanto, a temperatura das células. Estudos como Arifin *et al.* (2020) mostram que a adição de aletas metálicas de alumínio na superfície posterior do painel reduz a temperatura do painel em até 10 °C para o caso estudado, aumentando a eficiência de conversão energética em 18%.

Os materiais de mudança de fase são substâncias específicas, conforme comenta a Seção 2.2, com temperaturas de mudança de fase variadas, grande capacidade de retenção de energia térmica, alto calor latente por unidade de volume e idealmente baixo coeficiente de expansão térmica. Acoplar esse tipo de material na parte posterior de um painel fotovoltaico faz com que o PCM absorva grandes quantidades de calor latente a uma temperatura estável durante a mudança de fase entre os estados sólido e líquido. Dessa forma, o calor excedente das células fotovoltaicas é absorvido pelo material de mudança de fase durante o dia, e a noite esse calor é liberado de volta ao meio ambiente, solidificando o PCM e recomeçando o ciclo. Vários cuidados devem ser tomados ao selecionar um PCM para ser acoplado a um painel fotovoltaico. O principal deles seria a faixa adequada de temperatura de mudança de fase, como indicam Savvakis and Tsoutsos (2021) e Hasan *et al.* (2017). Por esse motivo, Hasan *et al.* (2017) propuseram um critério levando em consideração as temperaturas médias durante a noite de verão e as temperaturas médias da superfície do painel durante os dias de inverno, de tal forma que o PCM escolhido tenha uma temperatura de mudança de fase maior que a média noturna do verão e menor que a temperatura de superfície média do painel no inverno. Isto é necessário para que o aproveitamento do PCM seja maximizado ao longo de todo ano.

Outro importante fator a ser levado em consideração quando se trata de arrefecimento de painel fotovoltaico por acoplamento com um material de mudança de fase é a espessura do PCM, já que esses materiais tem tanto densidade quanto custo elevados (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023). Por isso, diferentes modelos matemáticos são propostos para prever a temperatura do painel acoplado a materiais de mudança de fase. Por exemplo, Elsheniti *et al.* (2020) propuseram um modelo unidimensional simplificado com o intuito de realizar análises anuais da implementação do PCM em sistemas fotovoltaicos, mostrando a influência de parâmetros como inclinação e espessura do PCM. Um fator interessante mostrado pelo estudo é o fato de espessuras exageradas diminuírem a eficiência do painel devido a sua solidificação parcial durante o período noturno. Isso faz com que o painel receba energia térmica do PCM parcialmente liquefeito na parte inicial do dia, aumentando a temperatura de operação do painel e, conseqüentemente, diminuindo sua eficiência. Outros estudos aproveitam essa retenção de

calor no PCM como fonte de calor ou até mesmo, utilizam-na para gerarem energia elétrica, acoplando o PCM a geradores térmicos (Shakibi *et al.*, 2023; Siahkamari *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2022b).

A Tabela 2 mostra os principais resultados em resfriamento passivo de painéis fotovoltaicos. É importante notar que, em termos de redução de temperatura, em geral, os métodos de resfriamento ativo são melhores; porém, o ganho de eficiência, quando considerado o gasto em sistemas ativos, torna-se parelho. Por esse motivo, os autores deste trabalho acreditam que sistemas de resfriamento passivo são opção mais viável para arrefecimento de sistemas fotovoltaicos. Ademais, sistemas de resfriamento passivo requerem menos manutenção e são de construção mais simples.

### 2.1.3 Sistemas de resfriamento combinado

Em alguns casos, combinar duas ou mais técnicas de resfriamento pode levar a uma melhora na utilização de energia térmica, eficiência e vida útil do painel fotovoltaico. Portanto, técnicas de resfriamento passivas e ativas podem ser combinadas a fim de compensar parte de suas limitações, como, capacidade de recuperação térmica, desempenho térmico ou uniformidade do arrefecimento (Gharzi *et al.*, 2020). Sistemas de resfriamento combinados formados por técnicas ativas e passivas, utilizando PCMs para condução de calor são as mais frequentes encontradas na literatura (Koohestani; Nižetić; Santamouris, 2023).

Como exemplo, o trabalho de Shakibi *et al.* (2023) estuda um sistema de arrefecimento composto por um PCM e um coletor aletado contendo água corrente, misturando, portanto, uma solução passiva com uma ativa. O estudo buscou otimizar, por meio de uma rede neural, o fluxo de massa de água ideal para diferentes combinações de condições ambientes, como a irradiação solar e a velocidade do vento. Dessa forma, além de aproveitar a energia proveniente da irradiação solar para gerar energia elétrica, o sistema aproveita da energia térmica remanescente para aquecer a água, aumentando a eficiência energética total do sistema.

Em um sistema combinado com uso de PCM e microcanais de cobre escoando água, Siahkamari *et al.* (2019) compararam experimentalmente o uso de PCM parafínico com bioPCM feito de gordura de ovelha com e sem adição de nanopartículas em sua composição. Além das variações de PCMs, o estudo investigou diferentes vazões de água, comparando os resultados de temperatura na superfície do painel fotovoltaico. Como resultados os autores relatam que a maior redução de temperatura ocorreu para o bioPCM com adição de nanopartículas, tendo um

Tabela 2 - Principais resultados alcançados por sistemas de resfriamento passivo aplicados a painéis fotovoltaicos.

Referência	Técnica	Redução de temperatura	Ganho em eficiência elétrica	Condição	Localização
Mittelman, Alshare and Davidson (2009)	Canais de ar	10-20 °C	1-2%	Numérico, condições variáveis	—
Zou <i>et al.</i> (2017)	Resfriamento passivo de ar com aprimoramento solar	Manter abaixo de 75 °C	Não mencionado	Numérico, constantes	Hemisfério Norte
Chandrasekar <i>et al.</i> (2013)	Sistema evaporativo utilizando algodão úmido	20°C	Eficiência máxima foi de 9% para 10,4%	Experimental, condições ambientais	Tiruchirappalli, Índia
Alizadeh <i>et al.</i> (2020)	tubo de calor	14,6 °C	Máximo de 23%	Numérico, constantes	Carmânia, Irã
Su, Sui and Davidson (2022)	Imersão em óleo de silicone	Manter entre 20 e 31 °C	Não mencionado	Experimental, condições ambientais	Não mencionado
Hasan <i>et al.</i> (2017)	PCM parafínico (RT-42)	10,5 °C	5,9%	Experimental, condições ambientais	Emirados Árabes
Elsheniti <i>et al.</i> (2020)	PCM parafínico (RT25HC)	10 °C	2% (de 17,15 para 18%)	Numérico, condições ambientais	Alexandria, Egito
Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022)	PCM parafínico (RT-42)	9 °C	De 11,62 para 12,64%	Experimental, condições ambientais	Benha, Egito

Fonte: elaborado pelo autor.

aumento de 24,6 a 26,2% na potência máxima gerada quando comparado com nenhum sistema de arrefecimento, e um aumento de 5,3 a 12% quando comparado à parafina.

A Tabela 3 mostra os principais resultados em resfriamento combinado de painéis fotovoltaicos. É importante notar que diferentemente das Tabelas 1 e 2, a terceira coluna da Tabela 3 mostra a eficiência combinada, que é a soma da eficiência elétrica com a térmica em sistemas em que se aproveita dessa energia, e a soma das eficiências elétricas em sistemas com geradores térmicos.

É importante notar o grande aumento de eficiência combinada ou total de sistemas combinados de resfriamento de painéis fotovoltaicos, fazendo com que grande parte da energia proveniente do sol seja aproveitada. O ponto negativo desses sistemas, segundo Koohestani, Nižetić and Santamouris (2023), é a necessidade de desenvolvimento extremamente preciso para o funcionamento adequado.

Embora muitos trabalhos apresentem soluções de resfriamento de painéis fotovoltaicos com PCMs, são poucos aqueles que trabalham com bioPCMs. Os únicos dois trabalhos encontrados são os já citados: Siahkamari *et al.* (2019) e Wongwuttanasatian, Sarikarin and Suksri (2020). Esses, inclusive, ressaltam que além da disponibilidade abundante e natural dos produtos, bioPCMs são até 400 vezes mais baratos quando comparados com PCMs parafínicos da Rubitherm<sup>®</sup>, por exemplo.

O fato de se apresentarem como uma opção viável, serem ecológicos, possivelmente de menor custo e pouco explorados pela literatura faz com que o presente trabalho tenha como principal objetivo viabilizar a utilização de bioPCMs em sistemas de resfriamento passivo de painéis fotovoltaicos comerciais em condições ambientais nacionais.

## 2.2 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Materiais de mudança de fase são materiais que conseguem absorver grandes quantidades de calor latente com aumento mínimo na temperatura (Ma; Li; Zhao, 2019). Portanto, é possível acoplar um sistema PCM cuja temperatura de mudança de fase está dentro da faixa atingida por um painel fotovoltaico durante o dia para que este mantenha a temperatura controlada dentro da faixa de calor latente, i.e., uma temperatura baixa, a fim de aumentar a eficiência de conversão de energia e a vida útil do painel.

Sendo a adição de PCMs uma técnica de resfriamento passivo, não há necessidade de fluxo de massa de fluido ou energia elétrica extra. Em adição, PCMs são considerados uma

Tabela 3 - Principais resultados alcançados por sistemas de resfriamento combinado aplicados a painéis fotovoltaicos.

<b>Referência</b>	<b>Técnica</b>	<b>Redução de temperatura</b>	<b>Eficiência combinada máxima</b>	<b>Condição</b>	<b>Localização</b>
Shakibi <i>et al.</i> (2023)	Nano-PCM com coletor de água	Não mencionado	48%	Numérico, condições variáveis	—
Wongwuttanasatian, Sarikarin and Suksri (2020)	Trocador de calor passivo de alumínio com e sem bioPCM (cera de palma)	6,1 °C do sistema aletado sem PCM para o com PCM	De 9,33 para 9,82%	Experimental, condições ambientais	Khon Kaen, Tailândia
Siahkamari <i>et al.</i> (2019)	Nano bioPCM com microcanais de cobre escoando água	20,3 °C	26,2% (somente eficiência elétrica)	Experimental, em laboratório	—
Gao <i>et al.</i> (2022b)	Sistema híbrido com PCM RT28HC e gerador termoelétrico	19,22 °C	Não mencionado	Numérico, condições uniformes e não uniformes	—

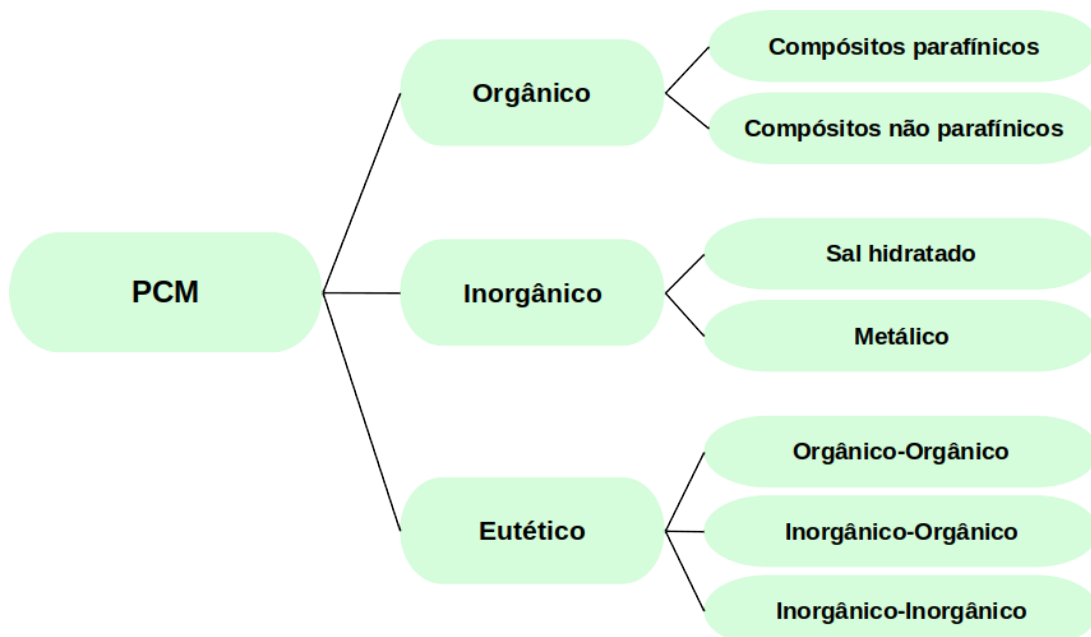
Fonte: elaborado pelo autor.

efetiva solução para se utilizar energia térmica proveniente de fontes renováveis, com diversas pesquisas avaliando sua viabilidade em sistemas energia solar e controle térmico em construções. Em Pandey *et al.* (2018) é apresentada uma fundação sólida de cogeração de energia em sistemas PV/PCM.

Apesar de cada vez mais pesquisadores abraçarem a tecnologia PV/PCM, aumentando o número de publicações nesse campo, na prática, decidir se o sistema é aplicável ainda não está claro, por conta das propriedades termofísicas em geral, como baixa condutividade térmica, vazamentos e alto custo, resultando em um sistema ainda insuficiente com relação à confiabilidade e ao custo benefício quando comparado a outras soluções (Ma; Li; Zhao, 2019).

Existem, basicamente, PMCs de três diferentes tipos: orgânico, inorgânico e eutético, os quais podem reter e prover uma grande quantidade de energia em uma faixa de temperatura específica (Pandey *et al.*, 2018). A maioria dos PCMs é de origem orgânica e inorgânica, e esses podem ser distinguidos uns dos outros de acordo com suas propriedades termofísicas, como calor latente e temperatura de fusão. É importante ressaltar que nenhum material sozinho satisfaz completamente todas as características termofísicas necessárias para resolver um problema em particular. Por isso, devem ser utilizados os materiais acessíveis em um sistema planejado para compensar as características que não são interessantes (Pandey *et al.*, 2018). A Figura 3 explicita esses tipos de PCM em suas principais categorias.

Figura 3 - Tipos de PCMs e suas categorias.



Fonte: adaptado de Pandey *et al.* (2018).

### 2.2.1 Parafínicos

PCMs parafínicos são de origem orgânica, já que são compostos por hidrocarbonetos. Esses materiais contém uma ou várias cadeias sintéticas de n-alcanos. A temperatura de entalpia e fusão dos compostos parafínicos aumenta de acordo com a cadeia carbônica que o constitui (Abhat, 1983; Kosny; Shukla; Fallahi, 2013). A transição sólido-líquido atende de forma satisfatória diversos dos critérios necessários para seleção de materiais de mudança de fase. Por exemplo, parafinas não apresentam problemas referente à estabilidade termofísica após consecutivos ciclos de mudança de fase, possuem entalpia durante a fusão em torno de 200 kJ/kg, são não tóxicas e relativamente fáceis de se obter no mercado. Entretanto, a mudança de volume durante solidificação — da ordem de 10% — pode ser um problema para algumas aplicações, já que o encapsulamento e o trocador de calor não serão de construção simples (Dincer; Rosen, 2011). Além disso, parafinas são derivadas do petróleo, ou seja, contribuem para os problemas ambientais. Logo, embora parafinas sejam o tipo de PCM mais usado e estudado até o momento, por conta do contexto global é necessário substituí-las por outro material mais ecologicamente correto.

### 2.2.2 Ácidos graxos

Ácidos graxos são substâncias orgânicas pertencentes ao grupo dos ácidos carboxílicos (COOH). Alguns ácidos graxos possuem características muito similares às parafinas, ou seja, estabilidade termoquímica, não tóxicos, mesma ordem de entalpia de fusão, dentre outros (Sharma *et al.*, 2005; Sari; Karaipekli, 2012). Quando suas propriedades termofísicas são apropriadas para aplicações de armazenamento térmico na forma de calor latente, esses materiais são chamados de bioPCMs (ou PCMs de base biológica, ver Seção 2.2.5). Além disso, sua produção pode ser proveniente de subprodutos da indústria alimentícia, promovendo uma produção sustentável e ligação direta com a redução de emissões de carbono. A Tabela 4 mostra as propriedades de alguns ácidos graxos e de suas misturas eutéticas.

### 2.2.3 Sal hidratado e ligas metálicas

Sais hidratados destacam-se pela elevada condutividade térmica e entalpia de fusão quando comparados a PCMs orgânicos. O maior desafio da aplicação desse tipo de PCM nos dias de hoje decorre da instabilidade termofísica após consecutivos ciclos de mudança de fase (Lira, 2018). Já as ligas metálicas apresentam entalpias de mudança de fase normalmente abaixo dos

Tabela 4 - Propriedades termofísicas de ácidos graxos.

Ácido	Proporção mássica (%)	Temperatura de fusão (°C)	Calor latente de fusão (kJ/kg)
Caprílico	-	16,10	144,22
Cáprico	-	32,14	156,40
Láurico	-	42,60	176,60
Mirístico	-	51,80	178,14
Palmítico	-	60,42	233,24
Oléico	-	13,60	138,70
Cáprico/Láurico	65,2 : 34,8	19,67	126,56
Cáprico/Palmítico	76,5 : 23,5	21,85	171,22
Láurico/Palmítico	69 : 31	35,20	166,30

Fonte: adaptado de Lira (2018).

valores encontrados em PCMs. Estudos que utilizam esses tipos de substâncias como materiais de mudança de fase buscam se beneficiar de sua elevada condutividade térmica, densidade e temperatura.

#### 2.2.4 Misturas Eutéicas

Misturas eutéicas são aquelas que apresentam uma mistura de elementos ou compostos químicos em uma determinada proporção cujo ponto de fusão é o mais baixo possível. Ou seja, durante o resfriamento uma fase líquida se transforma em, pelo menos, duas fases sólidas (Callister, 2013). Pelo fato de, na prática, ser difícil encontrar o verdadeiro ponto eutéico da mistura, a mudança de fase ocorre em um pequeno intervalo de temperatura. Sua importância no contexto de PCMs está fortemente atrelada à possibilidade de misturar PCMs de mesma origem, mas com propriedades distintas, para que assim seja possível a criação de uma mistura com características mais interessantes para uma aplicação específica.

#### 2.2.5 BioPCMs

BioPCMs são uma nova categoria de PCMs orgânicos obtidos de matérias-primas pouco utilizadas (Sharma *et al.*, 2015). Esses podem ser compostos de ácidos graxos, misturas complexas ou eutéicas. Assim como os PCMs orgânicos, os bioPCMs possuem propriedades termofísicas apropriadas, como: estabilidade termoquímica, não alteração de propriedades quando sujeitos a diversos ciclos de mudança de fase, não toxicidade e alguns possuem mesma

ordem de entalpia de fusão quando comparado a outros PCMs, como os parafínicos. A Tabela 5 mostra as propriedades de alguns bioPCMs diferentes daqueles mostrados na Tabela 4, por se tratarem de compostos complexos e misturas.

Tabela 5 - Propriedades termofísicas de alguns bioPCMs.

<b>BioPCM</b>	<b>Temperatura de fusão (°C)</b>	<b>Calor latente de fusão (kJ/kg)</b>	<b>Calor específico (kJ/kgK)</b>
Banha de porco	21,8 ± 0,4	30 ± 1	1,9 ± 0,2
Óleo de coco	21,4 ± 0,4	64 ± 6	2,0 ± 0,2
Óleo de Pequi	35,8 ± 0,4	34 ± 3	2,2 ± 0,2
Pequi+Ricinol [30:70]	22,0 ± 0,4	10 ± 1	3,1 ± 0,3
Pequi+Ricinol [70:30]	30,7 ± 0,4	33 ± 2	3,8 ± 0,2
Pequi+Ricinol [50:50]	27,0 ± 0,4	17 ± 1	2,6 ± 0,2
Cera de Palma	43,9 ± 0,2	133 ± 12	2,8 ± 0,3
Cera de soja	55,6–43,8 ± 0,3	195 ± 18	1,3 ± 0,1
Cera de carnaúba tipo 3	78,5–62,50 ± 0,2	241 ± 23	2,0 ± 0,2
Cera de carnaúba tipo 4	74,5–54,7 ± 0,2	289 ± 27	0,9 ± 0,1

Fonte: adaptado de Lira (2018) e Monteiro (2018).

Pode-se observar, portanto, que existe uma grande variedade de bioPCMs e que alguns desses têm propriedades termofísicas muito semelhantes às parafinas; esse motivo acrescido ao fato de serem subprodutos da indústria alimentícia fazem desses materiais uma solução para a substituição das parafinas nesse mercado. É nesse contexto que se faz necessário um estudo de viabilidade de bioPCM aplicado à placa fotovoltaica para arrefecimento e aproveitamento da energia térmica residual gerada pelo processo de conversão da energia solar para elétrica; diminuindo a temperatura de operação do painel, aumentando sua eficiência de conversão energética e aumentando de maneira expressiva a eficiência energética do sistema.

### 2.3 OBJETIVO

Diante do contexto apresentado, o objetivo geral deste trabalho é investigar o desempenho térmico de painéis fotovoltaicos com e sem a utilização de sistemas de resfriamento passivo baseados em materiais de mudança de fase de origem biológica (bioPCMs).

Para atingir esse objetivo, uma metodologia foi desenvolvida com base nos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo numérico transitório tridimensional em CFD que considere o escoamento de ar e as variações das condições ambientais, para prever a temperatura das células fotovoltaicas sem um sistema de resfriamento acoplado ao módulo.
- Desenvolver um segundo modelo numérico transitório tridimensional em CFD que considere o escoamento de ar e as variações das condições ambientais, para prever a temperatura das células fotovoltaicas em um sistema PV/PCM.
- Desenvolver um terceiro modelo numérico transitório tridimensional em CFD para um sistema PV/PCM, substituindo a modelagem detalhada do escoamento de ar por correlações empíricas, mantendo as variações das condições ambientais, e comparar seus resultados com os do segundo modelo.
- Selecionar e dimensionar um sistema de resfriamento passivo composto por um bioPCM para um módulo fotovoltaico comercial, avaliando seu desempenho térmico sob condições reais de operação.

Espera-se que os modelos desenvolvidos sejam capazes de prever a temperatura de módulos fotovoltaicos com ou sem sistemas de resfriamento passivo baseados em PCM, considerando as condições ambientais locais, como temperatura ambiente, irradiação solar e velocidade do vento. Além disso, esses modelos poderão ser utilizados para análises de viabilidade e dimensionamento, promovendo a aplicação desse tipo de sistema em diferentes condições ambientais.

### 3 METODOLOGIA

Tendo em vista a grande influência da temperatura de operação das células fotovoltaicas em sua eficiência de conversão energética e os diversos resultados de sistemas de resfriamento em condições de vários locais ao redor do mundo, o presente trabalho propõe dois modelos numéricos tridimensionais em CFD capazes de prever a temperatura das células fotovoltaicas com e sem a presença de um sistema de resfriamento passivo composto de um bioPCM dadas as condições ambientais de velocidade do vento, temperatura ambiente e irradiação solar locais.

A Seção 3 descreve a metodologia para desenvolvimento dos modelos numéricos compostos do painel sem presença de PCM, Seção 3.1, e com presença de PCM, Seção 3.2, de forma separada com a finalidade de evitar confusão quanto as particularidades de cada modelo. Além disso, na Seção 3.3 é apresentada uma análise da necessidade de considerar o cálculo do escoamento de ar nas simulações do sistema PV/PCM.

#### 3.1 PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

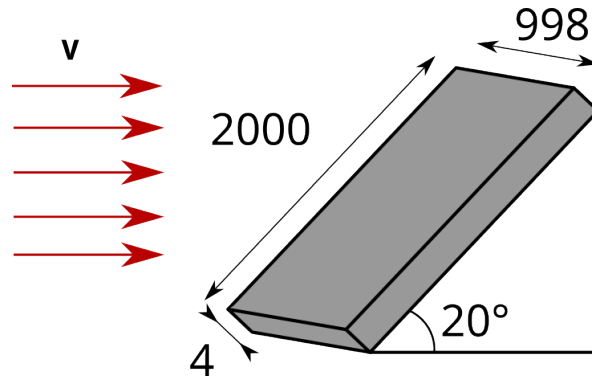
##### 3.1.1 Problema físico e modelo matemático

Para o modelo físico é usado um painel fotovoltaico comercial da *CanadianSolar* modelo CS3U-350P, dimensões  $2000 \times 992 \times 40$  mm, composto de 144 células de silício policristalino (p-Si) com potência nominal máxima STC de 350 Wp e eficiência de 17,64% montado em condição livre, inclinado em  $20^\circ$  conforme latitude local, com as condições ambientais de Aparecida do Taboado no estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, tendo como base os experimentos descritos em Silva *et al.* (2022).

Com a finalidade de redução de complexidade da geometria e do problema como um todo não é considerado a estrutura de sustentação do painel, e as seis camadas que o compõem foram simplificadas em uma única camada com propriedades equivalentes. A Figura 4 mostra as dimensões do painel computacional e a Tabela 6 indica as propriedades equivalentes mencionadas, as camadas então ordenadas da parte superior para inferior.

Interferências externas advindas de outras estruturas e da própria camada limite do solo são desconsideradas, para que o modelo seja genérico. Isso significa que as únicas variações da magnitude da velocidade do vento no fluxo livre consideradas são as temporais. A direção do vento, porém, é simplificada para uma única, sendo essa a de maior incidência, de norte para sul na região estudada. Essa simplificação garante maior estabilidade e convergência para o modelo.

Figura 4 - Esquema do painel fotovoltaico, considerando a camada equivalente. Dimensões em milímetros.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6 - Propriedades das diferentes camadas do painel e da camada equivalente.

Camada	Material	Espessura [m·10 <sup>-3</sup> ]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico [J/kg·K]	Condutividade Térmica [W/m·K]
1	Vidro Temperado	3,2	3000	500	1,8
2	Revestimento anti-reflexo	0,0001	2400	691	32
3	Células PV p-Si	0,225	2330	677	148
4	Metal de contato	0,01	2700	900	237
5	Etileno vinil acetato (EVA)	0,5	960	2090	0,35
6	Fluoreto de polivinila (PVF)	0,0001	1200	1250	0,2
	Equivalente	4,04	2664,5	589	1,09

Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2022).

### 3.1.1.1 Equações governantes

Como a intenção do modelo é calcular a temperatura das células fotovoltaicas ao longo do dia e as condições ambientais de velocidade do vento, irradiação solar, e temperatura ambiente são variáveis, é preciso, portanto, que o modelo matemático seja transiente a fim de capturar essas variações. Como a magnitude da velocidade não é maior que 5 m/s, é seguro adotar a hipótese do ar como fluido incompressível. A parte fluida do problema é, então, descrita pelo conjunto das equações de balanço de massa (Equação 1), quantidade de movimento (Equação 2) e energia (Equação 3) seguindo a hipótese do meio contínuo da mecânica dos fluidos (Moukalled; Darwish; Mangani, 2016).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \alpha (T - T_{\text{ref}}), \quad (2)$$

$$\rho c_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} T) \right] = k_T \nabla^2 T + \mu \Phi + \dot{q}_V, \quad (3)$$

onde  $\mathbf{v}$  é o vetor velocidade,  $\rho$  é a densidade,  $t$  é o tempo,  $p$  a pressão,  $\mu$  a viscosidade dinâmica,  $\alpha$  é a expansividade térmica,  $\mathbf{g}$  o vetor aceleração da gravidade,  $c_p$  o calor específico a pressão constante,  $T$  a temperatura,  $k_T$  a condutividade térmica,  $\Phi$  é o termo de dissipação viscosa, cujo valor é negligenciável para baixas velocidades (Moukalled; Darwish; Mangani, 2016) e  $\dot{q}_V$  a geração de calor volumétrica. É importante ressaltar que o último termo da Equação 2 ( $\rho \mathbf{g} \alpha (T - T_{\text{ref}})$ ) se refere à aproximação de Boussinesq, que se faz presente para levar em consideração os efeitos de fluatuabilidade do escoamento.

Quanto a parte sólida do problema, somente é necessário resolver a equação da energia, e, considerando um sólido homogêneo e isotrópico, com propriedades constantes, a transferência de energia ocorre, internamente, somente por difusão. Por esse motivo, a equação da energia no sólido pode ser escrita como

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_T \nabla^2 T + \dot{q}_V. \quad (4)$$

As propriedades utilizadas para o sólido estão explicitadas na Tabela 6. Quanto às propriedades do fluido, assume-se massa específica de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , calor específico de  $1006,43 \text{ J/kgK}$ , condutividade térmica de  $0,0242 \text{ W/mK}$  e viscosidade dinâmica de  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

### 3.1.1.2 Modelo de turbulência

Na apresentação das equações governantes não foi assumido nada quanto ao regime do escoamento, isso é, se ele é laminar ou turbulento. Como os painéis solares analisados pelo modelo se encontram na camada limite atmosférica, é de se esperar que esse escoamento, antes mesmo de chegar ao painel, já esteja perturbado com uma larga banda de frequências (Silveira Neto, 2020), e ao entrar em contato com o painel inclinado, surgem descolamentos nas extremidades gerando um regime turbulento, mesmo em baixas velocidades. Portanto, é razoável assumir que o escoamento seja turbulento no domínio do ar. Como se sabe o escoamento turbulento é conhecido por ter características caóticas, por conta das múltiplas interações não lineares entre as estruturas turbilhonares que o compõe.

Segundo Silveira Neto (2020), uma das principais características da turbulência é a multiplicidade de grandezas temporais e espaciais. No ponto de vista da metodologia dos

volumes finitos, para se resolver as equações apresentadas na Seção 3.1.1.1 é preciso que a malha computacional seja de grandeza menor que a menor perturbação espacial amplificada. Esse comprimento é chamado de Comprimento de Transformação Viscosa de Kolmogorov. É, também, preciso que o passo de tempo numérico seja menor que o tempo característico relativo às Estruturas de Kolmogorov. Como é de conhecimento geral, para grande parte dos problemas de engenharia, esses números são pequenos o suficiente para que, atualmente, não haja capacidade computacional capaz de solucionar o problema. Por exemplo, para solucionar diretamente o problema estudado, é estimado que a malha computacional tivesse que ser da ordem de 300 bilhões de elementos.

Uma alternativa largamente utilizada tanto na indústria quanto em meios acadêmicos, é, ao invés solucionar as equações por meio de uma simulação computacional direta como descrito anteriormente, solucioná-las utilizando as equações médias de Boussinesq–Reynolds (Silveira Neto, 2020). A abordagem principal é a decomposição das variáveis do escoamento em valores médios temporais e componentes flutuantes (Moukalled; Darwish; Mangani, 2016). Sendo  $\phi$  uma variável genérica do escoamento, sua decomposição seria expressa em

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \overline{\phi}(\mathbf{x}, t) + \phi'(\mathbf{x}, t), \quad (5)$$

onde  $\mathbf{x}$  simboliza coordenada no espaço tridimensional,  $t$  o tempo, a barra superior denota a média temporal e o apóstrofo, as flutuações instantâneas.

Dessa forma, ao substituir as médias de Boussinesq–Reynolds nas equações governantes de fluidos Newtonianos incompressíveis, obtém-se

$$\nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}}) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}} - \rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}) + \rho \mathbf{g} \alpha (\bar{T} - T_{\text{ref}}), \quad (7)$$

e

$$\rho c_p \left[ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{v}} \bar{T}) \right] = \nabla \cdot (k_T \nabla \bar{T} - \rho c_p \overline{\mathbf{v}' T'}) + \dot{q}_V. \quad (8)$$

O conjunto de equações é conhecido como *Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations* (URANS). O termo  $\bar{\boldsymbol{\tau}}$  na Equação 7 é o tensor das tensões viscosas. O termo altamente não linear  $-\rho \overline{\mathbf{v}' \mathbf{v}'}$  é conhecido como tensor de Reynolds. Esse introduz seis novas variáveis desconhecidas

à equação do balanço de quantidade de movimento, enquanto que o termo  $-\rho c_p \overline{\mathbf{v}'T'}$  também introduz três variáveis desconhecidas à equação do balanço de energia.

Consequentemente, para solucionar o conjunto de equações URANS faz-se necessário a solução de equações adicionais para os desconhecidos fluxos turbulentos (Moukalled; Darwish; Mangani, 2016). Uma das mais utilizadas formas de se expressar as tensões não lineares em termos das componentes médias do escoamento é a hipótese de Boussinesq. Em analogia aos fluidos Newtonianos, a hipótese de Boussinesq assume que o tensor de Reynolds seja linear com relação aos gradientes de velocidade médias, de tal forma que

$$\boldsymbol{\tau}^R = -\rho \overline{\mathbf{v}'\mathbf{v}'} = \mu_t \{ \nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I}, \quad (9)$$

onde  $\mathbf{v}$  significa a velocidade média, que a partir desse ponto não será usada a barra de linha superior para simplificar a notação,  $k$  é a energia cinética turbulenta definida por

$$k = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{v}' \cdot \mathbf{v}'} \quad (10)$$

e  $\mu_t$  a viscosidade dinâmica turbulenta que depende do escoamento e não do fluido.

De maneira similar, o fluxo térmico turbulento é calculado em analogia à lei de Fourier de forma que

$$\dot{\mathbf{q}}^R = -\rho c_p \overline{\mathbf{v}'T'} = k_t \nabla T, \quad (11)$$

onde  $k_t$  é difusividade térmica turbulenta.

Portanto, para fechar a solução das equações, é preciso calcular  $\mu_t$  e  $k_t$ . Na literatura existem vários modelos capazes de fazer esse trabalho. O modelo  $k-\omega$  SST (Menter, 1994) é certamente um dos mais utilizado devido a sua capacidade e precisão no cálculo da turbulência em uma grande variedades de aplicações (Menter, 2009). Por isso, adotou-se este modelo de turbulência no presente trabalho.

O modelo de turbulência  $k-\omega$  SST adiciona mais duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta  $k$  e uma para a taxa específica de dissipação turbulenta  $\omega$ , respectivamente,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_b - \rho k \omega + S_k \quad (12)$$

e

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right] + \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla k : \nabla \omega \quad (13)$$

onde  $\sigma_k$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\sigma_{\omega 2}$  são constantes associadas à calibração do modelo usando dados experimentais, e  $P_k$ ,  $P_b$ ,  $S_k$  são termos relacionados a produção e dissipação. A relação da energia cinética turbulenta e dissipação com a viscosidade dinâmica turbulenta é

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (14)$$

e a relação com a difusividade térmica turbulenta é

$$k_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (15)$$

onde  $Pr_t$  é uma constante conhecida como número de Prandtl turbulento, possuindo valor igual a 0,9.

O termo  $F_1$ , das Equações 12 e 13, é responsável por fazer a transição entre o uso dos modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  originais, principal ideia por trás do modelo SST. Dessa forma o modelo consegue utilizar os diferentes modelos onde eles são mais precisos. Sendo o  $k-\omega$  utilizado do começo da camada limite até a parede, e o  $k-\varepsilon$  utilizado do fim da camada limite ao escoamento livre.

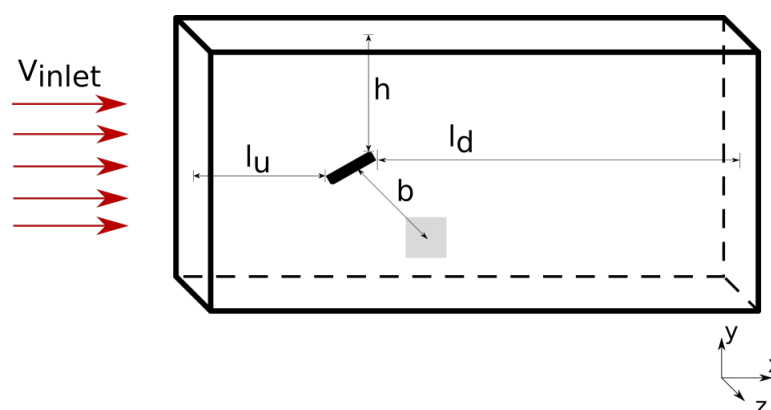
### 3.1.1.3 Domínio computacional e condições de contorno

O domínio computacional se refere a uma região volumétrica externa que envolve o objeto de estudo, onde as equações que descrevem o escoamento do fluido são resolvidas. Um total de seis faces definem a região de contorno de um domínio computacional típico de formato cúbico. Essas faces definem um limite dimensional não físico para o domínio; isto é, sua influência sob o escoamento, quando não conhecidas as condições de contorno exatas, constitui um erro computacional. Considerando ambos o custo computacional e a precisão do modelo faz-se necessário analisar o tamanho desse domínio.

Para tal, foi utilizada uma metodologia conforme feito em Abu-Zidan, Mendis and Gunawardena (2021) para definir as dimensões do domínio computacional. Para isso, foi considerado um domínio cujas dimensões são separadas em quatro variáveis,  $l_u$ ,  $l_d$ ,  $h$  e  $b$ ,

ilustradas na Figura 5. Onde  $l_u$  é o comprimento da extremidade a montante do painel ao limite do domínio em direção à entrada de ar (*inlet*),  $l_d$  é o comprimento da extremidade a jusante do painel à extremidade onde o ar é expelido do domínio (*outlet*),  $h$  é a distância da parte superior do painel à extremidade superior do domínio e  $b$  é a distância da lateral do painel à lateral do domínio. É importante ressaltar que há simetria relacionado às distâncias  $h$  e  $b$  — isso é,  $h$  é também a distância da parte inferior do painel à extremidade inferior do domínio, assim como  $b$  é a distância lateral de ambos os lados do painel a sua respectiva lateral do domínio.

Figura 5 - Domínio Computacional.



Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, baseado no comprimento do painel  $L$  e nas recomendações de Abu-Zidan, Mendis and Gunawardena (2021) e Franke *et al.* (2011) foram definidos casos de simulação alterando os valores das distâncias do domínio um por vez, mantendo os demais constantes em seus maiores valores, a fim de avaliar o comportamento de cada qual isoladamente. A Tabela 7 mostra todas as dimensões para a avaliação do domínio computacional. Por exemplo, para avaliar o  $l_u$  os parâmetros  $l_d$ ,  $h$  e  $b$  são mantidos em  $25L$ ,  $9L$ , e  $10L$ , respectivamente. A mesma metodologia é usada na avaliação dos demais parâmetros, totalizando 24 diferentes configurações.

O problema é composto do painel, inclinado de  $20^\circ$  Norte, envolto pelo domínio fluido, o ar, cujos limites devem ser atribuídos de condições de contorno. Considerando o domínio fluido, o ar entra com velocidade (sempre na mesma direção de Norte para Sul) e temperatura espacialmente constantes, mas que variam temporalmente para representar o regime transitório visto ao longo de uma dia. As paredes laterais do domínio tem condições de simetria atreladas a elas, enquanto que na saída é imposta a condição de pressão ambiente, como mostra a Figura 6.

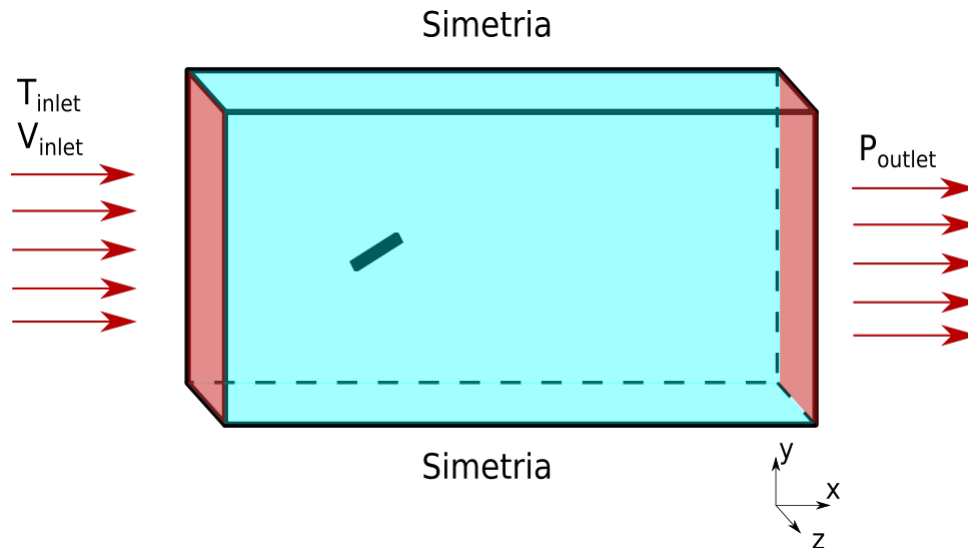
Condição de não deslizamento e acoplamento dos fluxos de energia são atribuídos na superfície de contato entre o escoamento e as paredes do PV. Já a irradiação solar incidente é

Tabela 7 - Dimensões dos domínios computacionais.

$l_u$	$l_d$	$h$	$b$
$10L$	$25L$	$9L$	$10L$
$7,5L$	$20L$	$7L$	$7L$
$5L$	$15L$	$5L$	$5L$
$3L$	$10L$	$3L$	$4L$
$2L$	$8L$	$2L$	$3L$
$1,5L$	$5L$	$1,2L$	$2L$
$1L$	$3L$		$1,5L$

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6 - Domínio físico e condições de contorno.



Fonte: elaborado pelo autor.

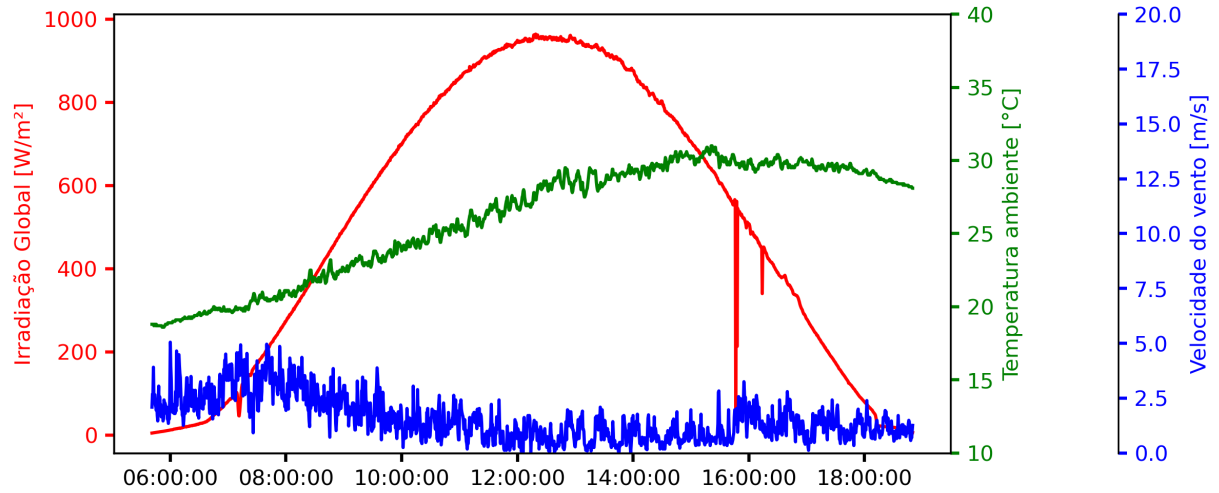
inserida como uma fonte de calor volumétrica no painel, subtraindo a parcela da energia solar convertida em energia elétrica pelo painel para cada instante de tempo.

O intervalo de tempo entre cada valor das condições de contorno transientes é de 5 minutos, sendo o início representativo do nascer do sol, onde, para tempos de simulação intermediários é feita interpolação linear. As variações temporais das condições impostas para o dia escolhido (08/12/2021) são explicitadas na Figura 7.

#### 3.1.1.4 Modelo de radiação

Por ter natureza diferente das trocas de calor por difusão e advecção, os modelos de radiação são tratados de maneira especial nos códigos CFD. A primeira escolha do experimentador

Figura 7 - Variação das condições de contorno.



Fonte: Adaptado de Silva (2021).

computacional é decidir se será contabilizada a radiação ou não no problema. Como se sabe, a troca de calor por radiação é fator importante no que diz respeito a energia solar fotovoltaica, pois além do aquecimento do painel acontecer majoritariamente pela absorção de irradiação solar, o painel também irradia energia térmica para o ambiente, já que ele se encontra, ao longo do dia, à temperatura mais elevada que o meio ambiente.

É de interesse do modelo proposto que a segunda característica seja descrita, já que, como comentado na Seção 3.1.1.3, a irradiação solar é contabilizada como uma geração de calor volumétrica no painel. Para tanto, o efeito da irradiação é incluída a partir da consideração que o meio seja não participante, isso é, que o fluido do meio (ar) não emite, absorve ou espalha radiação, não tendo qualquer efeito sobre a transferência de radiação entre as superfícies.

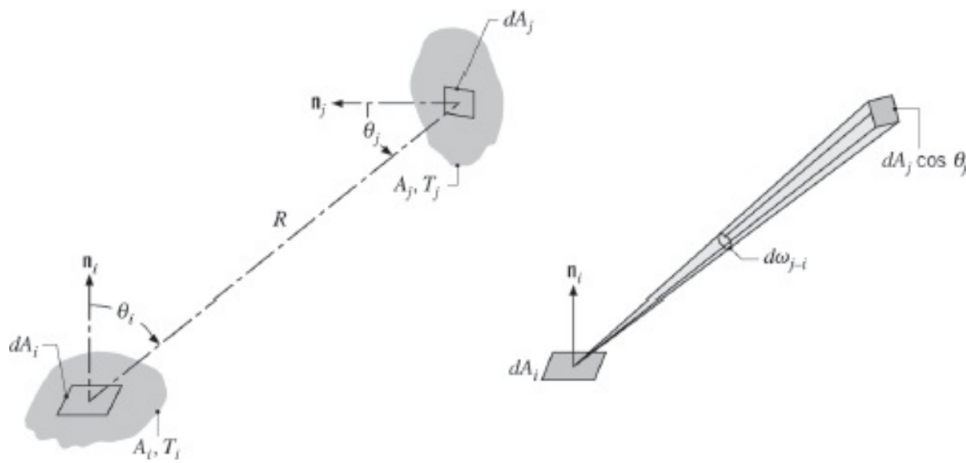
O modelo leva em consideração somente a troca de calor radiante entre as superfícies participantes do domínio, que seriam as faces que limitam o domínio computacional e as faces externas do painel. Para calcular a troca de calor radiante entre duas superfícies quaisquer é primeiramente calculado um fator de forma  $F_{ij}$ , definido como a fração da radiação que deixa a superfície  $i$  e é interceptada pela superfície  $j$  de acordo com as Equações 16 e 17.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (16)$$

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (17)$$

sendo  $A$  a área,  $\theta$  o ângulo formado em cada uma das superfícies e  $R$  o comprimento da linha que conecta as faces. Para melhor entendimento os parâmetros são indicados esquematicamente na Figura 8.

Figura 8 - Fator de forma associado a troca de calor por radiação entre elementos de superfície com áreas  $dA_i$  e  $dA_j$ .



Fonte: Incropera and Dewitt (2014).

Em uma cavidade fechada composta de  $N$  superfícies, é necessário um total de  $N^2$  fatores de forma. Esses fatores se combinam em uma matriz que é calculada uma única vez para um domínio computacional estático. Tendo todos os fatores de forma, e admitindo que as superfícies do domínio sejam cinzas e difusas, o que faz com que sua emissividade seja igual a sua absorvidade, o fluxo de energia radiante deixando uma superfície do domínio é calculada por

$$q_{sai,i} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) q_{entra,i} \quad (18)$$

onde  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T$  a temperatura. O calor que entra na superfície  $q_{entra,i}$  é dado pela somatória de todos os calores que saem das outras superfícies e chegam a  $i$ . O valor de  $q_{sai,i}$  entra como termo fonte na equação da energia, nas faces dos elementos que possuem tal condição.

### 3.1.2 Formulação numérica

Para solução das equações diferenciais parciais apresentadas na Seção 3.1.1 é usado o *software* de CFD Fluent da ANSYS® versão acadêmica 19.0, sendo essa uma poderosa e bem estabelecida ferramenta de implementação da metodologia dos volumes finitos com variáveis

co-localizadas. Como existem diferentes textos explicando os detalhes da implementação da metodologia dos volumes finitos no Fluent, neste trabalho a atenção é limitada para o processo de discretização e solução das equações.

### 3.1.2.1 Malha Computacional

A discretização espacial do domínio, ou geração de malha, produz um malha computacional, na qual as equações governantes são solucionadas. Para o caso, a malha é dividida em duas regiões, ou domínios computacionais. O domínio do ar é toda a região ao redor do painel, que é tratada como fluido. O domínio do painel é o módulo propriamente dito, tratado como sólido.

As malhas computacionais foram geradas usando o gerador de malha do ANSYS, chamado de *Ansys Meshing, software* capaz de gerar malhas de maneira automática com controle de moderado para alto do usuário sobre a geração. As malhas de ambos domínios são geradas como sendo um único corpo, dessa forma, a interface entre os domínios fica perfeitamente conectada, dispensando o uso de interpolação numérica entre os elementos das faces dos domínios.

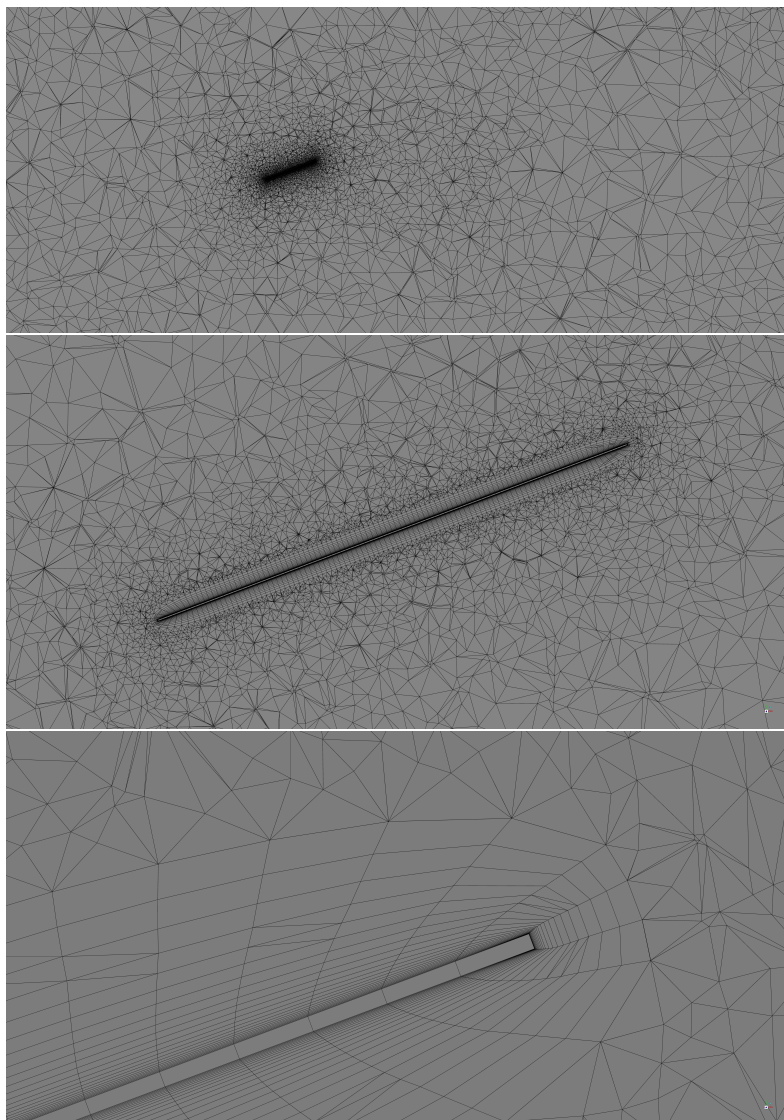
A malha é obtida com dois refinamentos volumétricos no em torno do painel e uma camada prismática de elementos para fazer jus ao critério de  $y^+ \approx 1$  do modelo de turbulência. A Figura 9 mostra um corte longitudinal da malha obtida em três diferentes aproximações para que seja possível ter uma visualização geral da malha.

### 3.1.2.2 Esquemas de Discretização

Para solucionar as equações diferenciais parciais na metodologia dos volumes finitos, é feita uma transformação dos diferenciais para equações algébricas. O passo de discretização das equações é feito em cada um dos elementos de malha para produção de uma relação algébrica que conecta o valor da variável do elemento ao valor das variáveis nos elementos vizinhos. O formato dessa relação é dependente do esquema de discretização utilizado, entre os vários disponíveis na literatura. Via de regra, quanto mais preciso e complexo um esquema de discretização é, menor sua estabilidade quanto a solução iterativa.

Tendo essa relação em mente, foram escolhidos para a discretização das equações o método dos mínimos quadrados para o gradiente, o método de diferenças centrais para interpolação da pressão, o método implícito de segunda ordem para interpolações temporais e o *upwind* de segunda ordem para os termos convectivos das equações da quantidade de movimento,

Figura 9 - Malha computacional associada ao caso do painel.



Fonte: elaborado pelo autor.

energia e turbulência. Mais detalhes sobre esses métodos podem ser consultados no próprio guia teórico do software (ANSYS-Inc, 2017).

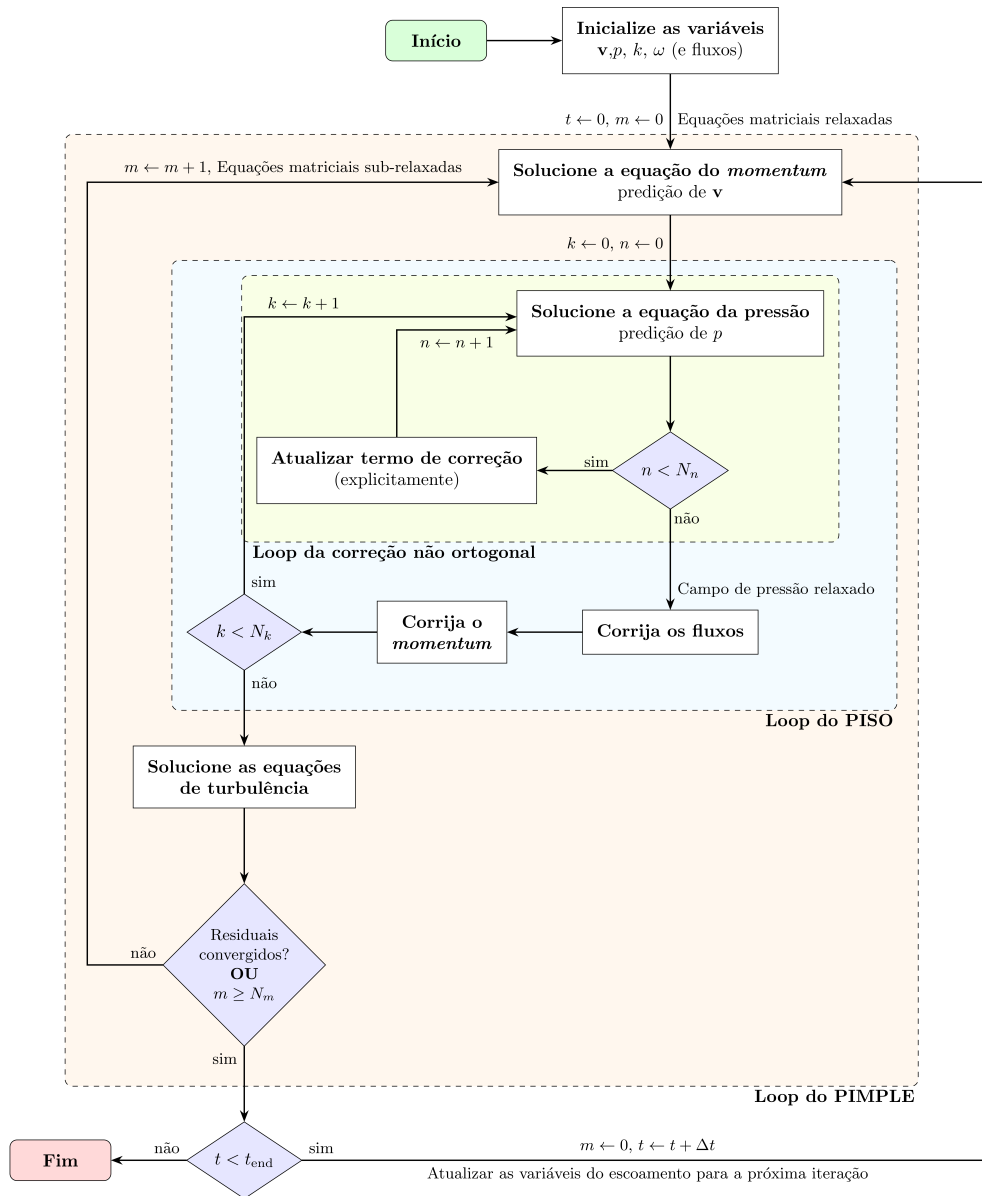
### 3.1.2.3 Estratégia de Solução

Para solução das equações diferenciais parciais governantes é aplicada uma técnica para reformular as equações de Navier–Stokes em termos da equação de quantidade de movimento e pressão, as quais são discretizadas e solucionadas sequencialmente. Mais detalhes sobre esse procedimento são encontrados em Patankar (1981).

Como resultado dessa separação, existem diferentes algoritmos capazes de acoplar a pressão com a velocidade, o usado no presente trabalho é o chamado PIMPLE, uma mistura

do SIMPLE com o PISO, onde para cada passo de tempo é calculado a solução de maneira iterativa até sua convergência. Essa característica faz com que a discretização temporal seja precisa e estável para números de Courant muito maiores que 1, quando usado um esquema de discretização temporal de segunda ordem com iterações suficientes em cada passo de tempo. A Figura 10 mostra um resumo da estratégia de solução utilizada pelo PIMPLE.

Figura 10 - Fluxograma simplificado da estratégia de solução do PIMPLE.



Fonte: Adaptado de Santos (2023).

A inicialização dos parâmetros  $\mathbf{v}$ ,  $p$  e  $T$  são feitas utilizando as condições ambientes no início do dia. Já a inicialização dos parâmetros  $k$  e  $\omega$  é feita de maneira empírica assumindo uma intensidade turbulenta de 5%.

Adotou-se um número máximo de 1000 iterações por passo de tempo juntamente aos critérios de convergência de  $10^{-3}$  para o balanço da equação da continuidade,  $10^{-4}$  para os resíduos das componentes de velocidades e termos do modelo de turbulência, e  $10^{-5}$  para o resíduo na equação da energia. Essa combinação faz com que a convergência seja alcançada em todos os passos de tempo, sendo preciso cerca de 200 iterações no primeiro passo de tempo, e cerca de 5 iterações em passos de tempo avançados na solução.

### 3.1.3 Estimativa de erros e confiabilidade da solução

A fim de assegurar a precisão e confiabilidade da solução numérica, é feita uma estimativa de erros dos resultados obtidos. Essa estimativa é feita em duas etapas, uma chamada de verificação e a outra chamada de validação. A verificação consiste em investigar a precisão matemática da solução das equações. Já a validação está ligada ao processo de ratificar o significado físico da solução.

A verificação é feita ao examinar a convergência temporal e espacial do modelo. Enquanto a validação é satisfeita ao comparar os resultados com modelos de maior confiabilidade, como resultados experimentais. A seguir é explicada como é feita a verificação do modelo, enquanto a validação é feita comparando os resultados de temperatura do painel com os resultados experimentais obtidos em Silva (2021), Seção 4.1.4.

#### 3.1.3.1 Índice de convergência da malha

A qualidade da solução obtida pela metodologia dos volumes finitos depende diretamente tanto da qualidade da malha, quanto do tamanho dessa malha, de forma que, quanto menor os elementos dessa malha, mais fiel à realidade será a solução do escoamento, porém maior será o custo computacional. Para garantir que a malha obtida seja suficiente para a resolução do problema, é feito um estudo de independência de malha utilizando a metodologia GCI proposta por Roache (1994) e recomendada por Celik *et al.* (2008).

Partindo das extrapolações de Richardson, Roache (1994) propôs um parâmetro chamado GCI (Grid Convergence Index) com a intenção de estimar o erro relacionado a discretização espacial do domínio físico de qualquer simulação numérica. Posteriormente, Celik *et al.* (2008) consolidaram essa metodologia definindo um passo a passo de como aplicá-la.

O método GCI é baseado nas extrapolações de Richardson, que, para duas malhas de diferentes tamanhos pode ser expressa pela Equação 19.

$$f_{\text{exact}} = f_{\text{fine}} + \frac{f_{\text{fine}} - f_{\text{coarse}}}{r^{\wp} - 1} + \text{H.O.T.} \quad (19)$$

onde:  $f_{\text{exact}}$  é o valor da solução exata,  $f_{\text{fine}}$  o valor da solução com a malha mais refinada,  $f_{\text{coarse}}$  a solução da malha menos refinada,  $r = h_{\text{coarse}}/h_{\text{fine}}$  é a razão de refino entre as malhas, calculado baseando-se no tamanho representativo dos elementos  $h$ ,  $\wp$  representa a ordem de convergência do modelo e H.O.T. são os termos de ordens maiores que, na região assintótica, tendem a 0.

Caso a ordem de convergência não for conhecida e a análise partir do pressuposto de que as malhas se encontram na região assintótica de convergência, a Equação 20 pode ser obtida, representando o erro da malha refinada em relação à solução exata (malha com infinitos elementos).

$$\text{GCI}_{\text{fine}} = \frac{F_s}{r^{\wp} - 1} \left| \frac{f_{\text{fine}} - f_{\text{coarse}}}{f_{\text{fine}}} \right| \quad (20)$$

onde  $\text{GCI}_{\text{fine}}$  representa o erro e  $F_s$  é um fator de segurança que depende da quantidade de malhas que estão sendo analisadas,  $F_s = 3$  para análise de duas malhas e  $F_s = 1,25$  para análise de três malhas. Caso seja desejado avaliar a malha menos refinada, deve-se utilizar a Equação 21.

$$\text{GCI}_{\text{coarse}} = \frac{F_s r^{\wp}}{r^{\wp} - 1} \left| \frac{f_{\text{fine}} - f_{\text{coarse}}}{f_{\text{fine}}} \right| = r^{\wp} \text{GCI}_{\text{fine}}. \quad (21)$$

Para que seja obtido o erro relacionado tanto da malha mais refinada quanto da menos refinada, é preciso conhecer a ordem de convergência da solução  $p$ . Portanto, é preciso uma expressão adicional para a ordem de convergência observada. Como sugerido por Celik *et al.* (2008), dados três diferentes tamanhos de malha, a ordem de convergência pode ser obtida de maneira iterativa pela Equação 22.

$$\wp = \frac{1}{r_{21}} \left| \ln |\varepsilon_r| + \ln \left( \frac{r_{21}^{\wp} - s}{r_{32}^{\wp} - s} \right) \right|, \text{ sendo } s = \begin{cases} 1 & \text{se } \varepsilon_r > 0 \\ -1 & \text{se } \varepsilon_r < 0 \end{cases} \quad (22)$$

onde  $\varepsilon_r = \frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}$  e os subíndices 1 a 3 indicam malha mais refinada a menos refinada.

Para verificação da simplificação H.O.T. = 0 e garantia que a análise se encontre na região assintótica é calculado o índice de convergência, definido por  $r_c = \text{GCI}_{\text{coarse}}^{21} / \text{GCI}_{\text{fine}}^{32}$ .

Caso  $r_c \approx 1$ , então as três malhas analisadas estão na região assintótica, e, portanto, a aproximação é válida.

### 3.1.3.2 Índice de convergência temporal

Em simulações transientes, o passo de tempo pode influenciar diretamente a precisão dos resultados, de modo que, quanto menor for o passo de tempo, mais preciso o resultado, porém, como o objetivo desse trabalho é simular o dia solar por completo e há limitação de poder computacional, é interessante que o passo de tempo da simulação seja o maior possível, sem grandes perdas em eficiência. Portanto, faz-se necessário analisar a influência desse parâmetro nos resultados de simulação.

A análise de convergência temporal é realizada utilizando a mesma metodologia GCI utilizada na independência da malha computacional, com a diferença que, agora o parâmetro  $h$  presente na razão de refino  $r$  da Equação 19 passa a ser o passo de tempo, e com isso, obtém-se um erro associado à discretização temporal.

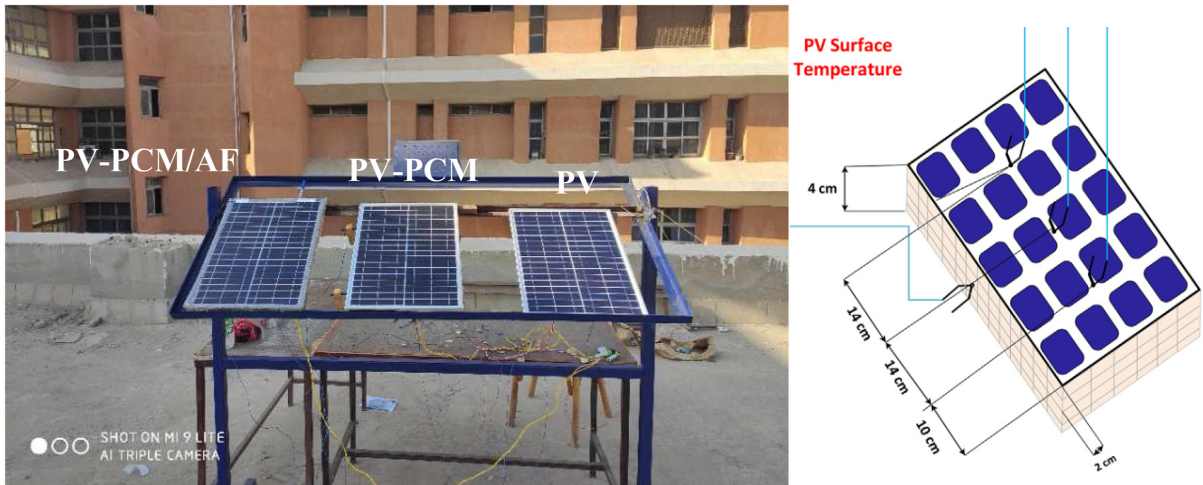
## 3.2 PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS ACOPLADOS A PCM

O modelo físico da simulação que engloba painel fotovoltaico acoplado a um PCM foi feito baseado no modelo experimental de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), já pensando na validação do modelo numérico proposto. A análise parte da construção do modelo numérico para reprodução do caso experimental numericamente e, posteriormente, comparação dos resultados obtidos.

### 3.2.1 Problema físico e modelo matemático

Para contextualizar o problema, é fornecida uma breve explicação do experimento realizado por Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022). O trabalho experimental teve como objetivo comparar o desempenho de três módulos fotovoltaicos nas condições ambientais locais em Banha, Egito. Um dos painéis foi acoplado a um PCM do tipo RT-42, um segundo foi acoplado ao mesmo PCM entremeadado a uma malha de alumínio a fim de aumentar a condutividade térmica do sistema, e o último sendo somente o painel PV original — isto é, sem a presença de qualquer sistema de resfriamento externo. A Figura 11 mostra uma foto de como foi realizado esse experimento, bem como o esquema de tomada de temperatura pelos termopares do tipo T.

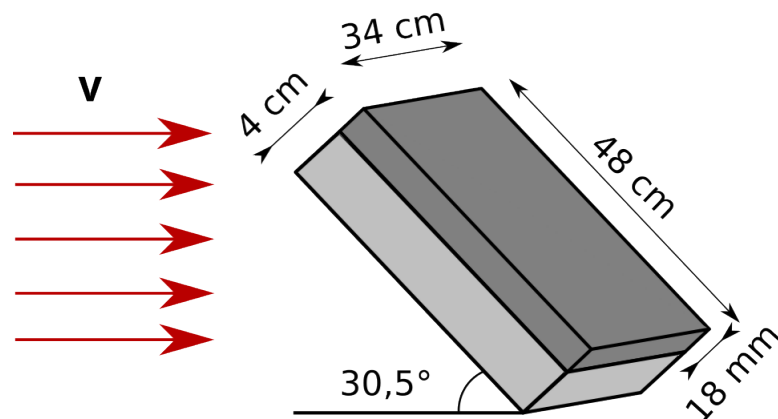
Figura 11 - Foto do experimento e esquema de tomada de temperatura.



Fonte: adaptado de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022).

Essa etapa busca reproduzir os resultados alcançados experimentalmente com o painel acoplado ao PCM puro. Para isso, como no caso anterior, simplificações geométricas são feitas a fim de minimizar a complexidade do problema sem perdas expressivas na representação do modelo físico e, conseqüentemente, dos resultados. As hastes e fixações relacionados a sustentação do painel e PCM são desprezadas, bem como a presença do solo e de outros painéis ao redor do painel fotovoltaico de interesse. Ademais, as camadas que compõem o painel são associadas em uma única camada com propriedades equivalentes. As propriedades do painel são assumidas como iguais às da Tabela 6. A Figura 12 mostra as dimensões do painel e do PCM.

Figura 12 - Esquema do painel e o PCM.



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim como no primeiro modelo, interferências externas advindas de outras estruturas e da própria camada limite do solo são desprezadas. E, por conta dos autores do trabalho experimental (Yousef; Sharaf; Huzayyin, 2022) não fornecerem informações sobre a velocidade

do vento, essa é admitida como constante e igual a média em magnitude e direção durante o dia do experimento no local, obtida através do *software* de análise climática *Open-Meteo* (Zippenfenig, 2023).

### 3.2.1.1 Equações governantes

Com a intenção de obter a temperatura das células fotovoltaicas ao longo do dia com condições variáveis de temperatura ambiente e irradiação solar, é necessário que o modelo seja transiente. Como a magnitude da velocidade igual a 2,65 m/s é seguro assumir como hipótese o ar como fluido incompressível acoplado a aproximação de Boussinesq para considerar a convecção natural. Porém, durante testes preliminares foi observado que essa hipótese trazia instabilidades numéricas para o modelo, fazendo com que o ar fosse assumido como compressível com a hipótese de gás ideal. O domínio fluido do ar é, então, descrito pelo conjunto de equações de balanço de massa (Equação 23), quantidade de movimento (Equação 24) e energia (Equação 25) seguindo a hipótese do meio contínuo da mecânica dos fluidos (Moukalled; Darwish; Mangani, 2016).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (23)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \mu \left[ \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] + \rho \mathbf{g}, \quad (24)$$

$$c_p \left[ \frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} T) \right] = k_T \nabla^2 T + \frac{Dp}{Dt} + \mu \Phi - \frac{2}{3} \mu \Psi + \dot{q}_V, \quad (25)$$

onde  $\Phi$  e  $\Psi$  são os termos de dissipação viscosa, cujo valor é muito próximo de zero para o caso de baixas velocidades, conforme Moukalled, Darwish and Mangani (2016). As equações governantes são complementadas pela equação de estado de gás ideal, dada por

$$\rho = \frac{p}{\Re T} \quad (26)$$

onde  $\Re$  é a constante dos gases ideais para o ar.

Na parte sólida do problema (domínio painel) a Equação 4 é válida, assim como as considerações de sólido homogêneo e isotrópico admitidas na Seção 3.1.1.1.

No que diz respeito a região do PCM, essa é tratada de forma especial, já que sofre mudança de fase ao longo do dia. A metodologia usada para descrever esse fenômeno é a proposta por Swaminathan and Voller (1992). Em sua proposição, a região mole, composta por

uma mistura líquido/sólido, é tratada como um meio poroso de porosidade igual a fração líquida, onde termos de dissipação viscosa são adicionados para representar a perda de pressão causada pela presença do material sólido. A interface é uma região onde a porosidade cai de 1 para 0 conforme o material se solidifica. Quando o material está completamente solidificado em uma célula, sua porosidade é nula, assim como sua velocidade. Na equação da energia é levado em consideração uma entalpia  $H$ , cujo valor é a soma da entalpia sensível  $H_s$  com a entalpia do calor latente  $\Delta H$ , de modo que

$$H = H_s + \Delta H, \quad (27)$$

sendo

$$H_s = H_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT, \quad (28)$$

onde  $H_{\text{ref}}$  é o valor da entalpia de referência.

A fração líquida  $\beta$  é definida como

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_f, \\ 1 & \text{se } T > T_f. \end{cases} \quad (29)$$

onde  $T_f$  é a temperatura de mudança de fase. A temperatura de mudança de fase é única porque o PCM é admitido como uma substância pura.

O calor latente  $\Delta H$  pode agora ser escrito em termos da entalpia de mudança de fase do material,  $L_h$ , como

$$\Delta H = \beta L_h. \quad (30)$$

A equação da energia em termos da entalpia usada em problemas de mudança de fase é dada por

$$\rho \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}H) \right] = k_T \nabla^2 T, \quad (31)$$

sendo a solução da temperatura essencialmente uma interação entre a equação da energia (Equação 31) e a fração líquida (Equação 29).

Quanto à equação da quantidade de movimento é adicionado dois termos, um que diz respeito à aproximação de Boussinesq para o empuxo e outro de dissipação para que a velocidade seja nula à ocorrência da solidificação,

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \alpha (T - T_{\text{ref}}) + \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + 0,001} A_{\text{mole}} \mathbf{v}, \quad (32)$$

onde  $A_{\text{mole}}$  é a constante da região mole, que determina a amplitude da transição da velocidade de sólido para líquido. Valores altos fazem com que a transição aconteça de maneira mais veloz. O acréscimo de 0,001 no denominador é somente para prevenir divisão por zero. A constante da região mole é admitida como  $10^5$ , valor padrão do *software* e recomendado por Prieto and González (2016) por ser suficiente para vários materiais de mudança de fase.

Além disso, diferentemente do fluido ar, o PCM é admitido como sendo incompressível em regime laminar, devido as baixíssimas velocidades induzidas pela convecção natural.

### 3.2.1.2 Modelo de turbulência

Assim como feito na Seção 3.1.1.2, é razoável assumir que o escoamento do ar seja turbulento. Portanto, pelas mesmas justificativas é escolhido o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST para considerar as flutuações quando calculadas as equações governantes em termos dos valores médios, conforme descrito em 3.1.1.2.

### 3.2.1.3 Domínio computacional e condições de contorno

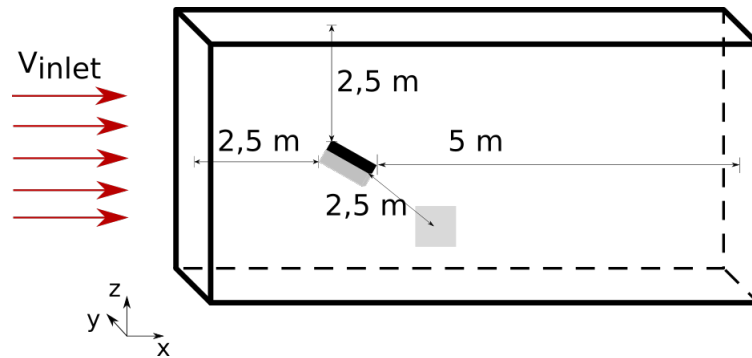
Como os elementos de malha próximos aos limites do domínio computacional são grandes e, conseqüentemente, a economia ao fazer um estudo de sensibilidade de suas dimensões não fosse tão expressiva, decidiu-se por não ser feito tal estudo no caso com PCM. Dessa forma, baseado nas recomendações de Franke *et al.* (2011) foram definidos as dimensões do domínio computacional como ilustrado na Figura 13. Sendo que as medidas nos eixos  $y$  e  $z$  são simétricas.

Conforme Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), o problema é composto pelo conjunto painel e PCM inclinados de  $30,5^\circ$  Sul, envolto pelo domínio ar. O ar tem velocidade de 2,65 m/s, conforme média diária local (Zippenfenig, 2023), sempre na direção de Norte para Sul, e temperatura espacialmente constante, mas que varia temporalmente. As paredes laterais do domínio tem condições de simetria, e na saída são impostas condições de pressão e temperatura ambiente. A Figura 14 ilustra as condições de contorno adotadas.

As condições de não deslizamento e acoplamento dos fluxos de energia são atribuídas às superfícies de contato entre o escoamento e as paredes do PV e do PCM. Já a irradiação solar incidente é inserida como uma fonte de calor na superfície de contato entre o painel e o ar, subtraindo a parcela da energia solar convertida em energia elétrica pelo painel para cada instante de tempo. Esse valor se soma ao  $q_{entra,i}$  na Equação 18 somente na superfície de contato entre o painel e o ar.

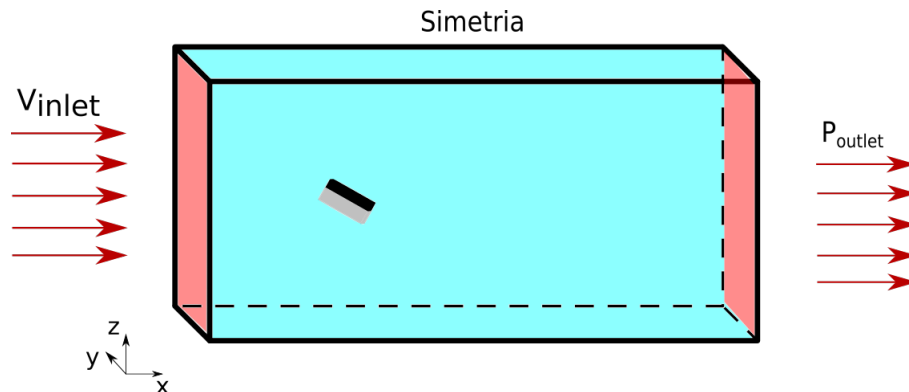
O intervalo de tempo entre cada valor das condições de contorno transientes é de 30 minutos, sendo iniciada às oito da manhã e terminada às quatro horas da tarde. As variações temporais das condições ambientes de Banha, Egito no dia 19/07/2020 são fornecidas pelos autores e estão explicitadas na Figura 15.

Figura 13 - Domínio Computacional.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 - Domínio físico e condições de contorno.

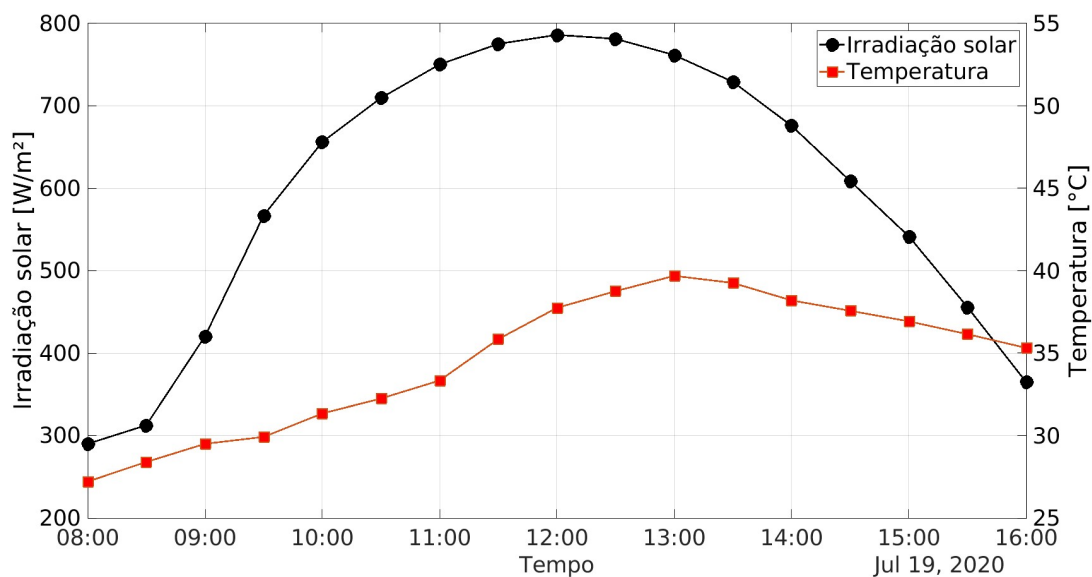


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 3.2.1.4 Modelo de radiação

O modelo de radiação utilizado para o caso com PCM acoplado ao painel foi o mesmo que aquele usado no caso anterior, sendo válida portanto as explicações contidas na Seção 3.1.1.4 para a Seção atual também. Tanto o painel quanto o PCM são admitidos como opacos, portanto somente irradiam e absorvem radiação em suas paredes externas, trocando calor com as faces dos limites do domínio ar.

Figura 15 - Variação das condições de contorno.



Fonte: Adaptado de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022).

### 3.2.2 Formulação numérica

Para solução das equações diferenciais parciais apresentadas na Seção 3.2.1.1 é utilizado o *software* de código aberto OpenFOAM<sup>®</sup>. Que, como o Fluent implementa a metodologia dos volumes finitos com variáveis co-localizadas. Foi optado pela mudança de *software* pelo fato do OpenFOAM ser livre e, portanto, dar liberdade para seu uso em vários ambientes, sem preocupação com licença. Os casos foram solucionados com o auxílio do supercomputador Santos Dumont, de responsabilidade do Laboratório Nacional de Computação Científica – LNCC. Assim como anteriormente, a atenção do texto é limitada para o processo de discretização e solução das equações.

#### 3.2.2.1 Malha Computacional

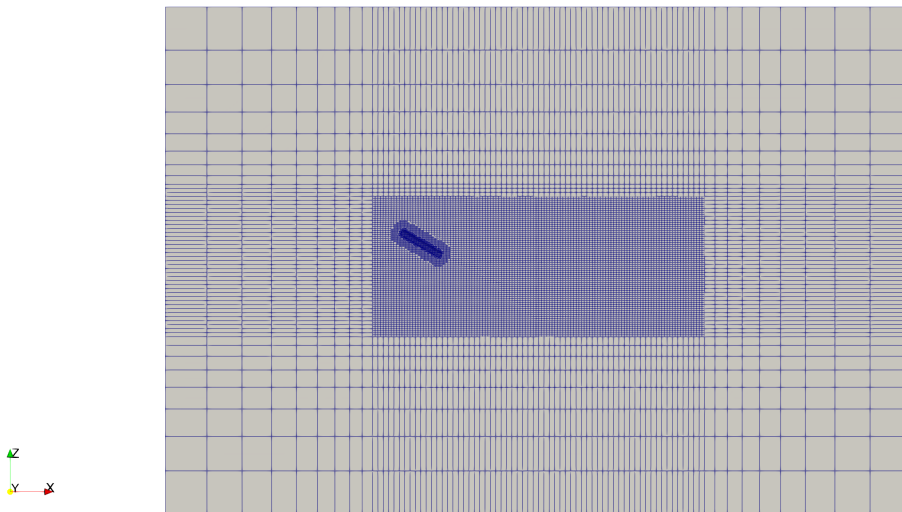
A malha computacional é dividida em três regiões ou domínios computacionais. O domínio do ar, fluido presente na região que envolve o conjunto painel e PCM. O domínio do painel, tratando o módulo como um sólido. E, por fim, o domínio do PCM, que tem tratamento espacial de fluido e sólido por conta da mudança de fase, como explicado na Seção 3.2.1.1.

As malhas computacionais foram geradas utilizando o gerador de malha snappyHexMesh que vem juntamente com o OpenFOAM. O snappyHexMesh é um gerador automático de malhas, cuja característica principal é a dominância de elementos hexaédricos. Elementos poliédricos aparecem em regiões de difícil encaixe de elementos hexaédricos, geralmente na transição

entre diferentes níveis de refinamento, e elementos tetraédricos aparecem na camada prismática feita próximas às paredes. Em geral, malhas cujos elementos são hexaédricos possuem maior qualidade, com um número de elementos menor, tendendo a acelerar os cálculos.

Apesar dos domínios serem solucionados de maneira segregada, a geração das malhas é feita como sendo um corpo único, fazendo com que a interface seja perfeitamente conectada, dispensando interpolação numérica. A malha é obtida com um refinamento volumétrico ao em torno do painel, refinamentos nas faces do painel e PCM e refinamento externo dado pela distância relativa ao PCM. A Figura 16 mostra uma visão geral da malha. A camada prismática é feita para atender ao critério de  $y^+ \approx 1$  do modelo de turbulência. A Figura 17 mostra duas vistas aproximadas, mostrando os refinamentos e a camada prismática.

Figura 16 - Vista geral da malha.

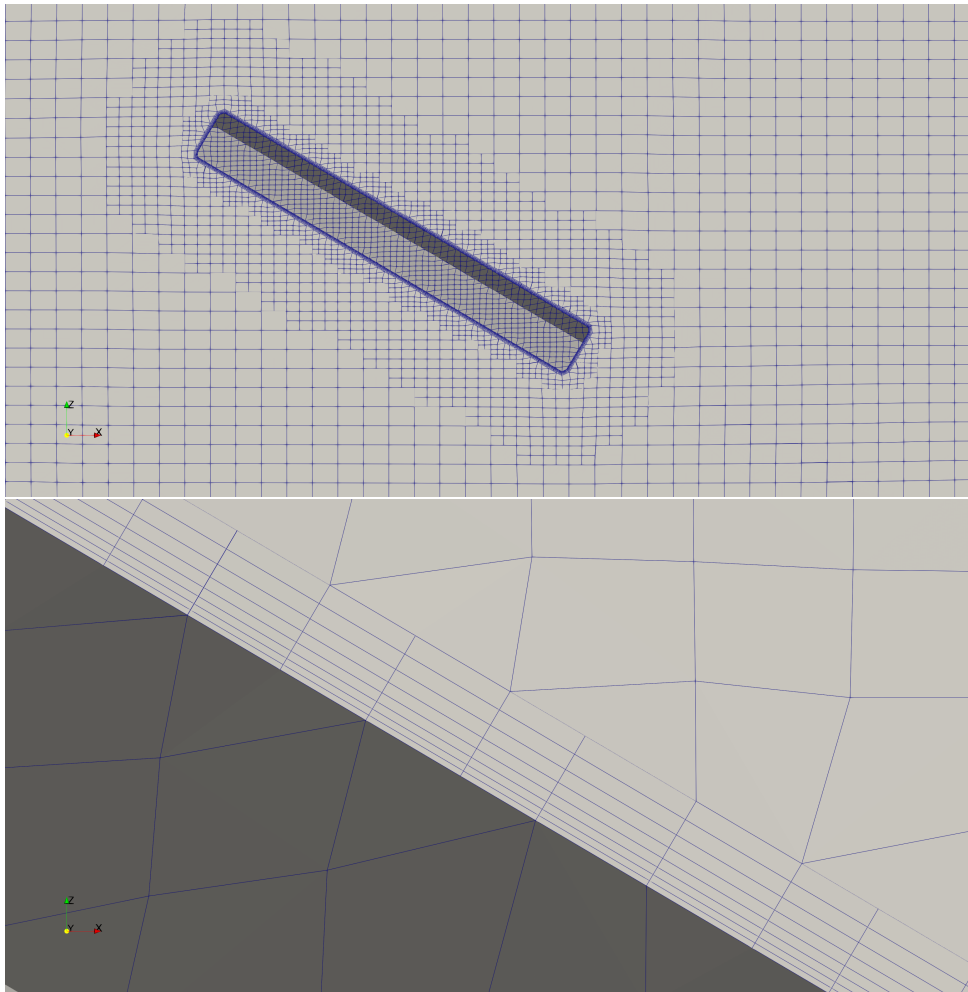


Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.2.2 Esquemas de Discretização

Quanto à discretização das equações, foram utilizados para os gradientes: mínimos quadrados para as componentes da equação da turbulência  $k$  e  $\omega$  e o Teorema de Green para a velocidade, pressão, densidade e entalpia. Para a interpolação dos termos advectivos foi utilizado o *upwind* de segunda ordem, para a discretização temporal o esquema de Euler e o método das diferenças centrais para o gradiente normal a superfície nos termos de difusão.

Figura 17 - Vista aproximada da malha.



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.2.3 Estratégia de Solução

O solucionador utilizado para solução das equações do problema é o *chtMultiRegionFoam*, sendo esse da categoria de transferência de calor para múltiplas regiões, fluidas ou sólidas. Com uma reformulação da equação da pressão para inclusão da velocidade e densidade em um escoamento compressível, Pantankar (1971) fez com que o algoritmo baseado na pressão SIMPLE fosse funcional para solução de escoamentos a qualquer velocidade (Moukalled; Darwish; Mangani, 2016). Portanto, o algoritmo de solução das equações continua sendo o PIMPLE, para que o número de Courant possa ser muito maior que 1, acelerando a solução das equações.

Como o algoritmo de convergência ainda não foi implementado no OpenFOAM para o solucionador utilizado, foi preciso definir como critério de parada somente o número de iterações por passo de tempo. Observando a convergência dos resíduos das equações foi definido o número

de 20 iterações por passo de tempo. Com isso, é esperado maiores erros numéricos em resultados nos primeiros passos de tempo da simulação, devido à não convergência da solução. O que não é grande problema, já que os resultados mais interessantes e relevantes para o escopo do trabalho estão no intervalo entre 10 e 15 horas, onde o nível de irradiação solar é expressivo.

### **3.2.3 Estimativa de erros e confiabilidade da solução**

Como discutido na Seção 3.1.3 para assegurar a precisão e a confiabilidade da solução numérica é preciso verificar e validar a solução. A verificação é feita da mesma maneira como feito anteriormente (Seção 3.1.3), avaliando o índice de convergência da malha e o índice de convergência temporal. Já a validação é a comparação dos resultados obtidos com os resultados experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022).

### **3.2.4 Critério de seleção do PCM e estimativa da espessura efetiva**

Conforme mencionado na revisão bibliográfica (Seção 2), soluções de arrefecimento de painel fotovoltaicos que utilizam materiais de mudança de fase necessitam de cuidados quanto à seleção do PCM, cuja temperatura de mudança de fase deve ser adequada às condições climáticas locais, e quanto à espessura do mesmo, para que este tenha capacidade térmica suficiente para absorver o calor excedente do painel fotovoltaico ao longo do dia.

No que diz respeito à seleção do material de mudança de fase, Ma, Li and Zhao (2019) estabeleceram um critério de escolha que considera a temperatura ambiente média noturna de um dia de verão e a temperatura média do painel durante um dia de inverno ensolarado. De acordo com esse critério, o PCM deve ter uma temperatura de mudança de fase menor que a temperatura do painel em um dia de inverno e maior que a temperatura ambiente noturna em um dia de verão. Dessa forma é assegurado que o PCM regule a temperatura do painel de maneira efetiva durante todo o ano.

Para a região onde foram conduzidos os experimentos de Silva *et al.* (2022) (Aparecida do Taboado, MS, Brasil), a temperatura ambiente média de verão noturna é de 22 °C, enquanto a temperatura média do painel durante um dia ensolarado de inverno é de 45 °C. Portanto, de acordo com o critério de seleção de PCM estabelecido, a temperatura de mudança de fase deve ser entre 22 e 45 °C.

Já para a região onde foram conduzidos os experimentos de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022) (Banha, Egito), a temperatura ambiente noturna é de 25 °C, enquanto a temperatura

média do painel durante um dia ensolarado de inverno é de 45,6 °C. Portanto, a temperatura de mudança de fase do PCM para tais condições deve ser entre 25 e 45,6 °C. O PCM parafínico escolhido pelos autores é o RT-42 da Rubitherm<sup>®</sup>, com temperatura de mudança de fase de 40,5 °C, atendendo o critério estabelecido.

Já para as condições experimentais de Silva *et al.* (2022), foram selecionados dois bioPCMs, o ácido láurico (LA) e a mistura eutética de ácido láurico e palmítico com proporções mássicas de 69 e 31% (LA:PA), respectivamente, sendo o primeiro com temperatura de mudança de fase igual a 43,5 °C e segundo 35,2 °C. A tabela 8 mostra as propriedades termofísicas utilizadas dos três PCMs citados.

Tabela 8 - Propriedades termofísicas dos PCMs: RT-42; ácido láurico (LA); e da mistura eutética de ácido láurico e ácido palmítico (LA:PA).

Propriedades	RT-42	LA	LA:PA
Proporção mássica [%]	–	–	69:31
Temperatura de mudança de fase [°C]	40,5	43,5	35,2
Densidade (fase sólida) [kg/m <sup>3</sup> ]	880	940	925,7
Calor específico [kJ/kg·K]	2,0	1,95	1,91
Condutividade térmica [W/m·K]	0,2	0,45	0,37
Viscosidade absoluta [kg/m·s]	0,0235	0,0060	0,0065
Coefficiente de expansão térmica [K <sup>-1</sup> ]	0,0005	0,0094	0,0069
Calor latente [kJ/kg]	165,0	187,2	166,3

Fonte: adaptado de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), González-Peña *et al.* (2020), Bayram, Aksöz and Maraşlı (2014), Gao *et al.* (2022a) e Tunçbilek *et al.* (2005).

Quanto ao cálculo da espessura necessária para que o PCM seja capaz de absorver o calor excedente do painel ao longo do dia, foi utilizado o método proposto por Savvakis and Tsoutsos (2021). Esse método parte do pressuposto que todo o calor que não é transferido para o meio ambiente pela parte superior do painel fotovoltaico é transferido para o PCM.

Dessa forma, a espessura do PCM  $d_{PCM}$  pode ser determinada por:

$$d_{PCM} = \frac{E_c}{\rho A [c_p (T_f - T_{inicial}) + L_h + c_p (T_{final} - T_f)]}, \quad (33)$$

onde  $T_{inicial}$  e  $T_{final}$  são as temperaturas médias inicial e desejada final do painel. O valor da temperatura inicial é assumido como a temperatura ambiente no nascer do sol e quanto a temperatura final é assumido 50 °C para o painel acoplado ao bioPCM LA e 40 °C para o LA:PA. A energia térmica absorvida pelo PCM durante o período analisado ( $E_c$ ), é calculada baseada na

potência máxima transferida pelo painel ao PCM:

$$E_c = \frac{t}{R_p} \sum_{i=1}^N P_c(t_i), \quad (34)$$

onde  $R_p$  é o período de referência (igual a um dia solar) e  $P_c$  é a potência térmica transferida para o PCM, expressa como:

$$P_c = q_{G_i} - q_{\text{conv f}} - q_{\text{rad f}} - P_{PV}, \quad (35)$$

onde  $q_{G_i}$  é o potência térmica proveniente da irradiação solar e  $q_{\text{conv f}}$  e  $q_{\text{rad f}}$  representam as trocas de calor entre a parte frontal do painel com o ambiente por meio da convecção e radiação, respectivamente e  $P_{PV}$  a potência elétrica produzida pelo painel.

As espessuras estimadas considerando as condições ambientes dos experimentos de Silva *et al.* (2022) foram 2 cm e 2,4 cm para os bioPCMs ácido láurico e LA:PA, respectivamente. É importante notar que para estimar essas espessuras é necessário conhecer a temperatura do painel fotovoltaico. Como, a princípio, a temperatura do painel é desconhecida para o sistema PV/PCM, a temperatura experimental do painel sem o PCM acoplado foi utilizada para essa estimativa.

### 3.3 EXPLORANDO A NECESSIDADE DO DOMÍNIO AR

Ao realizar a revisão bibliográfica dos trabalhos envolvendo painéis fotovoltaicos acoplados a materiais de mudança de fase, um fato curioso foi notado, nenhum dos trabalhos que propõem modelos numéricos, independentemente de sua complexidade, efetivamente calcula o escoamento de ar ao em torno do sistema PV/PCM. Todos os trabalhos assumem que, as relações empíricas para o cálculo de um coeficiente de troca de calor por convecção são suficientes para prever a quantidade de calor trocada por convecção. E, pela falta de um trabalho que justifique tal suposição, foi decidido por utilizar o modelo desenvolvido na Seção 3.2 para realizá-la.

Para explorar a necessidade do cálculo do escoamento de ar em modelos numéricos envolvendo sistemas PV/PCM foram utilizados os resultados provenientes do modelo desenvolvido na Seção 3.2 para comparação com resultados provenientes do mesmo modelo excluindo o domínio ar do mesmo, substituindo, então, a necessidade do cálculo do escoamento de ar por equações empíricas para o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção.

### 3.3.1 Cálculo empírico do coeficiente de transferência de calor por convecção

A troca de calor convectiva  $q_{\text{conv}}$  que ocorre entre o ar e as faces do sistema PV/PCM é descrita pela lei de Newton do resfriamento

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} (T - T_{\text{amb}}), \quad (36)$$

onde  $h_{\text{conv}}$  é o coeficiente de troca de calor por convecção e  $T_{\text{amb}}$  é a temperatura ambiente.

O coeficiente de transferência de calor para a parte frontal do painel  $h_{\text{conv f}}$  foi determinado utilizando o efeito combinado da convecção forçada  $h_f$  com a convecção natural  $h_{nf}$ , de acordo com a relação (Armstrong; Hurley, 2010):

$$h_{\text{conv f}} = \sqrt[3]{h_f^3 + h_{nf}^3}, \quad (37)$$

onde o coeficiente de convecção forçada é calculado por:

$$h_f = \frac{\text{Nu}_f k_{\text{ar}}}{L}, \quad (38)$$

com  $k_{\text{ar}}$  representando a condutividade térmica do ar e  $\text{Nu}_f$  o número de Nusselt para convecção forçada em placas planas sob fluxo de calor constante (Çengel, 2002), dado por:

$$\text{Nu}_f = \begin{cases} 0.906 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} & \text{para } \text{Re} < \text{Re}_{tr}, \\ 0.0385 \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{1/3} & \text{para } \text{Re} \geq \text{Re}_{tr}, \end{cases} \quad (39)$$

onde  $\text{Re}$  é o número de Reynolds e  $\text{Pr}$  o número de Prantdl. O número de Reynolds de transição adotado foi de  $\text{Re}_{tr} = 5 \cdot 10^5$ . Vale ressaltar que as propriedades do ar foram calculadas baseadas de temperatura de filme.

O coeficiente de convecção natural para a superfície frontal do painel foi calculado como descrito em Silva *et al.* (2022) e Bejan and Kraus (2003)

$$h_{nf} = \frac{\text{Nu}_{nf} k_{\text{air}}}{L}, \quad (40)$$

onde  $\text{Nu}_{nf}$  é dado por (Bejan; Kraus, 2003; Fujii; Imura, 1972)

$$\text{Nu}_{nf} = 0.14 \left[ (\text{Gr Pr})^{1/3} - (\text{Gr}_{cr} \text{Pr})^{1/3} \right] + 0.56 (\text{Gr}_{cr} \text{Pr} \cos \theta)^{1/4}, \quad (41)$$

$Gr_{cr}$  é o número de Grashof crítico e  $\theta$  é o complemento do ângulo de inclinação do painel. Para um ângulo de inclinação de  $20^\circ$  ( $\theta = 70^\circ$ ),  $Gr_{cr} = 1 \cdot 10^6$ .

No que diz respeito ao coeficiente de troca de calor por convecção na parte posterior do sistema PV/PCM  $h_{convp}$ , foi utilizado um coeficiente de efeito combinado entre convecção forçada  $h_f$  e convecção natural  $h_{np}$

$$h_{convp} = \sqrt[3]{h_f^3 + h_{np}^3}, \quad (42)$$

onde  $h_f$  é calculado pelas Equações 38 e 39 e  $h_{np}$  é calculado pelas relações (Fujii; Imura, 1972; Bejan; Kraus, 2003):

$$h_{np} = \frac{Nu_{np} k_{air}}{L}, \quad (43)$$

$$Nu_{np} = 0.56 (Gr Pr \cos \theta)^{1/4}, \quad (44)$$

em que,  $Nu_{np}$  é o número de Nusselt para convecção natural na parte posterior de uma superfície plana inclinada. Quantos aos coeficientes de convecção nas laterais do sistema PV/PCM, no PV são iguais às da parte superior do painel e no PCM são iguais às da parte inferior do PCM, essa simplificação foi adotada já que a espessura do painel e do PCM são muito menores que seu comprimento e largura.

É importante ressaltar que, embora o modelo de radiação adotado anteriormente não faça mais sentido, já que não existem as superfícies que limitam o domínio ar para troca de calor, o efeito desse tipo de troca de calor é levado em consideração a partir da lei de Stefan-Boltzmann:

$$q_{rad} = \epsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4), \quad (45)$$

onde  $q_{rad}$  é o calor trocado por radiação,  $\epsilon$  é a emissividade das superfícies do sistema PV/PCM e  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Assim como feito na Metodologia (Seção 3) o texto desta Seção é dividido em duas partes, a Seção 4.1 diz respeito a simulação do painel sem a presença de PCM e a segunda, Seção 4.2, diz respeito aos resultados do modelo considerando PCM acoplado à parte posterior do painel. Além disso, a Seção 4.3 diz respeito à análise da necessidade de se calcular o escoamento de ar em sistemas PV/PCM; e a Seção 4.4 analisa o desempenho térmico de um sistema PV/bioPCM proposto para as condições de Aparecida do Taboado, MS, Brasil.

### 4.1 PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

#### 4.1.1 Domínio computacional

O modelo numérico CFD desenvolvido para predição da temperatura de painéis fotovoltaicos é primeiramente verificado quanto à influência do tamanho do domínio computacional, analisando, de maneira independente, as quatro dimensões domínio  $l_u$ ,  $l_d$ ,  $h$  e  $b$ , representadas na Figura 5. Nessa análise de sensibilidade foram comparados os perfis de temperatura ao longo da face superior do painel. Os resultados se encontram na Figura 18.

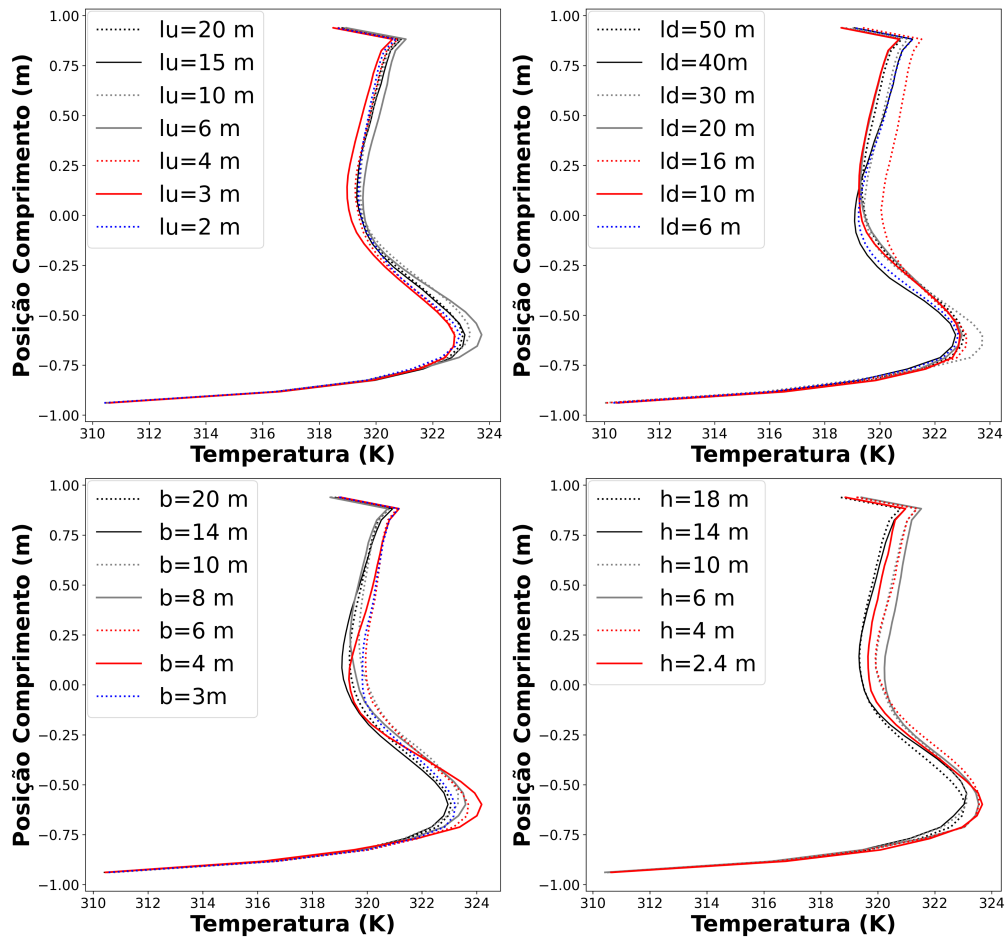
Considerando o resultado do maior domínio como referência, é possível observar pequenos desvios do perfil de temperatura para todos as dimensões analisadas. Para a escolha da dimensão do domínio, fez-se um cálculo considerando valores pontuais no centro dos elementos de malha do painel, dessa forma foi possível escolher a dimensão do domínio para cada uma das variáveis. Por fim, adotou-se os valores de  $l_u = 10$  m,  $l_d = 20$  m,  $b = 8$  m e  $h = 6$  m.

#### 4.1.2 Malha computacional

No que diz respeito à análise de sensibilidade de malha, essa foi realizada em regime permanente para as condições ambientais de Aparecida do Taboado, Mato Grosso do Sul, em 8 de dezembro de 2021 às 12 horas, por ser um ponto representativo onde condições como irradiação solar e temperatura ambiente são altas. Foram comparados os resultados de temperatura média do painel para três diferentes malhas utilizando a metodologia GCI. Os resultados são mostrados na Tabela 9.

Como a incerteza das malhas são extremamente pequenas, optou-se pela malha 3, composta de 610,694 mil elementos, já que, por ser a menor malha, implica em um menor custo computacional. É importante ressaltar que os parâmetros de qualidade das malhas analisa-

Figura 18 - Perfis de temperatura ao longo da face superior do painel para análise de sensibilidade das dimensões do domínio.



Fonte: elaborado pelo autor.

das foram mantidos iguais, pois o objetivo é analisar somente a influência da quantidade de elementos.

#### 4.1.3 Passo de tempo

Com a malha escolhida, foi realizada a análise de passo de tempo da simulação. Para tal, foi utilizada a metodologia GCI comparando os resultados das temperaturas médias do painel obtidas para três diferentes passos de tempo, simulando um dia completo, do nascer ao pôr do sol. Foram calculados os GCI a cada hora do dia, sendo adotado o de maior valor como referência para o erro associado à discretização temporal. A Tabela 10 explicita os resultados do maior valor de GCI, o qual ocorre às 13 horas.

Observando o valor da incerteza numérica relacionado ao passo de tempo, pode-se inferir que esta é extremamente baixa — ou seja, para os valores de passo de tempo analisados sua influência nos resultados é baixa o suficiente para que seja factível escolher o maior deles, sendo,

Tabela 9 - *Grid Convergence Index* (GCI) para malha espacial, valores relativos às 13h.

	<b>Malha 1</b>	<b>Malha 2</b>	<b>Malha 3</b>
Número de elementos	4880734	2038337	610694
Tamanho representativo ( $h$ [mm])	112	150	224
Razão de refino ( $r$ )	-	1,34	1,49
Temperatura média ( $T$ [°C])	45,76	45,78	45,85
GCI	0,02%	0,06%	0,25%

$$r_c = 1,0003$$

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10 - *Grid Convergence Index* (GCI) para passo de tempo, valores relativos às 13h.

	<b>Passo de tempo 1</b>	<b>Passo de tempo 2</b>	<b>Passo de tempo 3</b>
Passo de tempo ( $h$ [s])	0,01	0,1	0,5
Razão de refino ( $r$ )	-	10	5
Temperatura média ( $T$ [°C])	46,8996	46,9000	46,9067
GCI	0,00003%	0,0013%	0,0190%

$$r_c = 1,0000$$

Fonte: elaborado pelo autor.

portanto, igual a 0,5 s. Cabe a observação de que foram testados valores de passo de tempo maiores que 0,5 s, porém, devido as variações na velocidade de entrada no domínio, houve instabilidade da solução.

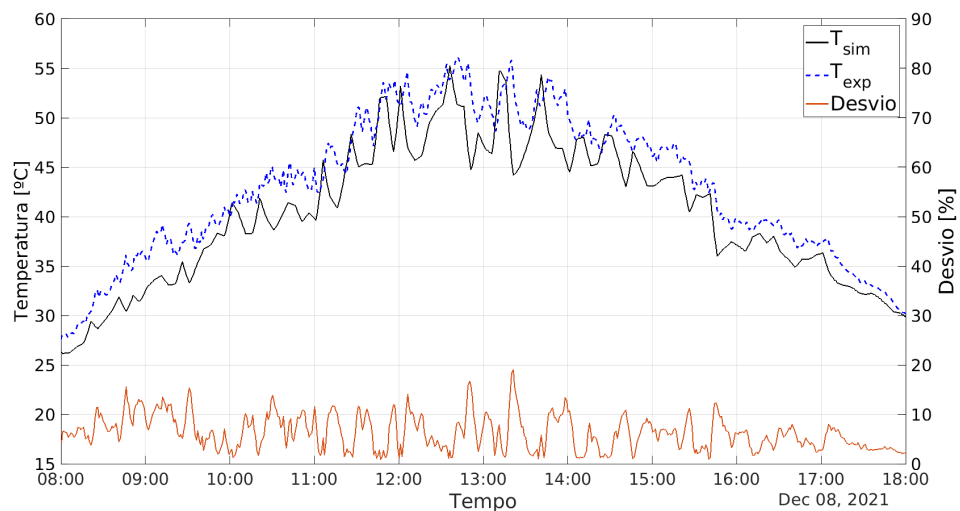
Ademais, o erro de discretização da solução numérica é dado pela combinação do erro de discretização espacial com o erro de discretização temporal. No caso, escolhendo a malha de 600 mil elementos em combinação com o passo de tempo de 0,5 segundos, é estimado que o erro de discretização não passe de 0,3%.

#### 4.1.4 Validação

Após concluída a verificação do modelo numérico, é preciso validá-lo — isto é, comparar os resultados de interesse com um modelo de maior confiabilidade. Tendo como base os experimentos de Silva *et al.* (2022), foram comparadas as médias de oito temperaturas medidas em pontos específicos do painel, conforme feito experimentalmente via termopares. O dia 8 de dezembro de 2021 foi especialmente selecionado para tal comparação por ser um dia quente sem a presença de nuvens, tendo em vista que a maior preocupação do trabalho é com a obtenção

de altas temperaturas no módulo fotovoltaico. Os resultados da temperatura média do painel experimentais  $T_{exp}$  e numéricos  $T_{sim}$ , bem como os desvios absolutos entre eles são mostrados na Figura 19.

Figura 19 - Média das temperaturas do painel obtidas da simulação numérica  $T_{sim}$  e experimentalmente  $T_{exp}$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

O desvio médio entre as temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente é igual a 6,51%, sendo o máximo desvio de 19% obtido às 13h21. Visto que o erro de discretização é da ordem de 0,3%, é provável que os desvios em relação ao modelo experimental sejam causados pelas simplificações e hipóteses adotadas, bem como erros experimentais. Contudo, é possível afirmar que o modelo numérico foi validado, já que os resultados possuem sentido físico, se aproximando em tendência e magnitude dos valores experimentais.

#### 4.2 PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS ACOPLADOS A PCM

No que diz respeito ao modelo numérico CFD desenvolvido para predição da temperatura de um painel fotovoltaico acoplado a um material de mudança de fase PCM dadas as condições ambientais locais, a análise de sensibilidade das dimensões do domínio foi dispensada, conforme comentado em 3.2.1.3. Dessa forma, os resultados desse modelo englobam a análise de sensibilidade de malha e passo de tempo, bem como a comparação com os resultados experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022).

#### 4.2.1 Malha computacional

Baseado nos dados fornecidos por Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), as condições de contorno de temperatura ambiente e irradiação solar do modelo proposto foram dadas a cada 30 minutos de acordo com a Figura 15. Com os resultados da temperatura média da face superior do painel, avaliados a cada 30 minutos, foi usada a metodologia GCI para comparar os valores obtidos para três malhas computacionais. Os resultados de temperatura média do painel fotovoltaico relativos às 12h30 são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - *Grid Convergence Index* (GCI) para malha espacial, valores relativos às 12h30.

	<b>Malha 1</b>	<b>Malha 2</b>	<b>Malha 3</b>
Número de elementos	4227906	2004794	949900
Tamanho representativo ( $h$ [mm])	46	60	80
Razão de refino ( $r$ )	-	1,30	1,33
Temperatura ( $T$ [°C])	53,16	53,29	53,55
GCI	0,42%	0,74%	1,28%

$r_c = 1,0025$

Fonte: elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que o resultado apresentado na Tabela 11 representa apenas o GCI da malha relativo às 12h30. Quando considerado o resultado dos GCIs correspondentes aos demais tempos, o erro médio da malha 3 é de 1,7%. Vale mencionar que o erro máximo ocorre às 09h, logo ao início da simulação, onde há presença de erros numéricos devido a não convergência da solução, conforme comentado na Seção 3.2.2.3. Apesar desse fator, os desvios encontrados para os demais tempos são pequenos o suficiente para que a escolha da malha a ser utilizada seja a malha 3, composta de 949,9 mil elementos, visando diminuir o custo computacional sem perder o significado físico do modelo.

#### 4.2.2 Passo de tempo

Assim como realizado na seção 4.1.3, foi utilizada a malha escolhida após o teste de sensibilidade para a realização da análise relativa ao passo de tempo da simulação. Foram utilizados três diferentes passos de tempo para realizar a análise seguindo a metodologia GCI, comparando os resultados das temperaturas médias do painel obtidas ao longo do dia. Foram calculados os resultados relativos ao GCI a cada meia hora, seguindo o intervalo de tempo em que

foram fornecidas as condições ambientes. A tabela 12 explicita os valores de GCI encontrados relativos às 12h30, os quais correspondem aos máximos valores encontrados ao longo do dia.

Tabela 12 - *Grid Convergence Index* (GCI) para passo de tempo, valores relativos às 12h30.

	<b>Passo de tempo 1</b>	<b>Passo de tempo 2</b>	<b>Passo de tempo 3</b>
Passo de tempo ( $h$ [s])	0,138	0,277	0,553
Razão de refino ( $r$ )	-	2	2
Temperatura média ( $T$ [°C])	53,5970	53,5709	53,5253
GCI	0,14%	0,14%	0,25%
			$r_c = 0.9995$

Fonte: elaborado pelo autor.

Quando considerado os resultados dos GCIs correspondentes às outras horas do dia, o erro médio do passo de tempo 3 é de 0,15%. Esse baixo valor justifica a escolha do maior passo de tempo, diminuindo o custo computacional sem perda de significado físico do modelo.

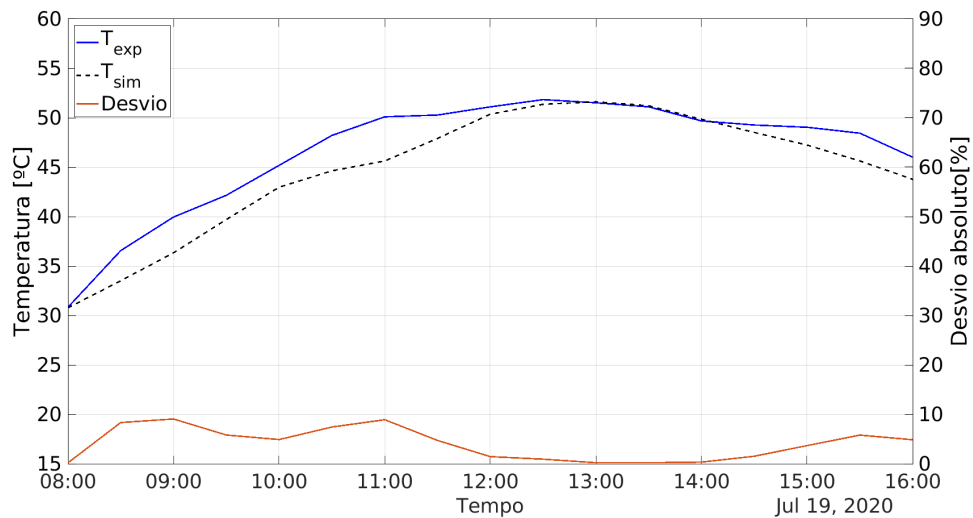
### 4.2.3 Validação

Utilizando da malha e passo de tempo mais grosseiros, foram comparados os resultados de temperatura do painel obtidos experimentalmente por Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022) e numericamente pelo modelo proposto. A temperatura comparada é relativa à média de três pontos localizados na face superior central do painel, conforme feito fisicamente usando termopares na análise experimental (Figura 11). A Figura 20 mostra as temperaturas citadas e o desvio relativo entre elas.

Aproveitando os dados fornecidos por Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022) é comparado a média das temperaturas de dois termopares localizados na parte interna do PCM, posicionados a uma profundidade de 1,5 cm e 3 cm de distância do painel. A Figura 21 mostra as temperaturas internas no PCM obtidas experimentalmente  $T_{exp}$  e numericamente  $T_{sim}$ , assim como o desvio relativo entre elas.

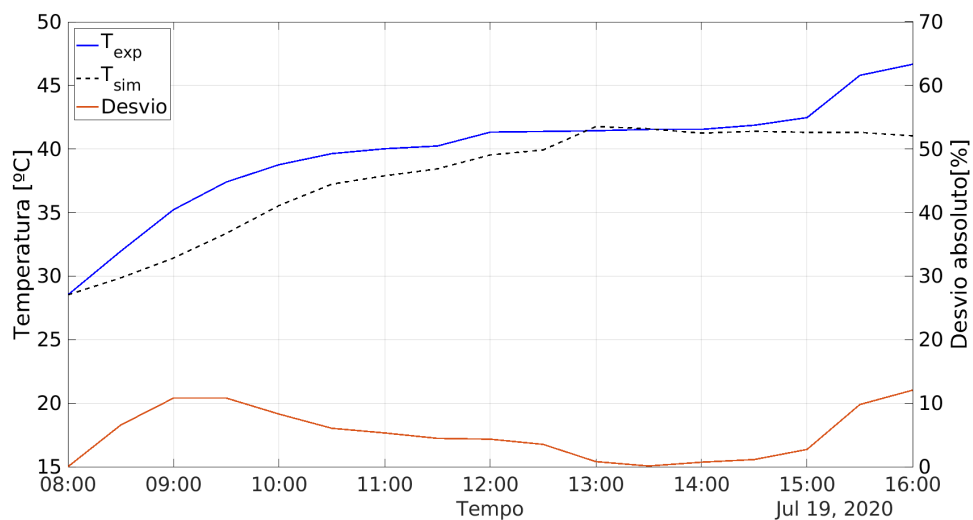
É possível observar nas Figuras 20 e 21 que os desvios máximos ocorrem às 09:00, e são iguais a 9 e 10,8%, respectivamente. O desvio médio para a temperatura na face do painel é igual a 4,02%, enquanto que para o PCM é de 5,15%. Como os erros relacionados a discretização são menores que os desvios, é provável que esses ocorram devido às hipóteses simplificadoras adotadas e aos erros experimentais. Levando em consideração os valores dos desvios apresentados e a tendência similar das curvas de temperatura numéricas e experimentais,

Figura 20 - Média das temperaturas do painel obtidas da simulação numérica  $T_{sim}$  e experimentalmente  $T_{exp}$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 21 - Média das temperaturas internas no PCM obtidas da simulação numérica  $T_{sim}$  e experimentalmente  $T_{exp}$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

é possível afirmar que o modelo foi validado. É importante notar que o PCM utilizado (RT-42) é uma mistura, e que mesmo o admitindo como substância pura (Equação 29) seu comportamento é devidamente representado, evidenciando a robustez do modelo numérico.

#### 4.3 EXPLORANDO A NECESSIDADE DO DOMÍNIO AR

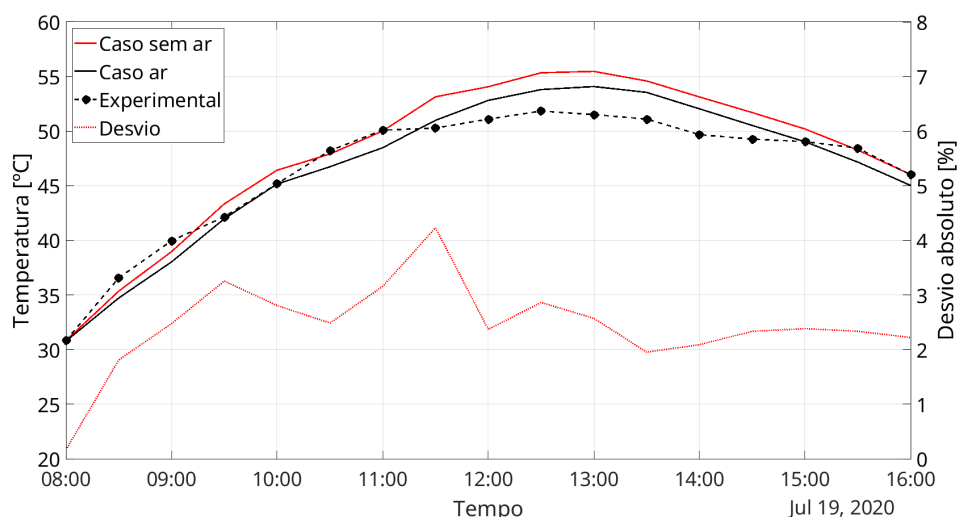
Com a finalidade de estudar a necessidade de calcular o escoamento de ar para analisar o desempenho térmico de um painel fotovoltaico acoplado a um PCM, foi realizado um estudo comparando os resultados obtidos pelo modelo que considera o escoamento de ar (chamado de

"Caso ar") com os resultados obtidos de um modelo que desconsidera o cálculo do escoamento, se baseando em formulações empíricas para o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção entre as faces do sistema PV/PCM e o ambiente (chamado de "Caso sem ar").

#### 4.3.1 Temperatura média do painel fotovoltaico

Primeiramente, para avaliar a dependência do cálculo do escoamento de ar na temperatura média do painel, foram comparados ambos os casos com os resultados experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022). A Figura 22 mostra os resultados relativos a temperatura média do painel obtidos pelos Casos ar e sem ar em comparação com os resultados experimentais, bem como o desvio absoluto relativo à comparação entre ambos os casos.

Figura 22 - Temperatura média do painel fotovoltaico ao longo do dia para o Caso ar, Caso sem ar e os dados experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), bem como o desvio absoluto relativo a comparação de ambos os casos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Quando comparados as temperaturas médias do painel obtidos pelos Casos ar e sem ar com os dados experimentais, o Caso ar mostra um desvio médio de 2,78%, com valor máximo de 5,04% às 8h30, enquanto o Caso sem ar mostra um desvio médio de 3,51% com um pico de 7,68% às 13h. Apesar dos desvios, está claro que ambos os casos se aproximam bem dos resultados experimentais tanto em magnitude quanto em tendência, validando os resultados de ambos modelos numéricos.

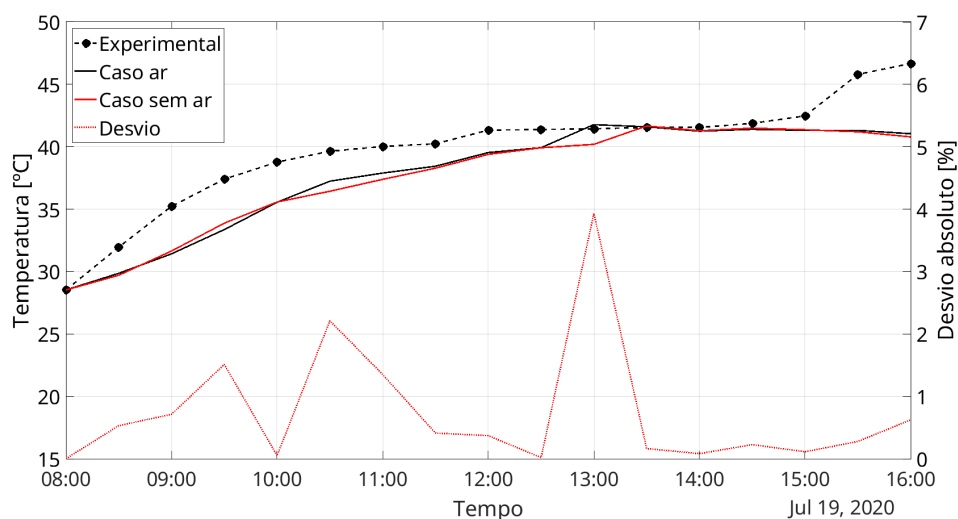
Quando comparados ambos casos entre si, a temperatura média do painel fotovoltaico obtida pelo Caso ar é um pouco menor que a obtida pelo Caso sem ar. O desvio absoluto médio entre as curvas é de 2,44% ao longo do dia, sendo o valor máximo de 4,13% atingido às 11h30.

Portanto, em termos da temperatura média do painel, o impacto de não simular o escoamento de ar ao entorno do sistema PV/PCM é mínimo.

### 4.3.2 Temperatura média interna do PCM

Para investigar mais profundamente a sensibilidade dos resultados do modelo numérico para com o cálculo do escoamento de ar ao em torno do sistema PV/PCM, foram comparadas a temperatura média de dois pontos internos do PCM obtidas pelos modelos dos casos sem ar e com ar com aquela obtida experimentalmente por Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022). A Figura 23 mostra as temperaturas internas do PCM obtidas no Caso ar, no Caso sem ar e experimentalmente, juntamente com o desvio entre os casos.

Figura 23 - Temperatura média interna no PCM ao longo do dia para o Caso ar, Caso sem ar e os dados experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022), bem como o desvio absoluto relativo a comparação de ambos os casos.



Fonte: elaborado pelo autor.

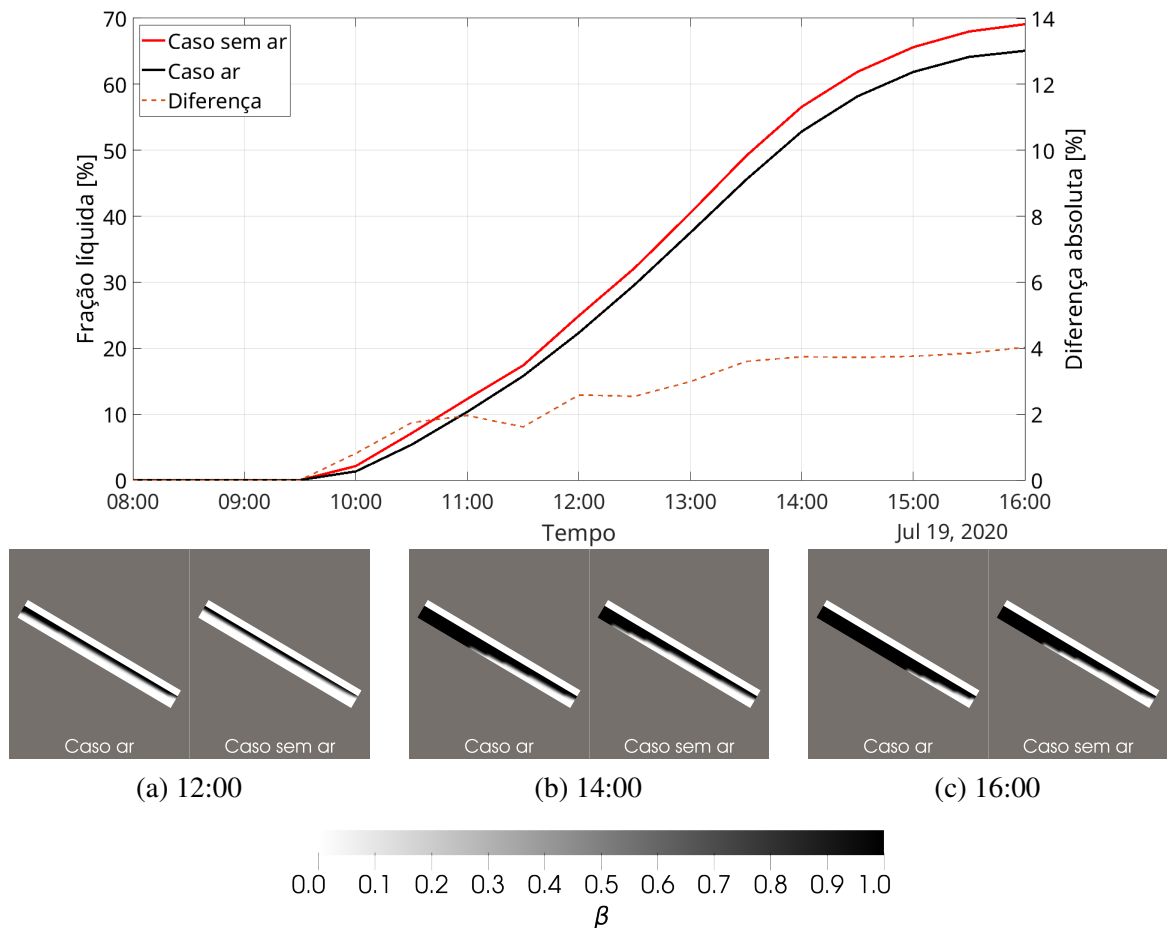
Novamente os resultados obtidos pelos modelos numéricos concordam de maneira satisfatória com os resultados experimentais, com desvios médios de 5,15% e 5,46% para os casos ar e sem ar, respectivamente. Esse resultado próximo valida os modelos numéricos em termos da representação da temperatura interna do PCM.

Quando comparados os resultados do Caso ar com o Caso sem ar, é possível notar um desvio quase insignificante durante todo o dia, com exceção das 13h, onde há um pico de 3,93%. Esse desvio tão baixo indica que considerar o escoamento de ar em simulações de sistemas PV/PCM para análise da temperatura interna do PCM tem impacto negligenciável.

### 4.3.3 Fração líquida de PCM

Para concluir a análise da dependência do cálculo do escoamento de ar em modelos numéricos de sistema PV/PCM, foi avaliado o comportamento do volume de PCM liquefeito, em termos da fração líquida, ao longo do dia pelos Casos ar e sem ar. Como tal variável não foi medida pelos experimentadores (Yousef; Sharaf; Huzayyin, 2022), essa análise é estritamente numérica. A Figura 24 mostra a evolução da fração líquida de PCM ao longo do dia, bem como cortes longitudinais no sistema PV/PCM mostrando o perfil da fronteira de derretimento obtido por ambos os casos.

Figura 24 - Fração líquida de PCM ao longo do dia para os caso ar e sem ar.



Fonte: elaborado pelo autor.

Como visto na Figura 24, as diferenças entre as frações líquidas obtidas nos Casos ar e sem ar são mínimas. A diferença absoluta se mantém abaixo de 4% durante todo o dia, destacando boa concordância entre os casos. Além do mais, é possível notar, de maneira qualitativa, boa concordância em relação à fronteira de derretimento obtida pelos modelos. Esses

resultados sugerem que, em relação à fração líquida de PCM, o cálculo do escoamento de ar não é necessário, pois seu impacto é mínimo sob as condições estudadas.

#### 4.3.4 Custo computacional

Uma das maiores diferenças entre os Casos ar e sem ar é o custo computacional. Como no Caso sem ar não há a necessidade de calcular o escoamento de ar sobre o sistema PV/PCM, o custo computacional é significativamente reduzido. Isso acontece principalmente por conta da menor malha computacional no Caso sem ar, a qual é composta de consideravelmente menos elementos quando comparada àquela do Caso ar, bem como a redução de complexidade do modelo computacional envolvido na solução das equações de turbulência.

Ambos os casos foram solucionados no supercomputador Santos Dumont do laboratório nacional de computação científica, utilizando 8 processadores em paralelo, permitindo uma comparação direta quanto ao tempo computacional. O Caso ar foi resolvido em 83,6 horas, enquanto o Caso sem ar foi resolvido em 7,5 horas. Isso significa que o Caso sem ar se completou aproximadamente 11 vezes mais rápido do que o Caso ar, indicando uma redução significativa em custo computacional.

É importante notar que o passo de tempo do Caso ar é limitado pelo alto número de Courant atingido no domínio ar, aproximadamente 2000. Como no Caso sem ar esse domínio é inexistente, um passo de tempo maior poderia ser empregado, já que o número de Courant máximo no domínio PCM é de somente 0,4. Isso amplificaria ainda mais a diferença de custo computacional entre os casos. Para referência, estudos similares utilizaram passos de tempo tão grandes quanto 1 e 5 segundos (Hatakeyama; Ishizuka, 2014; Li *et al.*, 2018). Porém, para ter certeza que esse fator não influenciasse nas comparações, o passo de tempo foi mantido igual em ambos os casos, bem como a malha computacional dos domínios PV e PCM.

#### 4.4 DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA PV/BIOPCM

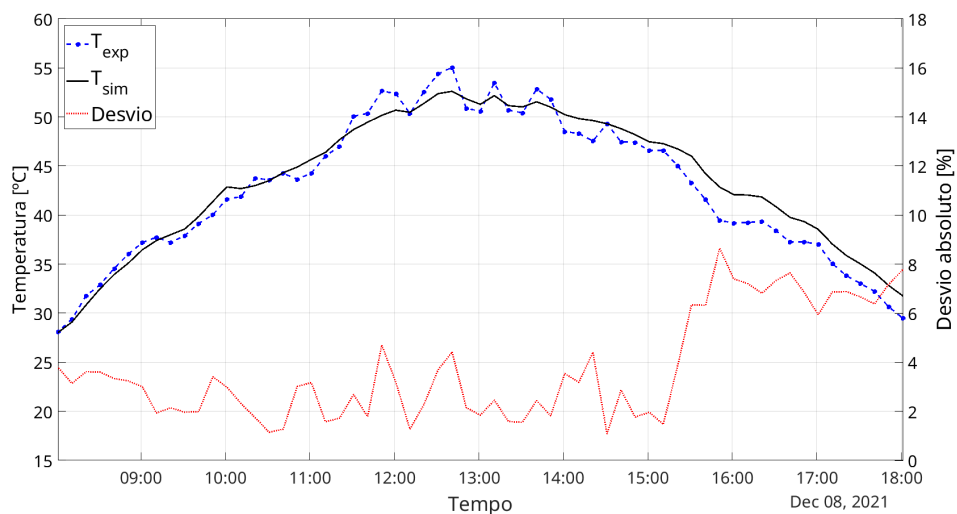
Apesar de entender que os resultados obtidos na Seção 4.3 são válidos somente para as condições ambientais e geométricas avaliadas, a conclusão de que o cálculo do escoamento do ar é desnecessário para analisar o desempenho térmico de sistemas PV/PCM foi extrapolada para as condições experimentais de Silva *et al.* (2022), a fim de avaliar a viabilidade da implementação de bioPCMs em tais condições.

O modelo descrito na Seção 3.2 sem a consideração do domínio ar, juntamente com as equações descritas na Seção 3.3.1 foram utilizados para prever a temperatura do painel fotovoltaico comercial acoplado a dois diferentes bioPCMs, ácido láurico (LA) e a mistura eutética de ácido láurico e ácido palmítico (LA:PA), sob as condições ambientais do dia 08/12/2021 em Aparecida do Taboado, MS, Brasil, conforme Figura 7.

#### 4.4.1 Verificação das hipóteses

Para avaliar se a hipóteses simplificadoras assumidas tanto na Seção 3.2 quanto na Seção 3.3.1 são válidas para o caso de Silva *et al.* (2022), foi utilizado o modelo considerando somente o painel fotovoltaico, sem a presença de ambos os domínios ar e PCM portanto, para previsão de sua temperatura, comparando os resultados com os obtidos experimentalmente por Silva *et al.* (2022). A Figura 25 mostra a temperatura média considerando os oito pontos medidos por termopares experimentalmente e numericamente.

Figura 25 - Comparação entre a temperatura média do painel obtida experimental ( $T_{exp}$ ) (Silva *et al.*, 2022) e numericamente ( $T_{sim}$ ) ao longo do dia.



Fonte: elaborado pelo autor.

Quando comparado a temperatura média do painel, é observado uma boa concordância entre aquela obtida pelo modelo numérico para com aquela obtida experimentalmente, com um desvio médio absoluto de 3,74% ao longo do dia, com valor máximo de 8,65% às 15h51. Apesar dos desvios, a tendência geral similar dos resultados numéricos com os experimentais faz com que as hipóteses assumidas e equações empíricas utilizadas no modelo sejam validadas.

#### 4.4.2 Verificação da malha computacional e passo de tempo

A verificação da independência dos resultados quanto a malha computacional e passo de tempo foi realizada seguindo a metodologia GCI, como feito anteriormente, porém utilizando o caso composto do sistema PV/PCM, sob as condições experimentais de Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022). As Tabelas 13 e 14 mostram os resultados dos GCIs considerando a média dos valores ao longo do dia ( $\overline{\text{GCI}}$ ) para a malha computacional e o passo de tempo, respectivamente.

Tabela 13 - *Grid Convergence Index* (GCI) para malha computacional.

	<b>Malha 1</b>	<b>Malha 2</b>	<b>Malha 3</b>
Número de elementos	359125	160550	65000
Tamanho representativo ( $h$ [mm])	11,83	15,38	20,00
Razão de refino ( $r$ )	-	1,30	1,30
$\overline{\text{GCI}}$	0,28%	0,42%	0,73%

$$1.01 > r_c > 0.99$$

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 14 - *Grid Convergence Index* (GCI) para passo de tempo.

	<b>Passo de tempo 1</b>	<b>Passo de tempo 2</b>	<b>Passo de tempo 3</b>
Passo de tempo ( $h$ [s])	0,25	0,5	1
Razão de refino ( $r$ )	-	2	2
$\overline{\text{GCI}}$	0,01%	0,03%	0,11%

$$1.01 > r_c > 0.99$$

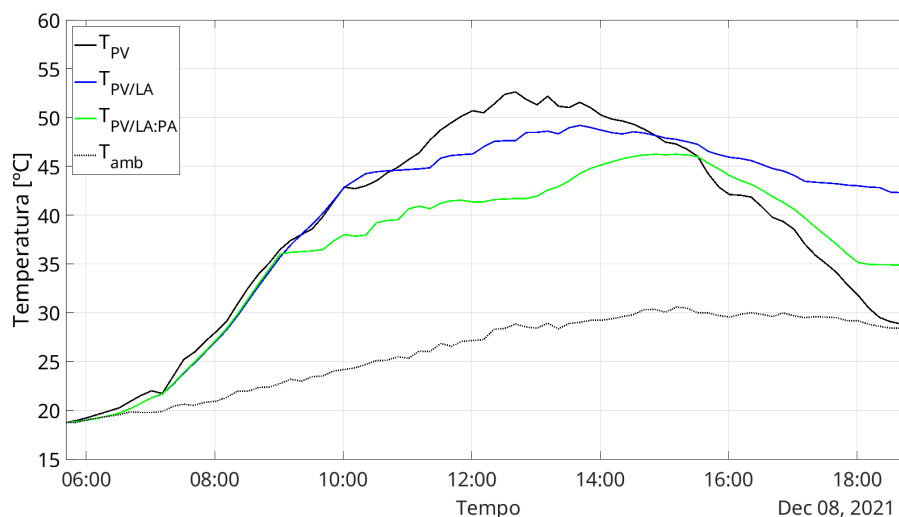
Fonte: elaborado pelo autor.

Evidentemente, os resultados médios de GCI mostrados nas Tabelas 13 e 14 são consideravelmente baixos, fazendo com que sejam selecionados a menor malha (Malha 3) e o maior passo de tempo (Passo de tempo 3) para as simulações subsequentes. É importante mencionar que embora tenha sido mostrado somente a média, os resultados dos GCIs podem chegar a valores máximos de 6,52% para a malha 3 e 0,74% para o passo de tempo 3. Porém esses valores máximos foram considerados como atípicos, não representando o erro de discretização do modelo durante toda a simulação.

#### 4.4.3 Temperatura do painel fotovoltaico

Ao se acoplar um sistema de arrefecimento a um painel fotovoltaico, um dos principais parâmetros de interesse é a temperatura de operação das células ao longo do dia, pois essa afeta diretamente a eficiência de conversão energética e a degradação do painel. Portanto, ao acoplar os bioPCMs LA e LA:PA ao painel fotovoltaico o interesse inicial é comparar a temperatura do painel fotovoltaico com e sem a presença desses bioPCMs. A Figura 26 mostra a temperatura média do painel fotovoltaico sem PCM ( $T_{PV}$ ), acoplado ao bioPCM LA ( $T_{PV/LA}$ ) e ao bioPCM LA:PA ( $T_{PV/LA:PA}$ ), bem como a temperatura ambiente para referência ( $T_{amb}$ ).

Figura 26 - Comparação entre a temperatura média do painel sem PCM ( $T_{PV}$ ), com ácido láurico (LA) ( $T_{PV/LA}$ ) e com a mistura eutética de ácido láurico e palmítico (LA:PA) ( $T_{PV/LA:PA}$ ), e a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).



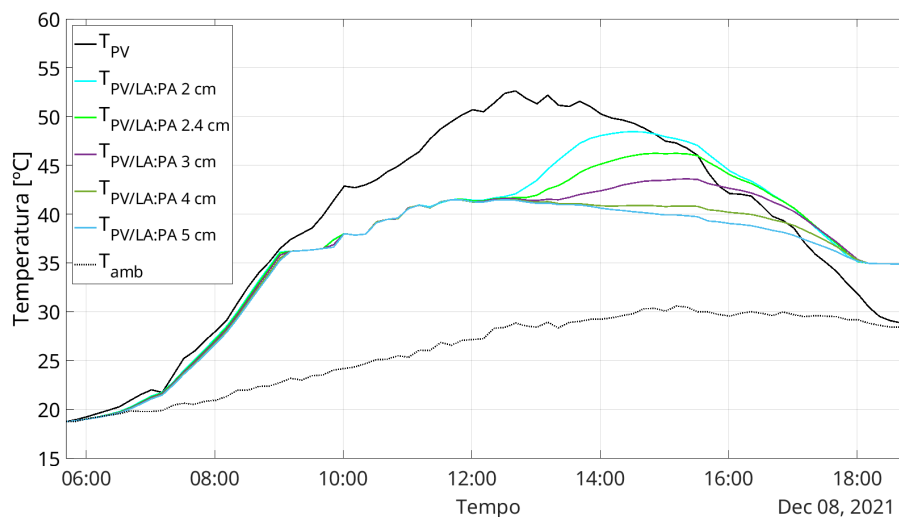
Fonte: elaborado pelo autor.

Ao observar as curvas relativas aos painéis acoplados aos bioPCMs selecionados (Figura 26) é claro que ambos reduziram a temperatura de operação em relação ao painel sem PCM. A temperatura máxima atingida pelo painel sem PCM foi de 52,62 °C, enquanto que para o painel acoplado ao bioPCM LA foi de 49,19 °C e para o acoplado a LA:PA foi de 46,23 °C. Ou seja, houve uma redução de 3,43°C e 6,39°C na temperatura máxima do painel ao se acoplar os bioPCMs LA e LA:PA, respectivamente. Porém, algo que chama atenção é o aumento repentino da temperatura do painel acoplado ao LA:PA a partir das 13h, sugerindo que praticamente todo o volume de PCM sólido tenha se tornado líquido. Ou seja, que o bioPCM tenha absorvido toda sua capacidade de calor latente antes do final do dia, necessitando de um maior volume, i.e. maior espessura, para se manter em mudança de fase.

Outro fator que chama atenção é que a curva de resfriamento (a partir das 15:00) é mais lenta para os sistemas com bioPCMs do que para aquele painel sem sistema de resfriamento. Isso ocorre pois a energia armazenada pelos PCMs em forma de calor latente, ao final do dia, é transferida de volta para o painel, tornando seu resfriamento mais lento. Esse fato também é percebido e evidenciado em estudos experimentais, como Savvakis and Tsoutsos (2021).

Para avaliar se a hipótese de que não há espessura suficiente para o bioPCM LA:PA, foi variado a espessura do bioPCM desde 2 a 5 cm, lembrando que a espessura calculada pela metodologia proposta por Savvakis and Tsoutsos (2021) foi de 2,4 cm, e é a que foi utilizada para os resultados mostrados na Figura 26. A Figura 27 mostra as temperaturas médias do painel sem PCM e com LA:PA em diferentes espessuras.

Figura 27 - Temperatura média de operação do painel sem PCM ( $T_{PV}$ ) e acoplado à mistura eutética de ácido láurico e palmítico (LA:PA) em várias espessuras ( $T_{PV/LA:PA}$ ).



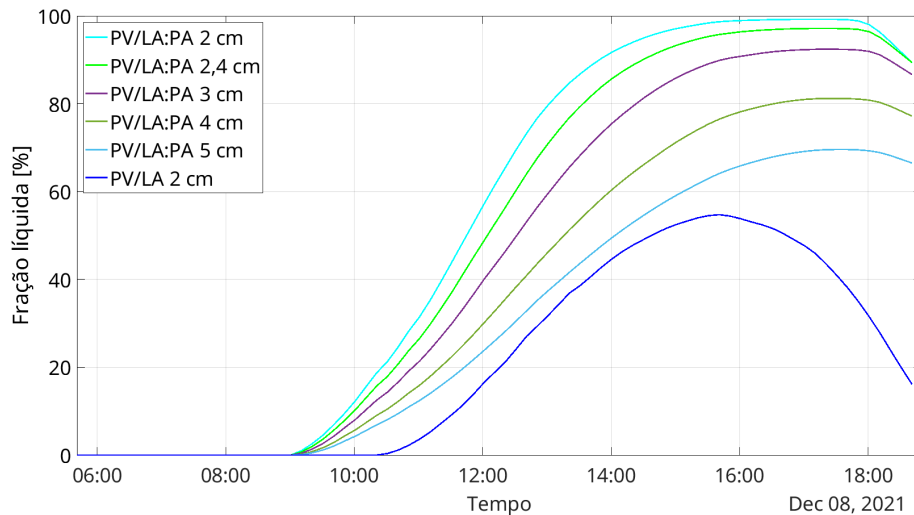
Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 27 evidencia que o aumento repentino da temperatura do painel acoplado a LA:PA é causado pela falta de volume de PCM sólido a ser liquefeito, pois ao aumentar a espessura de PCM, e por consequência o volume, esse fenômeno fica cada vez menos evidente, até praticamente não existir mais, como no caso das espessuras 4 e 5 cm. Quanto maior a espessura do PCM, menor a temperatura máxima atingida; e.g., para as espessuras de 2, 3 e 4 cm tem-se uma redução da temperatura máxima de, aproximadamente, 4, 9 e 11 °C. Sendo que, para a espessura de 5 cm, os mesmos 11 °C são reduzidos.

#### 4.4.4 Fração líquida de PCM

Para melhor decidir qual é a espessura de bioPCM ótima dentre as exploradas, é verificado o comportamento da fração líquida dos bioPCM LA e LA:PA ao longo do dia para as várias espessuras, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Comportamento da fração líquida de bioPCM ácido láurico (LA) e da mistura eutética de ácido láurico e palmítico (LA:PA) em várias espessuras.



Fonte: elaborado pelo autor.

A fração líquida de PCM máxima atingida para o bioPCM LA:PA com espessura 2, 2,4, 3, 4 e 5 é de 99%, 97%, 92%, 81% e 70%, respectivamente, enquanto que para o bioPCM LA é de 55%. Levando em consideração o momento em que houve o aumento repentino de temperatura mostrado na Figura 27, é possível concluir que tal aumento ocorre a partir do momento em que a fração líquida de PCM ultrapassa o valor de 90%. Portanto, para definir uma espessura ótima de PCM de maneira mais assertiva é recomendado realizar uma análise da temperatura do painel fotovoltaico com a fração líquida de PCM, conforme realizado.

#### 4.4.5 Potência e energia elétrica produzidas

Como se sabe a eficiência de conversão energética,  $e$ , por consequência, a potência elétrica, de um painel fotovoltaico está diretamente ligada a sua temperatura de operação. A eficiência de conversão energética ( $\eta$ ) é descrita pela Equação 46 (Evans; Florschuetz, 1977), enquanto a potência elétrica ( $P_{PV}$ ) produzida pelo painel é dada pela Equação 47:

$$\eta = \eta_{\max} [1 - \gamma(T_{PV} - T_{ref})], \quad (46)$$

$$P_{PV} = \eta q_{G_i}, \quad (47)$$

onde  $\eta_{\max} = 17,64\%$  é a eficiência máxima,  $\gamma = 0,38\%/^{\circ}\text{C}$  é o coeficiente de temperatura,  $T_{PV}$  é a temperatura de operação do módulo,  $T_{\text{ref}} = 25^{\circ}\text{C}$  é a temperatura de referência e  $q_{G_i}$  é a potência térmica solar que atinge o painel, os números são relativos ao painel CS3U-350P utilizado por Silva *et al.* (2022).

Dessa forma, a energia elétrica produzida pelo painel  $E_{PV}$  durante um período de referência  $R_p$ , igual a um dia solar, pode ser calculada por

$$E_{PV} = \frac{t}{R_p} \sum_{i=1}^N P_{PV}(t_i). \quad (48)$$

onde é importante mencionar que o intervalo de tempo utilizado para o cálculo é de 10 minutos, sendo o mesmo utilizado nas condições de contorno.

A energia total produzida durante o dia analisado pelos painéis sem a presença de PCM e acoplados aos bioPCMs LA e LA:PA estão explicitadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Energia elétrica produzida pelos painéis sem PCM e com bioPCMs LA e LA:PA durante o dia 08/12/2021 em Aparecida do Taboado, MS, Brasil.

Sistema	Espessura PCM [cm]	Energia elétrica [Wh]	Ganho energético [%]
PV	–	1970,1	–
PV/LA	2	1977,1	0,35%
PV/LA:PA	2	2000,5	1,54%
PV/LA:PA	2,4	2007,1	1,88%
PV/LA:PA	3	2014,0	2,23%
PV/LA:PA	4	2020,2	2,54%
PV/LA:PA	5	2020,2	2,54%

Fonte: elaborado pelo autor.

Como mostra a Tabela 15, para o dia analisado há um ganho quanto à energia elétrica gerada pelo painel acoplado ao bioPCM LA de 0,35%, ou 7 Wh, em relação ao painel sem PCM, enquanto que para os painéis acoplados ao bioPCM LA:PA há um ganho de 1,54%, 1,88%, 2,23%, 2,54% e 2,54% respectivos às espessuras 2, 2,4, 3, 4 e 5 cm. Desta forma, no melhor dos casos (bioPCM LA:PA com espessura de 4 cm), há uma produção de 50 Wh a mais de energia elétrica no dia. Além do mais, levando em consideração o valor produzido de energia elétrica pelos painéis acoplados ao bioPCM LA:PA, fica claro que a escolha da espessura ótima para o sistema é a de 4 cm, já que ao aumentá-la não há mais ganho em energia gerada.

## 5 CONCLUSÃO

Esta dissertação de mestrado teve como objetivo desenvolver um modelo computacional tridimensional capaz de prever a temperatura de painéis fotovoltaicos acoplados ou não a materiais de mudança de fase de origem orgânica (bioPCMs), considerando condições reais de aplicação. Para isso, diferentes modelos numéricos foram propostos, testados e validados, culminando em um modelo capaz de atender aos objetivos propostos com relativo baixo custo computacional. Este estudo se destaca por ser um dos poucos, se não o único, que incorpora o cálculo do escoamento de ar para analisar um sistema PV/PCM em condições reais de operação e avalia o impacto dessa abordagem em variáveis críticas do sistema. Se destaca também, por ser um dos únicos, dentro do contexto de painéis fotovoltaicos, à propor e analisar o desempenho térmico de um sistema de arrefecimento 100% passivo composto por bioPCMs.

Os modelos desenvolvidos foram validados com base em dois estudos experimentais: Silva *et al.* (2022) e Yousef, Sharaf and Huzayyin (2022). O primeiro foi utilizado para validar o modelo sem sistemas de resfriamento, enquanto o segundo validou o modelo que considera um PCM acoplado à parte posterior do painel fotovoltaico. Ambos os modelos apresentaram alta precisão na previsão das temperaturas operacionais das células fotovoltaicas, com valores de 93,5% e 96%, respectivamente. Para o modelo que considera o PCM, a precisão na previsão da temperatura interna do PCM foi de 95%.

Além disso, o modelo PV/PCM foi empregado para investigar a influência do cálculo do escoamento de ar ao redor do sistema, substituindo o domínio computacional por correlações empíricas. A análise revelou uma diferença média de apenas 2,4% na temperatura do painel entre os modelos que consideram ou desconsideram o escoamento de ar, e diferenças máximas de 3,9% e 4,0% na temperatura interna e na fração líquida do PCM, respectivamente. Considerando que o custo computacional do modelo que inclui o escoamento de ar é mais de 11 vezes superior ao do modelo simplificado, este último foi considerado mais vantajoso devido à sua alta precisão (96,5%) e eficiência computacional.

Finalmente, o modelo foi utilizado para analisar a viabilidade da aplicação de bioPCMs sob condições ambientais reais de Aparecida do Taboado, MS, Brasil, em 08/12/2021. Dois bioPCMs foram implementados: ácido láurico (LA) e uma mistura eutética de ácido láurico e ácido palmítico (LA:PA). Os resultados indicaram reduções na temperatura máxima de operação do painel de 3,4 °C e 11,2 °C para os bioPCMs LA e LA:PA, respectivamente. Com isso, são esperados ganhos de 0,35% e 2,54% na energia elétrica gerada ao longo do dia, em comparação

ao painel sem resfriamento. Além disso, a redução da temperatura operacional contribui para aumentar a vida útil dos módulos fotovoltaicos, um benefício importante para a sustentabilidade e a eficiência do sistema.

A análise numérica demonstrou a eficácia de bioPCMs na redução térmica de módulos fotovoltaicos, com diminuições de temperatura de até 11,2 °C. Embora o sistema de resfriamento proposto neste estudo utilize exclusivamente bioPCM, recomenda-se que trabalhos futuros investiguem aspectos estruturais críticos, tais como: (i) otimização geométrica e de materiais do recipiente de contenção do PCM, visando garantir integridade térmico-mecânica durante ciclos sucessivos de fusão-solidificação; (ii) validação experimental dos parâmetros termofísicos dos bioPCMs em condições operacionais dinâmicas, incluindo efeitos de histerese térmica e degradação a longo prazo; e (iii) análise de sistemas híbridos que integrem resfriamento passivo por PCM com técnicas ativas, como circulação de água, fazendo proveito do calor armazenado, ou por técnicas passivas, como aletas metálicas, aumentando a condutividade térmica do sistema. Adicionalmente, estudos multidisciplinares devem abordar desafios práticos como a compatibilidade química entre bioPCMs e materiais de encapsulamento, mecanismos de mitigação de expansão volumétrica e escalabilidade industrial dessas soluções. A combinação de modelagem numérica avançada, caracterização experimental multiescala e abordagens de inteligência artificial para otimização de parâmetros emerge como caminho promissor para viabilizar a transição tecnológica desses sistemas para aplicações reais.

## 6 PUBLICAÇÕES RESULTANTES DO TRABALHO

Partes do presente projeto foram apresentadas de forma oral em três publicações em congressos:

MARSON, V.; SANTOS, G. B.; SILVA, J. B. C.; CARDOSO, E. M. Termorregulação de painéis fotovoltaicos integrados com materiais de mudança de fase. In: CONEM 2024, 2024, Natal - RN. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.CONEM2024.CON24-0614>. Acesso em: 15 de março, 2025.

MARSON, V.; SILVA, D. D.; MORSCH FILHO, E.; CARDOSO, E. M. Análise numérica transiente do desempenho térmico de um módulo fotovoltaico comercial. In: CONEM 2024, 2024, Natal - RN. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.CONEM2024.CON24-0649>. Acesso em: 15 de março, 2025.

MARSON, V.; SANTOS, G. B.; SILVA, J. B. C.; CARDOSO, E. M. Thermoregulation of integrated photovoltaic panels with bio-based phase change materials. In: XLV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2024, Maceió - AL. Proceedings of CILAMCE 2024, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.55592/cilamce.v6i06.8273>. Acesso em: 15 de março, 2025.

Os autores ainda esperam publicar dois artigos em jornais acadêmicos. Um intitulado "*Evaluating the Impact of the Air Domain on CFD Simulations of Photovoltaic Panels Coupled with Phase Change Materials*", que diz respeito à análise da necessidade do domínio ar em sistemas PV/PCM. E outro que diz respeito ao desenvolvimento do modelo e aplicação de bioPCMs em painéis fotovoltaicos, intitulado "*Transient Performance of a Commercial Photovoltaic Panel integrated with a Bio-Based Phase Change Material: a Numerical Study*".

## REFERÊNCIAS

- ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. **Solar Energy**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 313–332, 1983. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X8390186X>. Acesso em: 15 de março de 2025.
- ABSOLAR. **Brasil atinge 32 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica**. 2023. <https://www.absolar.org.br/brasil-atinge-32-gw-de-capacidade-instalada-em-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 28 maio 2023.
- ABSOLAR. **Energia solar representa 19,5% da matriz elétrica brasileira**. 2024. <https://www.absolar.org.br/energia-solar-representa-195-da-matriz-eletrica-brasileira/>. Acesso em: 21 outubro 2024.
- ABU-ZIDAN, Y.; MENDIS, P.; GUNAWARDENA, T. Optimising the computational domain size in cfd simulations of tall buildings. **Heliyon**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. e06723, 2021. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021008264>. Acesso em: 15 de março de 2025.
- ALIZADEH, H.; Alhuyi Nazari, M.; GHASEMPOUR, R.; SHAFII, M. B.; AKBARZADEH, A. Numerical analysis of photovoltaic solar panel cooling by a flat plate closed-loop pulsating heat pipe. **Solar Energy**, [S. l.], v. 206, p. 455–463, 2020. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20305491>. Acesso em: 15 de março de 2025.
- ALSAYAH, A. M.; ABOALTABOOQ, M. H. K.; MAJEED, M. H.; HUSSEIN, B. A. S. M. CFD study to improve PV cell performance by forced air: Modern design. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, [S. l.], v. 45, n. 3, p. 1468–1477, 2019. ISSN 2303-4521. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v7i3.794>. Acesso em: 15 de março de 2025.
- ANSYS-INC. **Fluent Theory Guide 17.1**. 2017.
- ARIFIN, Z.; TJAHJANA, D. D. D. P.; HADI, S.; RACHMANTO, R. A.; SETYOHANDOKO, G.; SUTANTO, B. Numerical and experimental investigation of air cooling for photovoltaic panels using aluminum heat sinks. **International Journal of Photoenergy**, [S. l.], v. 2020, n. 1, p. 1574274, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2020/1574274>. Acesso em: 15 de março de 2025.
- ARMSTRONG, S.; HURLEY, W. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 30, n. 11, p. 1488–1495, 2010. ISSN 1359-4311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431110001225>. Acesso em: 15 de março de 2025.
- AZIMI, A.; BASIRI, N.; ESLAMI, M. A novel two-step optimization approach for film water cooling of a photovoltaic module in real ambient conditions. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 236, p. 121898, 2024. ISSN 1359-4311. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123019270>. Acesso em: 15 de março de 2025.

BAHAIDARAH, H.; SUBHAN, A.; GANDHIDASAN, P.; REHMAN, S. Performance evaluation of a pv (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. **Energy**, [S. l.], v. 59, p. 445–453, 2013. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213006567>. Acesso em: 15 de março de 2025.

BAYRAM, U.; AKSÖZ, S.; MARAŞLI, N. Temperature dependency of thermal conductivity of solid phases for fatty acids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [S. l.], v. 118, p. 311–321, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3968-z>. Acesso em: 15 de março de 2025.

BEJAN, A.; KRAUS, A. **Heat Transfer Handbook**. Wiley, 2003. (Heat Transfer Handbook, v. 1). ISBN 9780471390152. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=d4cgNG\\_IUq8C](https://books.google.com.br/books?id=d4cgNG_IUq8C). Acesso em: 15 de março de 2025.

BEN. **Balanco Energético Nacional**. 2023. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 27 maio 2024.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2013.

CCEE. **Balanco 2023: cenário do mercado de energia elétrica**. 2023. [https://www.ccee.org.br/o/ccee/documentos/CCEE\\_1141906](https://www.ccee.org.br/o/ccee/documentos/CCEE_1141906). Acesso em: 27 maio 2024.

CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J.; COLEMAN, H.; RAAD, P. E. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, [S. l.], v. 130, n. 7, p. 078001, 07 2008. ISSN 0098-2202. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2960953>. Acesso em: 15 de março de 2025.

CHANDRASEKAR, M.; SURESH, S.; SENTHILKUMAR, T.; Ganesh karthikeyan, M. Passive cooling of standalone flat pv module with cotton wick structures. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 71, p. 43–50, 2013. ISSN 0196-8904. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413001556>. Acesso em: 15 de março de 2025.

DINCER, I.; ROSEN, M. **Thermal Energy Storage: Systems and Applications**. Chichester, Uk: Wiley, 2011.

DWIVEDI, P.; SUDHAKAR, K.; SONI, A.; SOLOMIN, E.; KIRPICHNIKOVA, I. Advanced cooling techniques of p.v. modules: A state of art. **Case Studies in Thermal Engineering**, [S. l.], v. 21, p. 100674, 2020. ISSN 2214-157X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19305416>. Acesso em: 15 de março de 2025.

ELSHENITI, M. B.; HEMEDAH, M. A.; SOROUR, M.; EL-MAGHLANY, W. M. Novel enhanced conduction model for predicting performance of a pv panel cooled by pcm. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 205, p. 112456, 2020. ISSN 0196-8904. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419314645>. Acesso em: 15 de março de 2025.

EVANS, D.; FLORSCHUETZ, L. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. **Solar Energy**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 255–262, 1977. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X77900688>. Acesso em: 15 de março de 2025.

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. Best practice guideline for cfd simulation of flows in the urban environment. **International Journal of Environment and Pollution**, [S. l.], v. 44, p. 419–427, 2011.

FUJII, T.; IMURA, H. Natural-convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 755–767, 1972. ISSN 0017-9310. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931072901184>. Acesso em: 15 de março de 2025.

GAO, L.; FAN, X.; ZHANG, S.; CHE, D.; SUN, B. Palmitic acid graphene composite phase change materials: A molecular dynamics simulation. **Thermochimica Acta**, [S. l.], v. 707, p. 179095, 2022. ISSN 0040-6031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603121002367>. Acesso em: 15 de março de 2025.

GAO, Y.; DAI, Z.; WU, D.; WANG, C.; CHEN, B.; ZHANG, X. Transient performance assessment of a hybrid pv-teg system integrated with pcm under non-uniform radiation conditions: A numerical investigation. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 198, p. 352–366, 2022. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122012538>. Acesso em: 15 de março de 2025.

GHARZI, M.; ARABHOSSEINI, A.; GHOLAMI, Z.; RAHMATI, M. H. Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance. **Solar Energy**, [S. l.], v. 211, p. 117–146, 2020. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20310008>. Acesso em: 15 de março de 2025.

GONZÁLEZ-PEÑA, D.; ALONSO-DEMIGUEL, I.; DíEZ-MEDIAVILLA, M.; ALONSO-TRISTÁN, C. Experimental analysis of a novel pv/t panel with pcm and heat pipes. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 5, 2020. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/1710>. Acesso em: 15 de março de 2025.

GREEN, M. A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 183–189, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.892>. Acesso em: 15 de março de 2025.

Haidar, Z. A.; ORFI, J.; KANEESAMKANDI, Z. Experimental investigation of evaporative cooling for enhancing photovoltaic panels efficiency. **Results in Physics**, [S. l.], v. 11, p. 690–697, 2018. ISSN 2211-3797. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379718311938>. Acesso em: 15 de março de 2025.

HAN, X.; WANG, Q.; ZHENG, J. Determination and evaluation of the optical properties of dielectric liquids for concentrating photovoltaic immersion cooling applications. **Solar Energy**, [S. l.], v. 133, p. 476–484, 2016. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1630069X>. Acesso em: 15 de março de 2025.

HASAN, A.; SARWAR, J.; ALNOMAN, H.; ABDELBAQI, S. Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (pv-pcm) system in hot climate. **Solar Energy**, [S. l.], v. 146, p. 417–429, 2017. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.070>. Acesso em: 15 de março de 2025.

HATAKEYAMA, T.; ISHIZUKA, M. Thermal analysis for package cooling technology using phase-change material by using thermal network analysis and cfd analysis with enthalpy porosity method. **Heat Transfer Engineering**, Taylor & Francis, [S. l.], v. 35, n. 14-15, p. 1227–1234, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.876340>. Acesso em: 15 de março de 2025.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 7. ed. [S.l.]: LTC, 2014.

KOOHESTANI, S. S.; NIŽETIĆ, S.; SANTAMOURIS, M. Comparative review and evaluation of state-of-the-art photovoltaic cooling technologies. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 406, p. 136953, 2023. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623011113>. Acesso em: 15 de março de 2025.

KOSNY, J.; SHUKLA, N.; FALLAHI, A. **Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates**. [S.l.], 2013. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/1067934>. Acesso em: 15 de março de 2025.

LI, D.; KING, M.; DOONER, M.; GUO, S.; WANG, J. Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow. **Solar Energy**, [S. l.], v. 221, p. 433–444, 2021. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21003376>. Acesso em: 15 de março de 2025.

LI, Y.; DU, Y.; XU, T.; WU, H.; ZHOU, X.; LING, Z.; ZHANG, Z. Optimization of thermal management system for li-ion batteries using phase change material. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 131, p. 766–778, 2018. ISSN 1359-4311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117366097>. Acesso em: 15 de março de 2025.

LIRA, L. F. de L. **Caracterização de bioPCMS para controle de demanda térmica predial**. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília – UnB, Brasília, DF, Brasil, 2018.

MA, T.; LI, Z.; ZHAO, J. Photovoltaic panel integrated with phase change materials (pv-pcm): technology overview and materials selection. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 116, p. 109406, 2019. ISSN 1364-0321. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119306148>. Acesso em: 15 de março de 2025.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], 2015.

MAH, C.-Y.; LIM, B.-H.; WONG, C.-W.; TAN, M.-H.; CHONG, K.-K.; LAI, A.-C. Investigating the performance improvement of a photovoltaic system in a tropical climate using water cooling method. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 159, p. 78–83, 2019. ISSN 1876-6102. Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218313171>. Acesso em: 15 de março de 2025.

MATTEI, M.; NOTTON, G.; CRISTOFARI, C.; MUSELLI, M.; POGGI, P. Calculation of the polycrystalline pv module temperature using a simple method of energy balance. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 553–567, 2006. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810500073X>. Acesso em: 15 de março de 2025.

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**, [S. l.], v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/3.12149>. Acesso em: 15 de março de 2025.

MENTER, F. R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. **International Journal of Computational Fluid Dynamics**, Taylor & Francis, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 305–316, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10618560902773387>. Acesso em: 15 de março de 2025.

MITTELMAN, G.; ALSHARE, A.; DAVIDSON, J. H. A model and heat transfer correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel. **Solar Energy**, [S. l.], v. 83, n. 8, p. 1150–1160, 2009. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09000176>. Acesso em: 15 de março de 2025.

MONTEIRO, M. M. **Caracterização termofísica de bio materiais de mudança de fase por meio da metodologia T-History**. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília – UnB, Brasília, DF, Brasil, 2018.

MOUKALLED, F.; DARWISH, M.; MANGANI, L. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An advanced introduction with openfoam® and matlab®**. Heidelberg: Springer, 2016. 791 p.

NIŽETIĆ, S.; ČOKO, D.; YADAV, A.; GRUBIŠIĆ-ČABO, F. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 108, p. 287–296, 2016. ISSN 0196-8904. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415010018>. Acesso em: 15 de março de 2025.

OGBOMO, O. O.; AMALU, E. H.; EKERE, N.; OLAGBEGI, P. Effect of operating temperature on degradation of solder joints in crystalline silicon photovoltaic modules for improved reliability in hot climates. **Solar Energy**, [S. l.], v. 170, p. 682–693, 2018. ISSN 0038-092X.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18305462>. Acesso em: 15 de março de 2025.

PANDEY, A.; HOSSAIN, M.; TYAGI, V.; Abd Rahim, N.; SELVARAJ, J. A.; SARI, A. Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 82, p. 281–323, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312972>. Acesso em: 15 de março de 2025.

PANTANKAR, S. **Calculation of Unsteady Compressible Flows Involving Shocks**. Imperial College of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, 1971. (Imperial College Dept. Mechanical Engineering). Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=Sk9smwEACAAJ>. Acesso em: 15 de março de 2025.

PATANKAR, S. V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situations. **Numerical Heat Transfer**, Taylor & Francis, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 409–425, 1981. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/01495728108961801>. Acesso em: 15 de março de 2025.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, Brasil, 2014. Disponível em:

[https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf). Acesso em: 15 de março de 2025.

PRIETO, M.; GONZÁLEZ, B. Fluid flow and heat transfer in pcm panels arranged vertically and horizontally for application in heating systems. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 97, p. 331–343, 2016. ISSN 0960-1481. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116305006>. Acesso em: 15 de março de 2025.

ROACHE, P. J. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. **Journal of Fluids Engineering**, [S. l.], v. 116, n. 3, p. 405–413, 09 1994. ISSN 0098-2202. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2910291>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SANTHAKUMARI, M.; SAGAR, N. A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 110, p. 83–100, 2019. ISSN 1364-0321. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119302369>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SANTOS, G. B. dos. **A data-driven approach for new perspectives on the development of small-scale H-Darrieus turbines**. Tese (PhD thesis) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, Agosto 2023.

SARİ, A.; KARAIPEKLI, A. Fatty acid esters-based composite phase change materials for thermal energy storage in buildings. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 37, p. 208–216, 2012. ISSN 1359-4311. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431111006363>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SAVVAKIS, N.; TSOUTSOS, T. Theoretical design and experimental evaluation of a pv+pcm system in the mediterranean climate. **Energy**, [S. l.], v. 220, p. 119690, 2021. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119690>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SHAHVERDIAN, M. H.; SOHANI, A.; SAYYAADI, H.; SAMIEZADEH, S.; DORANEHGARD, M. H.; KARIMI, N.; LI, L. K. A dynamic multi-objective optimization procedure for water cooling of a photovoltaic module. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 45, p. 101111, 2021. ISSN 2213-1388. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821001211>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SHAKIBI, H.; SHOKRI, A.; SOBHANI, B.; YARI, M. Numerical analysis and optimization of a novel photovoltaic thermal solar unit improved by nano-pcm as an energy storage media and finned collector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 179, p. 113230, 2023. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123000862>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SHARMA, A.; WON, L. D.; BUDDHI, D.; PARK, J. U. Numerical heat transfer studies of the fatty acids for different heat exchanger materials on the performance of a latent heat storage system. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 30, n. 14, p. 2179–2187, 2005. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105000364>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SHARMA, R.; GANESAN, P.; TYAGI, V.; METSEL/AAR, H.; SANDARAN, S. Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 95, p. 193–228, 2015. ISSN 0196-8904. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415000989>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SHITTU, S.; LI, G.; ZHAO, X.; AKHLAGHI, Y. G.; MA, X.; YU, M. Comparative study of a concentrated photovoltaic-thermoelectric system with and without flat plate heat pipe. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 193, p. 1–14, 2019. ISSN 0196-8904. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419304832>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SHRIVASTAVA, A.; Prakash Arul Jose, J.; Dilip Borole, Y.; SARAVANAKUMAR, R.; SHARIFPUR, M.; HARASI, H.; Abdul Razak, R.; AFZAL, A. A study on the effects of forced air-cooling enhancements on a 150 w solar photovoltaic thermal collector for green cities. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S. l.], v. 49, p. 101782, 2022. ISSN 2213-1388. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821007967>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SIAHKAMARI, L.; RAHIMI, M.; AZIMI, N.; BANIBAYAT, M. Experimental investigation on using a novel phase change material (pcm) in micro structure photovoltaic cooling system. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, [S. l.], v. 100, p. 60–66, 2019. ISSN 0735-1933. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193318302835>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SILVA, D. D. **Análise térmica, teórica e experimental, de um painel fotovoltaico comercial.** Dissertação (Mestrado em Energia e Sistemas Térmicos) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), Ilha Solteira, Brasil, 2021.

SILVA, D. D.; MARSON, V.; de Souza, R. R.; de Oliveira, J. D.; SILVA, J. B. C.; CARDOSO, E. M. A new predictive model for a photovoltaic module's surface temperature. **Energy Reports**, [S. l.], v. 8, p. 15206–15220, 2022. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722024805>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SILVEIRA NETO, A. da. **Escoamentos Turbulentos: Análise física e modelagem teórica.** Uberlândia, MG, Brasil: Composer, 2020. 634 p.

SMITH, S. E.; VIGGIANO, B.; ALI, N.; SILVERMAN, T. J.; OBLIGADO, M.; CALAF, M.; CAL, R. B. Increased panel height enhances cooling for photovoltaic solar farms. **Applied Energy**, [S. l.], v. 325, p. 119819, 2022. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192201090X>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SU, Y.; SUI, P.; DAVIDSON, J. H. A sub-continuous lattice boltzmann simulation for nanofluid cooling of concentrated photovoltaic thermal receivers. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 184, p. 712–726, 2022. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121017018>. Acesso em: 15 de março de 2025.

SWAMINATHAN, C.; VOLLER, V. A general enthalpy method for modeling solidification processes. **Metallurgical Transactions B**, [S. l.], v. 23, p. 651–664, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02649725>. Acesso em: 15 de março de 2025.

TUNÇBILEK, K.; SARI, A.; TARHAN, S.; ERGÜNEŞ, G.; KAYGUSUZ, K. Lauric and palmitic acids eutectic mixture as latent heat storage material for low temperature heating applications. **Energy**, [S. l.], v. 30, n. 5, p. 677–692, 2005. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544204002944>. Acesso em: 15 de março de 2025.

WONGWUTTANASATIAN, T.; SARIKARIN, T.; SUKSRI, A. Performance enhancement of a photovoltaic module by passive cooling using phase change material in a finned container heat sink. **Solar Energy**, [S. l.], v. 195, p. 47–53, 2020. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19311533>. Acesso em: 15 de março de 2025.

YE, J. Y.; REINDL, T.; ABERLE, A. G.; WALSH, T. M. Performance degradation of various pv module technologies in tropical singapore. **IEEE Journal of Photovoltaics**, [S. l.], v. 4, n. 5, p. 1288–1294, 2014.

YING, S.; ZHANG, X.; WU, Y.; PAN, Z. Solar photovoltaic/thermal(pv/t)systems with/without phase change materials (pcms): A review. **Journal of Energy Storage**, [S. l.], v. 89, p. 111582, 2024. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24011678>. Acesso em: 15 de março de 2025.

YOUSEF, M. S.; SHARAF, M.; HUZAYYIN, A. Energy, exergy, economic, and enviroeconomic assessment of a photovoltaic module incorporated with a paraffin-metal foam composite: An experimental study. **Energy**, [S. l.], v. 238, p. 121807, 2022. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221020557>. Acesso em: 15 de março de 2025.

ZIPPENFENIG, P. **Open-Meteo.com Weather API**. 2023. Disponível em: <https://open-meteo.com/>. Acesso em: 15 de março de 2025.

ZOU, Z.; GONG, H.; WANG, J.; XIE, S. Numerical investigation of solar enhanced passive air cooling system for concentration photovoltaic module heat dissipation. **Journal of Clean Energy Technologies**, [S. l.], v. 5, p. 206–211, 2017. DOI: 10.18178/JOCET.2017.5.3.370.

ÇENGEL, Y. A. **Heat Transfer: A Practical Approach**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2002.