



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONJUGADA EM PLACAS PLANAS INCLINADAS

Maurício Fernandes de Oliveira Assis, mauricio.a3347@ufob.edu.br¹
Kathrine Vogado Nepunuceno Paixão, kathrine.p9478@ufob.edu.br¹
André Issao Sato, andre.sato@ufob.edu.br¹

¹Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, Av. Manoel Novaes, n. 1064, Bairro Centro

Resumo. Este estudo tem como objetivo modelar, por meio de simulação computacional, especificamente utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), o fluxo de calor de 600 W/m² incidente em uma placa plana, considerando a convecção natural e a condução no problema de transferência de calor conjugada. Além disso, são empregados softwares gratuitos, como o OpenFOAM e o Salome-Meca, sendo o Salome utilizado para o processo de criação da geometria e geração de malha, e o OpenFOAM para resolver as equações por meio do Método dos Volumes Finitos. Para a análise, foram adotadas condições de contorno semelhantes às de artigos na literatura, utilizando o solucionador de transferência de calor conjugada chtMultiRegionSimpleFoam. Por fim, a simulação apresentou uma diferença de temperatura média na placa de 5,90% em comparação com o artigo de referência, além de apresentar uma distribuição de temperatura semelhante.

Palavras chave: chtMultiRegionSimpleFoam. OpenFOAM. Placa Solar. Transferência de calor.

Abstract. The aim of this study is to model, by means of computer simulation, specifically using Computational Fluid Dynamics (CFD), the heat flow of 600 W/m² incident on a flat plate, considering natural convection and conduction in the conjugate heat transfer problem. In addition, free software is used, such as OpenFOAM and Salome-Meca, with Salome being used to create the geometry and generate the mesh, and OpenFOAM to solve the equations using the Finite Volume Method. For the analysis, boundary conditions similar to those in articles in the literature were adopted, using the chtMultiRegionSimpleFoam conjugate heat transfer solver. Finally, the simulation showed an average temperature difference in the plate of 5,90% compared to the reference article, as well as a similar temperature distribution.

Keywords: chtMultiRegionSimpleFoam. Heat transfer, OpenFOAM, Solar panel.

1. INTRODUÇÃO

A energia renovável mais abundante no mundo é a energia solar, e pode ser classificada de duas formas: a fototérmica e a fotovoltaica. A quantidade de energia que um módulo fotovoltaico (PV) pode produzir depende principalmente do seu tipo, composição e fatores ambientais (principalmente temperatura e irradiância solar). Todavia, condições ideais são raramente replicadas em ambiente real, e os módulos PV geralmente não atingem o seu desempenho nominal. Dessa forma, a eficiência energética de placas fotovoltaicas é em torno de 13 a 20% em condições operacionais e apresenta um comportamento de redução com o aumento da temperatura da placa (Hernandez-Perez, *et al.*, 2020).

Há duas técnicas de resfriamento para painéis fotovoltaicos: resfriamento passivo e resfriamento ativo. O resfriamento passivo demonstra potencial maior devido à facilidade de implementar e funcionar sem a necessidade de consumo de energia, ao contrário dos sistemas ativos (Ahmed, *et al.*, 2022; Krstic, *et al.*, 2024; Hernandez-Perez, *et al.*, 2020).

A investigação das trocas térmicas da placa com o ambiente pode ser realizada por meio de experimentos em laboratório, medição no local e simulação de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Nesse sentido, a análise por meio da CFD tem vantagem em comparação a experimental devido a possibilidade de modelar o projeto em ambiente virtual, minimizando as despesas e o tempo para a fabricação e teste dos protótipos experimentais. Nesse contexto, o OpenFOAM pode ser utilizado para aplicação em problemas fluidodinâmicos e térmicos, desenvolvida na linguagem C++ e o software utiliza o Método de Volumes Finitos para resolver as equações (Zhou, *et al.*, 2023; OpenCFD, 2024).

Portanto, o objetivo deste estudo foi aplicar o solucionador chtMultiRegionSimpleFoam do OpenFOAM para simular uma placa inclinada aquecida com fluxo de calor conhecido na parte superior da mesma, que representaria uma placa fotovoltaica sujeita a convecção natural, e comparar os resultados com a literatura específica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para uma compreensão aprofundada dos princípios abordados neste estudo, é essencial a explanação dos fundamentos relacionados ao tema de pesquisa, bem como a descrição do problema. Com o aumento do uso da energia solar nos últimos anos, diversos estudos foram conduzidos no intuito de diminuir a temperatura operacionais, consequentemente, aumentando a eficiência do painel fotovoltaico. Nesse sentido, nos estudos foram utilizados métodos numéricos e experimentais para explorar o resfriamento passivo por meio de convecção natural. Esta seção expõe alguns trabalhos realizados.

Marinić-Kragić, *et al.* (2018) exploram o impacto das condições térmicas e de vento estocásticas na temperatura de operação e no desempenho dos painéis fotovoltaicos. Utilizando um modelo numérico validado experimentalmente, várias simulações CFD foram realizadas para analisar o fluxo de calor e de fluido em torno de um painel fotovoltaico monocristalino, bem como a transferência de calor dentro dos elementos do painel. Este estudo foi de grande importância, pois a temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos influencia diretamente sua eficiência e longevidade. O objetivo foi investigar o campo de transferência de calor e as variações de temperatura do painel em relação a diferentes velocidades de vento e condições de fonte de calor. Dessa forma, este trabalho estabelece uma base sólida e confiável para realizar simulações CFD, permitindo uma melhor compreensão e otimização do desempenho térmico dos painéis fotovoltaicos sob condições ambientais variáveis.

Nazari e Eslami (2021), motivados pelo trabalho anterior, investigam o efeito da geometria das estruturas em módulos fotovoltaicos no fluxo de fluido e na transferência de calor. Padrões de perfurações são introduzidos na estrutura de alumínio como método de resfriamento passivo. Simulações de CFD são realizadas para analisar o campo de fluxo, temperatura e saída de energia em condições de convecção forçada e natural. Este estudo é particularmente importante, pois aborda a eficiência dos métodos de resfriamento passivo para melhorar o desempenho dos módulos PV. Os resultados mostram que as perfurações são eficazes na redução da temperatura em convecção natural, mas têm pouco impacto em convecção forçada. Um projeto com perfurações circulares de 10 mm demonstrou uma melhoria de 0,62% na geração de energia em condições específicas. Este trabalho introduz a convecção natural de forma numérica e foi a base para a implementação deste estudo no OpenFOAM.

A formulação de transferência de calor conjugada, acoplada ou adjunta é frequentemente analisada, inclusive em transferência de calor em painéis fotovoltaicos. Nesse contexto, esses problemas geralmente contêm dois ou mais subdomínios, descritos por diferentes equações diferenciais. Portanto, a transferência de calor é considerada como um problema conjugado quando há transferência de calor por condução nas regiões sólidas e convecção entre o sólido e fluido (Renze e Akermann, 2019).

O OpenFOAM é uma ferramenta computacional desenvolvida na linguagem C++ e utilizada para a aplicação do Método de Volumes Finitos em problemas fluidodinâmicos e térmicos. O *chtMultiRegionSimpleFoam* é um solucionador especialmente concebido para simulações de estado estacionário que envolvem o fluxo de fluidos tanto laminar quanto turbulento e a condução de calor em sólidos. Ele é projetado para lidar especificamente com a transferência de calor conjugada (CHT) entre regiões sólidas e fluidas, o que o torna apropriado para uma variedade de problemas multifásicos nos quais a interação entre fases fluidas e sólidas desempenha um papel crucial (OpenCFD, 2024).

3. METODOLOGIA

Os detalhes da configuração da modelagem numérica são discutidos aqui. Além disso, esta seção inclui as especificações da placa plana, dimensões do domínio computacional, geração da malha e condições de contorno. O OpenFOAM é executado em sistemas operacionais Linux. Neste trabalho, foi utilizado a versão 2312 do OpenFOAM, no sistema operacional Ubuntu 22.04 LS por meio da máquina virtual WSL (Subsistema do Windows para Linux), instalado no Windows 11. O computador utilizado tem as seguintes configurações: modelo de notebook com 32 GB de memória RAM, aproximadamente 1 TB de armazenamento, placa de vídeo dedicada Nvidia GeForce RTX 3050 de 4 GB e processador Intel Core i5 de 2,5 GHz, utilizando processamento paralelo com dois núcleos.

3.1. Modelo computacional

A criação da geometria foi realizada por meio do *software* Salome-Meca. Uma placa inclinada tridimensional foi desenhada a uma altura de 0,5 m acima do solo com um ângulo de inclinação de 20°, para simular uma placa fotovoltaica modelo SL-50AA36. O domínio computacional de dimensões 3x1,8x3 metros com a placa é representado na Fig. 1 (Nazari e Eslami, 2021).

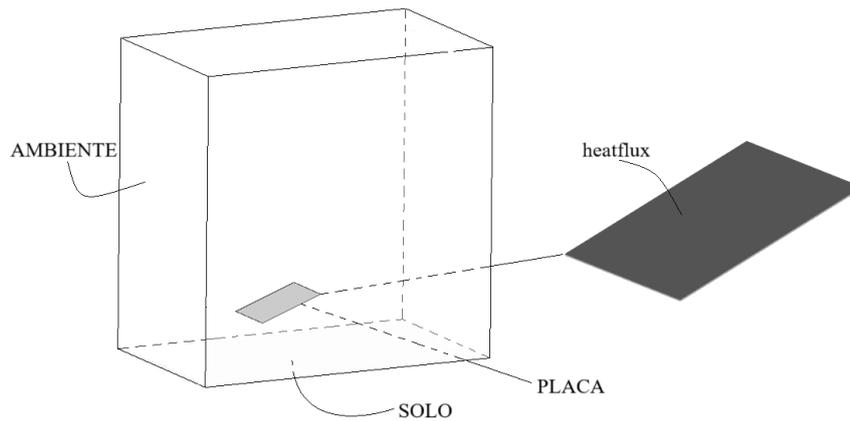


Figura 1. Geometria do domínio computacional (Autores, 2024)

As diferentes camadas do módulo (vidro, células fotovoltaicas e folha traseira) foram representadas como uma única camada com as propriedades médias. As propriedades do ar e dos materiais do módulo, incluindo cada camada fotovoltaica e a camada equivalente resultante, são apresentadas na Tab. 1 (Nazari e Eslami, 2021).

Tabela 1. Propriedades termo físicas do ar e componentes do painel fotovoltaico (Nazari e Eslami, 2021)

Material	Condutividade térmica (W/mK)	Capacidade de aquecimento (J/kgK)	Densidade (kg/m ³)	Espessura da camada (mm)
Alumínio	202,4	871	2719	-
Ar	0,0242	1006,43	1,225	-
Vidro	0,8	800	2530	3
Painel fotovoltaico	150	700	1000	0,3
Parte inferior da placa	0,35	800	800	0,3
Camada equivalente	13,196	731,66	2258,34	3,6

A discretização da geometria foi conduzida no *software* Salome Meca, realizando um refinamento na região da placa. Três malhas foram geradas com uma taxa de refinamento aproximada de 2,23 entre uma malha e outra. No processo de exportação da malha foram utilizados comandos nativos do OpenFOAM e teve início através do utilitário *ideasUnvToFoam*, o qual é capaz de reconhecer a malha produzida pelo Salome. Posteriormente, foi empregado o comando *createBaffles* para criar uma superfície em comum entre a placa e o domínio, com o intuito de aplicar condições de contorno de interface.

Em seguida, procedeu-se à divisão da malha utilizando o comando *splitMeshRegion*, segmentando o domínio (ambiente e solo) da placa. Por fim, a malha foi inspecionada por meio do comando *checkMesh*. A Fig. 2 apresenta a esquematização do processo de exportação da malha para o OpenFOAM.

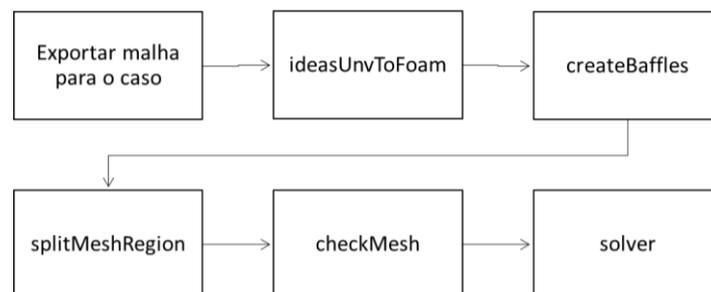


Figura 2. Esquematização do processo de exportação de malha (Autores, 2024)

Foi aplicada condições de contorno semelhantes ao trabalho desenvolvido por Nazari e Eslami (2021). Outrossim, o método para resolver o acoplamento pressão-velocidade foi o algoritmo SIMPLE e o modelo de turbulência utilizado foi k-Omega. A Fig. 3 especifica as condições de contorno nas regiões.

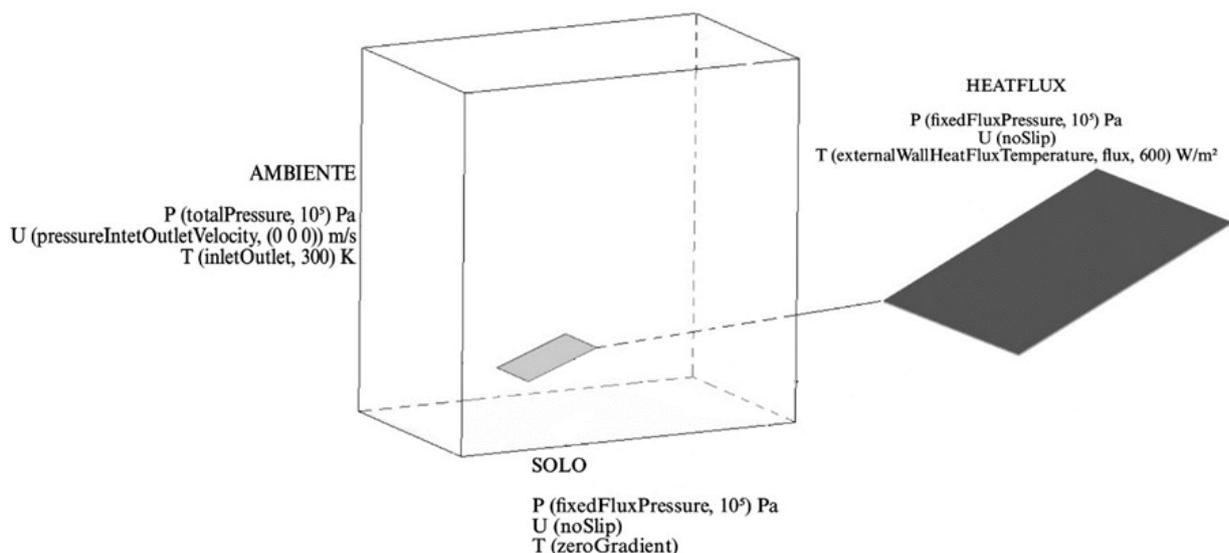


Figura 3. Condições de contorno (Autores, 2024)

Considerando a definição do problema fluidodinâmico, na superfície chamada "Ambiente", foi aplicada uma condição de entrada e saída de fluido, denominada de *pressureInletOutletVelocity* no OpenFOAM, enquanto nas regiões "solo", "heatflux" e "placa", foi aplicada a condição de não deslizamento, conhecida como *noSlip*. Para o campo de pressão foi estabelecido um valor inicial em todas as regiões de 10^5 Pa, com a condição de pressão constante em todas as superfícies.

Para o problema térmico, foi aplicado um fluxo de calor conhecido na superfície "heatflux", definido como uniforme e com um valor de 600 W/m^2 . Para a superfície "ambiente", fluxo de massa entrando foi considerado com temperatura de 300 K . A superfície "solo" foi tratada como adiabática.

Os fatores de relaxamento definidos foram $0,8$ para a entalpia e $0,3$ para a pressão absoluta-estática. Os critérios de convergência foram estabelecidos em 10^{-7} para p_rgh e 10^{-6} para h . Ademais, um critério de independência de malha proposto por Ahmed, *et al.* (2022) foi utilizado e, posteriormente, dados de temperatura, velocidade e pressão foram obtidos e comparados para validação do modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão destacados os principais resultados da simulação, incluindo informações sobre a estabilidade e a duração do processo de simulação, detalhes relativos à malha utilizada, bem como visualizações dos campos vetoriais de velocidade e distribuição da temperatura. As três malhas obtidas com suas respectivas temperaturas médias na placa e o tempo de simulação são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2. Resultados com o refinamento da malha (Autores, 2024)

Número de elementos	Temperatura (K)	Tempo (horas)
423638	390,90	6,41
947453	384,81	17,40
2117766	386,74	56,71

A análise de validação da malha compreendeu apenas 3 modelos, com uma diferença entre a temperatura da malha mais refinada para malha intermediária de $0,50\%$. Dessa forma, por apresentar um erro relativo menor que 1% , foi selecionado a malha de 947453 elementos para análise dos resultados por corresponder um menor custo computacional comparado à malha mais refinada. Diante disso, na Fig. 4 é possível avaliar a temperatura média com o número de elementos.

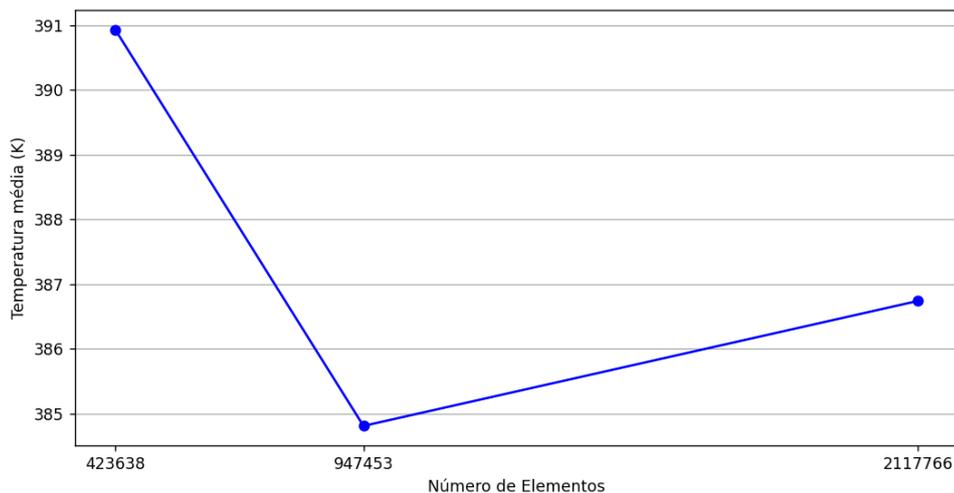


Figura 4. Independência de malha (Autores, 2024)

A estabilidade e convergência da simulação foi analisada por meio do gráfico de resíduos em função do número de interações, conforme indicado na Fig. 5.

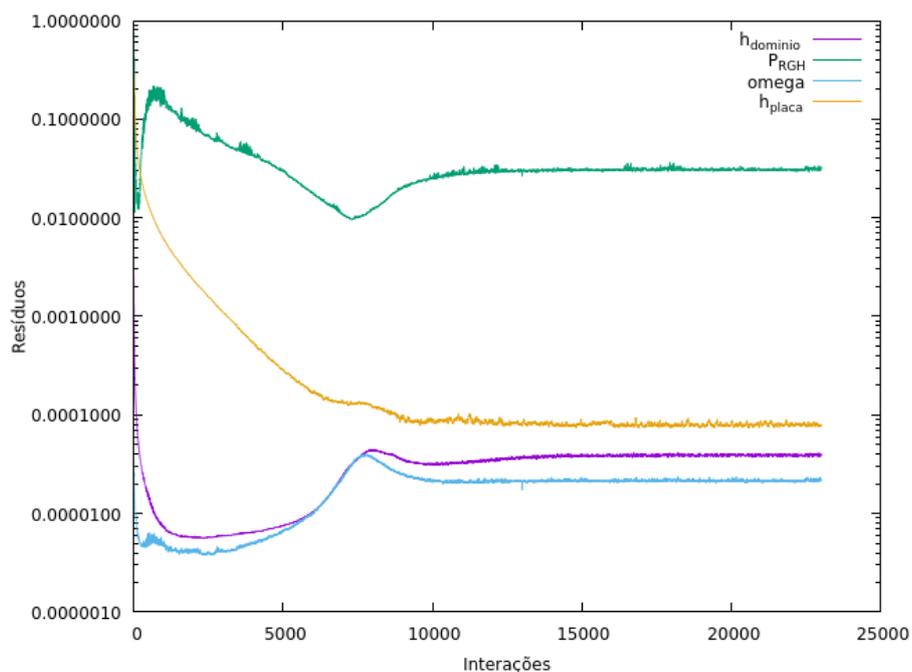


Figura 5. Gráfico dos resíduos (Autores, 2024)

A simulação não atingiu o critério de convergência especificado acima, mas, ao observar a Fig. 5, a estabilidade é alcançada após cerca de 13000 interações, com os resíduos reduzidos para ordem de 10^{-1} a 10^{-2} para pressão absoluta-estática e 10^{-4} a 10^{-5} para entalpia (h). Os valores de resíduos observados foram de 0,0001% em relação ao valor estabelecido de pressão absoluta-estática, indicando uma discrepância suficientemente pequena para considerar a simulação convergida por estabilidade.

Ademais, outro parâmetro importante é o valor de y^+ (y Plus) nas paredes, o qual está associado à velocidade de atrito e deve ser levado em consideração no modelo de turbulência k - Ω , onde foram obtidos valores mínimos e máximos próximos à placa de 0,50 e 3, respectivamente.

A Figura 6 exibe o campo de velocidade, demonstrando a dinâmica do ar aquecido pela placa. Nota-se o movimento ascendente do ar quente, acompanhado pela formação de regiões de recirculação dentro do domínio. Tais formações estariam condizentes com os estudos desenvolvidos por Naghavi, *et al.* (2021) e Nazari e Eslami (2021).

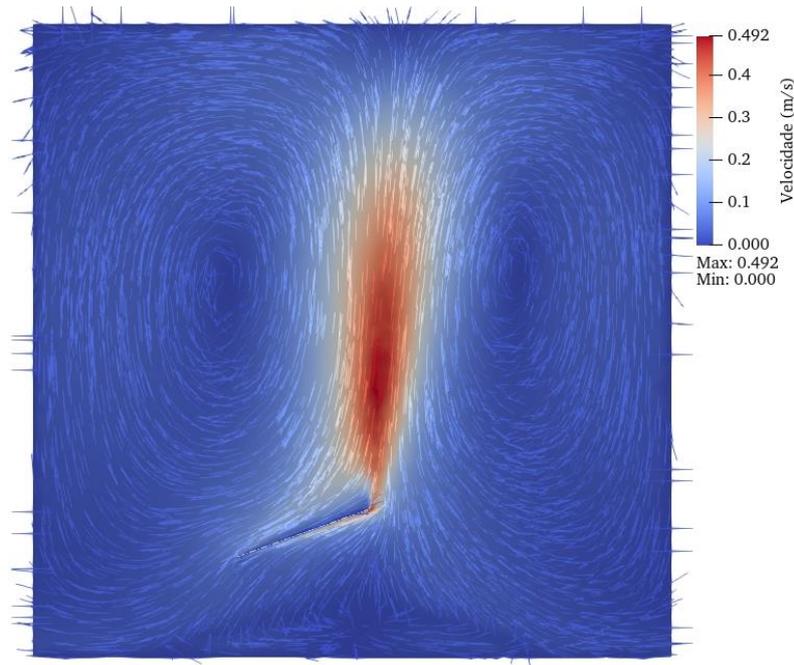


Figura 6. Campo de velocidade com vetores (Autores, 2024)

Na Figura 7 é apresentada o campo de temperatura, o ar próximo a placa é aquecido, consequentemente, há uma diferença de densidade em relação ao meio.

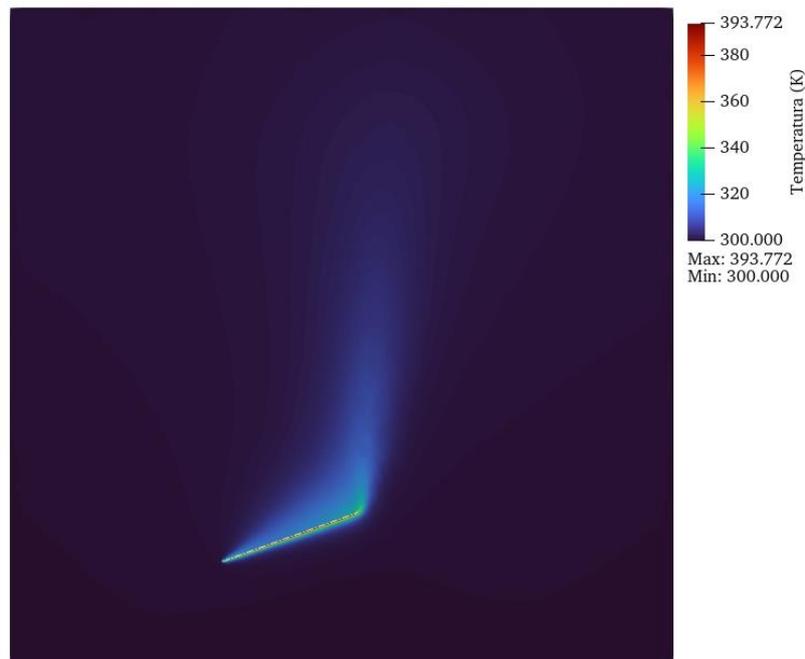


Figura 7. Campo de temperatura (Autores, 2024)

O comportamento do campo de temperatura foi semelhante ao encontrado por Nazari e Eslami (2021). Outrossim, a temperatura média da placa foi de 384,81 K e a distribuição de temperatura na placa foi similar à apresentada no artigo de referência. As Fig. 8 e Fig. 9 permitem a comparação da distribuição de temperatura na placa.

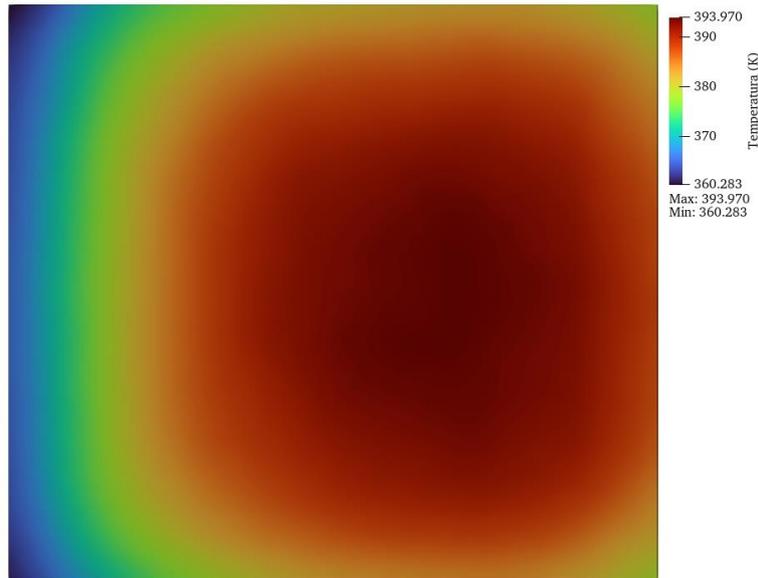


Figura 8. Distribuição da temperatura na placa (Autores, 2024)

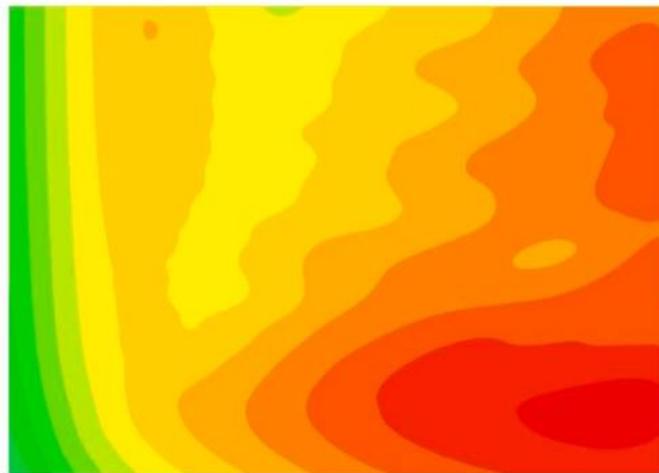


Figura 9. Distribuição da temperatura na placa (Nazari e Eslami, 2021)

Dessa forma, a temperatura média da placa apresentou um desvio de 5,90% dos resultados de Nazari e Eslami (2021), considerando a malha utilizada pelos mesmo de 10.582.832 elementos e a hipótese de Boussinesq. A simplificação empregada na utilização da aproximação de Boussinesq pode sugerir uma possível relação com a diferença na temperatura média da placa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de uma placa plana submetida a um fluxo de calor conhecido foi analisado quanto à transferência de calor conjugada, por meio do solucionador *chtMultiRegionSimpleFoam*, obtendo um valor de temperatura média na placa de 384,81 K. Comparativamente ao trabalho desenvolvido por Nazari e Eslami (2021) o valor compreendeu uma diferença de 5,90% da referência.

Dessa forma, é possível indicar sugestões para trabalhos futuros:

- Utilizar o modelo de turbulência k-Omega SST por apresentar melhores resultados nas regiões próximo a parede;
- Ao utilizar o modelo k-Omega SST avaliar adicionar elementos prismáticos próximo a placa;
- Avaliar a temperatura utilizando sistema de arrefecimento por aletas, com o *chtMultiRegionSimpleFoam* é possível avaliar a condução de calor da placa para as aletas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

7. REFERÊNCIAS

- Ahmed, Ishtiaq, Hossain Azmain Farhin, and Saziea Afrin Heme, 2022. Design and Analysis of Heat Sink Configurations for Passive Cooling of Solar Panels. Diss. *Department of Mechanical and Production Engineering*, Islamic University of Technology, Gazipur, Bangladesh.
- Hernandez-Perez, J. G., *et al.*, 2020. "A new passive PV heatsink design to reduce efficiency losses: A computational and experimental evaluation." *Renewable Energy* 147: 1209-1220.
- OpenCFD Ltd. OpenFOAM Documentario. Disponível em: <https://doc.openfoam.com>. Acesso em: 15 mar. 2024
- Krstic, Marko, *et al.*, 2024. "Passive cooling of photovoltaic panel by aluminum heat sinks and numerical simulation." *Ain Shams Engineering Journal* 15.1, 102330.
- Marinić-Kragić, Ivo, *et al.*, 2018. "Analysis of flow separation effect in the case of the free-standing photovoltaic panel exposed to various operating conditions." *Journal of cleaner production* 174: 53-64.
- Naghavi, M. S., *et al.*, 2021. "Experimental and numerical assessments of underlying natural air movement on PV modules temperature." *Solar Energy* 216: 610-622.
- Nazari, S., and M. Eslami., 2021. "Impact of frame perforations on passive cooling of photovoltaic modules: CFD analysis of various patterns." *Energy Conversion and Management* 239: 114228.
- Renze, Peter, and Kevin Akermann., 2019. "Simulation of conjugate heat transfer in thermal processes with open source CFD." *ChemEngineering* 3.2: 59.
- Zhou, Qi, *et al.*, 2023. "Analyzing the interactions between photovoltaic system and its ambient environment using CFD techniques: A review." *Energy and Buildings*: 113394.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.