



# Simulação computacional de uma placa aquecida: aplicação do software OpenFOAM

Palavras-Chave: PLACA AQUECIDA. TRANSFERÊNCIA DE CALOR. OPENFOAM.

Autores:

MAURÍCIO FERNANDES DE OLIVEIRA ASSIS, UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

Prof. Dr. ANDRÉ ISSAO SATO (orientador), UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

---

## INTRODUÇÃO:

A energia renovável mais abundante no mundo é a energia solar, e pode ser classificada de duas formas: a térmica e a fotovoltaica. Sua produção baseia-se no efeito fotovoltaico que é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade.

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).

Nesse contexto, é possível conduzir uma análise térmica das trocas de calor da placa com o meio, para posteriores estudos quanto ao controle de temperatura destes equipamentos e aplicação de sistemas de arrefecimento com o objetivo de aumentar a eficiência energéticas dos mesmos. Para tal análise, faz-se necessário o uso de softwares para a solução das equações de conservação (massa, energia e quantidade de movimento), que se apresentam complexas ao ponto de soluções analíticas serem impraticáveis. O método de volumes finitos, assim, auxiliados por *softwares* pode ser aplicado para esses problemas (Coelho, 2016).

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 (OpenCFD, 2023). O mesmo não possui interface de usuário gráfica nativa e, portanto, apresenta uma dificuldade de utilização e aplicação para estudos na graduação.

Neste sentido, este trabalho consiste na aplicação do *software* de código aberto OpenFOAM®, para a simulação de uma placa aquecida e posicionada em um ambiente que representaria a condição de um painel fotovoltaico e sua distribuição de temperatura no meio. Sendo necessária a apresentação da convergência da simulação, os campos de temperatura e velocidade para a verificação da aplicabilidade do programa de computador.

## METODOLOGIA:

O OpenFOAM® é um software executado nos sistemas operacionais Linux. No trabalho, foi usado a versão 2206 do OpenFOAM®, no sistema operacional Ubuntu 22.04 LS e por meio da máquina virtual WSL 2 (Subsistema do Windows para Linux), instalado no Windows 11.

O computador utilizado tem as seguintes configurações: modelo de notebook Acer Nitro 5 com 32 GB de memória RAM, aproximadamente 1 TB de armazenamento, placa de vídeo dedicada Nvidia GeForce GTX 1650 de 4 GB e processador Intel Core i5 de 2,5 GHz.

O solucionador utilizado para o caso foi o *buoyantSimpleFoam*, recomendado para problemas fluidodinâmicos e térmicos em escoamentos compressíveis (OpenCFD, 2023), e o método para resolver o acoplamento pressão-velocidade foi o algoritmo SIMPLE programado no *software*.

Para a construção da geometria do caso, foi utilizado o *software* Inventor da Autodesk®, sendo o domínio computacional de dimensões 10x10x10 metros, representando o ambiente e uma placa em seu interior que representaria um painel fotovoltaico, de dimensões 1x2x0,04 metros, angulação de 13° e a uma altura de 1,6 metro em relação ao solo. A Figura 1 abaixo mostra o esquema da configuração do modelo.

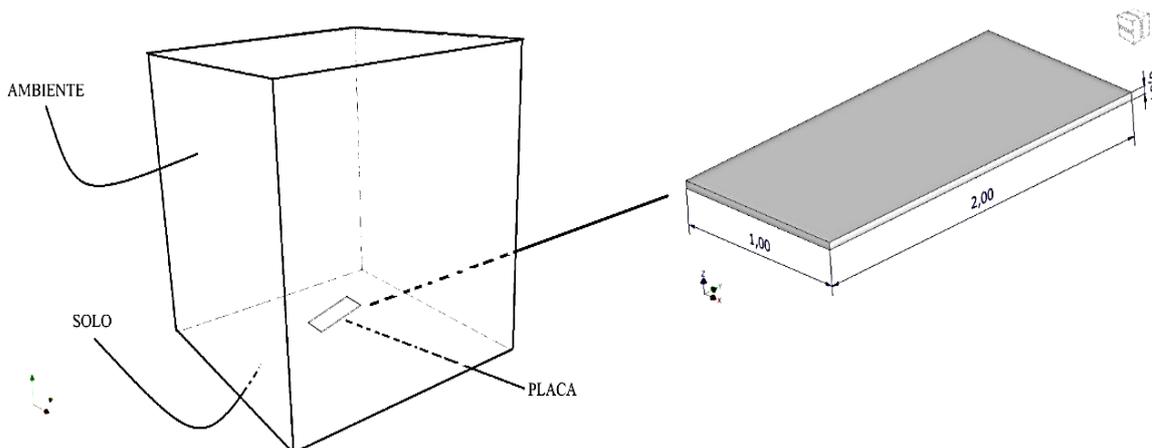


Figura 1 – Representação do domínio e suas faces e dimensões da placa

Fonte: Autores (2023).

Para a criação da malha no OpenFOAM® (conforme Figura 2), foi executada a ferramenta *surfaceFeatureExtract*, que extrai características geométricas das superfícies de uma dada geometria. Posteriormente, por meio do comando *blockMesh*, foi gerada uma malha grosseira, hexaédrica e estruturada, e que, posteriormente, foi refinada pela ferramenta *snappyHexMesh*.

As condições de contorno foram especificadas em cada face do domínio e os valores iniciais das variáveis.

Para a velocidade, na superfície denominada Ambiente, foi definida uma condição de acoplamento entre a vazão e o diferencial de pressão na região – condição denominada *pressureInletOutletVelocity*, no OpenFOAM® – enquanto para o Solo e a Placa, foi definida a condição de não deslizamento - *noSlip*.

Na variável pressão, foi estabelecida para todas as regiões o valor de 101325 Pascal como pressão absoluta.

Quanto a temperatura, foi fixada a condição de contorno de valor conhecido – *fixedValue* - de 300 K para o Solo e ambiente externo. Para a placa, foi estabelecido o valor de 400 K.

O modelo de turbulência utilizado consistiu no k-epsilon e as constantes de turbulência utilizadas foram os valores padrões. Conforme extraído do manual do usuário: (Cmu 0,09), (C1 1,44), (C2 1,92), (C3 0,0), (sigmak 1,0) e (sigmaEps 1,3) (OpenCFD, 2023).

O método de discretização geral utilizado consistiu na integração gaussiana para os volumes finitos e os critérios de convergência utilizados foram os valores de 1e-5 para X, Y e Z ( $p\_rgh$ ) e 1e-6 (U, h) para X, Y e Z.

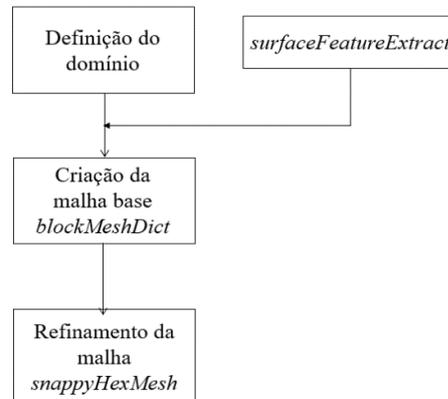


Figura 2 – Esquematização do processo de geração da malha

Fonte: Autores (2023).

Por fim, o pós processamento por meio do *software* ParaView® versão 5.11.0 permitiu observar os campos de velocidade, temperatura e pressão. Além disso, por intermédio do *software* Gnuplot® versão 5.4, construiu-se uma curva da evolução dos resíduos em relação ao número de interações, no intuito de acompanhar a estabilidade da simulação e sua convergência.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Nessa seção, serão apresentadas as principais informações obtidas da simulação, como estabilidade e tempo da simulação, dados da malha, campos vetoriais de velocidade, pressão e temperatura. A malha obtida para o domínio computacional é indicada na Figura 3, a mesma apresentou 1993702 elementos hexaédricos, sendo o refinamento realizado próximo a placa aquecida e apresentou 16982 elementos na superfície.

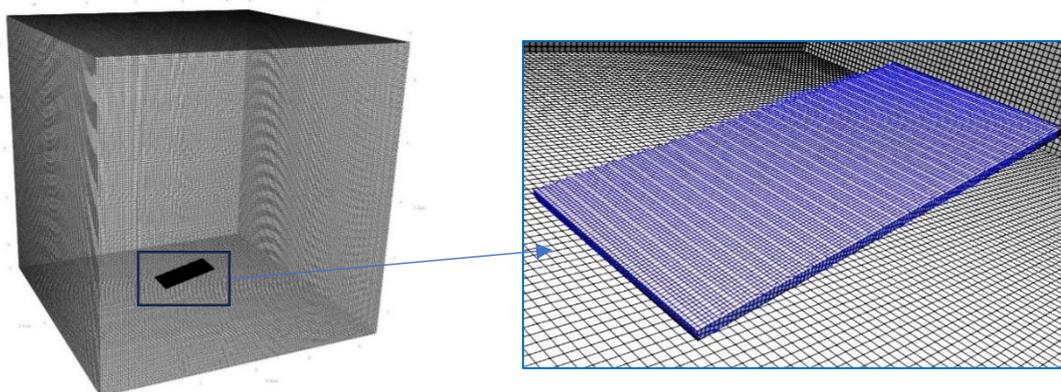


Figura 3 – Malha do domínio computacional

Fonte: Autores (2023).

A estabilidade e convergência da simulação foi avaliada por meio do gráfico de resíduos em relação ao número de interações, como demonstra a Figura 4.

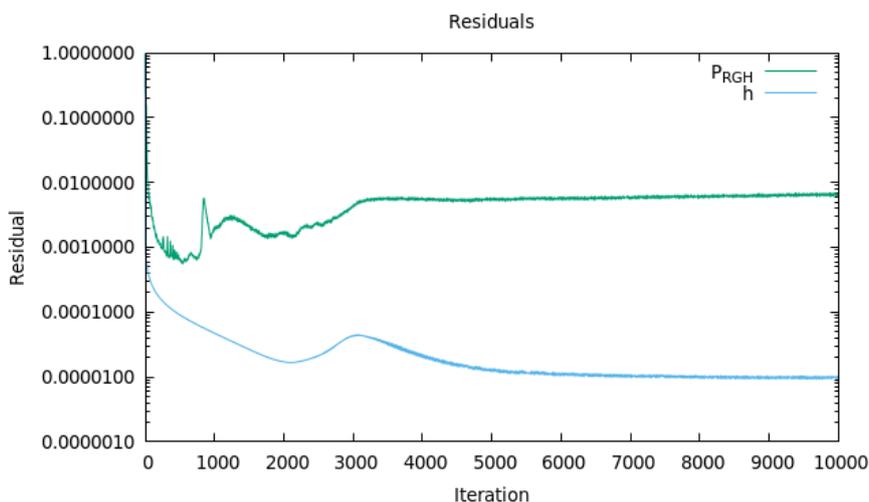


Figura 4 – Gráfico dos resíduos

Fonte: Autores (2023).

A simulação não chegou no valor inserido como critério de convergência, no entanto, ao analisar a Figura 4 é perceptível a estabilidade a partir da interação 5000, com valores de resíduos na ordem de  $10^{-3}$  para  $p\_rgh$  – que consiste na pressão absoluta - e  $10^{-5}$  para  $h$  – que consiste na entalpia. Os valores de resíduos obtidos foram  $3,88 \times 10^{-8} \%$  do valor estabelecido para a pressão absoluta e  $2,05 \times 10^{-3} \%$  para os valores obtidos de entalpia; representando uma parcela pequena o suficiente para se considerar que

a simulação estava convergida. Cabendo ressaltar que o tempo de simulação foi de, aproximadamente, 18 horas para 10000 interações.

O campo de velocidades, apresentado na Figura 5, mostra o comportamento do ar aquecido pela placa isotérmica, indicando comportamento ascendente do ar quente e a presença de regiões de recirculação no interior do domínio.

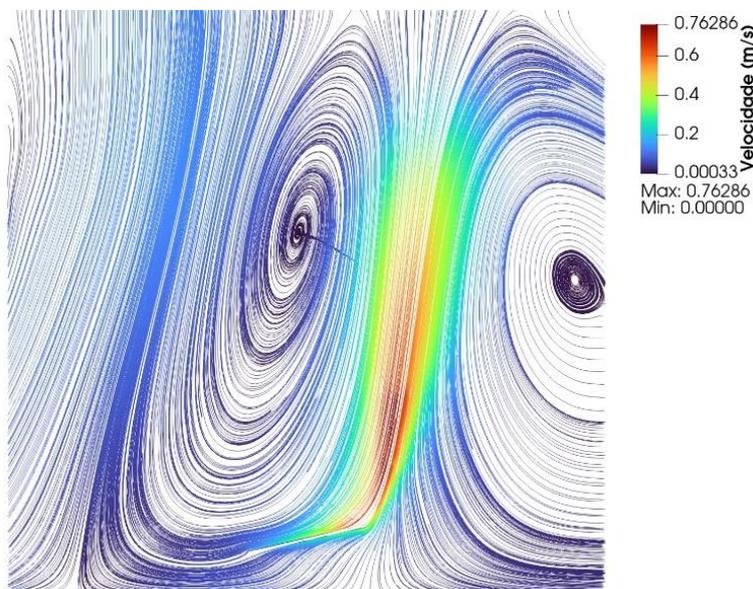


Figura 5 – Campo de velocidade

Fonte: Autores (2023).

O campo de velocidade tem um comportamento semelhante ao de Naghavi et al. (2021) onde é possível observar as células de convecção que são desenvolvidas em uma direção perpendicular a placa, inclinada, podendo levar a padrões de circulação de ar em espiral.

O campo de temperatura pode ser observado na Figura 6, a placa apresenta temperatura estabelecida de 400 K, enquanto o ar próximo à mesma sofre aquecimento e eleva por diferença de densidade com o meio. O ar aquecido se mistura com o ar ambiente, que está a 300 K, e ao mesmo tempo que resfria.

O comportamento do campo de temperatura é análogo ao observado em Nazari (2021). Nesse sentido, vale ressaltar que a avaliação dos ângulos de inclinação da placa fotovoltaica é importante no arrefecimento convectivo, apesar da escolha ser a incidência solar máxima. Ademais, a transferência de calor da placa inclinada é superior a uma horizontal (Dabaghzadeh, 2019).

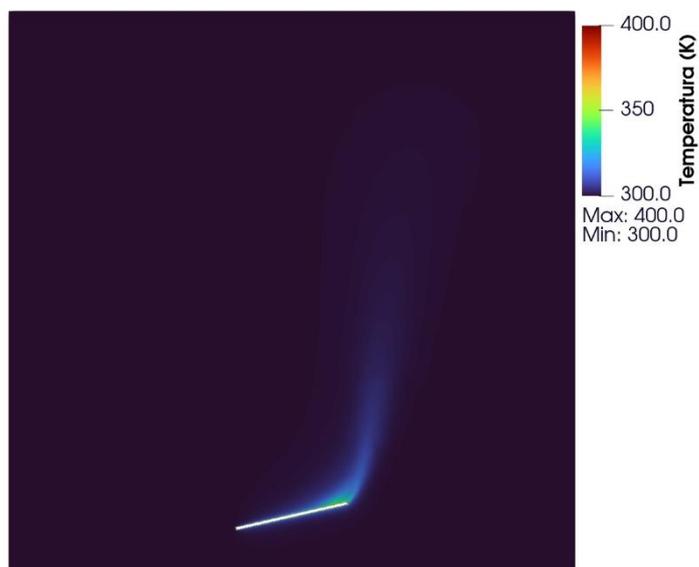


Figura 6 – Campo de temperatura para  $t=10000s$

Fonte: Autores (2023).

## CONCLUSÃO:

Neste trabalho de pesquisa, foi aplicado o software OpenFOAM® para a simulação do comportamento de uma placa aquecida em um domínio aberto, os resultados obtidos por meio do

método de volumes finitos foram satisfatórios quanto aos resíduos acumulados e o comportamento final foi condizente com o comparado com a literatura.

## **AGRADECIMENTOS:**

O autor agradece o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

## **BIBLIOGRAFIA**

COELHO, C. M. **Energia e fluidos: transferência de calor**, vol. 3. Editora Blücher, 2016.

J.G. HERNANDEZ-PEREZ, J.G. CARRILLO, A. BASSAM, M. Flota-Banuelos, L.D. Patino-Lopez, **A new passive PV heatsink design to reduce efficiency losses: A computational and experimental evaluation**, Renewable Energy, Volume 147, Part 1, 2020, Pages 1209-1220, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.088>.

OpenCFD Ltd. **OpenFOAM Documentario**. Disponível em: <https://doc.openfoam.com>. Acesso em: 6 jul. 2023.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN T. L., E LAVINE, A. S., 2008, **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**, 6ª Edição, LTC.

VERSTEEG, H. K.; AND MALALASEKERA, W., 2007, **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**, 2nd Edition, Longman Scientific and Technical.

SILVA et al. “**OpenFOAM Simulation and Experimental Analysis of the Influence of Geometric Parameters of Heat Sinks on Natural Convection.**” (2016).

M.S. NAGHAVI; A. ESMAEILZADEH; B. SINGH; B.C. ANG; T.M, YOON; K.S. ONG, **Experimental and numerical assessments of underlying natural air movement on PV modules temperature**, Solar Energy, Volume 216, 2021, Pages 610-622, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.007>.

S. NAZARI; M. ESLAMI, **Impact of frame perforations on passive cooling of photovoltaic modules: CFD analysis of various patterns**, Energy Conversion and Management, Volume 239, 2021, 114228, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114228>.

DABAGHZADEH, N.; ESLAMI, M. **Temperature distribution in a photovoltaic module at various mounting and wind conditions: a complete CFD modeling**. Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 11, n. 5, 2019, <https://doi.org/10.1063/1.5114895>.