



UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS LIVRES PARA SIMULAÇÃO DE CONVECÇÃO NATURAL EM PLACA SOLAR

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.4021

Vinicius Silva Figueredo - vinicius.figueredo@ufob.edu.br
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Nuccia Carla Arruda de Sousa - NUCCIACAS@HOTMAIL.COM
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

Resumo: *O uso crescente de ferramentas computacionais aplicadas na engenharia tem sido um fenômeno recente, devido principalmente ao atual avanço tecnológico. Associado a isso, existe a dificuldade de acesso a programas comerciais ou os que limitam suas configurações para uso, além de limitações de acesso em computadores pessoais, sendo restrito ao espaço físico acadêmico ou empresas. As ferramentas utilizadas são OpenFOAM, Salome-Meca e Paraview, ferramentas completas e gratuitas, com uma gama de aplicações e com uma série de possibilidades iguais ou superior aos softwares pagos bem consolidados no mercado. Através das ferramentas mencionadas, este artigo teve como finalidade utilizar e demonstrar o poder de programas de código aberto em estudos com fluidodinâmica computacional associando o conhecimento de convecção em placas planas horizontais com placas solares, observando o acréscimo de temperatura localmente em um ambiente fechado.*

Palavras-chave: *Fluidodinâmica computacional, métodos numéricos, convecção, placas solares, programas de código aberto*



UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS LIVRES PARA SIMULAÇÃO DE CONVECÇÃO NATURAL EM PLACA SOLAR

1 INTRODUÇÃO

Os mecanismos de transferência de calor são conhecidos como, condução, convecção e radiação. Conhecer estes mecanismos de transferência de calor e suas especificidades, representa em engenharia compreender o comportamento fundamental de diversos problemas presentes no dia a dia. A condução de calor pode ser definida como a transferência de energia entre partícula de maior energia para a vizinhança com menor energia. A convecção é caracterizada como a transferência de calor associada ao escoamento de fluidos sobre sólidos. Por fim, a radiação é caracterizada por ser a transferência de calor através da emissão de ondas eletromagnéticas pelo corpo, ou entre corpos, não necessitando de um meio para a sua propagação (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2003).

A convecção no ensino da engenharia frequentemente é apresentada de forma simplificada, uma vez que o fenômeno apresenta um alto grau de complexidade uma vez que apresenta uma combinação da transferência de calor com a mecânica dos fluidos, e principalmente quando se é tratado considerando a turbulência presente no escoamento, desta forma a fluidodinâmica computacional, integrada com diversos métodos numéricos, apresenta-se como alternativa para soluções aproximadas de fenômenos complexos, muitas vezes encontrados no dia a dia dos estudos em engenharia (MALISKA, 2017).

Este artigo concentra-se no estudo da transferência de calor por convecção em um modelo com características de Placa Solar plana, onde discutiremos os efeitos por convecção natural, que diferentemente da convecção forçada, no qual ocorre quando há a presença de um mecanismo para impulsão do fluxo de fluido, ocorre quando um fluido em contato com um sólido ganha ou perde temperatura, variando a sua massa específica. Para o caso em que o fluido ganha temperatura ocorre a movimentação ascendente da parcela de fluido aquecido, devido ao efeito de empuxo, pois houve uma diminuição de sua massa específica. Da mesma forma, o fluido que teve contato com um sólido com menor temperatura irá diminuir sua temperatura, logo sua massa específica tende a aumentar, causando um movimento descendente (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

Aplicando a fluidodinâmica computacional com o método dos volumes finitos (MVF), este trabalho buscou demonstrar a dinâmica envolvendo a convecção natural em uma placa plana horizontal considerando um ambiente fechado. Como solucionador na etapa de processamento para resolução do método numérico, utilizamos o software de código aberto e livre, o OpenFOAM, que utiliza o MVF escrito na linguagem C++ (OPENFOAM, 2022). Além deste software, foram utilizados outros softwares livres e de código aberto, O Salome Plataforma, para geração do domínio computacional e construção da malha, que faz parte do pré-processamento. Para o pós-processamento que é a etapa de visualização dos dados obtidos foi utilizado o software Paraview, apresentando uma boa integração com o OpenFOAM. A utilização de softwares gratuitos apresenta um contexto especial, pois não há a necessidade de gastos em softwares pagos, estando ao alcance de qualquer pessoa e ainda com a possibilidade de obtermos resultados confiáveis, que representam e resgatam satisfatoriamente a física do problema em análise.

A modelagem necessita relacionar conhecimentos teóricos adquiridos, conhecer as leis que regem o fenômeno de interesse, além disso, desenvolver a aplicação de um

método numérico para solução. Fazendo referência a um escoamento com transferência de calor por convecção natural em uma placa plana horizontal, visamos contextualizar este estudo numérico-computacional a um objeto análogo presente na rotina da engenharia, podendo ser associado à diversos casos envolvendo convecção forçada ou natural, como por exemplo, a troca de calor entre parques solares e o meio ambiente. Em um estudo desenvolvido por Ferreira e Boschi (2019) observando imagens do satélite LANDSAT 8 no período anterior e posterior à implantação de Parques Solares no Oeste da Bahia na cidade de Bom Jesus da Lapa, constatando que nesta região houve um aumento de temperatura. Outro estudo realizado por Barron-Gafford et al (2016) observa o impacto de parques solares no conforto térmico humano de zonas residenciais próximas ao local de instalação de parques solares. Sendo assim, este artigo aplicando FDC é fundamental para corroborar com análise do comportamento térmico em placas solares, além de potencializar o de modelos de trocas de calor e ferramentas livre no ensino de engenharia.

2 FUNDAMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Conhecer as leis de conservação que regem a convecção e que descrevem bem a camada limite é de fundamental importância para realização de uma boa simulação numérica que represente fielmente a física envolvida, passando diretamente por atribuições de condições de contorno e iniciais adequadas. Estas equações são rotineiramente, na engenharia, aplicadas em volumes de controle infinitesimais, o que causa uma certa familiaridade entre a forma ensinada e o método numérico dos volumes finitos.

2.1 Equações fundamentais da convecção

A primeira equação de conservação necessária para descrever completamente o comportamento da convecção natural é a lei da conservação da massa (BEJAN, 2013), representada abaixo:

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3) e \vec{v} é o vetor velocidade nas direções x, y e z (m/s). Esta é a forma mais geral para a conservação da massa, considerando a variação de massa específica no tempo e um campo tridimensional.

Para resolver os campos de pressão e as três componentes de velocidade é necessárias mais três equações, estas equações são definidas através da lei de conservação do momento, a forma geral desta equação para um campo tridimensional pode ser observada através da equação abaixo (GUHA; PRADHAN; JAIN, 2020):

$$\frac{d(\rho\vec{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \left(\mu\nabla\vec{v} + \mu\nabla\vec{v}^T - \frac{2}{3}\mu\nabla\vec{v} \right) + \rho\vec{g} \quad (2)$$

Sendo p a pressão estática (Pa), μ é a viscosidade dinâmica ($kg/m/s$), T é a temperatura do fluido (K) e \vec{g} é o vetor gravidade (m/s^2). A Equação (1) e (2) formam o sistema de equações necessárias para definir qualquer escoamento sem transferência de calor, problemas que envolvem trocas de calor necessitam de mais uma equação que define o campo de temperaturas do problema.

A lei de conservação da energia complementa o sistema de equações necessárias para um problema que envolve convecção, encontrando-a descrita de diferentes formas na literatura, em termos de energia interna, entalpia ou temperatura, sendo esta última, a forma representada abaixo (GUHA; PRADHAN; JAIN, 2020):

$$\frac{d(\rho T)}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) + \phi \quad (3)$$

Na Equação (3) os termos k , c_p e ϕ são, respectivamente, condutividade térmica do fluido (W/mK), calor específico à pressão constante (J/kgK) e o termo de dissipação viscosa.

Para situações envolvendo convecção natural é necessário a definição de outra equação, a aproximação de Boussinesq, para o efeito de flutuação devida a diferença de massa específica do fluido, esta aproximação assume que todas as propriedades do fluido se mantêm constantes com exceção da massa específica (PADET et al, 2015).

$$\rho = \rho_{ref} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (4)$$

Onde ρ_{ref} e β são, respectivamente, a massa específica de referência (kg/m^3) e coeficiente de expansão térmica ($1/K$) na temperatura de referência T_{ref} (K).

2.2 Configuração da simulação no OpenFOAM

A fluidodinâmica computacional segue uma sequência lógica para realização de uma simulação independente do software utilizado, são elas: pré-processamento, processamentos e pós-processamento. O pré-processamento consiste na definição do solucionador adequado para a física do problema de interesse, a construção do domínio e geração de malha neste domínio, a configuração de condições de contorno e iniciais adequadas e a definição das propriedades do(s) fluido(s) nas condições em que se deseja simular, o processamento é a etapa em que ocorre a simulação numérica, cabe ao usuário observar a convergência durante o cálculo do programa, através dos residuais extraídos da simulação, após finalizado toda a etapa de processamento, o pós-processamento consiste na visualização dos resultados e extração de dados de interesse, há diversos programas de visualização de dados científicos disponíveis e alguns softwares de simulação apresentam uma ferramenta própria de visualização dos resultados da simulação (MEDINA et al, 2015).

O solucionador do OpenFOAM escolhido para simulação da convecção natural em placa plana foi o "buoyantBoussinesqPimpleFoam", adequado para casos transientes, com troca de calor e com efeito de flutuação. O algoritmo PIMPLE, conforme apresentado por Holzmann (2016), é uma associação de dois outros algoritmos utilizados na fluidodinâmica computacional, PISO, desenvolvido por Issa; Gosman e Watking (1986), e o algoritmo SIMPLE, desenvolvido por Patankar (2018).

Além da seleção do solucionador adequado ao problema proposto, a definição do domínio é extremamente importante para o comportamento da simulação, uma vez que um domínio mal elaborado pode apresentar interferência na convergência da solução, para o presente caso um esboço do domínio pode ser observado na figura abaixo:

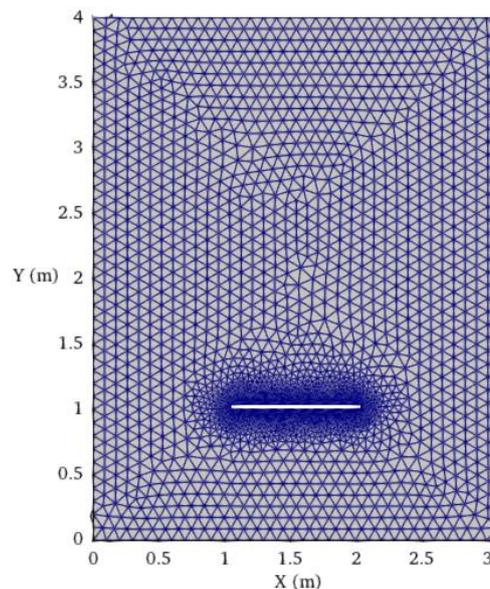
Figura 1: Esboço do domínio utilizado na simulação.



Fonte: Próprio autor.

A partir deste esboço foi feita a geometria através do software Salome plataforma, através de seu módulo CAD, este programa também possui um módulo de geração de malhas, dentre os vários tipos de malhas possíveis, variando entre estruturadas e não estruturadas, a escolhida foi não estruturada, através do gerador NETGEN, pois esta forma apresenta uma fácil construção, adequada para geometrias mais complexas. Foi também adicionado na malha camadas de prismas na região próxima às paredes das placas como forma de melhorar a solução da camada-limite na superfície dela sem aumentar consideravelmente seu custo computacional. A malha gerada possui dimensões de 4 metros de altura e 3,084 de largura, enquanto a placa possui 0,992 metros de largura e 0,035 metros de espessura e pode ser observada através da figura a seguir:

Figura 2: Malha gerada através do Salome Plataform.



Fonte: Próprio autor.

A simulação foi realizada de forma bidimensional, pois apesar da simplificação, tem o custo computacional reduzido quando comparada com uma simulação 3D. Alguns parâmetros de importante análise de qualidade de malha foram observados, pois uma malha de má qualidade apresenta representações inadequadas da física e a não convergência da solução numérica, os principais parâmetros se encontram na Tabela 1 e foram extraídos através do utilitário "checkMesh" do OpenFOAM, que analisa a qualidade da malha e exibe para o usuário que deve analisa-las com cuidado.

Tabela 1 – Parâmetros da malha gerada.

Número total de células	7572
Número de células hexaédricas	2140
Número de células prismáticas	5432
Razão de aspecto máxima	14,7632
Não-ortogonalidade da malha máxima	30,8089
Não ortogonalidade da malha média	6,0840
Distorção máxima	2,4954

Fonte: Próprio autor.

Uma vez finalizada a geração da malha deve ser atribuída as condições iniciais e de contorno, considerando que a simulação proposta é aplicada dentro de um ambiente fechado, as paredes e a placa receberam a condição de não escorregamento, ou seja, o fluido em contato com elas teria velocidade zero, desenvolvendo assim uma camada limite e o modelo de turbulência escolhido foi o k-epsilon, amplamente utilizado na literatura. Outras condições aplicadas estão demonstradas na tabela a seguir:

Tabela 2 – Propriedades e condições de contorno utilizadas na simulação.

Propriedade	Valor	Unidade
Gravidade	9,81	m/s^2
Temperatura ambiente	293,15	K
Temperatura da placa	353,15	K
Peso molecular	28,96	g/mol
Calor específico à volume constante, c_p	1004,4	$J/kg.K$
Calor específico à volume constante, c_v	712	$J/kg.K$
Viscosidade dinâmica	$1,831 \times 10^{-5}$	$kg/m/s$
Viscosidade cinemática	$1,5 \times 10^{-5}$	m^2/s
Número de Prandtl	0,705	
Densidade do ar	1,2	kg/m^3
Coefficiente de expansão térmica	$3,41 \times 10^{-3}$	$1/K$

Fonte: Próprio autor.

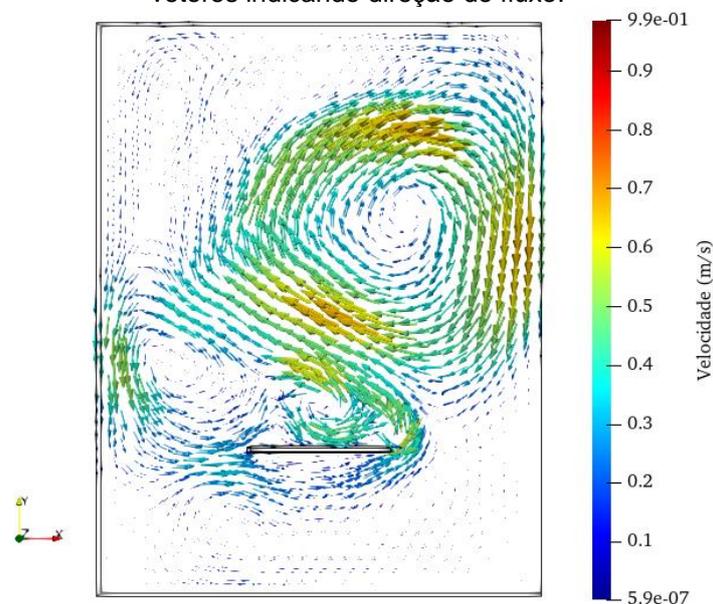
3 RESULTADOS

Através do solucionador buoyantBoussinesqPimpleFoam foi possível observar o comportamento transiente da convecção natural sobre uma placa plana em um ambiente fechado, verificando o desenvolvimento da temperatura em todo o ambiente bem como o campo de velocidade. Este fenômeno, apesar de ser tratado de forma bidimensional, o que ocorre corriqueiramente no ensino da transferência de calor de forma a simplificar o problema, apresenta uma grande complexidade no comportamento, o que torna complexa qualquer tentativa de abordagem analítica, havendo um comportamento complexo dos principais campos observados, velocidade e temperatura.



Na Figura 3 temos a demonstração do campo de velocidade através de vetores, indicando a direção e intensidade do ar dentro do domínio aos 75 segundos, desta forma, é possível observar a formação de correntes cíclicas de ar, geradas pela convecção.

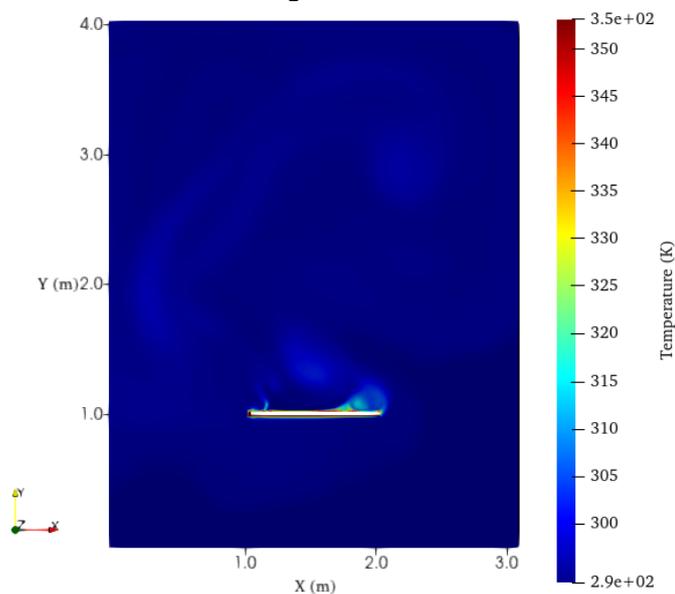
Figura 3: Campo de velocidades no tempo 75, com vetores indicando direção do fluxo.



Fonte: Próprio autor.

Este comportamento do ar está associado ao acréscimo de calor que está sendo adicionado ao ar através da placa plana com temperatura constante, o efeito de flutuação do fluido aquecido causa este deslocamento de ar quente próximo à placa, em que no instante 75 apresenta uma distribuição no domínio conforme Figura 4. É possível observar como a temperatura em quase todo o domínio foi afetada, e consequentemente a velocidade.

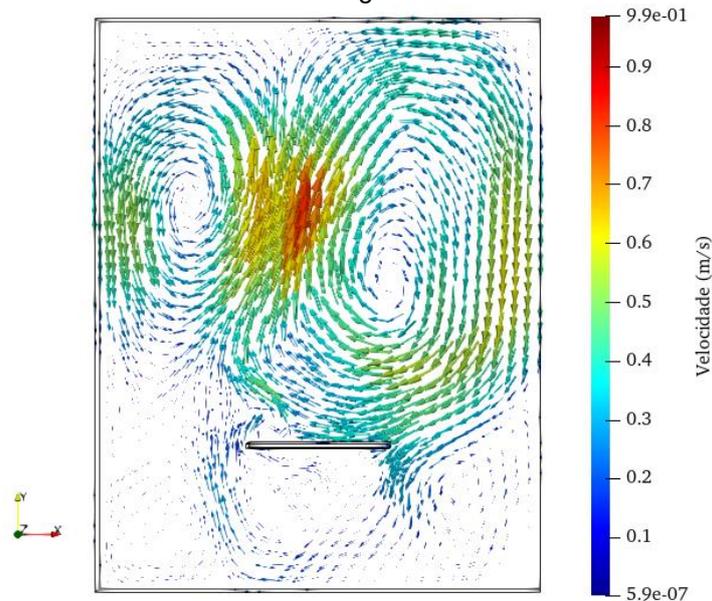
Figura 4: Distribuição de temperatura em 75 segundos.



Fonte: Próprio autor.

Em 150 segundos após o início da transferência de calor podemos ver a mudança no campo de velocidades na região, quando comparada ao instante 75, sendo perceptível a formação de algumas células de convecção.

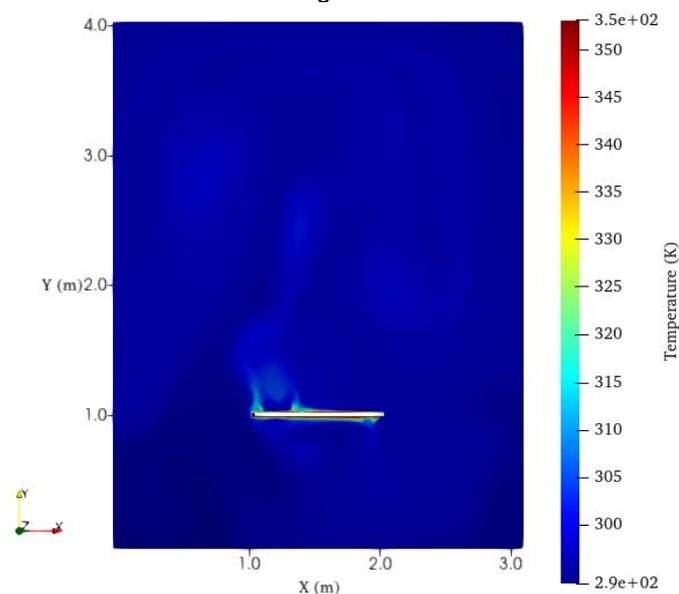
Figura 5: Distribuição do campo de velocidade em 150 segundos.



Fonte: Próprio autor.

A distribuição de temperatura por toda região sofre uma modificação no tempo de 150 segundos, o ar quente sendo carregado pelas correntes de ar afetam significativamente a região inferior à placa, este comportamento se deve à tendência descendente do ar nas extremidades direita e esquerda, em que há a presença de paredes.

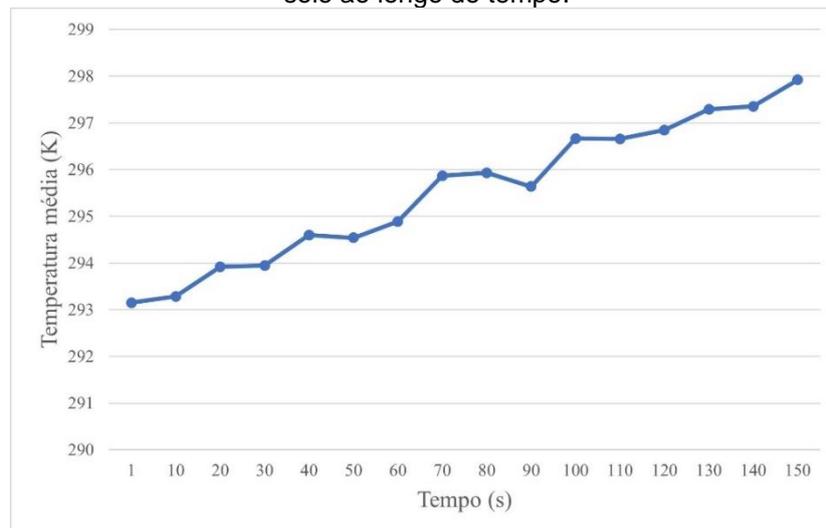
Figura 6: Distribuição de temperatura no domínio em 150 segundos.



Fonte: Próprio autor.

Ao longo do tempo a placa interfere no calor do ambiente, tendendo ao equilíbrio térmico, a Figura 7 dá uma boa noção do incremento de temperatura ao longo do tempo, analisando a temperatura média à uma altitude de 2 metros do solo e a aproximadamente 1 metro de distância da placa.

Figura 7: Temperatura média à 2 metros de altura do solo ao longo do tempo.



Fonte: Próprio autor.

É possível observar que 150 segundos após o início das trocas de calor, a região logo acima da placa apresenta uma temperatura média 5 graus acima da temperatura atribuída nas condições iniciais, se aproximando de 298K, o que representa um salto em Celsius de 20° para 24,85°.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que a simulação numérica representa uma importante parte do ensino e do exercício da engenharia atual, onde problemas complexos podem ser simplificados e simulados desde que o usuário entenda todas as variáveis e a física por trás dos fenômenos de interesse, desta forma, problemas conhecidos desde a graduação podem ser aproximados à diferentes situações encontradas no mundo real. Além da demonstração da capacidade e importância dos métodos numéricos, é observado a capacidade de softwares livres de resolver problemas de forma equivalente aos programas já bem estabelecidos no mercado, mas de forma gratuita, ajudando na democratização do conhecimento e no acesso à ferramentas que podem ser inacessíveis devido ao seu alto custo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Oeste da Bahia pelo apoio prestado e utilização de sua estrutura para realização do presente trabalho e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro prestado.

REFERÊNCIAS

- BARRON-GAFFORD, Greg A. et al. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2016.
- BEJAN, Adrian. **Convection heat transfer**. John wiley & sons, 2013.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa**. Porto Alegre: AMGH editora, 2009.
- FERREIRA, Victor Siqueira; BOSCHI, Leticia Sabo. **Avaliação da temperatura de superfície de um parque fotovoltaico a partir de imagens Landsat 8**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, SP, 2019. Anais... Santos. INPE, 2019. 2690p.
- GUHA, Abhijit; PRADHAN, Kaustav; JAIN, Akshat. Correction for semi-infinite assumption in the theories of natural convection and determination of average Nusselt number for finite inclined plates. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 148, p. 106062, 2020.
- HOLZMANN, Tobias. **Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®**. Loeben, Germany: Holzmann CFD, 2016.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, T. **Transferência de calor e massa**. Quinta Edição. LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora SA Rio de Janeiro, v. 698, p. 4000.0, 2003.
- ISSA, Raad I.; GOSMAN, A. D.; WATKINS, A. P. The computation of compressible and incompressible recirculating flows by a non-iterative implicit scheme. **Journal of Computational Physics**, v. 62, n. 1, p. 66-82, 1986.
- MALISKA, Clovis Raimundo. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed, Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2017.
- MEDINA, Humberto et al. Open source computational fluid dynamics using OpenFOAM. In: **Royal Aeronautical Society, General Aviation Conference**, London. 2015.
- OPENFOAM User Guide. Versão 9. Disponível em: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>. Acesso em: 14/03/2022.
- PADET, Jacques et al. Mixed thermal convection: fundamental issues and analysis of the planar case. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 3, p. 1865-1885, 2015.
- PATANKAR, Suhas V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. CRC press, 2018.

USE OF FREE TOOLS IN NATURAL CONVECTION SIMULATIONS OF SOLAR PLATES

Abstract: *The increasing use of computational tools applied in engineering has been a recent phenomenon, mainly due to the current technological advance. Associated with this, there is the difficulty of accessing commercial programs or those that limit their settings for use, in addition to limitations of access on personal computers, being restricted to the physical academic space or companies. The tools used are OpenFOAM, Salome-Meca and Paraview, complete and free tools, with a range of applications and with a series of possibilities equal or superior to the well-established paid software on the market. Through the tools mentioned, this article aimed to use and demonstrate the power of open-source software in studies with computational fluid dynamics associating the knowledge of convection in horizontal flat plates with solar plates, observing the temperature increase locally in a closed environment.*

Keywords: *Computational fluid dynamics, numerical methods, convection, solar plates, Open-source software.*