



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Vinicius Silva Figueredo

**UTILIZAÇÃO DO OPENFOAM PARA INVESTIGAÇÃO DE  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Bom Jesus da Lapa/BA

2023

Vinicius Silva Figueredo

**UTILIZAÇÃO DO OPENFOAM PARA INVESTIGAÇÃO DE  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Me. Luiz Justino da Silva Junior

Coorientadora: Dra. Nuccia Carla Arruda de Sousa

Bom Jesus da Lapa/BA

2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

F475            Figueredo, Vinicius Silva  
                 Utilização do OpenFOAM para investigação de transferência de calor em  
                 placas fotovoltaicas. / Vinicius Silva Figueredo. – 2023.

51f.: il.

Orientador: Prof. Me. Luiz Justino da Silva Júnior  
Coorientadora: Profa. Dra. Nuccia Carla Arruda de Sousa  
TCC - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do  
Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA,  
2023.

1. Mecânica dos Fluidos. 2. Placas solares. I. Silva Júnior, Luiz Justino  
da. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de  
Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 532

---

**Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB**

Vinicius Silva Figueredo

**UTILIZAÇÃO DO OPENFOAM PARA INVESTIGAÇÃO DE  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Mecânico” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Bom Jesus da Lapa/BA, 11 de julho de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Luiz Justino da Silva Junior, Me.  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

---

Profa. Nuccia Carla Arruda de Sousa, Dra.  
Universidade Federal de Alagoas

---

Profa. Bruna de Souza Constantino, Dra.  
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Este trabalho é dedicado a todos os que me  
ajudaram ao longo desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus pais, Viviane e Edilton, e minha irmã Leticia, pelo apoio prestado durante a graduação, à minha namorada Raquel, por ter dado o apoio, motivação e confiança para seguir em frente. À minha orientadora e amiga, Nuccia, pelas diversas discussões e ensinamentos, sem os quais não teria chegado aonde cheguei. Ao Professor Justino, pelos ensinamentos ao longo de todo o curso e orientações para conclusão deste trabalho. E por fim agradeço também à todos os professores da UFOB, que contribuíram para minha formação.

"A natureza é um enorme jogo de xadrez disputados por deuses, e que temos o privilégio de observar. As regras do jogo são o que chamamos de física fundamental, e compreender essas regras é a nossa meta." Richard Feynman

## RESUMO

Este estudo realizou a simulação computacional, através do software OpenFOAM, das trocas de calor entre placas fotovoltaicas e o ambiente em que ela está inserida, simulando diferentes quantidades de placas e observando o fenômeno nas condições climáticas da cidade de Bom Jesus da Lapa, no oeste da Bahia. Para realização desta simulação, foi utilizado modelos tridimensionais aplicados no solucionador "buoyantSimpleFoam", considerando efeitos de flutuação no fluido e observando os efeitos que as placas têm sobre o ambiente e sobre placas vizinhas. A análise foi feita observando os campos de temperatura gerados pela simulação, bem como os campos de velocidades, sendo analisados duas situações, uma com a presença de apenas uma placa solar e o segundo caso simulando uma situação mais próxima do real, havendo duas fileiras de placas, cada uma contendo um comprimento de dez placas alinhadas, em que foi possível observar a propagação do calor em ambos os casos e os efeitos quantitativos no fluxo de calor da placa para o ambiente.

**Palavras-chave:** Fluidodinâmica Computacional; Placas Solares; Convecção; OpenFOAM.

## ABSTRACT

This study carried out a computer simulation, using the OpenFOAM software, of the heat exchange between photovoltaic panels and the environment in which they are inserted, simulating different amounts of panels and observing the phenomenon in the climatic conditions of the Bom Jesus da Lapa city, in the west from Bahia. To carry out this simulation, three-dimensional models applied in the "buoyantSimpleFoam" solver were used, considering fluctuation effects in the fluid and observing the effects that the plates have on the environment and on neighboring plates. The analysis was carried out observing the temperature fields generated by the simulation, as well as the velocity fields, being analyzed two situations, one with the presence of only one solar plate and the second case simulating a situation closer to the real one, with two rows of plates, each one containing a length of ten aligned plates, in this way it was possible to observe the propagation of heat in both cases and the quantitative effects on the heat flux from the plate to the environment

**Keywords:** Computational fluid dynamics; Solar Panels; Convection; OpenFOAM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de calor obtido através do LANDSAT8 nos anos de 2016 e 2018. . . . .	16
Figura 2 – Volume de controle utilizado para definir as leis da conservação. . . . .	17
Figura 3 – Representação da camada-limite térmica e de velocidade. . . . .	19
Figura 4 – Sequência para realização de simulação no OpenFOAM. . . . .	24
Figura 5 – Organização convencional de pastas de casos. . . . .	25
Figura 6 – Esquema de circuito de um módulo fotovoltaico. . . . .	27
Figura 7 – Domínio utilizado para simulação no OpenFOAM para primeiro caso. . . . .	29
Figura 8 – Domínio utilizado para simulação no OpenFOAM para segundo caso. . . . .	30
Figura 9 – Malha gerada para o primeiro caso simulado. . . . .	31
Figura 10 – Malha gerada para o segundo caso simulado. . . . .	31
Figura 11 – Esquematização do algoritmo SIMPLE. . . . .	32
Figura 12 – Curva de residuais para primeiro caso (uma placa). . . . .	35
Figura 13 – Curva de residuais para segundo caso (2 fileiras com 10 placas). . . . .	36
Figura 14 – Vista superior do mapa de temperatura na altura de 0,5 metros para primeiro caso de uma placa. . . . .	37
Figura 15 – Vista superior do mapa de temperatura na altura de 0,5 metros para segundo caso com 2 fileiras de placas solares. . . . .	37
Figura 16 – Mapa de temperatura na altura de 0,8 metros para primeiro caso com 1 placa. . . . .	38
Figura 17 – Mapa de temperatura na altura de 0,8 metros para segundo caso. . . . .	39
Figura 18 – Distribuição de velocidade na altura de 0,5 metros para primeiro caso. . . . .	39
Figura 19 – Distribuição de velocidade na altura de 0,5 metros para segundo caso. . . . .	40
Figura 20 – Distribuição de temperatura com vista lateral do domínio do primeiro caso. . . . .	41
Figura 21 – Distribuição de temperaturas com vista lateral para domínio do segundo caso. . . . .	41
Figura 22 – Distribuição de velocidades com vista lateral para domínio do primeiro caso. . . . .	42
Figura 23 – Distribuição de velocidades com vista lateral para domínio do segundo caso. . . . .	42
Figura 24 – Linhas de fluxo do ar para o caso composto por apenas uma placa. . . . .	43
Figura 25 – Linhas de fluxo do ar para o caso composto por duas fileiras com dez placas. . . . .	43
Figura 26 – Fluxo de calor obtido pelo OpenFOAM para o primeiro caso para cada passo de tempo. . . . .	44
Figura 27 – Fluxo de calor obtido para o segundo caso em cada passo de tempo. . . . .	45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição de alguns solucionadores do OpenFOAM. . . . .	26
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades principais das malhas do primeiro e segundo caso. . . . .	30
Tabela 2 – Principais condições de contorno locais utilizadas na simulação. . . . .	33
Tabela 3 – Condições de contorno aplicadas na simulação. . . . .	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Desenho Assistido por Computador
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MFV	Método dos Volumes Finitos
OpenFOAM	Open Source Field Manipulation
RANS	Equação de Navier-Stokes com Média de Reynolds
SIMPLE	Método Semi-implícito para Equações Vinculadas à Pressão
SST	Transporte de Tensão de Cisalhamento

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$	Massa Específica ( $kg/m^3$ )
$\vec{u}$	Vetor velocidade ( $m/s$ )
$p$	Pressão ( $Pa$ )
$\mu$	Viscosidade dinâmica ( $N.s/m^2$ )
$S_M$	Termo fonte do Momento
$i$	Energia interna ( $J$ )
$k$	Condutividade Térmica ( $W/m.K$ )
$T$	Temperatura ( $K$ )
$\phi$	Função dissipação
$\delta$	Comprimento da camada limite ( $m$ )
$\delta_T$	Comprimento da Camada limite térmica ( $m$ )
$Nu$	Número de Nusselt
$h$	Coefficiente convectivo ( $W/m^2.K$ )
$A_S$	Área da superfície ( $m^2$ )
$T_S$	Temperatura da Superfície ( $K$ )
$T_\infty$	Temperatura do fluido ( $K$ )
$Re$	Número de Reynolds
$Pr$	Número de Prandtl
$L_c$	Comprimento característico ( $m$ )
$\nu$	Viscosidade cinemática ( $mm^2/s$ )
$\alpha$	Difusividade térmica ( $m^2/s$ )
$C_P$	Calor específico à pressão constante ( $J/kg.K$ )
$Gr$	Número de Grashof
$Ra$	Número de Reyleigh
$\eta$	Eficiência do painel fotovoltaico
$Y+$	Distância adimensional da parede

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	15
2	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> . . . . .	17
2.1	EQUAÇÕES GOVERNANTES . . . . .	17
2.1.1	A Camada-Limite e adimensionais . . . . .	19
2.1.2	A aproximação de Boussinesq . . . . .	21
2.1.3	Modelo de Turbulência . . . . .	22
2.2	OPENFOAM . . . . .	23
2.2.1	<b>Pré-Processamento</b> . . . . .	24
2.2.1.1	<i>SnappyHexMesh</i> . . . . .	25
2.2.2	<b>Processamento</b> . . . . .	26
2.2.2.1	<i>O pyFOAM</i> . . . . .	26
2.2.3	<b>Pós-Processamento</b> . . . . .	27
2.3	MODELO ELETRÔNICO DO PAINEL FOTOVOLTÁICO . . . . .	27
3	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	29
3.1	CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DE MALHA – PRÉ- PROCESSAMENTO . . . . .	29
3.2	O SOLUCIONADOR BOUYANTSIMPLEFOAM . . . . .	32
3.3	CONDIÇÕES DE CONTORNO . . . . .	33
4	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	35
5	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	46
5.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	47
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	48

## 1 INTRODUÇÃO

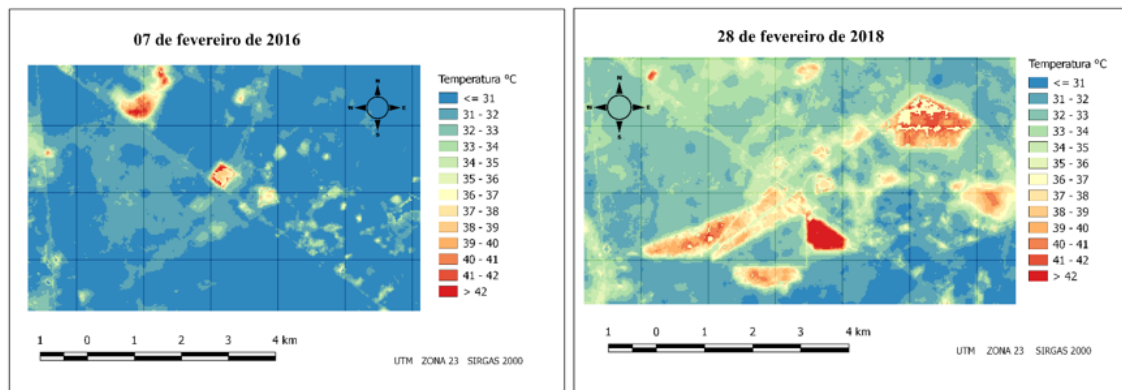
As energias renováveis têm tomado um papel central na sociedade e qualidade de vida, emergindo como solução de fornecimento de energia elétrica em atuais e futuras crises energéticas, bem como na cada vez mais ampliada utilização de veículos elétricos (MURATORI *et al.*, 2021). Neste contexto, a energia solar se coloca como principal fonte de energia renovável junto à energia eólica, uma vez que há uma corrida global para redução nas emissões de gases poluentes, como na recente Conferência de Estocolmo +50 (UNEP, 2021), que estão cada vez mais afetando o equilíbrio natural do planeta (PEPPLOW *et al.*, 2019).

Além da constante busca de expansão da produção de energia solar, há um grande estudo sendo constantemente realizado com a finalidade de melhorar a eficiência de painéis fotovoltaicos, visando uma máxima produtividade de parques como um todo, onde diversas variáveis são analisadas com este único objetivo, um exemplo destas variáveis é a troca de calor entre placa e o ambiente (AL-DAMOOK *et al.*, 2021).

Observando fatores importantes que interferem na produtividade de um painel fotovoltaico, é perceptível o quanto a temperatura na placa fotovoltaica afeta o seu desempenho, apesar de toda a radiação disponível. Teo, Lee e Hawlader (2012) mostrou que a queda de eficiência em uma placa fotovoltaica se dá entorno de 8-9% a cada 1.8°C de acréscimo de temperatura para todo 100  $W/m^2$ . Associando isto ao fato de haver uma grande quantidade de parques solares instalados no Nordeste brasileiro, região conhecida devido às suas altas temperaturas, surge a necessidade de investigar a perda de eficiência devido à esta condição climática regional.

Para além da queda de eficiência de painéis solares devido à temperatura, há um fator de possível impacto ambiental devido à presença de parques solares onde uma vez houve a presença de vegetação, FERREIRA e BOSCHI (2019) observaram através de imagens do satélite da região do infravermelho termal, LandSat8, conforme Figura 1, que na região de Bom Jesus da Lapa houve um aumento da temperatura superficial na região de instalação dos parques solares, devido à característica de absorção dos módulos fotovoltaicos e as construções necessárias do parque.

Figura 1 – Mapa de calor obtido através do LANDSAT8 nos anos de 2016 e 2018.



Fonte: (FERREIRA; BOSCHI, 2019)

Outro estudo realizado por Barron-Gafford *et al.* (2016) analisa o impacto de grandes parques solares que geram ilhas de calor próximas de zonas residenciais, podendo ter efeito no conforto térmico humano em regiões habitáveis em seu entorno.

Uma vez que não é viável fazer medições de temperatura nos locais em que os parques estão instalados, é proposto neste trabalho utilizar a simulação numérica das condições climáticas e trocas de calor entre a placa fotovoltaica e o meio em que ela está inserida, simulando as variações de temperatura e trocas de calor na placa e no ambiente ao seu redor.

Para realização da simulação computacional será utilizado o software de código-fonte aberto, OpenFOAM, que utiliza o método numérico dos volumes finitos, MFV, para solução de qualquer problema de mecânica dos fluidos e transferência de calor, vale ressaltar que o OpenFOAM trabalha com a mecânica do contínuo, ou seja, não se limita apenas a problemas de transferência de calor e fluidos conforme o OpenFOAM Foundation (2022). Este software é amplamente utilizado no mundo inteiro e apresenta a total liberdade de seus usuários para modificação dos solucionadores e códigos do programa, tal liberdade não é possível em softwares pagos, outra vantagem é a não limitação de número de elementos de malha, algo comum em softwares pagos.

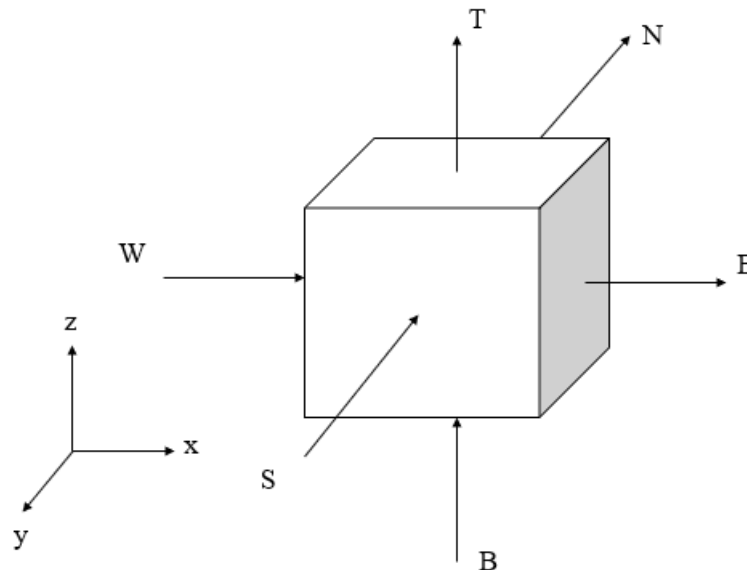
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para uma análise completa das trocas de calor de uma placa fotovoltaica é necessário uma série de conhecimentos que envolve diferentes físicas envolvidas neste processo, contemplando o escoamento de fluidos, transferência de calor por condução, convecção e radiação, além desta gama de comportamentos associados à conversão de energia solar, para uma análise numérica através da fluidodinâmica computacional (CFD), é necessário transportar as equações governantes para a linguagem do software OpenFOAM, que trabalha através do método dos volumes finitos. Nas seções que seguem será explicitado toda a teoria envolvida no processo de transferência de calor envolvido na conversão de energia em painéis fotovoltaicos.

### 2.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Antes de demonstrar as equações é necessário definir o volume de controle, que é um domínio de fluido tridimensional arbitrado com o qual será analisado as equações de conservação de massa, momento e energia (FOX; MCDONALD; MITCHELL, 2020), a representação deste volume de controle com a nomenclatura mais frequentemente utilizada na literatura se encontra na figura abaixo:

Figura 2 – Volume de controle utilizado para definir as leis da conservação.



Fonte: Próprio Autor

Os termos N, S, W, E, T e B se referem, respectivamente, à North (Norte), South (Sul), West (Oeste), East (Leste), Top (Topo) e Bottom (Fundo). Uma quantidade conservada na direção  $x$  no volume de controle, por exemplo, entrando em W irá deixar o

volume de controle em E, sem considerar uma geração ou sumidouro dentro deste elemento volumétrico. Uma vez definida o conceito de volume de controle, podemos então seguir para as equações de conservação que regem a convecção.

O processo de convecção é uma forma de transferência de calor muito presente na natureza, estando presente desde processos simples como a perda de calor de uma xícara de café até o movimento das massas de ar em todo o mundo, e representa a camada da mecânica do contínuo que associa a transferência de calor com o escoamento de fluidos (BEJAN, 2013). Posto isto, é necessário conhecer as equações básicas que representam o fenômeno da convecção (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), a primeira delas é a equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \vec{u} = 0 \quad (1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido [ $kg/m^3$ ] e  $\vec{u}$  é o vetor velocidade [m/s], esta forma da equação de conservação da massa é a mais geral, o primeiro termo do lado direito representa a variação de densidade do fluido no tempo e o segundo termo representa o fluxo de fluido através do volume de controle.

Outra equação governante para o fenômeno da convecção é a da conservação do momento, esta equação é formada a partir da segunda lei de Newton, que descreve a taxa de mudança do momento do fluido como um somatório de forças agindo sobre este elemento de fluido, todo este conceito é feito considerando também a análise em um volume de controle idêntico ao da Figura 1. Abaixo temos as equações de conservação do momento para cada uma das componentes x, y e z:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{M_x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{M_y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla z) + S_{M_z} \quad (4)$$

Onde u, v e w são componentes do vetor velocidade  $\vec{u}$  nas direções x, y e z respectivamente,  $p$  é a pressão [Pa],  $\mu$  é a viscosidade dinâmica [ $N.s/m^2$ ] e  $S_{M_x}$ ,  $S_{M_y}$  e  $S_{M_z}$  são os termos fonte do momento  $S_M$  nas componentes x, y e z.

A equação que carrega a parcela referente à transferência de calor é a da conservação da energia, associando à mesma análise em um volume de controle, um fluido que passa através do elemento arbitrado, em qualquer uma das direções, terá a sua energia conservada, considerando que não há sumidouros ou geração interna de energia. A forma representada a seguir é a mais geral para a conservação de energia e é obtida a partir da primeira lei da termodinâmica.

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + (\rho i \vec{u}) = -p \nabla \cdot \vec{u} + k \nabla T + \phi + S_i \quad (5)$$

Sendo  $i$  a energia interna [J],  $k$  a condutividade térmica do fluido [W/m.K],  $T$  a temperatura [K] e  $\phi$  a função dissipação, que pode ser definida como:

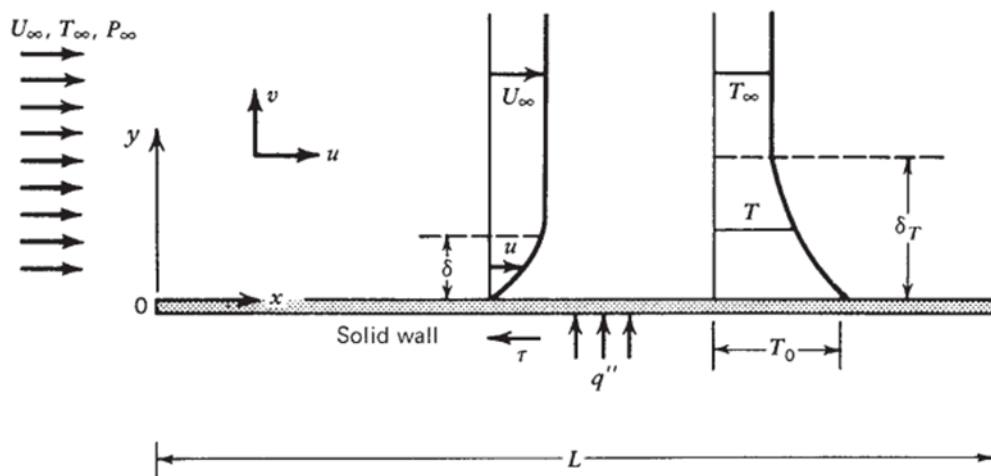
$$\phi = \mu \left( 2 \left( \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + \lambda (\vec{u})^2 \quad (6)$$

Na função dissipação, dada pela Equação (6), o termo  $\lambda$  relaciona as tensões com a deformação volumétrica, a equação de forma geral reúne todos os efeitos na energia interna devido à tensão viscosa do fluido.

### 2.1.1 A Camada-Limite e adimensionais

Há vários parâmetros que nos auxiliam a quantificar as transferências de calor no processo da convecção, seja ela forçada, natural ou mista, além disso é necessário conhecer o conceito do que é uma camada-limite. A camada-limite significa o perfil de velocidade e de temperatura (por não considerar transferência de massa, a camada limite de concentração é desconsiderada) causado por um fluido em contato com um corpo com velocidade e temperatura diferentes, adquirindo assim gradientes (CENGEL; GHAJAR, 2009). Para melhor exemplificação, a Figura 3 apresenta uma representação das camadas limite de velocidade e temperatura:

Figura 3 – Representação da camada-limite térmica e de velocidade.



Fonte: (BEJAN, 2013)

Como observado através da figura acima, temos que,  $\delta$  representa o comprimento da camada-limite de velocidade, onde a camada de fluido em contato com a placa tem velocidade igual à placa pela condição de não-escorregamento e que cresce até atingir a velocidade de fluido livre, esta distância entre a superfície da placa e o fluxo atingindo a velocidade de escoamento livre é o comprimento da camada-limite, o comprimento da camada-limite térmica  $\delta_T$  é definida analogamente, sendo então a distância em que o fluido possui a velocidade da superfície até atingir a temperatura do fluido livre (HAJ-MOHAMMADI; NOURAZAR, 2014).

O número de Nusselt,  $Nu$ , é o adimensional que nos fornece o quanto de transferência de calor por convecção está ocorrendo na superfície, é um número importante para definir o coeficiente convectivo  $h$  [ $W/m^2.K$ ], presente na equação da taxa de transferência de calor por convecção (ÖMEROĞLU, 2017):

$$q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

Onde  $A_S$  é a área da superfície em que está ocorrendo a transferência de calor,  $T_S$  é a temperatura desta superfície e  $T_\infty$  é a temperatura do fluido livre.

A relação entre o número de Nusselt e o coeficiente convectivo  $h$  pode ser dada localmente na direção  $x$  da superfície da placa conforme relação abaixo (GUHA; PRADHAN; JAIN, 2020):

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \quad (8)$$

Equações para definir o número de Nusselt variam das condições de escoamento e do tipo de superfície, para placas planas temos diferentes equações para uma placa isotérmica, compreendendo um escoamento turbulento ou laminar e para uma placa com fluxo de calor constante, compreendendo também escoamento laminar e turbulento, as equações (9-10) representam o fenômeno para uma placa isotérmica que será considerado para a simulação, (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000):

$$Nu_x = 0,33Re_x^{1/2}Pr^{1/3}, Pr \geq 0,6 - \text{Laminar} \quad (9)$$

$$Nu_x = 0,0296Re_x^{4/5}Pr^{1/3}, 0,6 \leq Pr \leq 60 - \text{Turbulento} \quad (10)$$

Onde, na Equação (9) e Equação (10),  $Re$  é o número de Reynolds e  $Pr$  é o número de Prandtl dados por:

$$Re = \frac{\rho u L_c}{\mu} \quad (11)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido [ $kg/m^3$ ],  $u$  é a velocidade do fluido [ $m/s$ ],  $L_c$  é o comprimento característico [ $m$ ] e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica [ $N.s/m^2$ ].

Para o número de Prandlt temos:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (12)$$

Onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática [ $mm^2/s$ ] e  $\alpha$  é difusividade térmica [ $m^2/s$ ]. A difusividade térmica pode ser dada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_P} \quad (13)$$

Sendo  $k$  a condutividade térmica [ $W/m.K$ ] e  $C_P$  o calor específico à pressão constante.

Estas definições do número de Nusselt são feitas para a convecção forçada, mas uma vez que no fenômeno da transferência de calor em placas solares podem ocorrer tanto a convecção forçada quanto efeitos da convecção natural, é necessário defini-la também (CENGEL; GHAJAR, 2009). Numa convecção natural há outros números adicionais que são utilizados para definir o número de Nusselt, como o número de Grashof ( $Gr$ ), que é uma relação das forças de flutuação e a viscosidade do fluido, e o número de Rayleigh ( $Ra$ ), que é um produto entre os números de Prandlt e Grashof, tendo assim, uma relação entre as forças de flutuação, difusividade térmica e quantidade de movimento, as definições para Grashof, na Equação (14), (envolvendo temperatura constante na superfície da placa) e Reyleigh, através da Equação (15), podem ser observadas a seguir (FAN *et al.*, 2021):

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (14)$$

$$Ra = GrPr \quad (15)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ],  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica [ $1/K$ ],  $L_c$  o comprimento característico da superfície [ $m$ ],  $\nu$  é a viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ],  $q$  é o fluxo de calor através da superfície [ $W/m^2$ ].

As relações para o número de Nusselt em convecção natural são dadas por (MOON; CHUNG, B.-J., 2014):

$$Nu_x = 0,54Ra^{1/4}, 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \quad (16)$$

$$Nu_x = 0,15Ra^{1/3}, 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \quad (17)$$

### 2.1.2 A aproximação de Boussinesq

Uma vez que estamos tratando de convecção natural, há uma nova variação a ser considerada devido ao aquecimento do fluido, como dito anteriormente, o fluido aquecido tende a diminuir a sua massa específica, causando assim uma força de empuxo nesta

parcela de fluido, o que afeta diretamente a equação de conservação do momento, e a principal representação deste fenômeno se dá pela relação conhecida como “aproximação de Boussinesq” (PADET *et al.*, 2015).

$$\rho = \rho_{ref}[1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (18)$$

Onde  $\rho_{ref}$  e  $T_{ref}$  são a densidade e temperatura de referência, respectivamente, no qual representa propriedades do fluido no início do processo de transferência de calor,  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica [1/K] e  $T$  é a temperatura do fluido após a transferência de calor [K].

Entretanto, o termo da densidade pode ser dado através de outras equações de estado, estas estão presentes dentro dos arquivos do OpenFOAM, podendo ser alteradas conforme necessidade do usuário ou do comportamento a ser simulado.

### 2.1.3 Modelo de Turbulência

A escolha do modelo de turbulência é um importante passo para descrever um fenômeno de interesse, ele possui as ferramentas necessárias para descrever o complicado fenômeno da turbulência dentro de um fluxo de fluido e conta com diversos modelos de turbulência construídos e neste trabalho será utilizado o modelo RANS  $k - \omega$  SST, em que é adicionado mais duas equações ao sistema, com isso necessitando de mais duas condições de contorno.

O modelo utilizado,  $k - \omega$  SST, se trata de uma junção entre os modelos  $k - \epsilon$  e  $k - \omega$ . Esta junção foi feita com o objetivo de reduzir problemas na solução próxima às paredes em simulações utilizando o modelo  $k - \epsilon$ , uma vez que o modelo  $k - \omega$  trabalha melhor em regiões próximas às paredes, fazendo então um novo modelo que tem o comportamento do  $k - \omega$  em regiões próximas às paredes e do  $k - \epsilon$  para regiões distantes da parede (ITO, 2020).

As equações do modelo  $k - \omega$  SST para  $k$ , energia cinética turbulenta, e  $\omega$ , frequência de turbulência, são descritas pela Equação (19) e Equação (20), respectivamente (LAITINEN *et al.*, 2020).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (19)$$

Como também,

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_C) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (20)$$

As constantes são  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_{\omega 1} = 2$ ,  $\sigma_{\omega 2} = 1,17$ ,  $\gamma = 0,44$ ,  $\beta = 0,083$  e  $\beta^* = 0,09$ , o termo  $F_C$  representa uma função que permite a transição suave do modelo  $k - \omega$  próxima à

parede para o modelo  $k - \epsilon$  longe da parede, ela pode assumir valores entre 0 e 1, conforme a proximidade do elemento com a parede, além disso, como se trata de uma mistura de modelos, as constantes utilizadas precisam ser corrigidas para o novo modelo, conforme relação abaixo:

$$C = F_C C_\omega + (1 - F_C) C_\epsilon \quad (21)$$

A viscosidade turbulenta para o novo modelo é dada por:

$$\mu_T = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (22)$$

Onde  $a_1$  é uma constante e  $F_2$  é uma função para limitação da viscosidade turbulenta e depende da distância do elemento até a parede mais próxima (ITO, 2020).

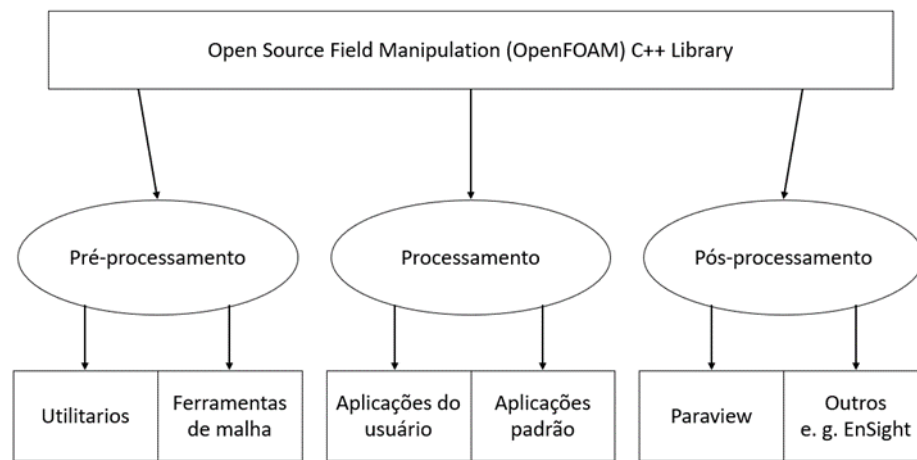
Conforme (CHUNG, T. J. *et al.*, 2002), o modelo de turbulência RANS é um método estatístico, diferentemente de métodos determinísticos, como a solução direta das equações de Navier-Stokes, que aumenta o custo computacional da solução, sendo assim, a utilização do modelo RANS é mais vantajoso quando o efeito da turbulência não exige uma alta acurácia, além disso, possibilita o uso de malhas menos refinadas, reduzindo ainda mais o custo computacional.

## 2.2 OPENFOAM

O software utilizado para simulação CFD foi o OpenFOAM, que se trata de um programa para solução de problemas da mecânica do contínuo e que possui uma grande popularidade entre a comunidade científica da área (MEDINA *et al.*, 2015). Por se tratar de um programa com código-fonte aberto, o usuário tem total liberdade de configuração de suas bibliotecas e códigos, podendo assim implementar novos solucionadores conforme a necessidade do problema tratado, isto causa um ponto atrativo, aumentando assim sua propagação pela comunidade científica (JACOBSEN; FUHRMAN; FREDSE, 2012)(GAMET *et al.*, 2020).

A principal linguagem de programação do OpenFOAM é a C++ e utiliza o método dos volumes finitos para realizar soluções, normalmente aplicadas na análise de transferência de calor e fluxo de fluidos, ele possui uma série de etapas necessárias para realização de uma simulação computacional, representada abaixo:

Figura 4 – Sequência para realização de simulação no OpenFOAM.



Fonte: Adaptado de OpenFOAM Foundation (2022)

### 2.2.1 Pré-Processamento

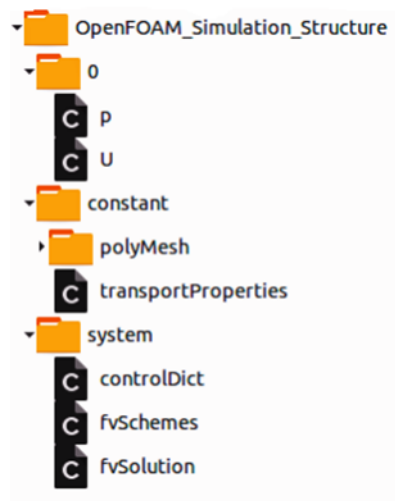
O pré-processamento é a fase inicial de uma simulação, sendo a primeira etapa a criação de um domínio no qual se deseja representar bem como a construção da malha. Para desenvolvimento de malhas o OpenFOAM possui uma ferramenta de criação chamada “blockMesh”, que possui uma maior facilidade para construção de malhas simples, mas que em malhas complexas deixa de ser indicado, construindo malhas hexaédricas. É comum a utilização de softwares específicos para produção de geometrias e malhas como o Salome, GMSH, SnappyHexMesh, bem como malhas exportadas de outros softwares de simulação CFD, como principalmente o ANSYS, o OpenFOAM tem comandos para exportação e conversão de malhas feita em programas de terceiros.

Além da criação de geometrias e malhas para o problema de interesse, o pré-processamento consiste em uma seleção ou construção do solucionador adequado ao problema tratado e atribuição das condições de contorno, para uma melhor representação da física do problema. Esta etapa é uma parte crítica do processo de simulação e atribuições erradas geram simulações inconsistentes (MEDINA *et al.*, 2015).

A organização das pastas do caso a ser simulado têm um certo padrão que pode ser observado na Figura 5:

As pastas utilizadas em cada caso podem ter variações dependendo do solucionador e configurações específicas do problema, como modelos de turbulência, adição da transferência de calor por radiação etc. A pasta “0” consiste as condições iniciais e de contorno da simulação, com o decorrer da solução numérica mais pastas de tempo são geradas, cada uma representando um instante de tempo, no qual o próprio usuário poderá controlar quais irão aparecer, dependendo do interesse. A pasta "constant" contém informações da malha e geometrias, bem como propriedades do fluido, transferência de calor e configura-

Figura 5 – Organização convencional de pastas de casos.



Fonte: Medina *et al.* (2015)

ção dos modelos de turbulência utilizados. A pasta "system" contempla os arquivos para configuração da solução numérica em sí, gerenciando o passo de tempo da simulação, quais solucionadores serão utilizados, bem como os esquemas de discretização aplicados.

### 2.2.1.1 *SnappyHexMesh*

Para construção das malhas propostas ao longo deste trabalho foi utilizada a ferramenta *snappyHexMesh*, que se trata de um gerador de malha feito para o OpenFOAM, que funciona utilizando as geometrias feitas em outros softwares e uma malha de base, podendo ou não ser feita pelo "blockMesh" (gerador de malhas estruturadas do OpenFOAM), o processo de geração de malha se dá da seguinte forma:

- Criação da superfície de interesse através de outros softwares CAD em formato STL;
- Geração da malha base através do BlockMesh;
- Inclusão da superfície na malha de base;
- Refinamento da malha através de parâmetros atribuídos pelo usuário na região da superfície;
- Após o refinamento é feita a extração da região da superfície, sendo realizado sucessivos refinamentos para garantir a suavidade da superfície.

O *snappyHexMesh* permite refinamentos em regiões específicas dentro da malha, bem como a geração de camadas de inflação para regiões próximas a superfície, além destas utilidades, pode ser feita a divisão do domínio para processamento paralelo e a configuração de diferentes níveis de refinamento geral da malha.

### 2.2.2 Processamento

O processamento no OpenFOAM consiste no cálculo, através dos volumes finitos, feito pela máquina, solucionadores específicos podem causar um maior ou menor tempo computacional. Estes cálculos numéricos, uma vez que se utilizam de métodos iterativos, geram resíduos, que por sua vez são observados durante a etapa de processamento. O monitoramento destes resíduos são importantes para observar o comportamento da simulação e se o critério de convergência será atingido, este critério se define como o valor a ser atingido pelos residuais ao longo da simulação, desta forma, quando os valores dos resíduos atingem um valor abaixo do critério, diz-se que a simulação convergiu.

#### 2.2.2.1 O *pyFOAM*

Para observar os residuais ao longo da simulação foi utilizada uma biblioteca escrita em python para organizar e controlar dados gerados pelos solucionadores do OpenFOAM, o "*pyFOAM*", esta biblioteca consegue analisar os dados gerados em tempo real pelo OpenFOAM, gerando gráficos e armazenando-os, executar os solucionadores do OpenFOAM, manipular os parâmetros iniciais da simulação, bem como alterar e construir condições de contorno personalizadas.

O OpenFOAM permite o processamento paralelo entre núcleos do processador do computador, o que diminui o tempo computacional da simulação, mas depende da quantidade de núcleos e da velocidade destes. Alguns solucionadores encontrados no OpenFOAM e suas características podem ser observadas no quadro abaixo:

Quadro 1 – Descrição de alguns solucionadores do OpenFOAM.

<b>Solucionador</b>	<b>Característica.</b>
<b>laplacianFoam</b>	Soluciona a equação de Laplace, casos com condução de calor em sólidos.
<b>icoFoam</b>	Solucionador transiente para fluidos newtoniano incompressível e escoamento laminar
<b>pimpleFoam</b>	Fluidos incompressíveis e newtonianos em escoamento turbulento e transiente
<b>simpleFoam</b>	Aplicado em fluidos incompressíveis, com escoamento turbulento e em estado permanente, utilizando o algoritmo SIMPLE
<b>buoyantPimpleFoam</b>	Solucionador transiente para escoamento turbulento, com efeito de flutuação em fluidos compressíveis
<b>buoyantSimpleFoam</b>	Solucionador permanente para escoamento turbulento, com efeito de flutuação em fluidos compressíveis
<b>chtMultiRegionFoam</b>	Aplicado em escoamento transiente ou permanente com condução de calor em sólido ou entre sólidos, com efeito de flutuação e escoamento laminar ou turbulento

Fonte: OpenFOAM Foundation (2022).

Existem diversos outros tipos de solucionadores no OpenFOAM, abrangendo diversas físicas e processos, como combustão, misturas, eletromagnetismo, entre outras.

Uma vez que a simulação foi totalmente resolvida há a necessidade de visualização dos resultados e extração de dados necessários.

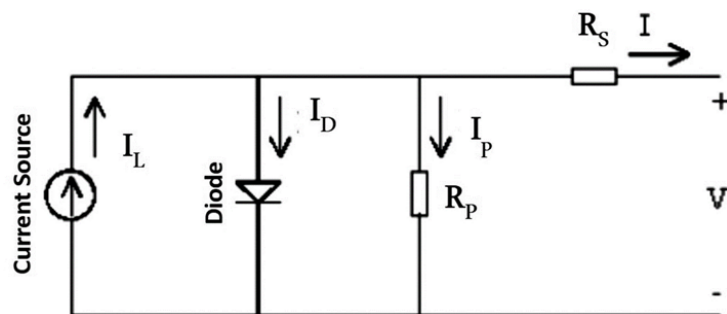
### 2.2.3 Pós-Processamento

O OpenFOAM não conta com uma ferramenta de visualização dos resultados nativa, com isso é necessário utilizar softwares de visualização científica, o programa comumente utilizado em conjunto com ele é o Paraview™(KITWARE, 2023), sendo também uma ferramenta de código-fonte aberto e livre, que é amplamente utilizado pela comunidade científica e que tem uma boa integração com o OpenFOAM, tendo uma gama muito grande de ferramentas para melhorar a visualização da simulação e extração dos dados obtidos através dela.

## 2.3 MODELO ELETRÔNICO DO PAINEL FOTOVOLTÁICO

Alguns trabalhos observam o impacto que a temperatura na célula fotovoltaica tem na corrente gerada pelo módulo fotovoltaico, como em Souza e De Sousa (2019) e Kim *et al.* (2011), isso representa que em condições de temperatura da célula elevadas gera quedas de eficiência do módulo fotovoltaico, muitos manuais de módulos fotovoltaicos vêm com informações de Eficiência x Temperatura, se tornando uma característica relevante para a produção de energia solar. A característica elétrica de um painel fotovoltaico pode ser representada conforme a figura abaixo:

Figura 6 – Esquema de circuito de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Souza e De Sousa (2019)

A partir desta figura é possível descrever o circuito elétrico aplicando a Lei de Kirchhoff, obtendo:

$$I_L = I_D + I_{R_p} + I_{R_s} \quad (23)$$

E considerando  $I_L = 0$ , pode ser definida a corrente no diodo:

$$I_D = I_{sat} \left[ e^{\frac{q}{nkT_C}} \right] - 1 \quad (24)$$

Onde  $I_{sat}$  é a corrente de saturação reversa,  $q$  é a carga do elétron,  $n$  é o fator de idealidade do diodo,  $k$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T_C$  é a temperatura da célula.

De acordo com a equação de eficiência de um painel fotovoltaico ( $\eta$ ), podemos verificar a importância da temperatura para seu melhor funcionamento (KANT *et al.*, 2016).

$$\eta = \eta_{ref}(1 - \beta_{ref}(T_{PV} - T_{ref})) \quad (25)$$

Onde  $\eta$  é a eficiência do painel,  $\eta_{ref}$ ,  $\beta_{ref}$  e  $T_{ref}$  são, respectivamente, a eficiência, coeficiente de temperatura [1/K] e Temperatura [K] nas condições padrão de teste realizados pelas fabricantes dos módulos.

Desta forma, constata-se uma relação direta entre a temperatura da placa e consequentemente do meio. O que nos direcionou ao estudo proposto neste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada a metodologia com que se seguirá este trabalho, desde a coleta de dados até os detalhes da configuração no OpenFOAM.

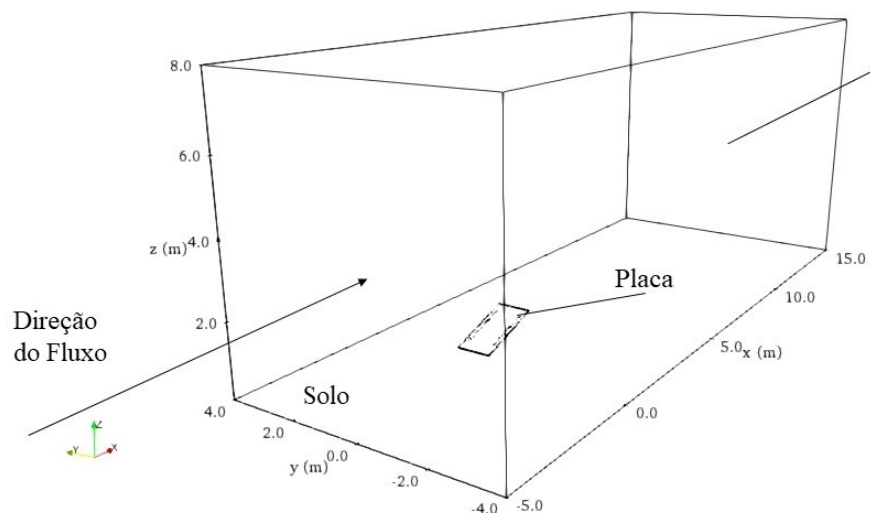
#### 3.1 CONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA E DE MALHA – PRÉ-PROCESSAMENTO

O domínio que representou a placa e o meio em que ela está inserida foi construído através de softwares livres, como Salome-Meca, FreeCAD e SnappyHexMesh, que permitem a construção de geometrias e malhas que podem ser utilizadas pelo OpenFOAM, com suas respectivas conversões de formato de malha. Sendo, o SnappyHexMesh uma própria ferramenta do OpenFOAM, é importante salientar que dentre os três softwares o SnappyHexMesh (OPENFOAM FOUNDATION, 2022) foi o que apresentou uma convergência mais rápida da solução.

A placa fotovoltaica selecionada para representação computacional foi baseada em placas disponíveis no mercado, que normalmente apresentam uma faixa de temperatura de operação que vai de  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $85^{\circ}\text{C}$  conforme Canadian Solar Inc (2018). A presente placa possui as dimensões de 2 metros de altura, 0,99 metros de largura e espessura de 0,035 metros.

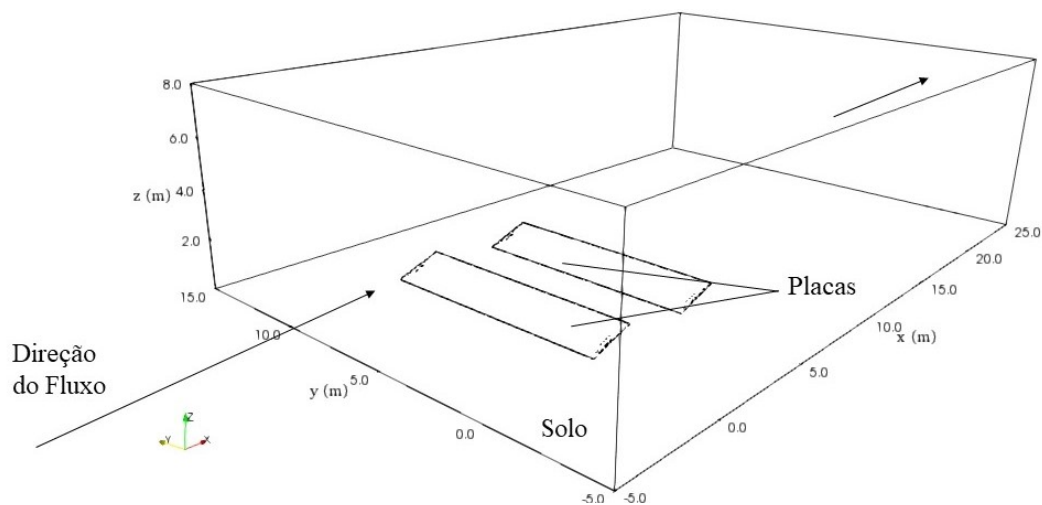
Para representação computacional foi gerada alguns domínios 3D para representar duas situações, a primeira, conforme Figura 7, é de uma única placa inserida no meio, a segunda, representada pela Figura 8, simula a forma com que os módulos são instalados em parques solares, em que foi feita uma geometria com dimensões equivalente a uma fileira de 10 placas solares, atrás desta primeira fileira se encontra uma segunda, com dimensões iguais, para verificação dos efeitos causados pelas placas à frente dela, em ambos os casos a angulação das placas são de  $14^{\circ}$ , o recomendado para Bom Jesus da Lapa/BA.

Figura 7 – Domínio utilizado para simulação no OpenFOAM para primeiro caso.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 8 – Domínio utilizado para simulação no OpenFOAM para segundo caso.



Fonte: Próprio Autor.

O refinamento da malha foi feito após realização de simulações com malhas contendo diferentes quantidades de elementos e analisando os resultados, quando ocorreu diferença nos resultados uma nova malha mais refinada foi gerada e a análise dos novos resultados foram feitas novamente, este método é conhecido como “análise de independência de malha” e as propriedades da malha final para ambos os casos podem ser observadas através da Tabela 1, estes parâmetros foram obtidos através do comando "checkMesh", utilizado para verificar as principais propriedades das malhas, como Razão de Aspecto, deformação e não-ortogonalidade.

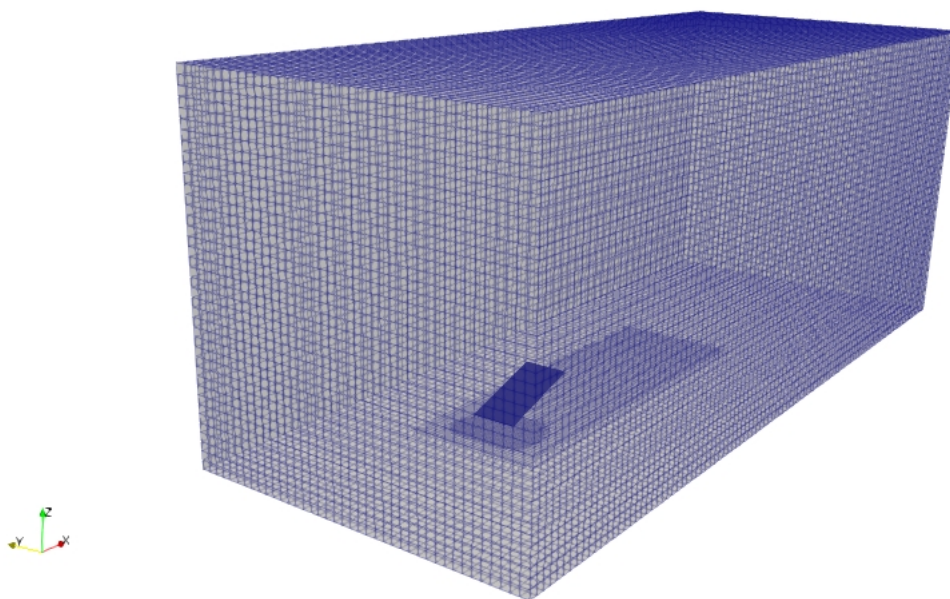
Tabela 1 – Propriedades principais das malhas do primeiro e segundo caso.

Propriedades	Primeiro Caso	Segundo Caso
Quantidade de Elementos	2067633	7288735
Razão de aspecto máximo	126,666	54,3318
Não-Ortogonalidade média	7,49967	8,34442
Máxima Assimetria	2,79062	3,33713
Camadas de prismas	15	15
Taxa de Crescimento dos Elem.	1,2	1,2

Fonte: Próprio Autor

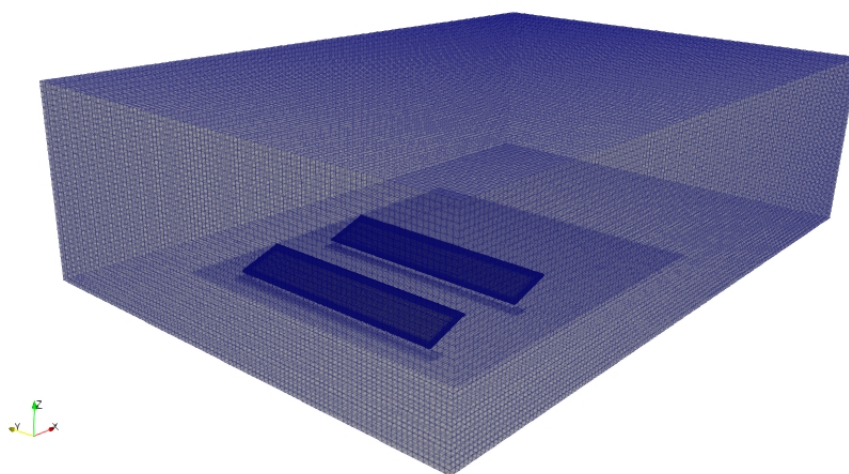
A seguir podemos observar a malha gerada para o primeiro caso, contendo um refinamento na região próxima a placa, se estendendo através da região posterior a placa, uma vez que a complexidade do escoamento em contato com a placa requer uma malha mais fina, de forma a captar maiores detalhes deste comportamento, para o segundo caso a malha também contou com refinamento na região próxima as fileiras de placas. Em ambas as malhas foram utilizadas camadas de prismas nas proximidades da superfície das placas, um total de 15 camadas foram construídas, sendo este valor o indicado pela literatura para este tipo de escoamento

Figura 9 – Malha gerada para o primeiro caso simulado.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 10 – Malha gerada para o segundo caso simulado.



Fonte: Próprio Autor.

Além desta análise, foi considerada um refinamento dos elementos próximos às placas, sendo realizado através do `snappyHexMesh`, como estamos lidando com modelos de turbulência, deve ser considerado um parâmetro chamado de  $Y^+$  (ou  $Y$  plus), este parâmetro identifica a localização em que a análise da camada limite está ocorrendo, desta forma, cada modelo de turbulência, que trabalha com leis de parede, tem um valor ideal para o  $Y^+$ . Na literatura é recomendado manter um valor de  $Y^+$  próximo de 1, evitando problemas nos resultados devido à uma análise deficiente da camada limite, o que é essencial para o fenômeno abordado neste trabalho, um valor de  $Y^+ \leq 1$  é o recomendado para o modelo de turbulência  $k - \omega$  SST e requer uma malha mais precisa na região em que ocorre os grandes gradientes de velocidade, pressão e temperatura, desta forma,

modelando melhor as subcamadas presentes na camada limite (MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2011).

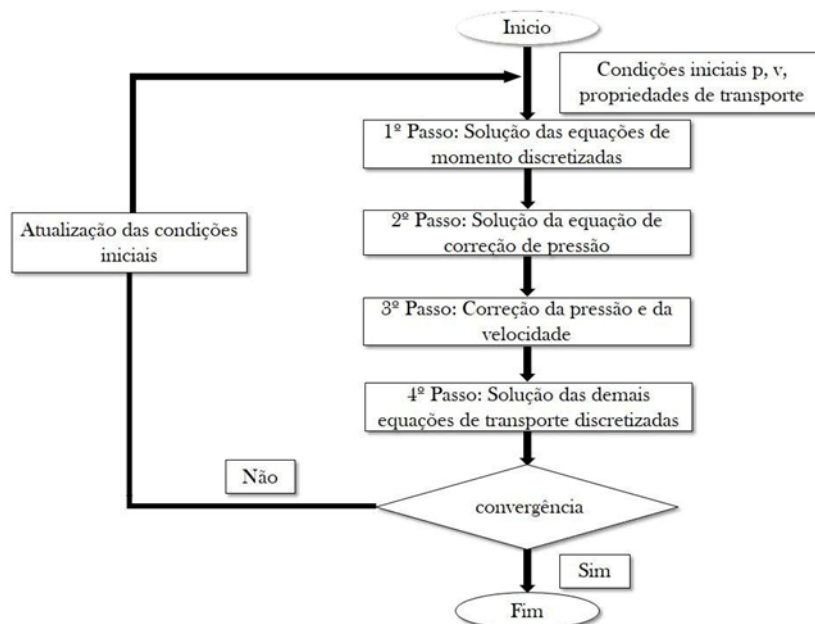
### 3.2 O SOLUCIONADOR BOUYANTSIMPLEFOAM

O solucionador utilizado neste trabalho foi o "buoyantSimpleFoam", que trabalha com as físicas da transferência de calor e pode ser feita a análise de flutuabilidade do fluido, sendo realizado neste texto através da Aproximação de Boussinesq, conforme abordado em seções anteriores.

O buoyantSimpleFoam é um solver de estado permanente para escoamentos turbulentos ou laminares, que trata em sua solução, problemas envolvendo transferência de calor e efeito de flutuação no escoamento, ou seja, a aproximação de Boussinesq é utilizada, conforme a Equação (18), caracterizando efeitos da convecção natural neste escoamento, o solver trata também de problemas envolvendo radiação, que não foram abordadas neste trabalho.

Este solucionador é feito com base no algoritmo SIMPLE, Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, que consiste num acoplamento pressão-velocidade para solução das equações de Navier-Stokes, é um algoritmo ideal para solução de problemas em regime permanente (PATANKAR, 2018).

Figura 11 – Esquemática do algoritmo SIMPLE.



Fonte: (FONSECA; SOUSA FILHO; MARTINS, 2018)

### 3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Dados ambientais da região de Bom Jesus da Lapa foram adquiridos através do banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) (INMET, 2022), que contém dados de temperaturas, pressão, radiação, velocidade de vento, entre outras informações. Estes dados foram úteis para definição das condições de contorno do problema, bem como informações necessárias para atribuir as propriedades do ar, logo, para uma maior fidelidade com o problema real, as condições ambientais na qual o parque está submetido no mundo real foram aproximadas para a simulação numérica. Os dados que foram coletados através do INMET compreendem o período do Verão para uma série histórica de 6 anos e serão demonstrados a seguir.

Tabela 2 – Principais condições de contorno locais utilizadas na simulação.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Velocidade de Vento	2 (m/s)
Temperatura Ambiente	32 (°C)
Temperatura da Placa	80 (°C)
Pressão	101.325 (Pa)
Viscosidade dinâmica	$1,849e^{-05}$ (kg/m.s)
Prandtl (laminar)	0,7295
Prandtl (turbulento)	0,7295
Densidade	1,1644 (kg/m <sup>3</sup> )

Fonte: (INMET, 2022)

As condições de contorno utilizadas na pasta "0" do OpenFOAM são uma parte extremamente importante do processo de uma simulação, podendo interferir negativamente na solução, causando problemas de convergência e na representação da física que o software produz, desta forma, as condições iniciais e contorno serão aplicadas para as principais entidades físicas apresentadas nas equações anteriormente, sendo elas, respectivamente, U (velocidade), T (temperatura), p (pressão estática), prgh (pressão dinâmica), nut (viscosidade turbulenta), alphas (difusividade térmica turbulenta), k (energia cinética turbulenta) e omega (taxa de dissipação específica). Estas condições de contorno foram aplicadas em cada grupo da geometria estudada, sendo elas, o solo (parede), ambiente, entrada (inlet), saída (outlet) e as placas, também caracterizadas como paredes, desta maneira, ficaram da seguinte forma, conforme Tabela 3:

Tabela 3 – Condições de contorno aplicadas na simulação.

Nome	Placa	Solo	Ambiente	Entrada	Saida
U	noSlip	noSlip	slip	fixedValue	inletOutlet
T	fixedValue	zeroGradient	zeroGradient	fixedValue	inletOutlet
p	calculated	calculated	calculated	calculated	calculated
prgh	fixedFluxPressure	fixedFluxPressure	zeroGradient	fixedFluxPressure	fixedValue
nut	nutWallFunction	nutWallFunction	zeroGradient	calculated	calculated
alphat	compressible::alphatWallFunction		zeroGradient	calculated	calculated
k	kqWallFunction	kqWallFunction	zeroGradient	fixedValue	inletOutlet
omega	omegaWallFunction	omegaWallFunction	zeroGradient	fixedValue	inletOutlet

Fonte: Próprio Autor

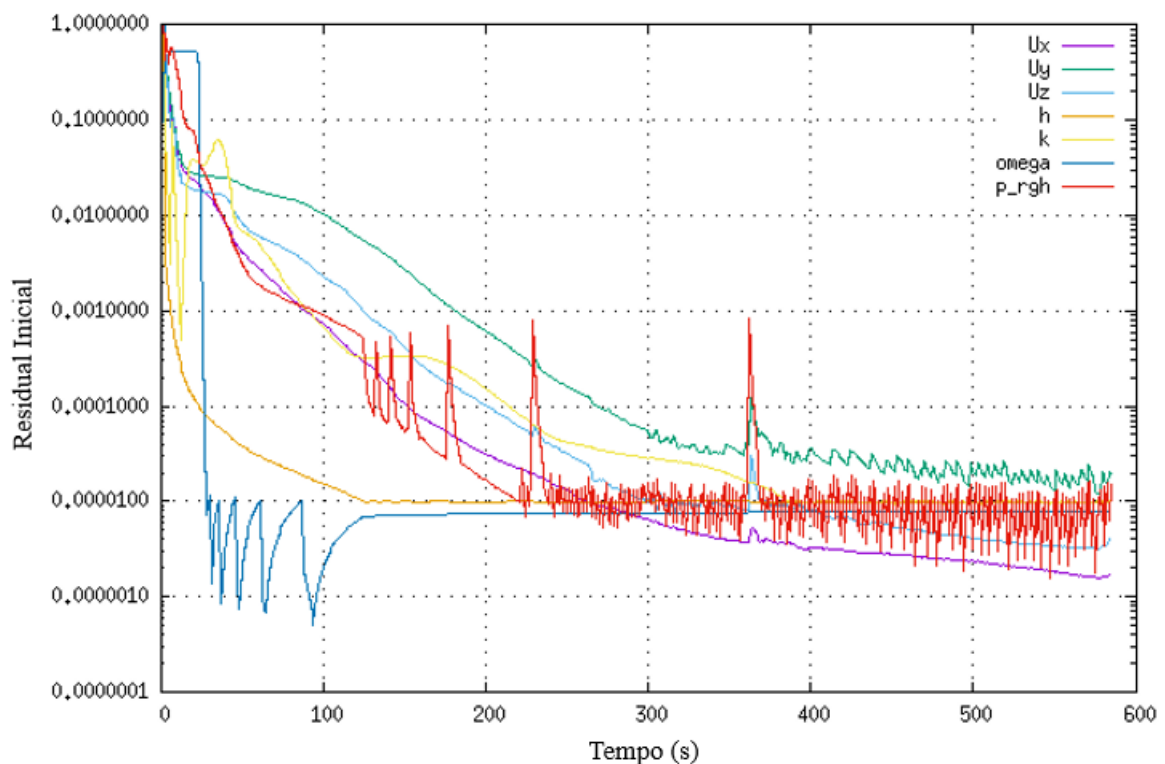
Para algumas situações envolvendo algumas condições de contorno dentro do OpenFOAM é possível alternar entre diferentes tipos de condições de contorno, pois se trata de uma ferramenta livre, desta forma, possuindo diferentes implementações em seu código.

## 4 RESULTADOS

Uma vez que as principais etapas foram realizadas, iniciando na geração da superfície a ser analisada através do Salome Plataform, gerando a malha de base com o utilitário blockMesh e importando a superfície em formato STL para integração com a malha base através do snappyHexMesh, temos então os primeiros resultados.

Inicialmente, foi observada os residuais para convergência da simulação através do PyFoam, desta forma, foi possível verificar o comportamento de algumas espécies físicas ao longo de toda a simulação para diferentes quantidades de elementos nas malhas, desta forma, através da análise de independência de malha, foi atingido um valor de número de elementos no qual não interfeririam nos resultados, alcançando a malha ideal para o problema. O primeiro caso gerou uma curva de residuais demonstradas pela Figura 12:

Figura 12 – Curva de residuais para primeiro caso (uma placa).

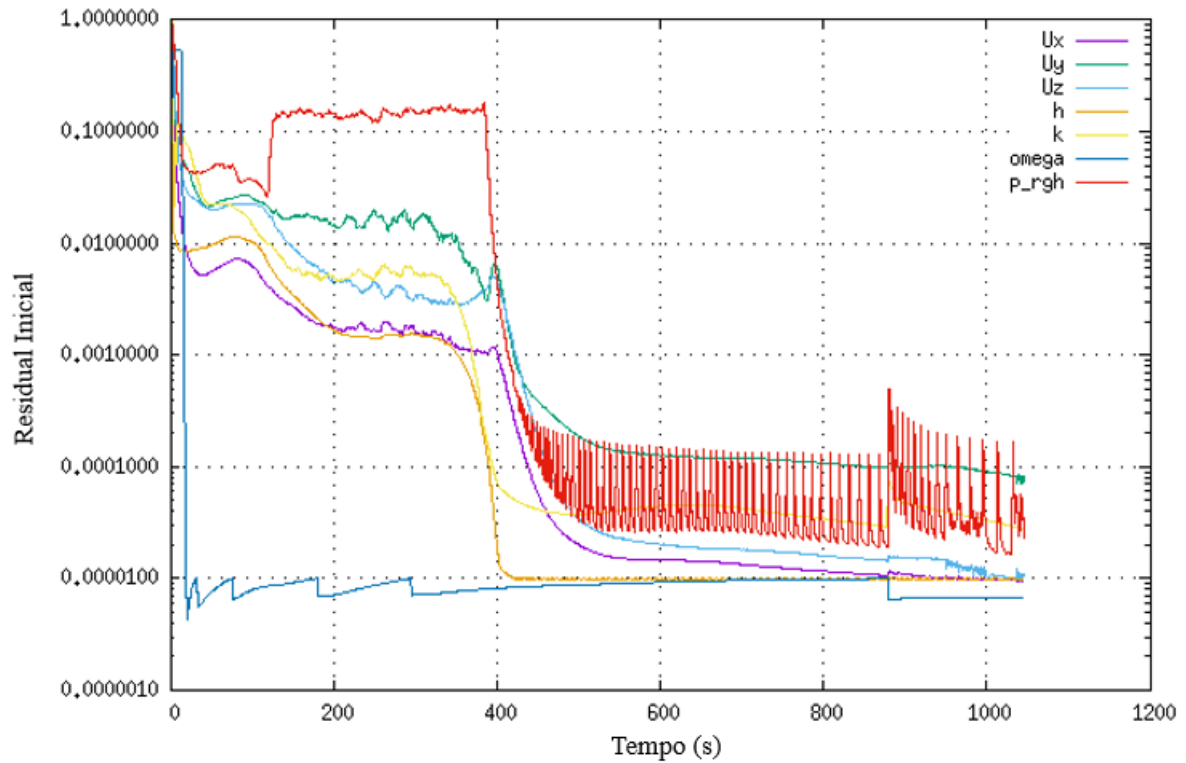


Fonte: Próprio Autor

Esta simulação apresentou uma convergência no tempo de 590 segundos, com um critério de convergência posto em  $1 \times 10^{-6}$  para todas as variáveis do problema.

Para o segundo caso foi utilizado o mesmo Critério de convergência para todas as variáveis analisadas e a convergência foi atingida no tempo de 1040 segundos, podendo ser observada através da figura abaixo:

Figura 13 – Curva de residuais para segundo caso (2 fileiras com 10 placas).



Fonte: Próprio Autor

Em ambos os casos as malhas geradas pelo snappyHexMesh apresentaram melhor convergência da simulação, comparado aos outros softwares utilizados como gerador de malha, como o SalomePlataform e Gmsh, o snappyHexMesh apresentou diversas ferramentas para configuração das malhas, possibilitando a modificação do número global de elemento, por meio do qual foi realizada o incremento no número de elementos de forma a se atingir a independência da malha, permitindo também a aplicação de diferentes níveis de refinamento através de todo o domínio, dessa forma, melhorando a convergência da simulação, foi possível a inclusão de camadas de inflação próximas às superfícies analisadas, sendo atribuída 15 camadas de elementos prismáticos.

Uma vez que a simulação apresentou queda em seus residuais, atingindo a convergência, foi feita a importação dos resultados obtidos no OpenFOAM para o Paraview, ferramenta necessária para renderização dos resultados. A primeira situação observada é o campo de Temperaturas na altura de 0,5 metros, conforme Figura 14:

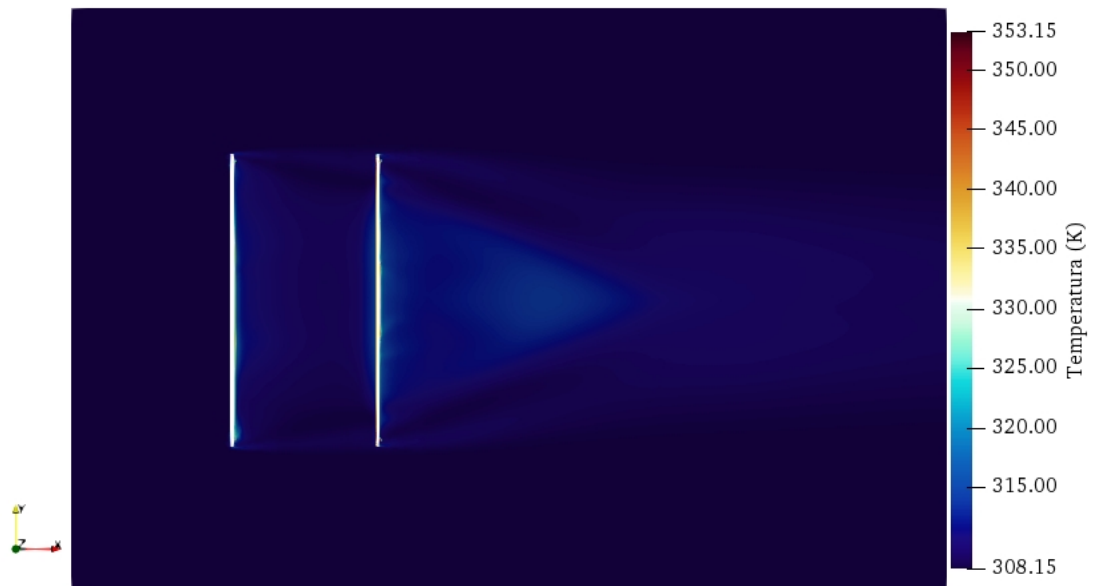
Figura 14 – Vista superior do mapa de temperatura na altura de 0,5 metros para primeiro caso de uma placa.



Fonte: Próprio Autor

Para a situação de duas fileiras de placas obtivemos o seguinte mapa de temperatura na altura mencionada:

Figura 15 – Vista superior do mapa de temperatura na altura de 0,5 metros para segundo caso com 2 fileiras de placas solares.



Fonte: Próprio Autor

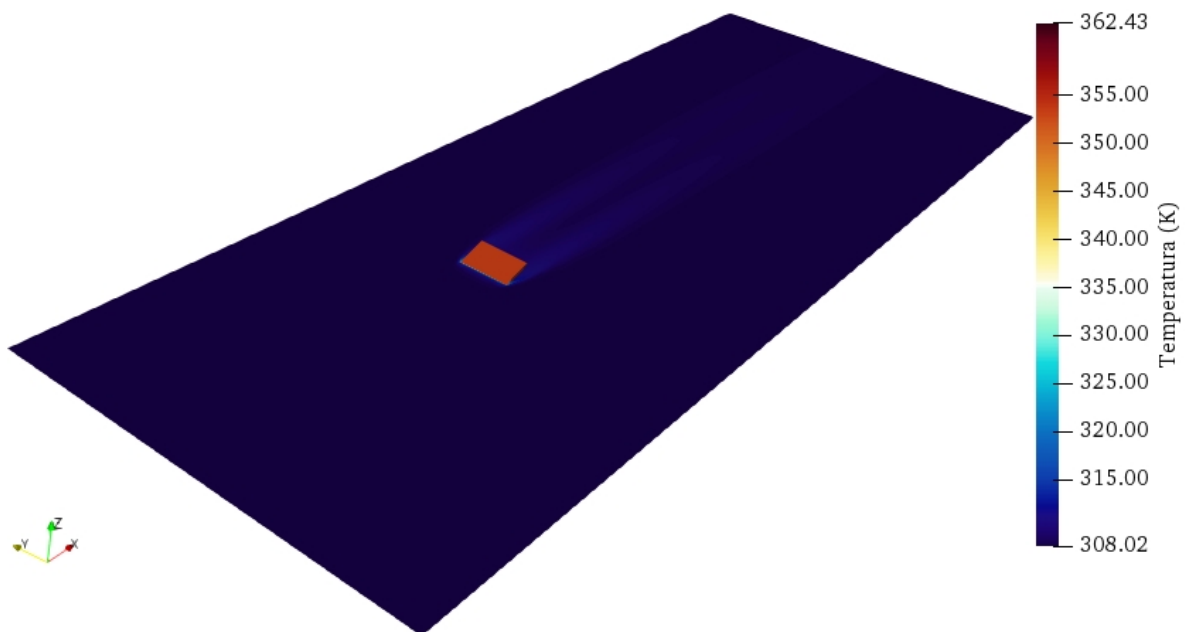
Este resultado é importante para perceber a dinâmica com que a temperatura se propaga pelo ambiente, no primeiro caso, vemos uma situação que não ocorre no mundo real, uma vez que as placas são instaladas em conjunto, mas para observar a propagação do calor oferece dados importantes de transferência de calor que veremos adiante. Para o

segundo caso temos algo mais próximo do real, apresentando 2 fileiras de placas solares e como a transferência de calor ocorre na região entre a primeira e a segunda fileira, bem como o campo de temperaturas resultantes após percorrer as duas fileiras.

Uma vez que estamos lidando com o efeito de flutuabilidade, ao passar pela placa o fluido ganha temperatura, esta temperatura causa uma diminuição da massa específica do ar, fazendo que com a massa de ar aquecida ganhe altura, por conta deste fenômeno foi extraído o campo de temperatura em uma altura um pouco mais elevada, 0,80 metros, em que percebemos diferenças no campo de temperatura com relação aos resultados anteriores.

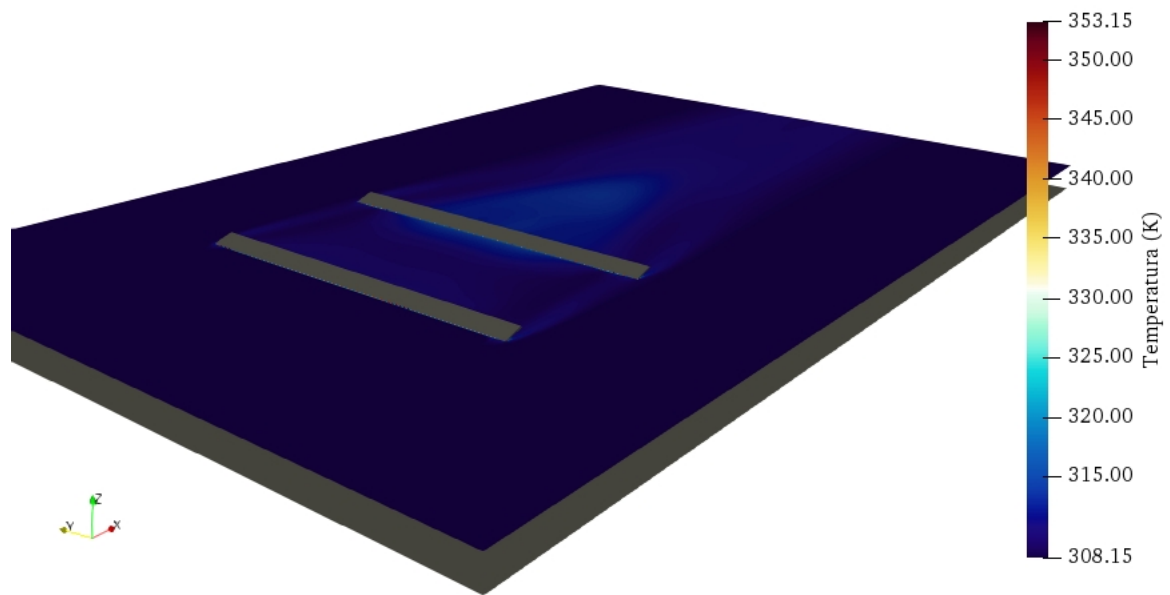
Em ambos os casos foi observado alterações no campo da temperatura com relação aos obtidos na altura de 0,5 metros, o que era esperado devido ao efeito da flutuabilidade, que ocorre em regimes de convecção natural, o campo pode ser observado na Figura 16 para o primeiro caso e na Figura 17 para o segundo caso.

Figura 16 – Mapa de temperatura na altura de 0,8 metros para primeiro caso com 1 placa.



Fonte: Próprio Autor

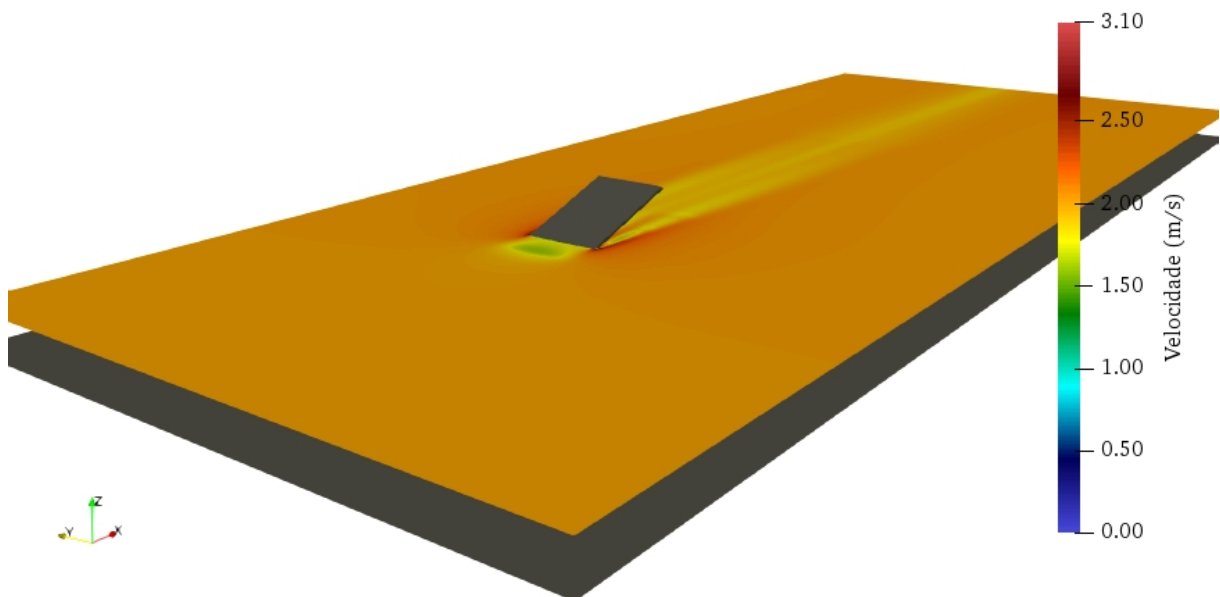
Figura 17 – Mapa de temperatura na altura de 0,8 metros para segundo caso.



Fonte: Próprio Autor

Foi obtido, além do campo de temperaturas em 0,5 metros, o campo de velocidade gerado, uma vez que a transferência de calor depende fortemente da velocidade com que o fluido passa pela superfície a aquecida, desta forma obtivemos os resultados abaixo para o primeiro caso:

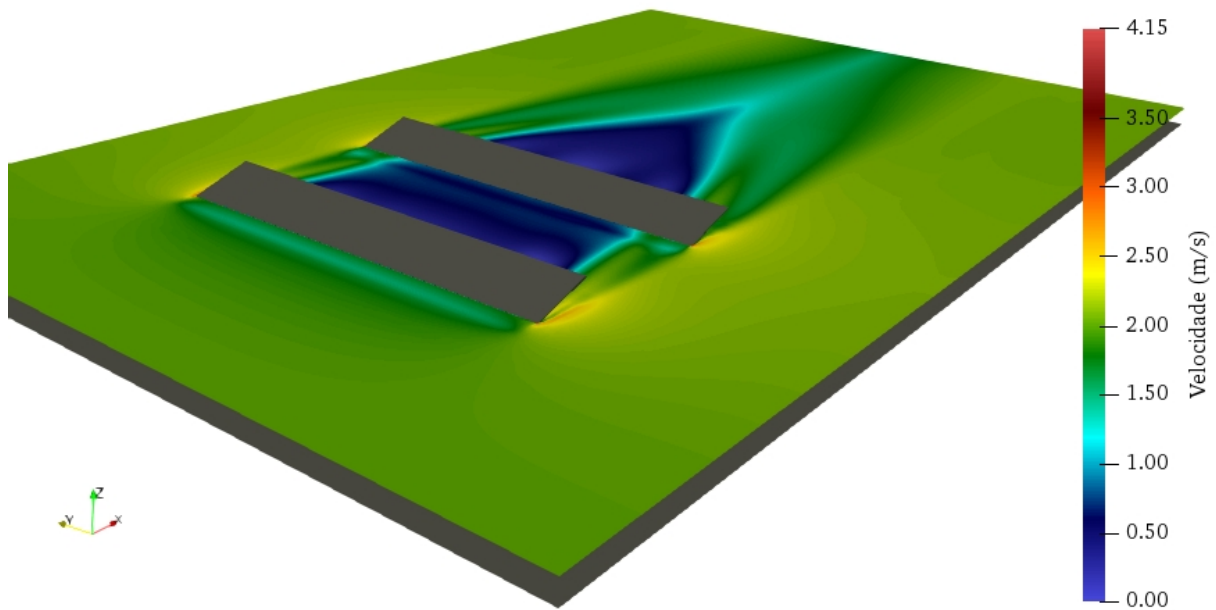
Figura 18 – Distribuição de velocidade na altura de 0,5 metros para primeiro caso.



Fonte: Próprio Autor

Para o segundo caso podemos observar também o comportamento do campo de velocidade na altura de 0,5 metros, assim podemos verificar a forma como placas mais a frente podem afetar outras posteriores, o fluido chega com velocidades menores e como verificamos nos campos de temperatura anteriormente, o ar chega com temperatura elevada pois já recebeu calor das placas posicionadas mais à frente.

Figura 19 – Distribuição de velocidade na altura de 0,5 metros para segundo caso.



Fonte: Próprio Autor

Uma forma de visualizar os efeitos da temperatura no fluido, associado ao fenômeno da flutuabilidade é observando lateralmente o deslocamento do fluido, bem como o ganho de altura do ar aquecido e como ele pode atingir outras placas posteriores, bem como alterar a temperatura no entorno do local onde estão instaladas as placas. Para a primeira situação de uma placa solar temos:

Figura 20 – Distribuição de temperatura com vista lateral do domínio do primeiro caso.



Fonte: Próprio Autor

Para o segundo caso podemos observar uma quantidade maior de calor que está sendo inserida no ambiente do que o primeiro caso, isto por conta da presença de mais placas, vemos também como o ar aquecido tende a ganhar altura conforme avança pelo domínio e conseqüentemente se houvesse mais fileiras de placas teríamos mais calor sendo despejado no ar.

Figura 21 – Distribuição de temperaturas com vista lateral para domínio do segundo caso.



Fonte: Próprio Autor

Uma vez que conhecemos o campo de temperatura através desta vista lateral do domínio, verificamos também o campo de velocidade referente a estes campos de

temperatura explicitados anteriormente, desta forma para o primeiro caso temos:

Figura 22 – Distribuição de velocidades com vista lateral para domínio do primeiro caso.



Fonte: Próprio Autor

O segundo caso apresenta variações no campo de velocidades com relação ao primeiro, logicamente devido ao efeito causado pela presença de uma nova fileira de placas inserida no domínio, conforme Figura 23:

Figura 23 – Distribuição de velocidades com vista lateral para o domínio do segundo caso.

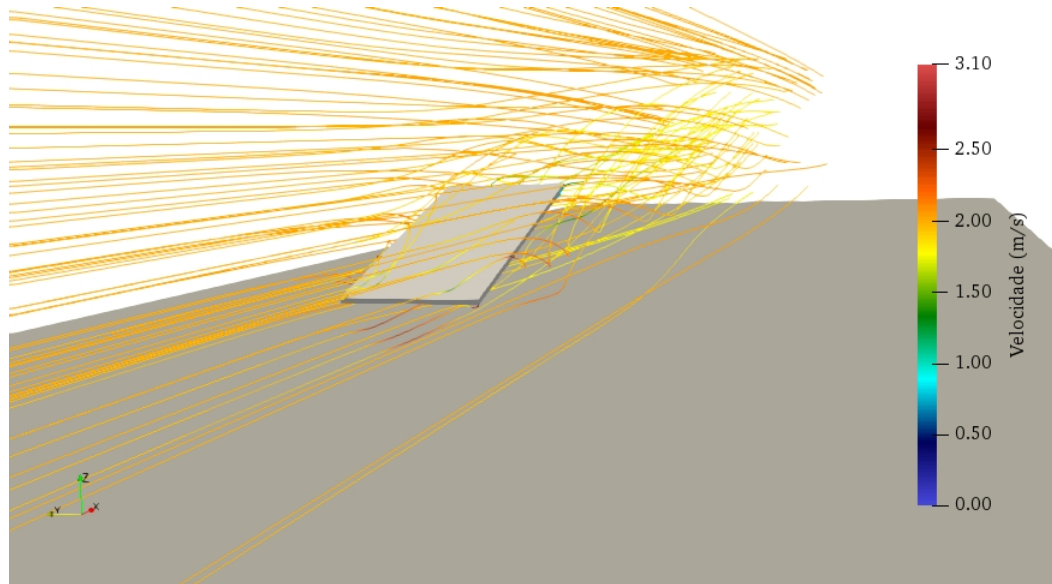


Fonte: Próprio Autor

A partir deste campo de velocidade foi obtida as linhas de fluxo do ar ao passar pelas placas em ambos os casos, gerando desta forma, uma visão mais detalhada de como

o ar se comporta neste tipo de escoamento com obstáculo, bem como sua interação entre as duas fileiras de placas para o segundo caso, a Figura 24 demonstra as linhas de fluxo para a simulação com apenas uma placa:

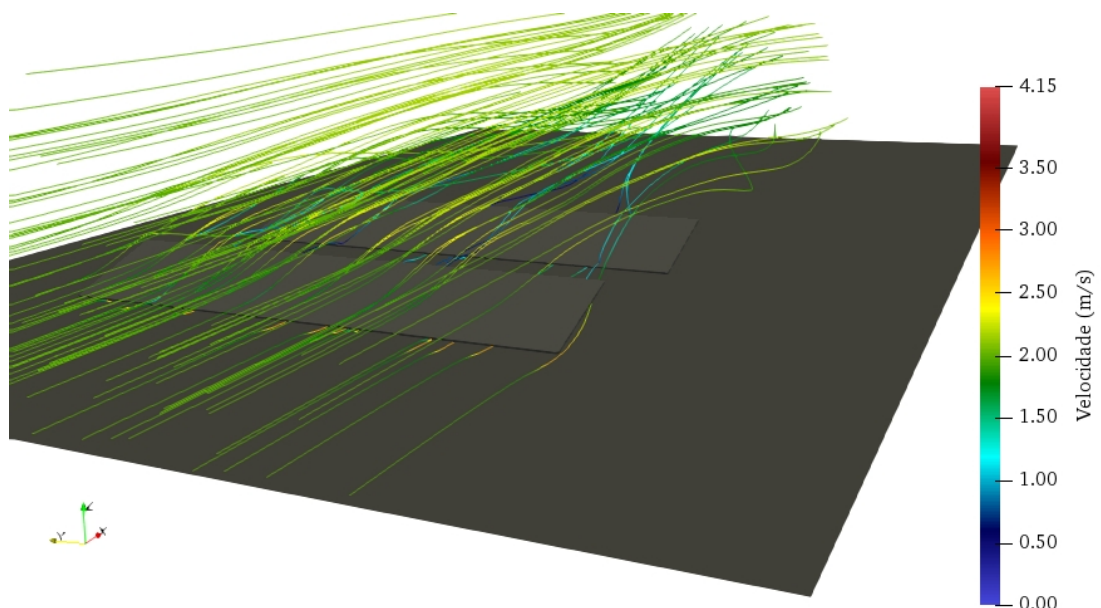
Figura 24 – Linhas de fluxo do ar para o caso composto por apenas uma placa.



Fonte: Próprio Autor

É possível observar a tendência das linhas de fluxo em subir devido ao efeito de flutuação, pois a temperatura desta parcela de fluido ganhou temperatura devido à placa. Um comportamento similar pode ser observado na Figura 25 para o caso de 2 fileiras de placas.

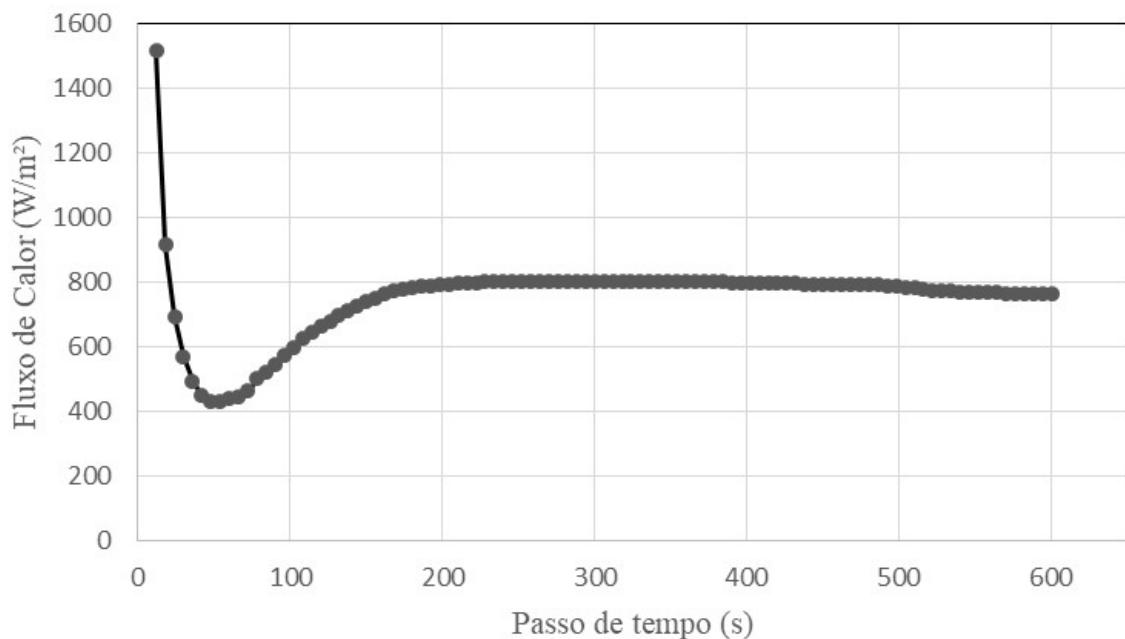
Figura 25 – Linhas de fluxo do ar para o caso composto por duas fileiras com dez placas.



Fonte: Próprio Autor

O OpenFOAM conta com recursos de extração de diversas propriedades de suas simulações, um destes recursos é a quantificação das trocas de calor que ocorrem em cada simulação, desta forma, foi utilizado o recurso para extração do fluxo de calor através da superfície com que estamos lidando. Para o primeiro caso temos a Figura 26 que demonstra os valores de fluxo de calor ( $W/m^2$ ) para cada tempo contabilizado pelo OpenFOAM, os valores vão desde o início da simulação até a sua convergência.

Figura 26 – Fluxo de calor obtido pelo OpenFOAM para o primeiro caso para cada passo de tempo.



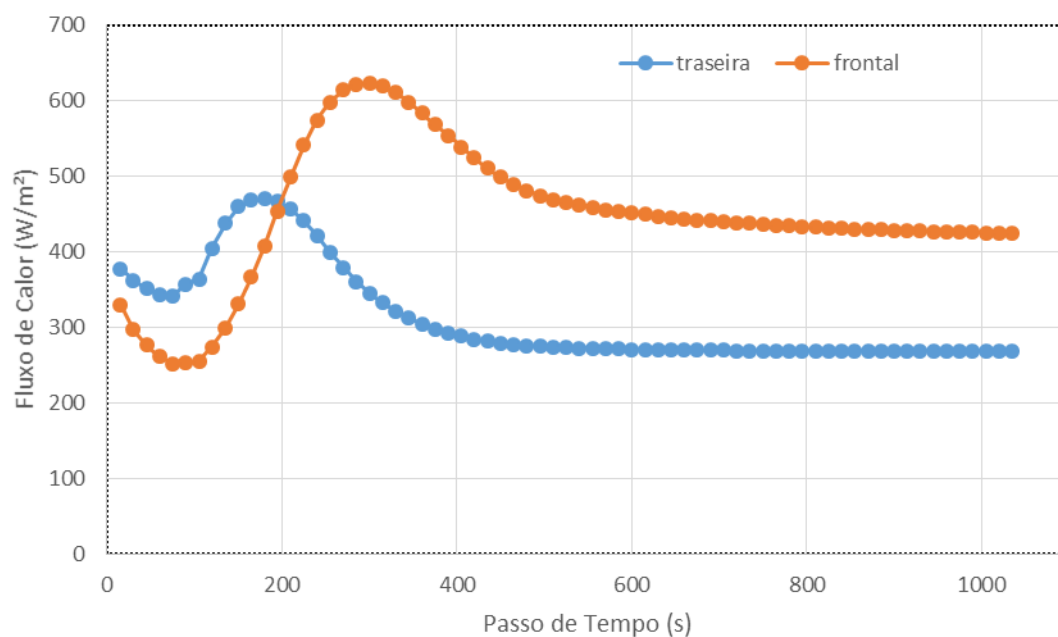
Fonte: Próprio Autor

Para a análise em uma placa, o fluxo de calor no momento da convergência da simulação é de  $762,6 W/m^2$ , esta análise foi realizada também para o segundo caso, de forma a verificar o impacto na transferência de calor quando há conjuntos de placas enfileirados.

Como demonstrado na Figura 27, a fileira posterior sofre interferência nas trocas de calor que ocorrem nela, isto devido ao fato de que a temperatura do fluido chega na segunda fileira após passar pela primeira, desse modo, já houve trocas de calor para o fluido, em termos quantitativos temos que o fluxo de calor para a primeira fileira é de, no momento da convergência,  $424,4 W/m^2$  e para a segunda fileira é de cerca de  $269,08 W/m^2$ .

Este tipo de comportamento mostra que em situações onde há mais fileiras de placas, como em um parque solar, pode ocorrer um efeito que irá afetar negativamente as trocas de calor ocorridas ao longo do parque, indicando que as placas das primeiras fileiras a entrar em contato com o ar ambiente podem perder mais temperatura, melhorando

Figura 27 – Fluxo de calor obtido para o segundo caso em cada passo de tempo.



Fonte: Próprio Autor

a sua eficiência. Outro ponto observado é que o ar, após passar pelas placas e ganhar temperatura, se desloca podendo levar essa parcela aquecida para outras regiões, assim, corroborando com a literatura, em que regiões próximas a parques solares têm um pior índice de desconforto térmico.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a simulação, utilizando o Método dos Volumes Finitos, de duas situações, o primeiro representando uma única placa solar e o segundo caso representando conjuntos de placas divididas em 2 fileiras, objetivando o estudo das trocas de calor entre placa e ar atmosférico e afim de verificar possíveis influencias que multiplas placas tem sobre as trocas de calor das demais vizinhas.

Para melhor análise dos efeitos fluidodinâmicos desse fenômeno foi escolhido o modelo de turbulência  $k - \epsilon$  SST, indicado para escoamentos externos e com melhor tratamento da camada limite nas paredes.

Desta forma podemos então concluir que:

- O software OpenFOAM se mostra como uma alternativa viável e gratuita para análise de trocas de calor por convecção, apresentando eficiência em suas soluções e disponibilizando uma série de ferramentas para obtenção de diferentes informações das simulações;
- O algoritmo "snappyHexMesh" se mostra, apesar da complexidade, com um grande potencial de geração de malhas com alto número de elementos e baixo custo computacional, facilitando de forma considerável a convergência da simulação e contemplando as mais variadas formas de manipulação de malhas computacionais;
- Utilizando as condições climáticas da cidade de Bom Jesus da Lapa é possível observar que a propagação do ar faz com que ar aquecido passe pelas demais placas no parque, desta forma, as primeiras placas a receber o ar no ambiente trocam mais calor que as placas posicionadas após elas, assim, a temperatura tende a ir aumentando conforme avança através das placas;
- Uma vez que a temperatura aumenta conforme o ar passa por mais placas e a temperatura na placa solar é um fator essencial para a eficiência dele, associada ao decaimento da transferência de calor conforme simulação, ao longo do tempo as placas podem apresentar uma queda de eficiência pela falta de trocas de calor;
- Corroborando com a literatura mostrada anteriormente, é possível perceber que a presença de placas aquecidas aumentam a temperatura do ar no entorno das placas, dessa forma, podendo havendo piora no índice de conforto térmico da região próxima ao local que estão as placas;
- A utilização da Fluidodinâmica Computacional se mostra como uma ferramenta poderosa da engenharia para estudar e prever fenômenos associados à transferência de calor, sendo necessário para uma boa simulação, o conhecimento da

física do problema e o conhecimento dos métodos numéricos para garantir uma reprodução bem aproximada do comportamento.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Após a obtenção e verificação dos resultados, pode-se ser indicado melhorias e possibilidades a serem realizadas futuramente:

- Estudo com outros modelos de turbulência, tanto para modelos RANS quanto LES;
- Estudo experimental com placas fotovoltaicas reais verificando a perda de calor em cada uma;
- Estudos de diferentes índices de conforto térmico obtidos através das simulações no OpenFOAM, bem como medição em parques solares reais;
- Análise da condução de calor nas diferentes camadas da placa solar, associada à convecção através do solucionador "multiRegionFoam";
- Estudo do espaçamento entre placas solares e fileiras para visualizar impacto na transferência de calor;
- Análise de diferentes formas de resfriamento aplicadas às placas fotovoltaicas através da Fluidodinâmica Computacional.

## REFERÊNCIAS

- BARRON-GAFFORD, Greg A; MINOR, Rebecca L; ALLEN, Nathan A; CRONIN, Alex D; BROOKS, Adria E; PAVAO-ZUCKERMAN, Mitchell A. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. **Scientific reports**, Springer, v. 6, n. 1, p. 1–7, 2016.
- BEJAN, Adrian. **Convection heat transfer**. [S.l.]: John wiley & sons, 2013.
- CANADIAN SOLAR INC. **KuMax HIGH EFFICIENCY MONO PERC MODULE**. 2018. Disponível em:  
<https://cdn.dooca.store/4104/files/canadian-datasheet-kumax-high-efficiency-mono-perc-module-cs3u-370-to-390wp.pdf?v=1628038761>.
- CENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. **Tranferência de Calor e Massa**. [S.l.]: AMGH editora, 2009.
- CHUNG, T J *et al.* **Computational fluid dynamics**. [S.l.]: Cambridge university press, 2002.
- AL-DAMOOK, Moustafa; KHATIR, Zinedine; AL QUBEISSI, Mansour; DIXON-HARDY, Darron; HEGGS, Peter J. Energy efficient double-pass photovoltaic/thermal air systems using a computational fluid dynamics multi-objective optimisation framework. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 194, p. 117010, 2021.
- FAN, Yifan; ZHAO, Yongling; TORRES, Juan F; XU, Feng; LEI, Chengwang; LI, Yuguo; CARMELIET, Jan. Natural convection over vertical and horizontal heated flat surfaces: A review of recent progress focusing on underpinnings and implications for heat transfer and environmental applications. **Physics of Fluids**, AIP Publishing LLC, v. 33, n. 10, p. 101301, 2021.
- 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: [s.n.], 2019. P. 2690–2693.
- FONSECA, William Denner Pires; SOUSA FILHO, Lourival Matos de; MARTINS, Genilson Vieira. ESTUDO NUMÉRICO DA CONVECÇÃO NATURAL EM

UMA PLACA PLANA VERTICAL VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL. **Acta Tecnológica**, v. 12, n. 1, p. 33–43, 2018.

FOX, Robert W; MCDONALD, Alan T; MITCHELL, John W. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.

GAMET, Lionel; SCALA, Marco; ROENBY, Johan; SCHEUFLER, Henning; PIERSON, Jean-Lou. Validation of volume-of-fluid OpenFOAM® isoAdvector solvers using single bubble benchmarks. **Computers & Fluids**, Elsevier, v. 213, p. 104722, 2020.

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**, Elsevier, v. 148, p. 106062, 2020.

HAJMOHAMMADI, Mohammad R; NOURAZAR, SS. Conjugate forced convection heat transfer from a heated flat plate of finite thickness and temperature-dependent thermal conductivity. **Heat Transfer Engineering**, Taylor & Francis, v. 35, n. 9, p. 863–874, 2014.

INCROPERA, Frank P; DEWITT, David P; BERGMAN, Theodore L. **Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa** . [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos**. Nov. 2022. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>.

ITO, M. C. **Avaliação numérico-experimental da convecção natural em uma placa plana horizontal**. 2020. F. 131. Diss. (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

JACOBSEN, Niels G; FUHRMAN, David R; FREDSE, Jørgen. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. **International Journal for numerical methods in fluids**, Wiley Online Library, v. 70, n. 9, p. 1073–1088, 2012.

KANT, Karunesh; SHUKLA, Amritanshu; SHARMA, Atul; BIWOLE, Pascal Henry. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. **Solar Energy**, Elsevier, v. 140, p. 151–161, 2016.

KIM, Jong Pil; LIM, Ho; SONG, Ju Hun; CHANG, Young June; JEON, Chung Hwan. Numerical analysis on the thermal characteristics of photovoltaic module with ambient temperature variation. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 95, n. 1, p. 404–407, 2011.

KITWARE. **PARAVIEW. Versão 5.9.1.** Mar. 2023. Disponível em: <https://www.paraview.org/>.

LAITINEN, Alpo; SAARI, Kari; KUKKO, Kirsi; PELTONEN, Petteri; LAURILA, Erkki; PARTANEN, Jouni; VUORINEN, Ville. A computational fluid dynamics study by conjugate heat transfer in OpenFOAM: A liquid cooling concept for high power electronics. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Elsevier, v. 85, p. 108654, 2020.

MEDINA, Humberto; BEECHOOK, Abhinivesh; SAUL, Jonathan; PORTER, Sophie; ALEKSANDROVA, Svetlana; BENJAMIN, Steve. Open source computational fluid dynamics using OpenFOAM. *In*: ROYAL Aeronautical Society, General Aviation Conference, London. [*S.l.*: *s.n.*], 2015.

MIRZAEI, Parham A; HAGHIGHAT, Fariborz. Pollution removal effectiveness of the pedestrian ventilation system. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 99, n. 1, p. 46–58, 2011.

MOON, Je-Young; CHUNG, Bum-Jin. Time-dependent Rayleigh–Benard convection: Cell formation and Nusselt number. **Nuclear Engineering and Design**, Elsevier, v. 274, p. 146–153, 2014.

MURATORI, Matteo *et al.* The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations. **Progress in Energy**, IOP Publishing, v. 3, n. 2, p. 022002, 2021.

ÖMEROĞLU, Gökhan. Experimental and computational fluid dynamics analysis of a photovoltaic/thermal system with active cooling using aluminum fins. **Journal of Photonics for Energy**, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 7, n. 4, p. 045503–045503, 2017.

OPENFOAM FOUNDATION. **OpenFOAM User Guide. Versão 9.** Dez. 2022. Disponível em: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>.

PADET, Jacques; COTTA, Renato M; MLADIN, Emilia C; PADET, Colette. Mixed thermal convection: fundamental issues and analysis of the planar case. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, SciELO Brasil, v. 87, p. 1865–1885, 2015.

PATANKAR, Suhas. **Numerical heat transfer and fluid flow**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2018.

PEPPLOW, Luiz Amilton; SILVA, Vander Luiz da; BETINI, Roberto C; PEREIRA, Thulio CG. Evaluation of Global Heating Reduction Potential with the Replacement of Electricity Supplied by the Local Concessionaire Via Solar Renewable Source. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, SciELO Brasil, v. 62, 2019.

SOUZA, JST; DE SOUSA, NCA. Temperature influence on mobility and charge density model of photovoltaic cells. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 41, 2019.

TEO, HG; LEE, PS; HAWLADER, MNA. An active cooling system for photovoltaic modules. **applied energy**, Elsevier, v. 90, n. 1, p. 309–315, 2012.

UNEP. **Estocolmo+50: Reunião internacional para acelerar ação por um planeta saudável e próspero para todos e todas**. Out. 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/estocolmo50-reuniao-internacional-para-acelerar-acao>.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson education, 2007.