

Hugo Okahara da Silva

**Estudo Experimental e Numérico da  
Transferência de Calor por Convecção Natural  
em um Gabinete Parcialmente Fechado**

Dourados

2018



Hugo Okahara da Silva

**Estudo Experimental e Numérico da Transferência de  
Calor por Convecção Natural em um Gabinete  
Parcialmente Fechado**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal da Grande  
Dourados - UFGD, como requisito para a  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

Faculdade de Engenharia – FAEN

Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Augusto Salomão Bornschlegell

Coorientador: Prof. Me. Ricardo Camparim

Dourados

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

S586e Silva, Hugo Okahara Da

Estudo Experimental e Numérico da Transferência de Calor por Convecção  
Natural em um Gabinete Parcialmente Fechado / Hugo Okahara Da Silva --  
Dourados: UFGD, 2018.

77f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Augusto Salomão Bornschlegell

Co-orientador: Ricardo Camparim

TCC (Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da  
Grande Dourados

Inclui bibliografia

1. OpenFOAM. 2. Simulação. 3. Estudo Térmico. 4. Dissipador de Calor. 5.  
Transferência de Calor Conjugada. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.**

Hugo Okahara da Silva

# **Estudo Experimental e Numérico da Transferência de Calor por Convecção Natural em um Gabinete Parcialmente Fechado**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. Dourados, 12 de dezembro de 2018:

---

**Prof. Dr. Augusto Salomão  
Bornschlegell**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Reginaldo Ribeiro de Sousa**  
FAEN - UFGD

---

**Prof. Dr. Fernando Augusto Alves  
Mendes**  
FAEN - UFGD

Dourados  
2018



# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que permitiu que tudo acontecesse.

A minha avó Lourdes, meu avô Yassuo, meu pai Celso e minha mãe Claudinéia e meu irmão Hygor que sem o apoio e o carinho me ajudaram e fizeram essa graduação possível.

A Universidade Federal da Grande Dourados pela estrutura e pelo curso de Engenharia Mecânica.

Ao meu orientador Augusto Salomão Bornschlegell por me auxiliar não somente ao longo deste trabalho mas também em aspectos morais que levarei para toda a vida.

Aos meus amigos por sempre me apoiar, contribuir e estar presente ao longo desses 5 anos.

A todos que fizeram parte diretamente e indiretamente da minha formação.

Por último, mas não menos importante, a Rafaela Oliveira da Silva por ser responsável pela maioria dos momentos bons que tive, por sempre me apoiar e me ajudar nos momentos difíceis dessa jornada.





*“(...) But it ain’t about how hard you hit.  
It’s about how hard you can get hit and keep moving forward (...)”  
(STALLONE, SYLVESTER; **ROCKY BALBOA**, 2006. )*



# RESUMO

Atualmente é crescente o número de computadores presente no cotidiano sendo que esses possuem cada vez mais poder de processamento. O processador presente no computador é o componente eletrônico responsável por receber e gerenciar as informações de todos os outros componentes constituintes, sendo assim exige uma quantidade grande de energia, a qual gera calor. Assim, o estudo da dissipação de calor se vê necessário para garantir o seu pleno funcionamento. Neste trabalho, utilizou-se o OpenFOAM como ferramenta para a simulação da transferência de calor gerada pelo processador em um gabinete parcialmente fechado onde foram analisados duas situações: A dissipação de calor com e sem o dissipador de calor, que permitiu a visualização da importância que o mesmo tem no papel de transferência de calor. Ambos os casos ocorreram com a mesma condição de contorno para o fluido e para as regiões sólidas, tendo a mesma potência de 10 W para o sólido que representava o processador. Com o resultado numérico foi possível observar o campo de temperatura, campo velocidade e a redução da temperatura provocada pela presença do dissipador. Para confirmação dos resultados de simulação foi confeccionada uma maquete com três resistores de potência para representar a geração de calor onde os dois casos também foram numericamente analisados. Através do resultado experimental foi possível observar a melhoria na dissipação de calor que o dissipador provocou, a visualização do campo de temperatura e serviu como parâmetro de comparação para o resultado numérico.

**Palavras-chave:** OpenFOAM. simulação. estudo térmico. dissipador de calor. transferência de calor conjugada.



# ABSTRACT

Nowadays, the number of computers present in the everyday life of humanity is increasing and these have been increasing processing power. The processor is the electronic component responsible for receiving and managing the information from other computer's components, requiring a large amount of energy, which generates heat. Thus, the study of heat dissipation is necessary to ensure it's full functioning. In this work, OpenFOAM was used as a tool to simulate the heat transfer generated by the processor in a partially closed cabinet where two situations were analyzed: Heat dissipation with and without the heatsink, which allowed the visualization of the importance it has in the role of heat transfer. Both cases occurred with the same boundary condition for the fluid and the solid regions, having the same power of 10 W for the solid representing the processor. With the numerical result it was possible to observe the field of temperature, velocity and the decrease of the temperature caused by the presence of the heatsink. To confirm the simulation results, a model with three power resistors was created to represent the heat generation, where the two cases were also numerically analyzed. Through the experimental result it was possible to observe an improvement in the heat dissipation caused by the heatsink, the visualization of the temperature field and served as a comparison parameter for the numerical result.

**Keywords:** OpenFOAM. simulation. thermal analysis. heatsink. conjugate heat transfer.



# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Parede Plana . . . . .	26
Figura 2 – Circuito Seedbeck . . . . .	28
Figura 3 – Geometria do escoamento (a) tipo d e (b) do tipo k . . . . .	29
Figura 4 – Resistores em paralelo . . . . .	32
Figura 5 – Montagem primeiro experimento . . . . .	32
Figura 6 – Montagem segundo experimento . . . . .	33
Figura 7 – Bancada de teste . . . . .	33
Figura 8 – Fonte de energia . . . . .	34
Figura 9 – Estrutura pasta OpenFOAM . . . . .	35
Figura 10 – Geometria da placa mãe . . . . .	36
Figura 11 – Geometria das resistências . . . . .	36
Figura 12 – Geometria do dissipador de calor . . . . .	37
Figura 13 – Malha gerada pela ferramenta <i>blockMesh</i> . . . . .	37
Figura 14 – Malha gerada pela ferramenta <i>snappyHexMesh</i> . . . . .	38
Figura 15 – Fronteiras da região do fluido . . . . .	39
Figura 16 – Interface <i>paraView</i> . . . . .	40
Figura 17 – Resultado experimental resistência . . . . .	41
Figura 18 – Imagem das resistências via câmera térmica . . . . .	42
Figura 19 – Imagem da folha de alumínio . . . . .	42
Figura 20 – Domínio numérico do primeiro caso . . . . .	43
Figura 21 – Campo de temperatura do primeiro caso . . . . .	43
Figura 22 – Campo de velocidade de primeiro caso . . . . .	44
Figura 23 – Vetor velocidade e campo de temperatura do primeiro caso . . . . .	44
Figura 24 – Fluxo de calor através das paredes das resistências . . . . .	45
Figura 25 – Resultado experimental dissipador . . . . .	45
Figura 26 – Imagem do conjunto resistores-dissipador . . . . .	46
Figura 27 – Domínio numérico do segundo caso . . . . .	46
Figura 28 – Campo de temperatura do segundo caso . . . . .	47
Figura 29 – Campo de velocidade do segundo caso . . . . .	47
Figura 30 – Vetor velocidade e campo de temperatura do segundo caso . . . . .	48





# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela processadores . . . . .	23
Tabela 2 – Condutividade térmica e calor específico de alguns materiais . . . . .	25
Tabela 3 – Tabela de condições iniciais . . . . .	38
Tabela 4 – Resumo dos resultados . . . . .	48



# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Dinâmica dos fluídos computacional
MVF	Métodos dos volumes finitos
CDS	<i>Central differencing scheme</i>
QUICK	<i>Quadratic upstream interpolation for convective kinectis</i>
SIMPLE	<i>Semi-implicit method for pressure-linked equations</i>
PISO	<i>Pressure Implicit with Splittin of Operators</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
STEP	<i>standard for the exchange of product model data</i>



# LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$c_p$	Calor específico [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$h$	Coefficiente de transferência térmica [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$I$	Corrente [A]
$k$	Condutividade térmica [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$Nu$	Número de Nusselt
$P$	Pressão [Pa]
$Pr$	Número de Prandtl
$q$	Calor [W]
$q''$	Fluxo de calor [W m <sup>-2</sup> ]
$Re$	Número de Reynolds
$T$	Temperatura [K]
$u, v, w$	Velocidade [m s <sup>-1</sup> ]
$V$	Volume [m <sup>3</sup> ]
$\delta$	Distância [m]
$\Gamma$	Coefficiente (genérico) de difusão
$\mu$	Viscosidade dinâmica [Pa s]
$\rho$	Massa específica [kg m <sup>-3</sup> ]
$\phi$	Propriedade arbitrária



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Transferência de calor</b>	<b>25</b>
2.1.1	Propriedades físicas	25
2.1.2	Condução	26
2.1.3	Convecção	26
2.1.4	Parâmetros adimensionais	27
<b>2.2</b>	<b>Instrumentação</b>	<b>27</b>
2.2.1	Câmera térmica	27
2.2.2	Termopar	28
<b>2.3</b>	<b>Outros trabalhos sobre o tema</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Experimental</b>	<b>31</b>
3.1.1	Materiais utilizados	31
3.1.2	Montagem da bancada experimental	31
3.1.3	Experimento	33
<b>3.2</b>	<b>Numérico</b>	<b>34</b>
3.2.1	OpenFOAM	34
3.2.2	Criação da geometria	36
3.2.3	Criação da malha	36
3.2.4	Condições de contorno e iniciais	38
3.2.5	Seleção do solver	39
3.2.6	Simulação	39
3.2.7	Pós-processamento	40
<b>4</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÕES</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Primeiro caso</b>	<b>41</b>
4.1.1	Resultado experimental	41
4.1.2	Resultados numéricos	42
<b>4.2</b>	<b>Segundo caso</b>	<b>45</b>
4.2.1	Resultado experimental	45
4.2.2	Resultado numérico	46
<b>4.3</b>	<b>Comparação dos resultados</b>	<b>48</b>

5	CONCLUSÃO . . . . .	49
	REFERÊNCIAS . . . . .	51
	<b>APÊNDICES</b>	<b>53</b>
	APÊNDICE A – BLOCKMESHDICTIONARY . . . . .	55
	APÊNDICE B – SNAPPYHEXMESHDICTIONARY . . . . .	59
	APÊNDICE C – CONTROLDICTIONARY . . . . .	63
	APÊNDICE D – <i>CHANGEDICTIONARY</i> REGIÃO WALL . . . . .	65
	APÊNDICE E – <i>CHANGEDICTIONARY</i> REGIÃO TOPAIR . . . . .	67
	APÊNDICE F – <i>CHANGEDICTIONARY</i> REGIÃO PLACAMAE . . . . .	73
	APÊNDICE G – <i>CHANGEDICTIONARY</i> REGIÃO DISSIPADOR . . . . .	75
	APÊNDICE H – ALLRUN . . . . .	77



# 1 INTRODUÇÃO

Aparelhos eletrônicos estão cada vez mais presentes em nosso dia-a-dia, computadores com grande capacidade de processamento estão cada vez mais acessíveis à população. O resfriamento de componentes eletrônicos é vital para garantir um bom funcionamento do dispositivo eletrônico tendo assim a possibilidade de se extrair a melhor performance. A engenharia caminha no sentido de melhorar a eficiência energética dos componentes eletrônicos obtendo um maior poder de processamento com um menor gasto energia. A Tabela 1 representa processadores populares da linha Intel® e AMD aonde observa-se seu ano de lançamento, nome da micro-arquitetura e o TDP. TDP é a sigla para *thermal design power* e representa máxima energia térmica que o componente irá produzir.

Tabela 1 – Tabela processadores

Modelo	TDP (W)	Micro-Arquitetura	Ano de lançamento	Fabricante
Core i5 - 750	95	Nehalem	2009	Intel
Core i5 - 2300	95	Sandy Bridge	2011	Intel
FX-6300	95	Piledriver	2012	AMD
FX-6200	125	Bulldozer	2012	AMD
Core i5 - 3330	77	Ivy Bridge	2013	Intel
Core i5 - 4430	84	Haswell	2013	Intel
Core i5 - 6400	65	Skylake	2015	Intel
Core i5 - 8400	65	Coffe Lake	2017	Intel
Ryzen 5 1400	65	Zen	2017	AMD

Fonte – Autoria Própria com dados obtidos através dos sites das fabricantes

O design dos aparelhos está com uma grande tendência para o desenvolvimento de computadores cada vez mais compactos, logo, a necessidade de desenvolver trocadores de calor cada vez mais eficientes. Assim, o estudo térmico da dissipação de calor do componente se vê cada vez mais necessário no projeto de um novo aparelho eletrônico. A simulação computacional é uma ferramenta para criação de um modelo que condiz com a realidade de um projeto sem a necessidade de criação de diversos protótipos, diminuindo assim o custo e tempo do projeto. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é a área da simulação computacional que trata de problemas de escoamento de fluidos envolvendo ou não os processos de transferência de calor.

## 1.1 OBJETIVO

Diante da situação apresentada, este trabalho tem como intuito a criação de um modelo computacional que irá analisar a influência que um gabinete de computador parcialmente fechado provoca na temperatura máxima atingida pelo processador.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segundo Incropera, Bergman e DeWitt (2008) “A transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”, ela pode ser separadas em três: condução, convecção e radiação. Neste trabalho é desconsiderada a parcela de radiação devido a simplificações feitas ao modelo. Nas próximas seções serão apresentados os fenômenos de condução e convecção, assim como os parâmetros físicos que os influenciam e propriedades adimensionais importantes.

#### 2.1.1 Propriedades físicas

A propriedade  $k$  é chamada de condutividade térmica a qual depende da característica física e da temperatura do material e significa a “velocidade” em que o material conduz o calor. A propriedade  $c_p$  é chamada de calor específico e retrata a quantidade de calor necessária para aquecer 1 kg em 1 K. A Tabela 2 apresenta alguns valores de condutividade térmica e calor específico de alguns materiais.

Tabela 2 – Condutividade térmica e calor específico de alguns materiais

Material	Temperatura (K)	Condutividade térmica, $k$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Calor específico, $c_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Alumínio	300	237	903
Cobre	300	401	385
Ferro	300	80,2	447
Fibra de vidro revestida	300	0,038	835
Poliestireno expandido	55	0,027	1210

Fonte – adaptado de (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008)

A propriedade  $\rho$  é chamada de massa específica a qual o valor depende do tipo de material, temperatura e pressão. Seu significado é a quantidade de massa de determinado material presente em certo volume. Sua unidade no SI é de kg m<sup>-3</sup>.

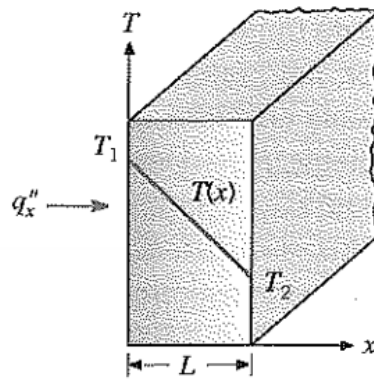
A propriedade  $\mu$  é chamada de viscosidade dinâmica. Seu significado é a quantidade de força necessária para mover uma determinada área em uma determinada distância. Sua unidade no SI é de Pa s.

### 2.1.2 Condução

Incropera, Bergman e DeWitt (2008) define que a condução pode ocorrer de duas formas. Em um material não condutor a transferência de calor se dá unicamente através de vibrações que são induzidas pelo movimento atômico e em um material condutor a transferência também ocorre devido ao movimento de translação dos elétrons livres.

Em uma parede plana, representada pela Figura 1, a taxa de transferência de calor pode ser calculada pela lei de Fourier que está representada na Equação 2.1.

Figura 1 – Parede Plana



Fonte – Adaptado de (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008)

$$q''_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.1)$$

### 2.1.3 Convecção

A convecção é a transferência de calor pelo movimento de determinado fluido. Segundo Incropera, Bergman e DeWitt (2008) a convecção pode ser dividida em dois fenômenos: difusão e advecção. A difusão é a transferência de calor devido ao movimento aleatório das moléculas e a advecção devido ao movimento global do fluido. A taxa de transferência de calor pode ser calculada pela lei do resfriamento de Newton que está representada na Equação 2.2.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

onde,

- $T_s$  é a temperatura na superfície do objeto;
- $T_\infty$  é a temperatura do fluido;
- $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

### 2.1.4 Parâmetros adimensionais

O número de Reynolds é definido pela Equação 2.3 a qual representa a razão das forças de inércia em relação as forças viscosas e é usado para classificar se o escoamento é laminar, turbulento ou em fase de transição (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008).

$$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} \quad (2.3)$$

O número de Nusselt é definido pela Equação 2.4 e representa uma medida para a transferência de calor que ocorre na interface sólido-fluido.

$$Nu \equiv \frac{hL}{k_f} \quad (2.4)$$

Segundo Incropera, Bergman e DeWitt (2008) “O número de Prandtl fornece uma medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas-limite de velocidade e térmica”. A Equação 2.5 representa o número de Prandtl.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.5)$$

## 2.2 INSTRUMENTAÇÃO

### 2.2.1 Câmera térmica

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2011), a temperatura pode ser medida através da agitação dos átomos de um objeto, sendo que quanto maior sua temperatura, maior a velocidade em que os átomos vibram. Essa vibração dos átomos geram um campo eletromagnético chamado de radiação térmica. Essa radiação térmica é captada pelos sensores da câmera qual reproduzem o campo de temperatura do objeto.

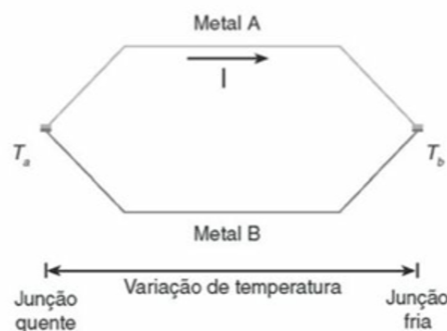
A leitura de temperatura efetuada pela câmera não depende unicamente da temperatura do objeto, fatores como a emissividade do material, a radiação do sol e de objetos próximos influenciam na leitura da temperatura. A correção desse campo de temperatura pode ser feita através da captura de uma imagem de uma folha de alumínio amassada posicionada em frente ao objeto afim de capturar as interferências internas.

A câmera térmica utilizada neste trabalho é a da marca Flir modelo E50 que possui uma faixa de utilização de  $-20^\circ\text{C}$  até  $650^\circ\text{C}$ , uma resolução de  $240 \times 180$  *pixels* e um NETD menor que  $0,05^\circ\text{C}$  a  $30^\circ\text{C}$ .

### 2.2.2 Termopar

Segundo Balbinot e Brusamarello (2011), o termopar é definido com um sensor ativo, ou seja, é um sensor que gera sinais elétricos sem necessitar de alimentação. Esse sinal elétrico é gerado devido ao efeito Seebeck que ocorre em um circuito fechado composto por dois tipos de metais com uma diferença de temperatura entre as extremidades. A partir desse sinal elétrico é possível calcular a temperatura no ponto de junção dos dois metais. O esquema de construção do circuito Seedbeck é descrito na Figura 2.

Figura 2 – Circuito Seedbeck



Fonte – adaptado de (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011)

O termopar utilizado neste trabalho é um do tipo J composto por ferro e constantan, ele possui uma faixa de utilização de 0 a 760 °C.

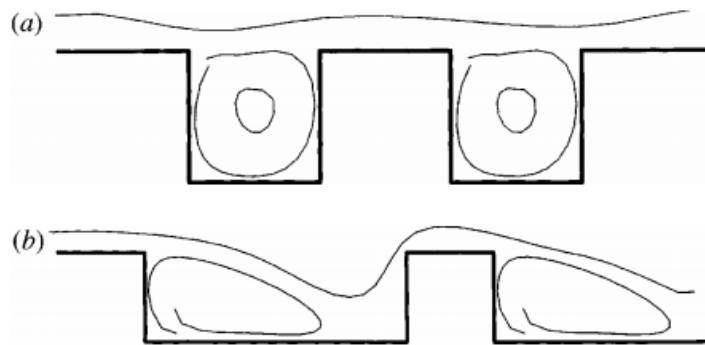
## 2.3 OUTROS TRABALHOS SOBRE O TEMA

Nesta seção são expostos os trabalhos que abordam o tema de transferência de calor conjugada que serviram de base teórica para o presente estudo.

Liu e Chung (2012) utilizou OpenFOAM para realizar um estudo de transferência de calor por convecção forçada envolvendo uma cavidade com duas arestas de altura  $h$  e de distância  $b$  entre elas. A malha possuía mais de 6.3 milhões de elementos qual utilizou-se do esquema PISO para calcular o acoplamento pressão velocidade. Foram analisados escoamentos do tipo d e k. No escoamento do tipo k as arestas são separadas o suficiente para que o fluxo entre dentro da cavidade tendo assim um maior coeficiente de troca térmica. Nos escoamentos tipo d, as arestas são mais próximas e não permitem o fluxo entrar dentro da cavidade, fazendo o ar quente presente entre as arestas ficar preso causando a diminuição do coeficiente de troca térmica. A Figura 3 representa o escoamento do tipo d e do tipo k.

Gomes (2015) realizou um estudo de convecção natural em um dissipador de calor utilizando o software OpenFOAM. No estudo foram adotadas três malhas contendo 3, 5, 6

Figura 3 – Geometria do escoamento (a) tipo d e (b) do tipo k



Fonte – adaptador de Jimenez (2004)

e 8 milhões de elementos quais utilizaram o solver *chtMultiRegionFoam* para simulação. O esquema PIMPLE foi utilizado para calcular o acoplamento pressão velocidade. A validação do estudo foi feito através de uma bancada experimental e por um processo analítico que mostraram um desvio máximo de 0,45 % ressaltando a confiabilidade presente no software OpenFOAM.

Silva (2015) realizou uma análise experimental de parâmetros geométricos que influenciam no coeficiente de transferência de calor de dissipadores. No estudo foram analisados 12 dissipadores nos quais variavam entre si as propriedades de passo, espessura, altura e número de aletas, variando assim a área total de convecção. O estudo mostrou que foram obtidos valores maiores de  $\bar{h}$  para os dissipadores que estão dispostos com a base de maneira vertical e resalta que os dissipadores dispostos verticalmente tem uma maior eficácia quando o espaçamento entre as aletas for maior enquanto que dissipadores com a base disposta de maneira horizontal tem uma maior eficácia quando suas aletas forem maiores.

Maschietto (2018) realizou uma análise numérica de um dissipador de calor aletado submetido a escoamento forçado a fim de otimizar sua geometria. Foi utilizando o software comercial IcePak <sup>TM</sup> qual pertence a ANSYS <sup>TM</sup>. A malha possuía 2,6 milhões de elementos sendo que o método SIMPLE foi utilizado para calcular o acoplamento pressão velocidade. Para comprovação de resultados, uma bancada experimental foi confeccionada chegando a variação máxima de 8% com a média de 3,85% quando comparados entre si. O estudo foi feito com quatro faixas de Reynolds sendo separado em três casos. O primeiro caso foi o aumento da altura das aletas, o segundo caso foi o aumento de número de aletas e o terceiro caso foi a otimização de uma geometria com a mesma área de transferência.





## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 EXPERIMENTAL

Nessa seção é descrita quais foram os materiais utilizados, como foi feita a montagem da bancada e como ocorreu experimento.

#### 3.1.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados na confecção da bancada foram:

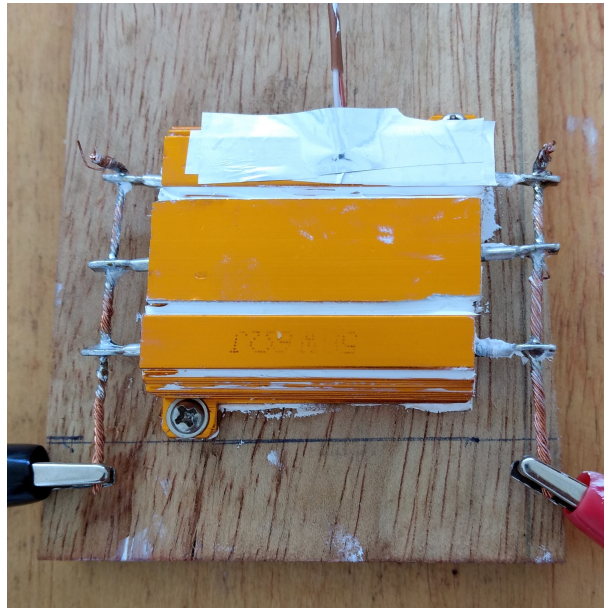
- Três resistores de potência de 50 W;
- Uma pasta térmica da marca Implastec;
- Um *thermalpad* da marca Artic;
- Um dissipador modelo AMD Wraith Stealth;
- Um gabinete modelo Itautec infoway com dimensões (350 x 400 x 150 mm);
- Uma placa mãe modelo GIGABYTE GA-945GCMX-S2 com dimensões (244 x 244 mm);
- Uma fonte de alimentação com saída variável da marca cidepe;
- Um *datalogger* da marca keysight modelo 34982A;
- Um termopar tipo J;
- Uma câmera térmica da marca Flir modelo E50.

#### 3.1.2 Montagem da bancada experimental

Montou-se os três resistores de potência em paralelos a fim de se obter uma potência máxima de 150 W. A pasta térmica foi utilizada entre os resistores a fim de eliminar o ar presente entre elas obtendo uma melhor dissipação do calor nessa região. A montagem dos três resistores está ilustrada na Figura 4 onde observa-se as três resistências em laranja, a pasta térmica na cor branca entre os resistores e os terminais das resistências na extremidades interligados por um fio de cobre.

Utilizou-se dessa montagem nos dois testes executados. No primeiro teste fixou-se na placa mãe os três resistores, posicionou-se o termopar na parte superior das resistências,

Figura 4 – Resistores em paralelo



Fonte – Autoria Própria

conectou-se os cabos de energia e inseriu-se o *thermalpad* acima das resistências. A Figura 5 representa a montagem do primeiro teste.

Figura 5 – Montagem primeiro experimento



Fonte – Autoria Própria

Para o segundo teste utilizou-se a montagem do primeiro teste em conjunto com um dissipador, onde posicionou-se a cima resistências, como demonstra a Figura 6.

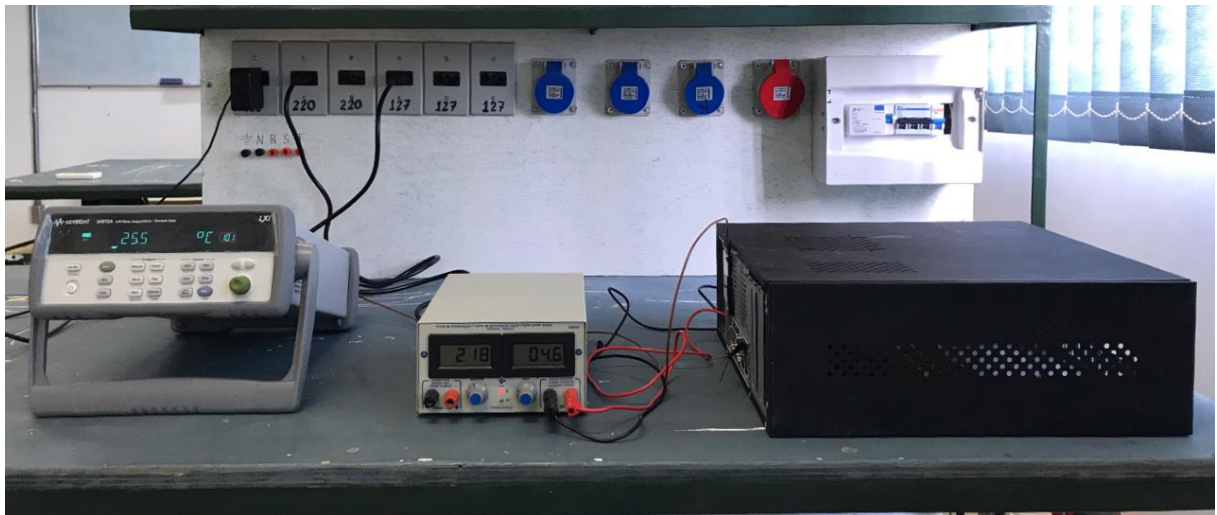
A bancada onde foi realizado experimento está representada na Figura 7. Vale ressaltar que os dois testes foram realizados com o gabinete fechado.

Figura 6 – Montagem segundo experimento



Fonte – Autoria Própria

Figura 7 – Bancada de teste

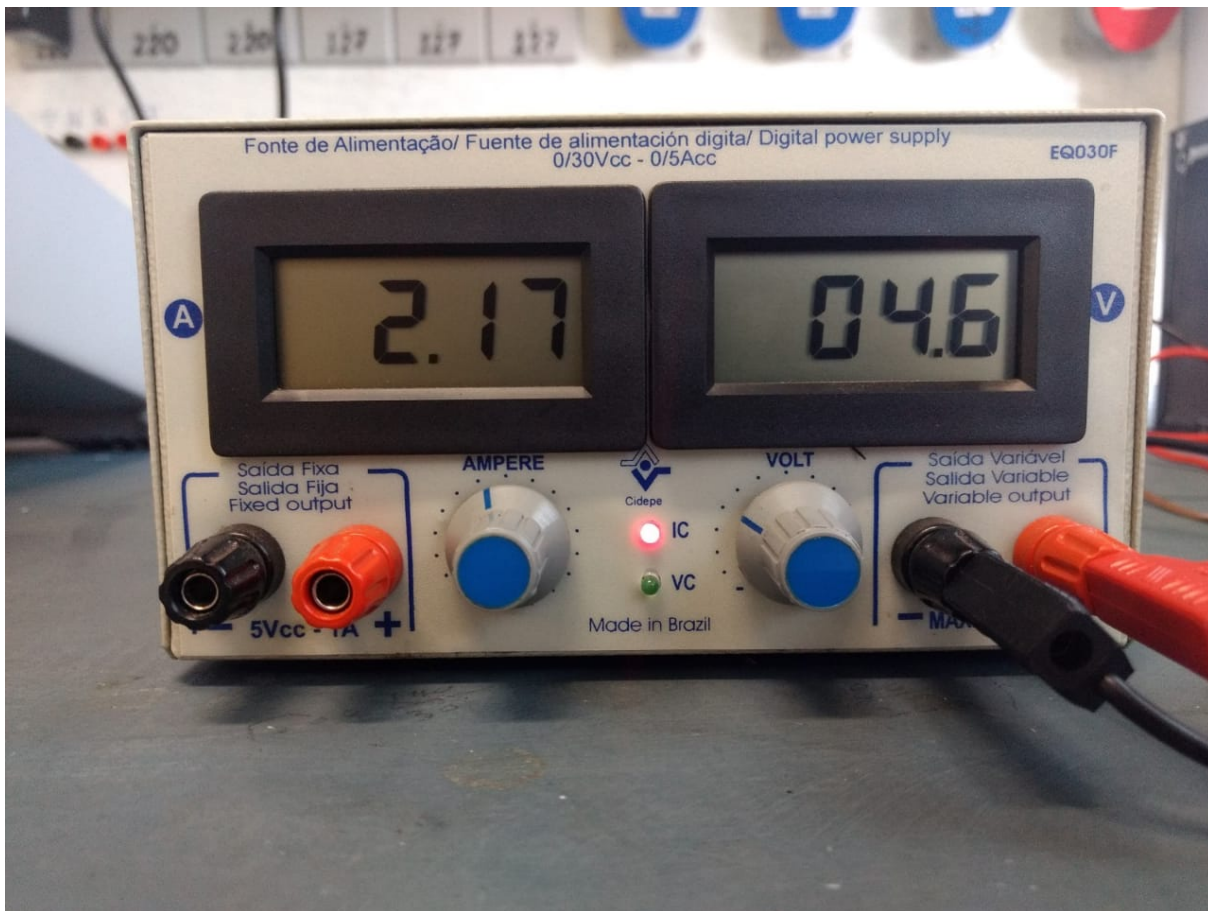


Fonte – Autoria Própria

### 3.1.3 Experimento

Após a montagem da bancada o experimento ocorreu de forma simples. Configurou-se o datalogger para salvar as leituras do termopar a cada 5 segundos. Em seguida a ajustou-se a fonte conforme a Figura 8. Os dois testes foram realizados utilizando a potência de aproximadamente 10 W concluindo o experimento assim que a temperatura estabilizasse.

Figura 8 – Fonte de energia



Fonte – Autoria Própria

## 3.2 NUMÉRICO

Os passos realizados na simulação numérica são separados em três: pré-processamento, simulação e pós-processamento. No pré-processamento acontece a modelagem do problema em software CAD, confecção da malha, seleção do solver, definição de propriedades dos elementos da simulação e condições de contorno. Na fase de simulação, o *solver* será responsável por resolver todas as equações que definem o problema físico a ser analisado gerando um arquivo com os dados de resposta. O pós-processamento é a parte de análise e visualização dos dados obtidos. Esta etapa é realizada através do software ParaView.

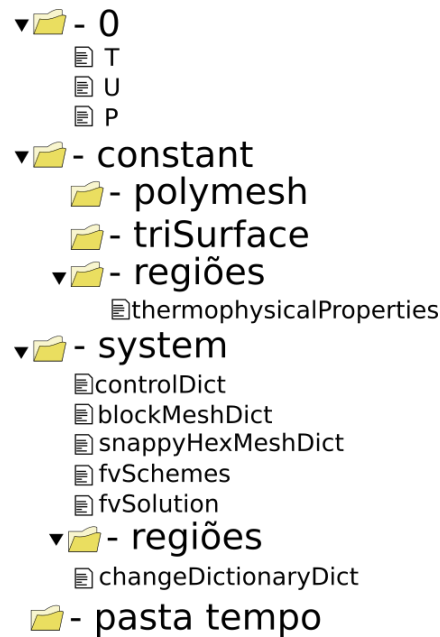
### 3.2.1 OpenFOAM

OpenFOAM é um programa de simulação computacional gratuito distribuído sobre licença GNU versão 3 pela *The OpenFOAM Foundation* contando com aproximadamente 250 aplicações distribuídas entre *solvers* e *utilities*. Cada caso analisado é separado por pastas e sua estrutura está representada na Figura 9.

A pasta 0 é o local onde se define as condições iniciais do problema como tempera-



Figura 9 – Estrutura pasta OpenFOAM



Fonte – Autoria Própria

tura, velocidade e pressão.

A pasta *constant* armazena os dados que permanecerão constante durante a simulação, sendo composta por outras três outras pastas. A pasta *polymesh* é responsável por armazenar a malha do caso. A pasta *triSurface* armazena os objetos desenhados em CAD que compõe a malha. A pasta região representa todas as pastas das regiões do problema, dentro dessa pasta temos o arquivo *thermophysicalProperties* que é responsável pela definição das constantes físicas da região como calor específico, condutividade térmica, etc.

A pasta *system* é responsável pelo armazenamento das informações referente ao solver. Dentro da pasta temos o arquivo *controlDict* que tem a função de definir tempo de início, tempo de fim, passo de tempo, *solver* e alguns dados para a saída dos dados. O arquivo *fvSchemes* define os esquemas utilizados na simulação. No presente trabalho, foram empregados os esquemas CDS para os termos difusivos e o esquema *upwind* para os termos de advecção. O arquivo *fvSolution* define os métodos numéricos para a resolução dos sistemas lineares, as tolerâncias e demais parâmetros da convergência como os coeficientes de relaxação.

A pasta de regiões que se localiza dentro da pasta *system* tem como objetivo a segregação das regiões a serem analisadas a fim de possibilitar a edição de cada região individualmente. Dentro da pasta regiões, podemos encontrar os arquivos *fvSolution* e *fvSchemes* individuais daquela região, podemos também encontrar o arquivo *changeDictionaryDict* que é responsável por alterar a condição inicial do problema para aquela

região.

### 3.2.2 Criação da geometria

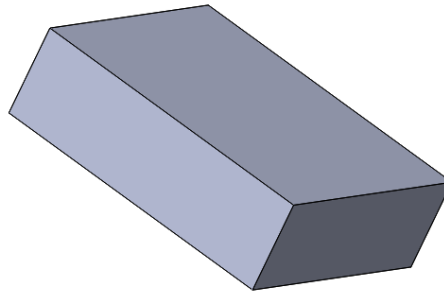
Este é o primeiro passo do pré-processamento. A geometria dos sólidos (placa mãe, processador e dissipador) foram desenhadas em software CAD e exportadas para o formato STEP. A Figura 10 representa a placa mãe que foi desenhada de modo simplificado sendo feita apenas uma placa sólida com as mesmas dimensões. A Figura 11 representa a modelagem das resistências sendo que o seu formato foi simplificado para um bloco que possuía as mesmas dimensões externas que o modelo experimental. O dissipador de calor é mostrado na Figura 12 onde buscou-se a sua modelagem de maneira mais completa respeitando as suas dimensões e detalhes.

Figura 10 – Geometria da placa mãe



Fonte – Autoria Própria

Figura 11 – Geometria das resistências



Fonte – Autoria Própria

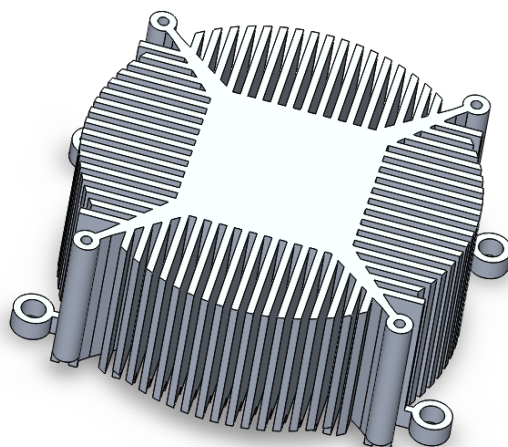
### 3.2.3 Criação da malha

O Software OpenFOAM possui diversas ferramentas para geração de malha. Foram utilizadas nesse trabalho as ferramentas *blockMesh* e *snappyHexMesh*.

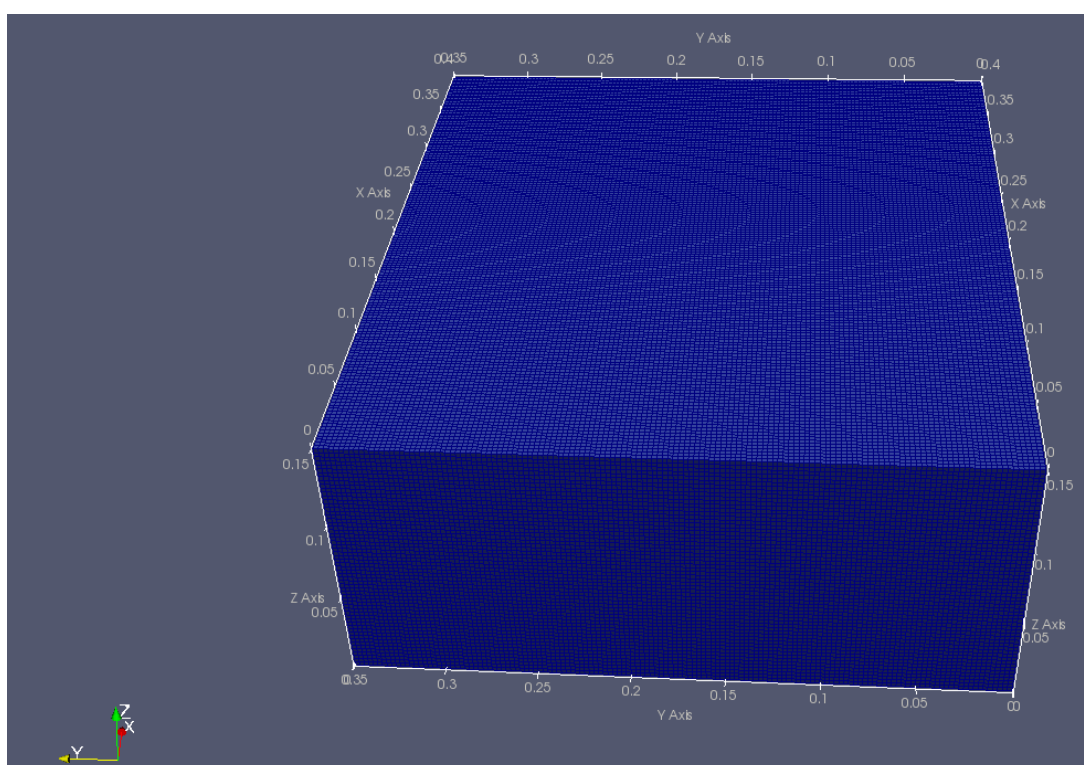
A ferramenta *blockMesh* é definida pelo arquivo *blockMeshDict* que está disponível no Apêndice A. O *blockMesh* foi utilizado para criar a malha do fluido denominada de *topAir*. A Figura 13 demonstra a malha gerada pela ferramenta.

A ferramenta *snappyHexMesh* é definida pelo arquivo *snappyHexMeshDict* que está disponível no Apêndice B. A ferramenta utiliza-se de arquivos com formato STL

Figura 12 – Geometria do dissipador de calor

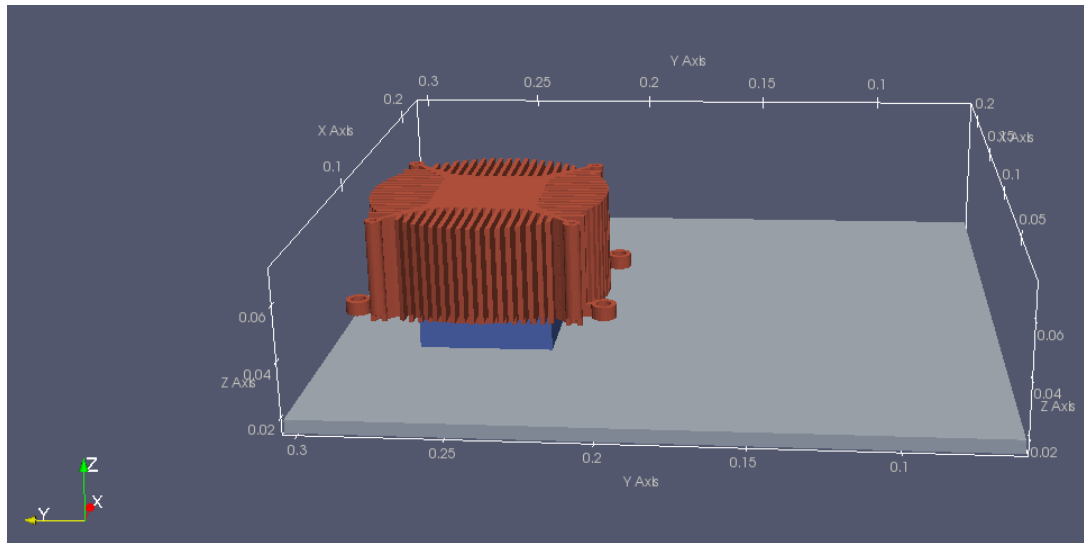


Fonte – Autoria Própria

Figura 13 – Malha gerada pela ferramenta *blockMesh*

Fonte – Autoria Própria

para criação das malhas. O software Salome-meca foi empregado para a realização dos procedimentos de posicionamento da geometria assim como a conversão do arquivo STEP para um arquivo de STL. A Figura 14 ilustra as três partes sólidas geradas. Em vermelho está representado o dissipador, em azul o processador e em branco a placa mãe.

Figura 14 – Malha gerada pela ferramenta *snappyHexMesh*

Fonte – Autoria Própria

### 3.2.4 Condições de contorno e iniciais

As condições de contorno e algumas condições iniciais são definidas no arquivo *changeDictionaryDict* individual de cada região. Os tipos de condições de contorno para as fronteiras utilizadas no modelo numérico são definidas conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela de condições iniciais

Tipo	Descrição
fixedValue	Define um número fixo para a condição de contorno
zeroGradient	Aplica uma condição de gradiente zero para a fronteira
inletOutlet	Define a condição como fixedValue ou zeroGradient dependendo do sentido
freestream	Condição de fluxo livre

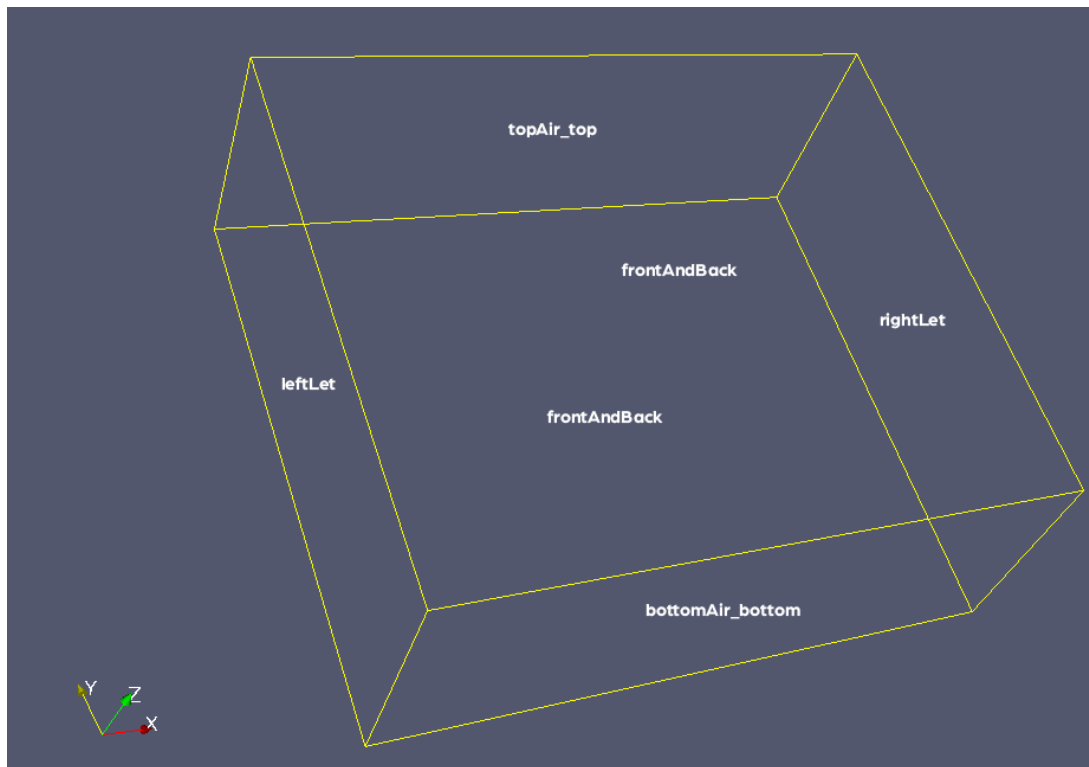
Fonte – <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/standard-boundaryconditions.php>

A região do fluido é definida conforme o Apêndice E onde suas fronteiras são nomeadas conforme a Figura 15. A respeito da velocidade o dicionário define que internamente o fluido possui a velocidade inicial no valor de  $0,01 \text{ m s}^{-1}$  na direção de X positivo, as faces *leftLet* e *rightLet* são definidas como *freestream* enquanto todas as outras faces são consideradas *fixedValue* com valor zero. Sobre a temperatura o dicionário define que a temperatura inicial é definida como 300 K em todo o domínio, as faces *leftLet* e *rightLet* são definidas como *inletOutlet* com retorno a 300 K, e todas as outras faces são definidas como *zeroGradient* com temperatura fixa em 300 K.

As regiões sólidas, definidas pelos Apêndices D, F e G, possuem a condição de temperatura inicial a 300 K.



Figura 15 – Fronteiras da região do fluido



Fonte – Autoria Própria

O arquivo *controlDict* que define os parâmetros temporais simulação está disponível no Apêndice C.

### 3.2.5 Seleção do solver

O *openFOAM* conta com uma gama de *solvers* prontos para as mais diversas situações. O *solver* utilizado nesse caso foi o *chtMultiRegionSimpleFoam* que se trata de um solver para regime permanente de transferência de calor conjugada entre sólido e fluido.

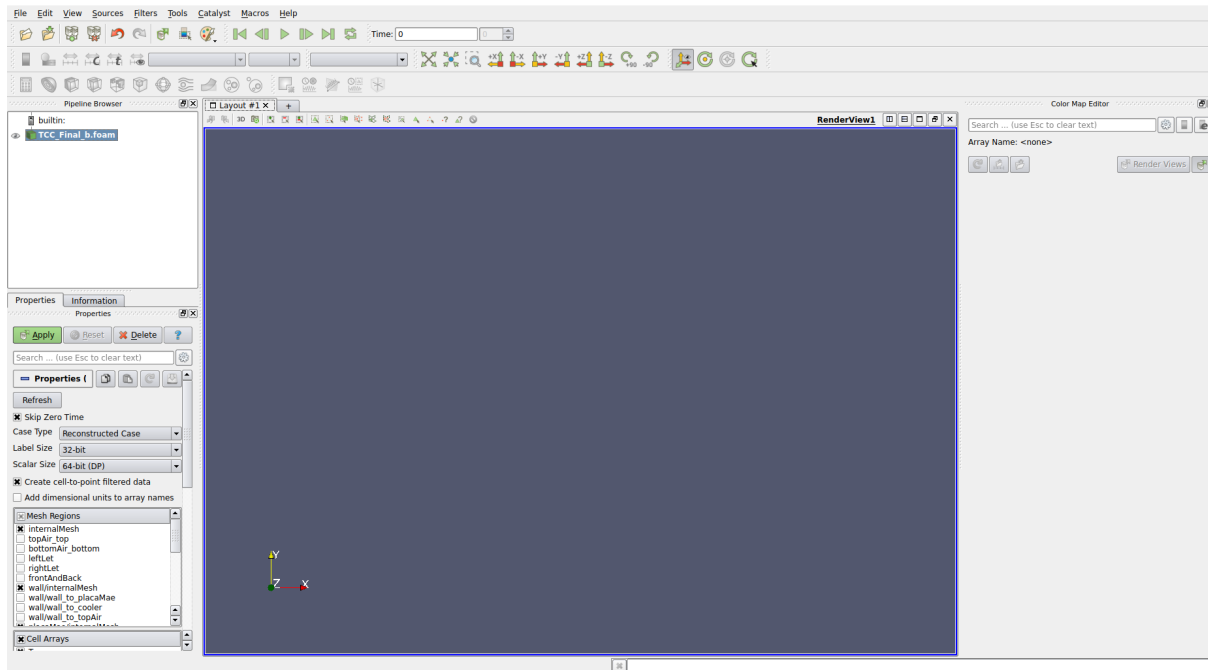
### 3.2.6 Simulação

Para facilitar a simulação, um arquivo *Allrun* foi desenvolvido contendo todos os comandos necessários para o funcionamento da simulação. O arquivo *Allrun* está disponível no Apêndice H. Dentro do arquivo tem-se o comando *blockMesh* que é responsável pela criação da malha do fluido, o comando *surfaceFeatureExtract* que extrai as bordas dos arquivos STL, o comando *snappyHexMesh -overwrite* que é responsável por gerar a malha das partes sólidas e o comando *splitMeshRegions -cellZonesOnly -overwrite* que nomeia na malha gerada todas as regiões e a deixa pronto para simulação. A simulação acontece após o comando *chtMultiRegionSimpleFoam* ser acionado.

### 3.2.7 Pós-processamento

O pós-processamento ocorre no software *paraView* que é aberto pelo terminal do Linux através do comando *paraFoam -builtin*. A Figura 16 mostra a interface do programa.

Figura 16 – Interface *paraView*



Fonte – Autoria Própria

## 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

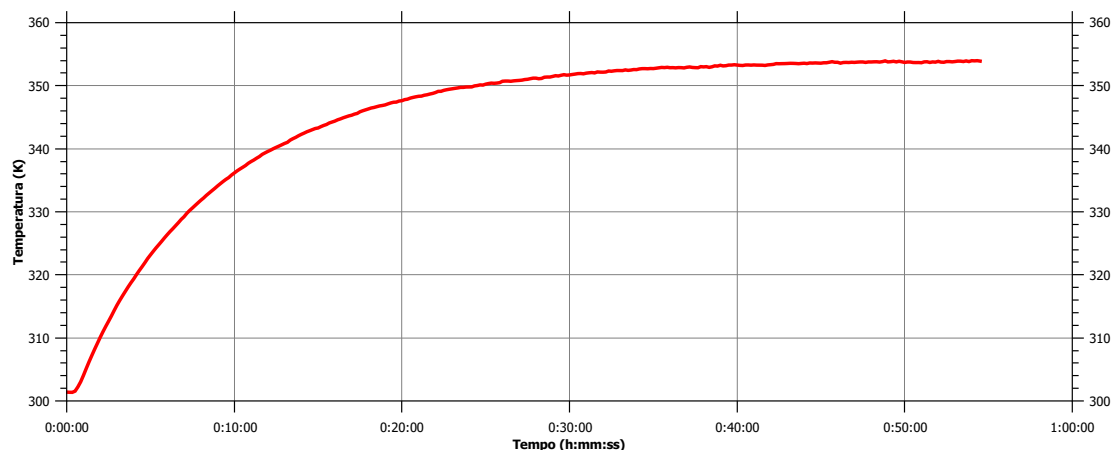
Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais e numéricos obtidos durante a realização do trabalho. Os resultados experimentais trazem os gráficos de temperatura versus tempo obtido no desenvolvimento dos dois experimentos. Os resultados numéricos trazem o valor de temperatura máxima obtida, perfil de velocidade e perfil de temperatura.

### 4.1 PRIMEIRO CASO

#### 4.1.1 Resultado experimental

O primeiro teste foi realizado utilizando somente as resistências com uma potência elétrica de 10 W. O gráfico do crescimento de temperatura está na Figura 17. É possível observar que a resistência demorou aproximadamente 55 minutos para estabilizar, chegando a uma temperatura máxima de 353 K.

Figura 17 – Resultado experimental resistência



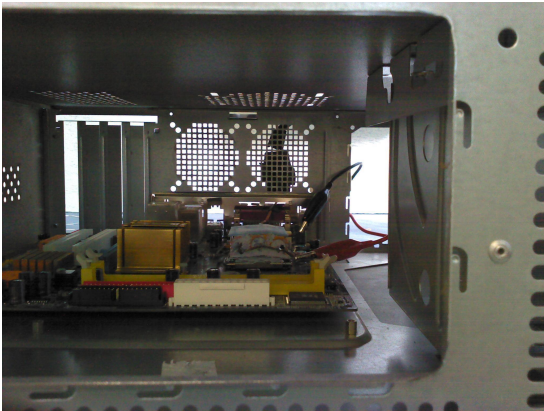
Fonte – Autoria Própria

A Figura 18a representa a imagem original capturada. A Figura 18b representa o campo de temperatura capturado pela câmera térmica onde podemos observar o aquecimento uniforme das resistências.

É possível observar a diferença da leitura de temperatura entre o termopar e a câmera térmica, onde essa diferença pode ser explicada devido as interferências provocadas pela radiação solar e pelo reflexo das paredes de metal. A Figura 19 mostra uma imagem feita utilizando uma folha de alumínio onde a temperatura ambiente era de aproximada-

Figura 18 – Imagem das resistências via câmera térmica

(a) Imagem original



(b) Campo de temperatura



Fonte – Autoria Própria

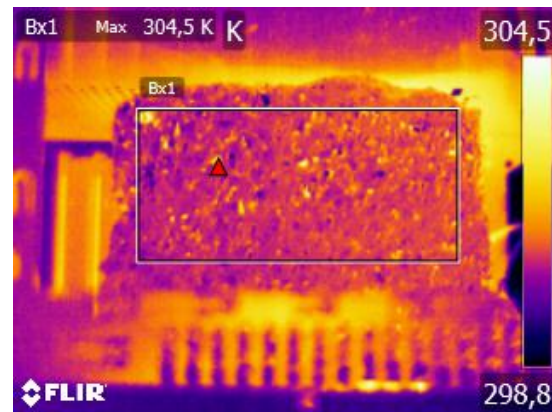
mente 299 K e a câmera obteve uma leitura máxima de 304,5 K, sendo assim, conclui-se que as interferências provocam uma variação de 5,5 K no resultado obtido através da câmera térmica.

Figura 19 – Imagem da folha de alumínio

(a) Imagem original



(b) Campo de temperatura



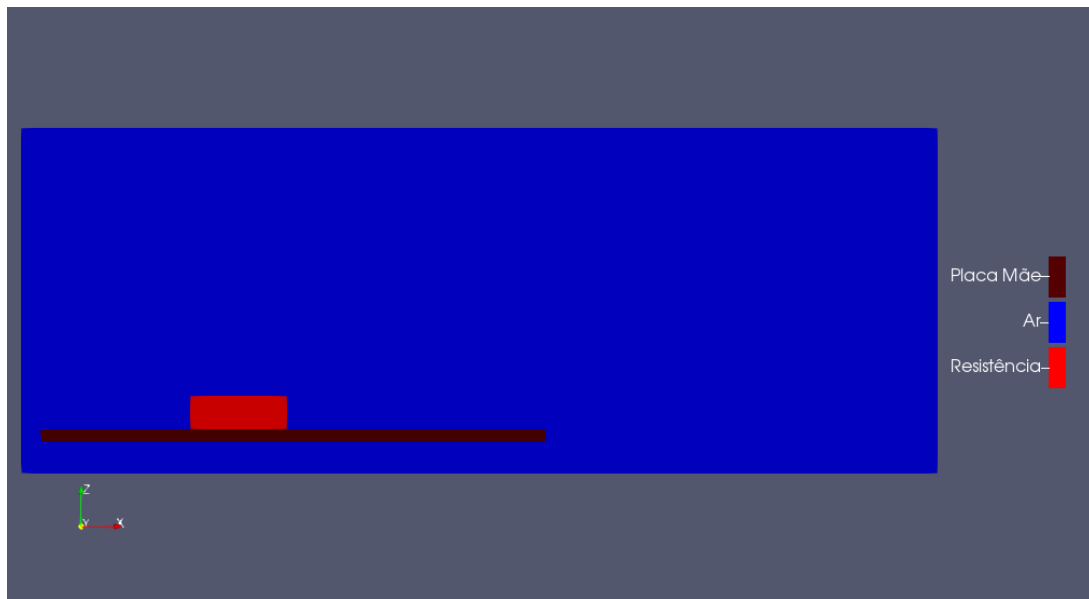
Fonte – Autoria Própria

#### 4.1.2 Resultados numéricos

As simulações foram feitas utilizando um computador com processador Intel ®Core™i7-6700 com 16 GB de RAM DDR4 disponível. Utilizou-se o *solver chtMultiRegionSimpleFoam* para resolver a simulação e a ferramenta *snappyHexMesh* para gerar a malha.

O primeiro caso contou com uma malha de 756 mil nós que eram divididos em três regiões como representado na Figura 20.

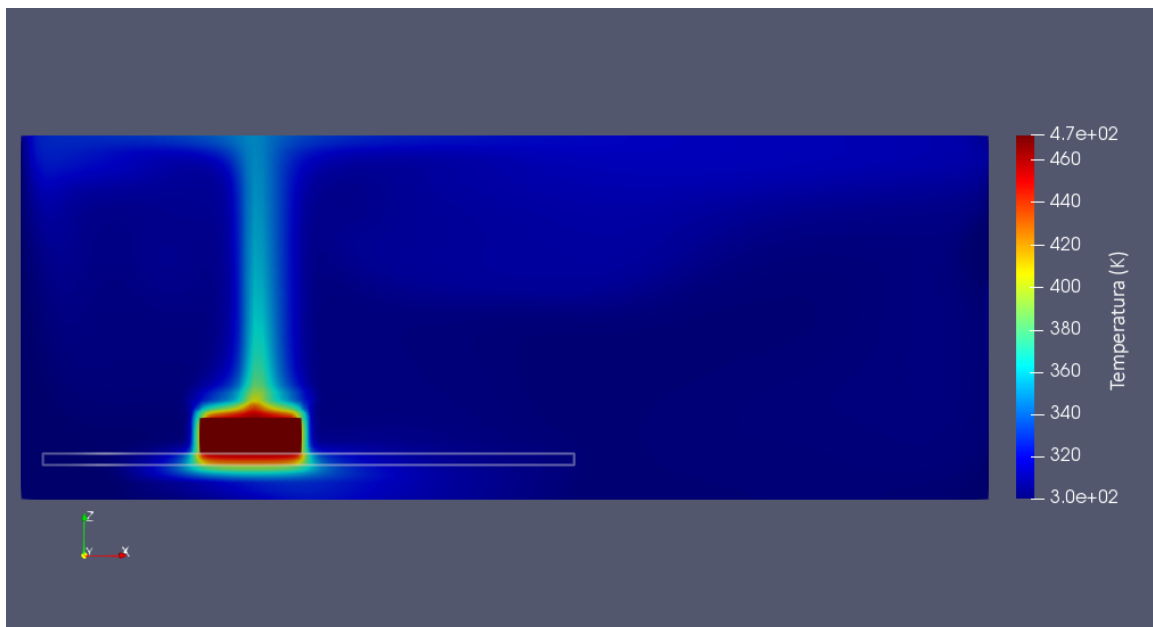
Figura 20 – Domínio numérico do primeiro caso



Fonte – Autoria Própria

A Figura 21 representa o campo de temperatura em um plano que intercepta as resistências. Observa-se o campo de temperatura das resistências e do ar aquecido devido a convecção natural.

Figura 21 – Campo de temperatura do primeiro caso

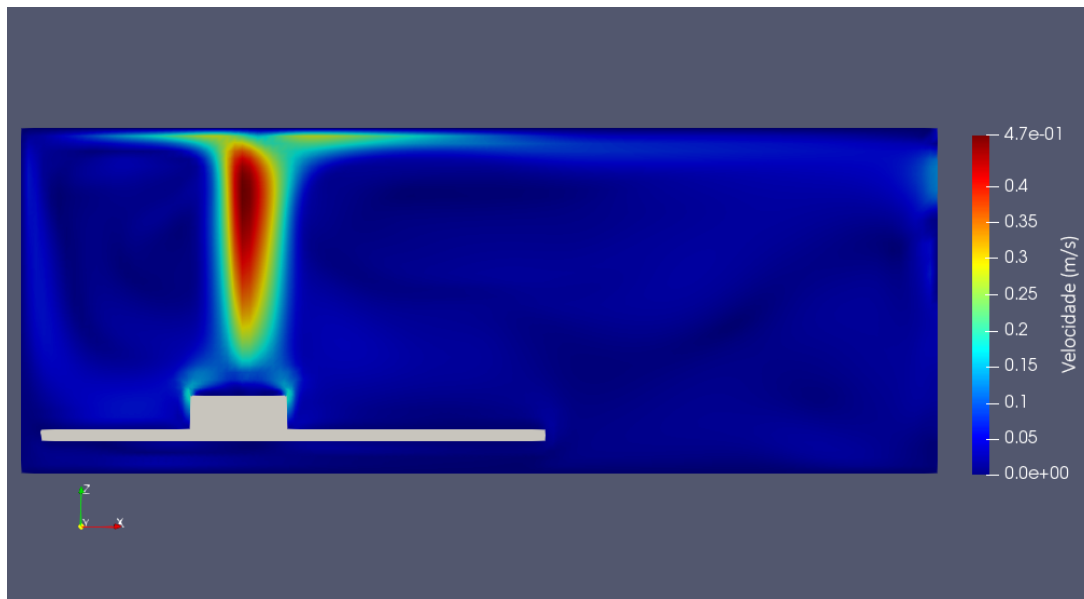


Fonte – Autoria Própria

Pode-se observar na Figura 22 o campo de velocidade no fluido, onde é possível verificar a recirculação do ar no domínio.

A Figura 23 demonstra os vetores de velocidade do fluido juntamente com o campo

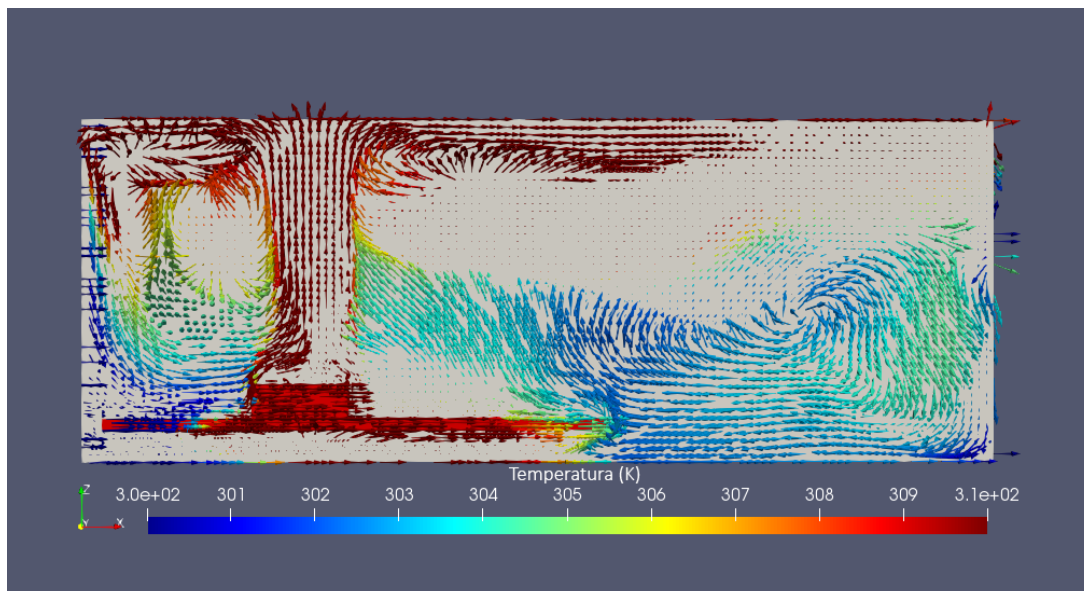
Figura 22 – Campo de velocidade de primeiro caso



Fonte – Autoria Própria

de temperatura a qual observar-se a recirculação do ar em conjunto com sua renovação do ar. A escala de temperatura foi ajustada para demonstrar a entrada de ar a temperatura ambiente.

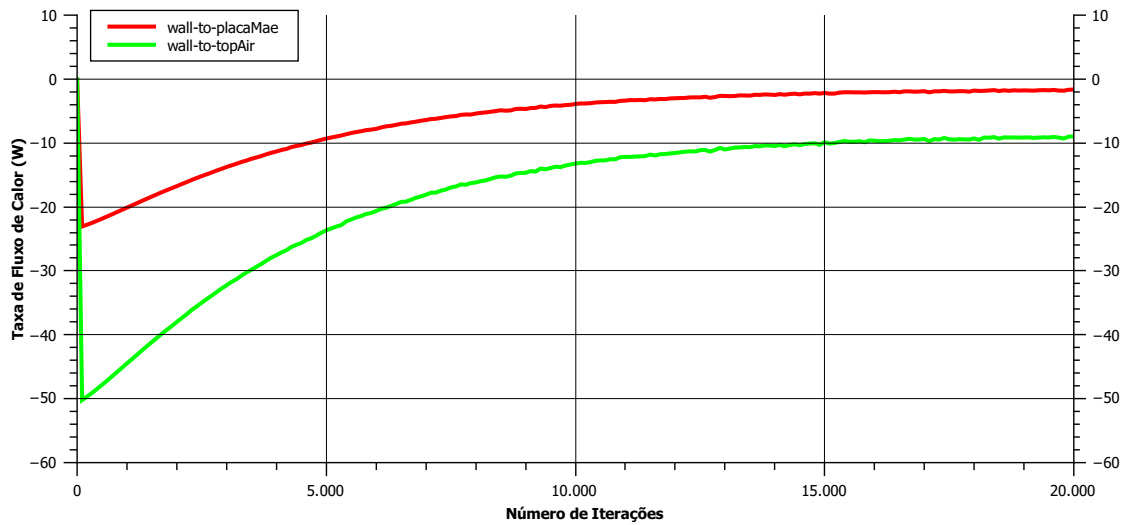
Figura 23 – Vetor velocidade e campo de temperatura do primeiro caso



Fonte – Autoria Própria

O gráfico na Figura 24 mostra a taxa de calor que é transferida através das paredes da resistência. Observa-se que ao final da simulação a soma das curvas é de aproximadamente 10 W, equivalente a potência injetada.

Figura 24 – Fluxo de calor através das paredes das resistências



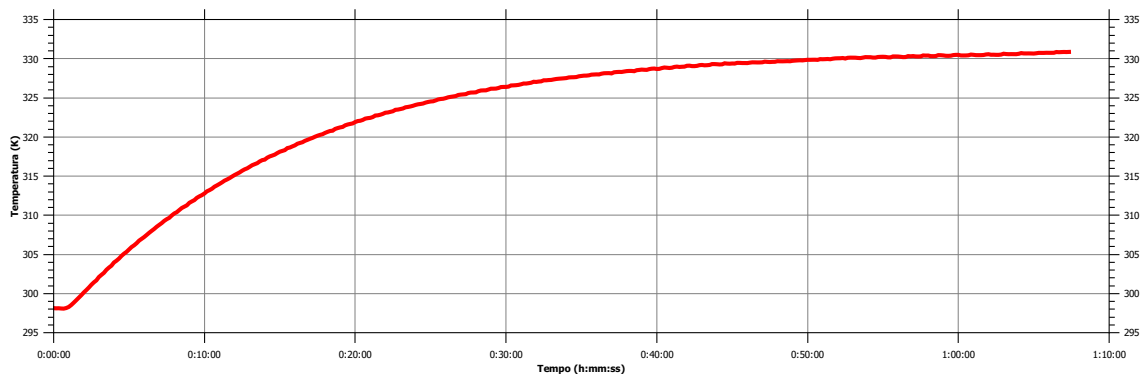
Fonte – Autoria Própria

## 4.2 SEGUNDO CASO

### 4.2.1 Resultado experimental

O segundo teste foi realizado utilizando a montagem com o dissipador, sendo que a mesma potência de 10 W foi aplicada. O resultado da temperatura pelo tempo está representado na Figura 25 onde pode-se ver que o conjunto com o dissipador demorou um pouco mais de 1 hora e 15 minutos para estabilizar e sua temperatura máxima atingiu 331 K.

Figura 25 – Resultado experimental dissipador



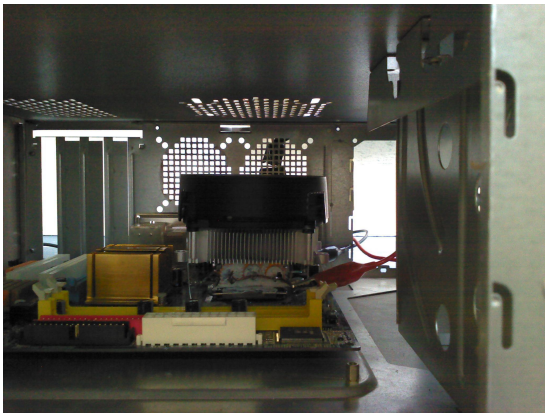
Fonte – Autoria Própria

A Figura 26 representa o campo de temperatura capturado pela câmera térmica onde é mostrado o aquecimento uniforme das resistências e a transferência de calor para o dissipador.



Figura 26 – Imagem do conjunto resistores-dissipador

(a) Imagem original



(b) Campo de temperatura

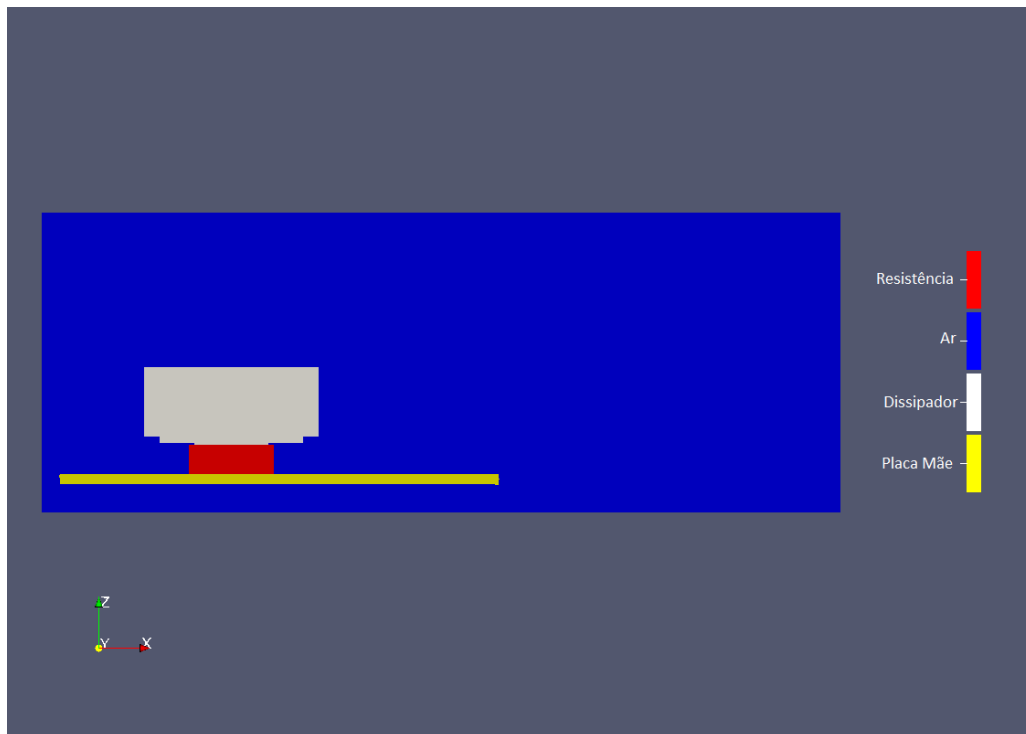


Fonte – Autoria Própria

#### 4.2.2 Resultado numérico

O segundo caso contou com uma malha de 4 milhões e 233 mil nós que eram divididos em quatro regiões regiões como representado na Figura 27.

Figura 27 – Domínio numérico do segundo caso

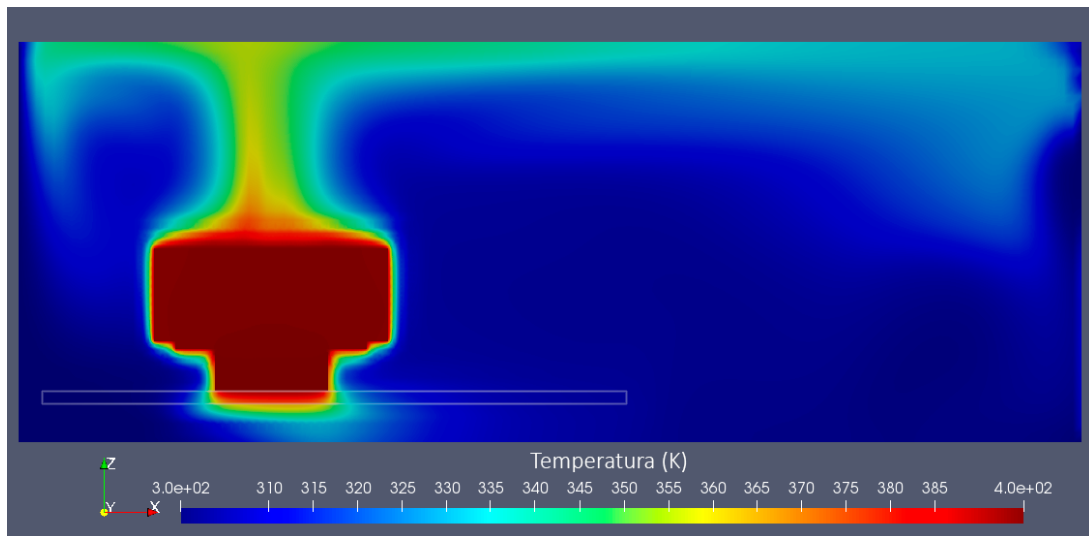


Fonte – Autoria Própria

A Figura 28 representa o campo de temperatura em um plano que intercepta as resistências e o dissipador. Observa-se o campo de temperatura das resistências, do dissipador e do ar aquecido devido a convecção natural.



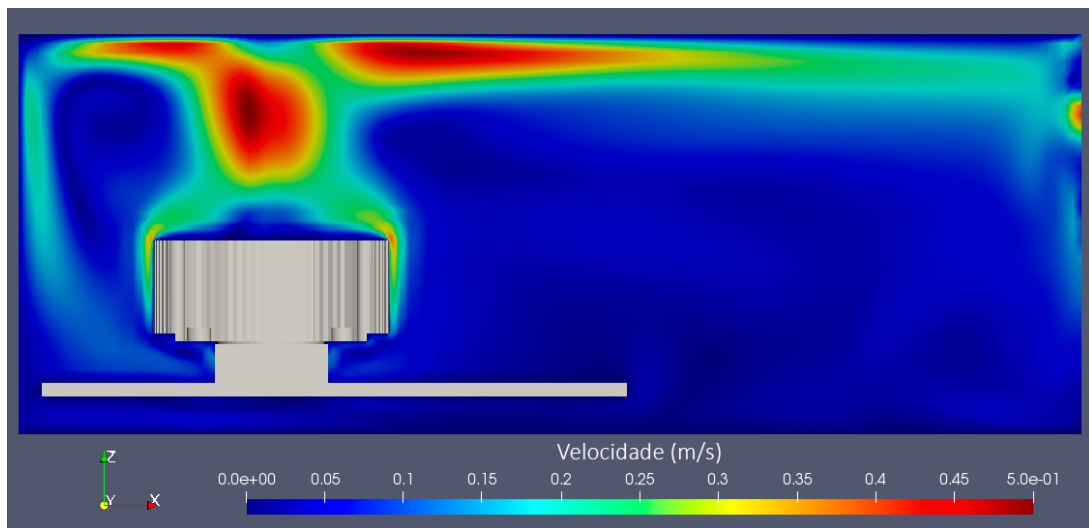
Figura 28 – Campo de temperatura do segundo caso



Fonte – Autoria Própria

Pode-se observar na Figura 29 o campo de velocidade no fluido, onde é possível verificar a recirculação do ar no domínio.

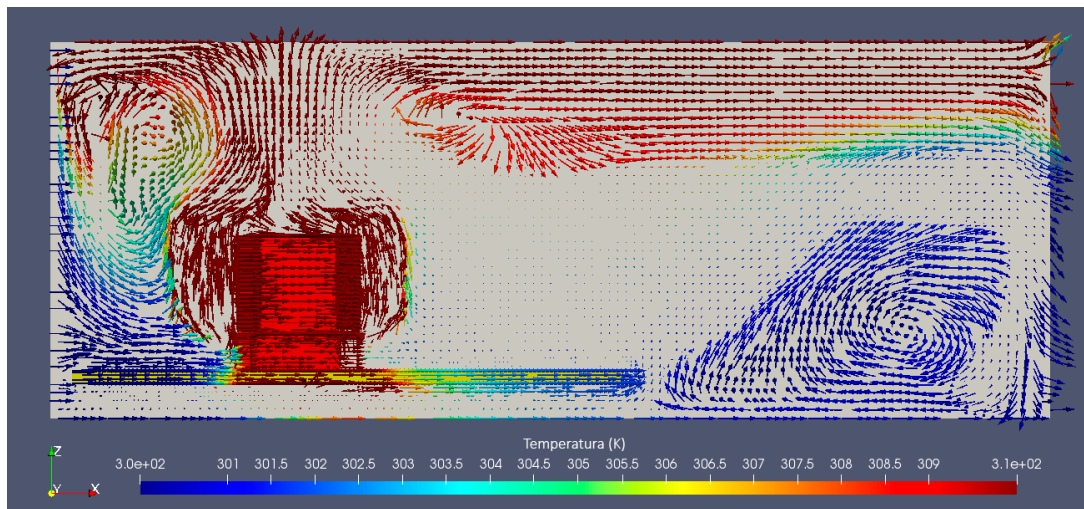
Figura 29 – Campo de velocidade do segundo caso



Fonte – Autoria Própria

A Figura 30 demonstra os vetores de velocidade do fluido juntamente com o campo de temperatura a qual observar-se a recirculação do ar, o aumento da temperatura do ar entre as aletas e a renovação do ar. A escala de temperatura foi ajustada para demonstrar a entrada de ar a temperatura ambiente.

Figura 30 – Vetor velocidade e campo de temperatura do segundo caso



Fonte – Autoria Própria

### 4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos resultados

Tipo	Temp. Máx. (K)	Temp. Máx. (K)
	Caso I	Caso II
Exp. Termopar	353	331
Exp. Câmera Térmica	360,1	336,2
Numérico	462	393

Fonte – Autoria Própria

Pode-se observar a coerência entre os resultados experimentais e divergência entre os resultados experimentais e numéricos. Observou-se também a coerência qualitativa do modelo numérico aonde pode-se observa a transferência de calor por convecção e condução, a recirculação e a renovação do ar no domínio.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs a análise térmica do comportamento do ar e da temperatura máxima atingida por um aquecedor feito por resistências que estavam dentro de volume parcialmente confinado, onde buscava-se verificar a influência no aumento da temperatura devido a obstrução parcial da recirculação do ar. Buscou-se também a análise da influência que o dissipador de calor trás a transferência de calor. Após análise dos resultados de temperatura máxima, campo de velocidade e campo de temperatura conclui-se que:

- I. A modelagem numérica do campo de velocidade é coerente com a modelagem proposta mostrando a recirculação do ar e a renovação pelo ar frio;
- II. A transferência de calor por condução e convecção ocorreram de forma satisfatória no modelo numérico e mostram consistência com a potência injetada (10 W);
- III. A simplificação do modelo numérico, onde não se considerou a transferência de calor por radiação, contribuiu para o aumento da temperatura máxima;
- IV. A modelagem numérica apresenta simplificações geométricas que dificultaram a evacuação do calor. Dentre as diferentes simplificações, destaca-se a não representação da carcaça. Presume-se que a sua representação juntamente com o ambiente externo possa melhor representar o problema;
- V. De modo geral, afirma-se que a modelagem empregada se mostrou conservadora do ponto de vista de evacuação de calor.

As recomendações para trabalhos futuros são a consideração da transferência de calor por radiação e a inclusão da carcaça no modelo numérico. No modelo experimental recomenda-se a medição da temperatura em diferentes pontos, o controle do fluxo de ar no gabinete e a investigação da melhor maneira para representar o aquecimento das resistências. Recomenda-se também o estudo do escoamento forçado através do domínio e como a posição do gabinete, vertical e horizontal, influenciam na transferência de calor.



# REFERÊNCIAS

- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. a. *Instrumentação e fundamentos de medidas: volume 1*. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2011. OCLC: 857059288. ISBN 978-85-216-1754-9 978-85-216-1815-7. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- GOMES, L. A. C. d. N. Estudo da Transferência de Calor por Convecção Natural em Dissipadores Usando OpenFOAM. nov. 2015. Citado na página 28.
- INCROPERA, F. P.; BERGMAN, T. L.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro: LTC, 2008. OCLC: 817127290. ISBN 978-85-216-1584-2. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.
- ISSA, R. I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*, v. 62, n. 1, p. 40–65, jan. 1986. ISSN 0021-9991. Nenhuma citação no texto.
- JIMENEZ, J. TURBULENT FLOWS OVER ROUGH WALLS. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 36, n. 1, p. 173–196, jan. 2004. ISSN 0066-4189, 1545-4479. Citado na página 29.
- LEONARD, B. P. The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 88, n. 1, p. 17–74, jun. 1991. ISSN 0045-7825. Nenhuma citação no texto.
- LIU, C.-H.; CHUNG, T. N. H. Forced convective heat transfer over ribs at various separation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 55, n. 19, p. 5111–5119, set. 2012. ISSN 0017-9310. Citado na página 28.
- MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos e Científicos, 2004. OCLC: 58559386. ISBN 978-85-216-1396-1. Nenhuma citação no texto.
- MASCHIETTO, V. C. L. Investigação experimental e análise numérica da transferência de calor em um dissipador de calor aletado. set. 2018. Citado na página 29.
- PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 15, n. 10, p. 1787–1806, out. 1972. ISSN 0017-9310. Nenhuma citação no texto.
- SILVA, V. A. da. Análise Experimental da Influência dos Parâmetros Geométricos de Dissipadores na Convecção Natural. fev. 2015. Citado na página 29.
- STEWART, J. *Cálculo, Volume 2*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2013. OCLC: 69933434. ISBN 978-85-221-1463-4. Nenhuma citação no texto.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Nachdr. Harlow: Pearson/Prentice Hall, 2005. OCLC: 255001925. ISBN 978-0-582-21884-0. Nenhuma citação no texto.



## Apêndices





# APÊNDICE A – BLOCKMESHDict

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 5.0 |
|  \\    /   A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org |
|   \\/     M anipulation | |
\*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       blockMeshDict;
}
// * * * * *

convertToMeters 1;

vertices
(
  (0 0 0)
  (0.4 0 0)
  (0.4 0.35 0)
  (0 0.35 0)
  (0 0 0.15)
  (0.4 0 0.15)
  (0.4 0.35 0.15)
  (0 0.35 0.15)
);

blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) topAir (120 105 45) simpleGrading (1 1 1)
);

```

```
edges
(
);

boundary
(
  topAir_top
  {
    type patch;
    faces
    (
      (3 7 6 2)
    );
  }
  bottomAir_bottom
  {
    type patch;
    faces
    (
      (1 5 4 0)
    );
  }
  leftLet
  {
    type patch;
    faces
    (
      (0 4 7 3)
    );
  }
  rightLet
  {
    type patch;
    faces
    (
      (2 6 5 1)
    );
  }
  frontAndBack
```

```
{  
  type patch;  
  faces  
  (  
    (0 3 2 1)  
    (4 5 6 7)  
  );  
}
```

```
mergePatchPairs  
(  
);
```

```
// ***** //
```



# APÊNDICE B – SNAPPYHEXMESHDICTIONARY

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 5.0 |
|  \\    /   A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org |
|   \\/     M anipulation | |
\*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       snappyHexMeshDict;
}
// * * * * *

#includeEtc "caseDicts/mesh/generation/snappyHexMeshDict.cfg"

castellatedMesh on;
snap           on;
addLayers      off;

geometry
{
  wall
  {
    type triSurfaceMesh;
    file "wall.stl";
  }
  placaMae
  {
    type triSurfaceMesh;
    file "placaMae.stl";
  }
};

```

```
castellatedMeshControls
{
    features
    (
        { file "wall.eMesh"; level 1; }
        { file "placaMae.eMesh"; level 1; }
    );

    refinementSurfaces
    {
        wall
        {
            level (1 1);
            faceZone wall;
            cellZone wall;
            cellZoneInside inside;
        }
        placaMae
        {
            level (1 1);
            faceZone placaMae;
            cellZone placaMae;
            cellZoneInside inside;
        }
    }

    refinementRegions
    {

    }

    locationInMesh (0.001 0.001 0.001); // Offset from (0 0 0) to avoid
    nCellsBetweenLevels 3;
}

snapControls
{
    // explicitFeatureSnap    true;
    // implicitFeatureSnap    false;
```

```
}

addLayersControls
{
    relativeSizes true;

    layers
    {
        expansionRatio 1.3;
        finalLayerThickness 1;
        minThickness 0.1;
        nGrow 0;

        featureAngle 30;
        nRelaxIter 3;
        nSmoothSurfaceNormals 1;
        nSmoothNormals 3;
        nSmoothThickness 2;
        maxFaceThicknessRatio 0.5;
        maxThicknessToMedialRatio 1;
        minMedianAxisAngle 90;
        nBufferCellsNoExtrude 0;
        nLayerIter 50;
    }

    meshQualityControls
    {
        minTetQuality -1e+30;
    }

    /*writeFlags
    (
        //    scalarLevels
        layerSets
        layerFields
    ); */
```

```
mergeTolerance 1e-6;
```

```
// ***** //
```



# APÊNDICE C – CONTROLDICT

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 5.0 |
|  \\    /   A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org |
|   \\  /    M anipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       controlDict;
}
// * * * * *

application    chtMultiRegionSimpleFoam;

startFrom      latestTime;

startTime      0;

stopAt         endTime;

endTime        20000;

deltaT         1;

writeControl    timeStep;

writeInterval   100;

purgeWrite      0;

```

```
writeFormat      ascii;
```

```
writePrecision   7;
```

```
writeCompression uncompressed;
```

```
timeFormat       general;
```

```
timePrecision    6;
```

```
runTimeModifiable true;
```

```
// ***** //
```

# APÊNDICE D – *CHANGEDICTIONARY*

## REGIÃO *WALL*

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 5.0 |
|  \\    /   A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org |
|   \\\ /    M anipulation | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       changeDictionaryDict;
}
// * * * * *

T
{
    internalField    uniform 300;

    boundaryField
    {
        ".*Let"
        {
            type          empty;
            value          uniform 300;
        }

        "wall_to_.*"
        {
            type          compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
            Tnbr          T;
            kappaMethod    solidThermo;
        }
    }
}

```

```
value          uniform 300;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
// ***** //
```

# APÊNDICE E – *CHANGEDICTIONARY*

## REGIÃO *TOPAIR*

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 5.0 |
|  \\    /   A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org |
|   \\  /    M anipulation | |
/*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       changeDictionaryDict;
}

// * * * * *

U
{
    internalField    uniform (0.01 0 0);

    boundaryField
    {
        ".*"
        {
            type      fixedValue;
            value      uniform (0 0 0);
        }

        leftLet
        {
            type      freestream;
            freestreamValue $internalField;
        }
    }
}

```

```

rightLet
{
  type          freestream;
  freestreamValue $internalField;
}
}
}

```

```

T
{
  internalField  uniform 300;

```

```

boundaryField
{
  ".*"
{
  type          zeroGradient;
  value         uniform 300;
}
}

```

```

leftLet
{
  type          inletOutlet;
  inletValue    uniform 300;
}

```

```

rightLet
{
  type          inletOutlet;
  inletValue    uniform 300;
}

```

```

"topAir_to_.*"
{
  type          compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
  Tnbr          T;
  kappaMethod   fluidThermo;
  value         uniform 300;
}

```

```
}  
}  
  
epsilon  
{  
  internalField    uniform 0.01;  
  
  boundaryField  
  {  
    ".*"   
    {  
      type          epsilonWallFunction;  
      value          uniform 0.01;  
    }  
  }  
  
  leftLet  
  {  
    type            fixedValue;  
    value            uniform 0.01;  
  }  
  
  rightLet  
  {  
    type            inletOutlet;  
    inletValue       uniform 0.01;  
    value            uniform 0.01;  
  }  
}  
}  
  
k  
{  
  internalField    uniform 0.1;  
  
  boundaryField  
  {  
    ".*"   
    {  
      type          kqRWallFunction;
```

```
value          uniform 0.1;
}

leftLet
{
  type          fixedValue;
  value         uniform 0.1;
}
rightLet
{
  type          inletOutlet;
  inletValue    uniform 0.1;
  value         uniform 0.1;
}
}

p_rgh
{
  internalField uniform 1e5;

  boundaryField
  {
    ".*"
    {
      type          fixedFluxPressure;
      value         uniform 1e5;
    }
  }

  rightLet
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform 1e5;
  }
}

p
{
```



```
internalField    uniform 1e5;
```

```
boundaryField
```

```
{
```

```
".*"
```

```
{
```

```
type            calculated;
```

```
value           uniform 1e5;
```

```
}
```

```
}
```

```
}
```

```
// ***** //
```



# APÊNDICE F – *CHANGEDICTIONARY*

## REGIÃO *PLACAMAE*

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 5.0 |
|  \\    /   A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org |
|   \\\ /    M anipulation | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       changeDictionaryDict;
}
// * * * * *

T
{
    internalField    uniform 300;

    boundaryField
    {
        ".*Let"
        {
            type            empty;
            value            uniform 300;
        }

        "placaMae_to_.*"
        {
            type            compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
            Tnbr            T;
            kappaMethod      solidThermo;
        }
    }
}

```

```
value          uniform 300;  
}  
}  
}
```

```
// ***** //
```

# APÊNDICE G – *CHANGEDICTIONARY*

## REGIÃO DISSIPADOR

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      /  O peration  | Version: 5.0 |
|  \\    /   A nd        | Web:      www.OpenFOAM.org |
|   \\\ /    M anipulation | |
\*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       changeDictionaryDict;
}

// * * * * *

T
{
    internalField    uniform 300;

    boundaryField
    {
        ".*Let"
        {
            type          empty;
            value          uniform 300;
        }

        "cooler_to_.*"
        {
            type          compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
            Tnbr          T;
            kappaMethod    solidThermo;
        }
    }
}

```

```
value          uniform 300;  
}  
}  
}
```

```
// ***** //
```

# APÊNDICE H – ALLRUN

```
#!/bin/sh
cd ${0%/*} || exit 1    # run from this directory

# Source tutorial run functions
. $WM_PROJECT_DIR/bin/tools/RunFunctions

runApplication blockMesh
runApplication surfaceFeatureExtract
runApplication snappyHexMesh -overwrite
runApplication splitMeshRegions -cellZonesOnly -overwrite

# remove fluid fields from solid regions (important for post-processing)
for i in wall cooler placaMae
do
rm -f 0*/$i/{mut,alphan,epsilon,k,U,p_rgh}
done

for i in placaMae topAir cooler wall
do
changeDictionary -region $i > log.changeDictionary.$i 2>&1
done

#-- Run on single processor
runApplication 'getApplication'
```