

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

LUCAS AUGUSTO MANICA

ANÁLISE NUMÉRICA DE SISTEMAS DE GERENCIAMENTO TÉRMICO DE
BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Joinville

2023

LUCAS AUGUSTO MANICA

ANÁLISE NUMÉRICA DE SISTEMAS DE GERENCIAMENTO TÉRMICO DE
BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Filipe Dutra da Silva

Coorientador(a): Dr. Ernane Silva

Joinville

2023

LUCAS AUGUSTO MANICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE SISTEMAS DE GERENCIAMENTO TÉRMICO DE
BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 27 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Dr. Filipe Dutra da Silva
Orientador

Dr. Ernane Silva
Coorientador

Dra. Talita Sauter Possamai
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Diogo Nardelli Siebert
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à minha família, principalmente a minha mãe Sivonei, meu pai Marcos e ao meu irmão João, por me apoiarem desde o início da faculdade dando todo suporte necessário. Não seria possível realizar esta graduação sem este apoio. Muito obrigado.

Ao professor orientador Dr. Filipe Dutra da Silva por todos conselhos e ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Especialmente pelas reuniões de discussões semanais, auxílio na geração da malha computacional, disponibilidade para rodar as simulações em regime transiente e fazer a correção deste trabalho em pouco tempo disponível.

Ao professor coorientador Dr. Ernane Silva pelo auxílio na elaboração deste trabalho, principalmente na fase inicial. Também pelas aulas de Mecânica dos Fluidos e Mecânica dos Fluidos Computacional durante a faculdade, as quais foram essenciais para o desenvolvimento deste tema.

Ao Laboratório de Computação Científica da UFSC Joinville, por permitir a utilização do Cluster para rodar todas as simulações numéricas deste trabalho, viabilizando a realização deste estudo.

Aos meus amigos de faculdade, por toda parceria desde o início do curso. Os momentos que passaram vão deixar saudades, principalmente os jogos do nosso time de futebol, almoços, jantas e todos as festas que estivemos juntos.

RESUMO

O aumento da poluição ambiental estimula a substituição dos combustíveis fósseis por outras formas de geração de energia. Na indústria automotiva, a utilização de carros elétricos vem se mostrando uma alternativa viável, pois os motores elétricos não geram emissões poluentes. Entretanto, apesar de contribuir para a melhora da questão ambiental, essa tecnologia vem trazendo novos problemas para a engenharia, especialmente em relação às baterias de íon-lítio, as quais possuem limitações devido a sensibilidade à temperatura, necessitando de um sistema de resfriamento apropriado. Nesse sentido, este trabalho apresenta simulações de fluidodinâmica computacional no software de código aberto Open-source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM), a fim de simular sistemas de resfriamento líquido de baterias fundamentados em dois casos distintos da literatura. Foram avaliados resultados de temperatura e perda de carga, considerando variações de geometria e sentido de escoamento, com o intuito de observar a capacidade de transferência de calor para cada sistema. No primeiro caso, baseado no artigo de Lan et al. (2016), o modelo de 4 canais foi mais eficiente, mantendo uma temperatura máxima da bateria de 300,675 K. Para o segundo caso, baseado no artigo de Liu et al. (2019), o modelo de contracorrente foi considerado mais adequado, pois manteve uma variação máxima de temperatura na bateria de 5,791 K.

Palavras-chave: Baterias. Resfriamento líquido. Simulação. OpenFOAM

ABSTRACT

The increase in environmental pollution encourages the replacement of fossil fuels by other forms of energy generation. In the automotive industry, the use of electric cars has proven to be a viable alternative, as electric motors don't generate polluting emissions. However, despite being an environmental improvement, this technology has brought new problems to engineering, especially in relation to lithium-ion batteries, which have limitations due to temperature sensitivity, requiring an appropriate cooling system. This work presents simulations of computational fluid dynamics in the open source software Open-source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM), in order to simulate liquid cooling systems for batteries based on two different cases of the literature. Temperature and pressure drop results were evaluated, considering variations in geometry and flow direction, in order to observe the heat transfer capacity for each system. In the first case, based on the article of Lan et al. (2016), the 4-channel model was more efficient, maintaining a maximum battery temperature of 300.675 K. For the second case, based on the article of Liu et al. (2019), the countercurrent model was considered more appropriate, as it maintained a maximum temperature variation in the battery of 5.791 K.

Keywords: Batteries. Liquid cooling. Simulation. OpenFOAM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito de célula, módulo e pacote de bateria	16
Figura 2 – Disposição de um pacote de bateria em um veículo elétrico.	16
Figura 3 – Vista ortogonal e frontal de um sistema de resfriamento líquido com duas placas frias de 6 mini canais.	18
Figura 4 - Métodos de solução para um problema físico na área de fenômenos de transporte.	20
Figura 5 - Representação do volume diferencial utilizado para o desenvolvimento das equações de conservação.....	21
Figura 6 - Fluxo de massa líquido nas faces do elemento diferencial.	22
Figura 7 – Estado de tensão em três faces de um elemento fluido.....	24
Figura 8 – Representação da camada limite de velocidade.....	26
Figura 9 – Ilustração da camada limite térmica.	27
Figura 10 – Perfil da camada limite de acordo com o número de Prandtl.	30
Figura 11 – Ilustração do efeito do número de Courant no transporte da informação sobre a malha computacional.....	31
Figura 12 - Geração de uma malha de fundo antes de executar o <i>snappyHexMesh</i>	32
Figura 13 – Etapa de divisão de células no <i>snappyHexMesh</i>	33
Figura 14 – Processo de remoção de células no <i>snappyHexMesh</i>	34
Figura 15 – Processo de movimentação dos vértices para acompanhar a superfície no <i>snappyHexMesh</i>	34
Figura 16 – Processo de adição de camadas prismáticas na malha computacional.	35
Figura 17 - Arquitetura Cluster Beowulf do Laboratório de Computação Científica.	36
Figura 18 – Diferentes disposições de canais do estudo de Lan et al. (2016).	37
Figura 19 – Dimensões da bateria para o Caso 1.	38
Figura 20 – Dimensões dos mini canais para o Caso 1.	38
Figura 21 – Dimensões para as simulações do Caso 1.	39
Figura 22 – Geometria do segundo caso de estudo. Sendo (a) o modelo de corrente paralela e (b) o modelo de contracorrente.	41
Figura 23 – Estrutura em formato de árvore dos canais internos da placa fria.	41

Figura 24 – Dimensões em milímetros para os canais internos e a bateria do Caso 2, estudada por Liu et al. (2019).....	42
Figura 25 – Modelo experimental de Liu et al. (2019).	45
Figura 26 – Diagrama esquemático do modelo experimental para o Caso 2.	46
Figura 27 – Representação da interface fluido/sólido.	47
Figura 28 - Vista frontal da malha computacional para os modelos do Caso 1.	49
Figura 29 – Vista lateral da malha computacional para os modelos do Caso 1.	49
Figura 30 – Detalhe da malha na região de entrada dos mini canais para o Caso 1.	50
Figura 31 - Malha computacional para o Caso 2, (a) a vista frontal, (b) vista lateral e (c) em perspectiva.	51
Figura 32 – Detalhe na entrada de água dos mini canais.	51
Figura 33 – Região interna dos canais em forma de árvore na malha computacional.	52
Figura 34 – Esquema de solução simplificado do algoritmo SIMPLE.	55
Figura 35 – Esquema de solução simplificado do algoritmo PIMPLE.	56
Figura 36 - Temperatura máxima da bateria para cada interação do Caso 1.	57
Figura 37 - Temperatura máxima da bateria para cada interação do Caso 2.	57
Figura 38 – Comparação em vista frontal de malhas para o Caso 1.	58
Figura 39 – Comparação em vista lateral de malhas para o Caso 1.	59
Figura 40 – Distribuição de temperatura e magnitude da velocidade na saída do canal para cada malha do Caso 1.	60
Figura 41 - Distribuição de temperatura para o modelo de 1 canal.	61
Figura 42 – Distribuição de temperatura para o modelo de 2 canais.	62
Figura 43 - Distribuição de temperatura para o modelo de 4 canais.	62
Figura 44 – Comparação das distribuições temperatura entre os modelos do Caso 1.	63
Figura 45 – Distribuição da magnitude da velocidade e temperatura na saída dos canais para o Caso 1.	64
Figura 46 – Perfis de velocidade e temperatura na saída dos canais para o Caso 1.	64
Figura 47 – Temperatura da bateria ao longo do tempo sem o sistema de resfriamento, para o Caso 2.	65
Figura 48 – Vista frontal das malhas para a análise de convergência do Caso 2.	66

Figura 49 – Detalhe da região dos mini canais nas malhas utilizadas para a análise de convergência do Caso 2.....	66
Figura 50 – Distribuição de velocidade e temperatura para as diferentes malhas do Caso 2.....	68
Figura 51 - Perfis de velocidade para as diferentes malhas do Caso 2.	68
Figura 52 – Temperatura máxima da bateria ao longo do tempo para escoamento em contracorrente.	69
Figura 53 - Temperatura máxima da bateria ao longo do tempo para escoamento em corrente paralela.	70
Figura 54 – Comparação da distribuição de temperatura na placa fria para o escoamento em contracorrente.....	71
Figura 55 - Comparação da distribuição de temperatura na placa fria para o escoamento em corrente paralela.	71
Figura 56 – Distribuição de temperatura e velocidade na saída do canal para o caso 2.	73
Figura 57 – Perfil de temperatura e velocidade na saída do canal para o Caso 2. ...	74
Figura 58 - Distribuição de temperatura na vista frontal do sistema para o Caso 2. .	74
Figura 59 – Distribuição de temperatura na vista lateral para o Caso 2.....	75
Figura 60 - Diferença entre a temperatura máxima e mínima da bateria ao longo do tempo para o Caso 2.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de descarga C de uma bateria.	32
Tabela 2 - Especificação do Cluster do Laboratório de Computação Científica.....	37
Tabela 3 – Propriedades dos materiais do sistema de resfriamento utilizadas por Lan et al (2016).	39
Tabela 4 – Condições de contorno para o Caso 1.	40
Tabela 5 – Propriedades dos materiais do sistema de resfriamento utilizadas por Liu et al. (2019).	43
Tabela 6 – Parâmetros da bateria para o Caso 2.....	44
Tabela 7 – Vazões de água considerados para o Caso 2.....	44
Tabela 8 – Condições de contorno para o Caso 2.	45
Tabela 9 – Número de células para as malhas geradas no Caso 2.	49
Tabela 10 - Grau de refino da malha para o Caso 2.	52
Tabela 11 – Parâmetro das malhas (a), (b) e (c) para o Caso 1.	59
Tabela 12 – Resultados encontrados para as malhas (a), (b) e (c).....	60
Tabela 13 - Comparação de resultados do Caso 1.	63
Tabela 14 – Parâmetros de cada malha computacional do Caso 2.	67
Tabela 15 – Resultados obtidos para cada malha computacional do Caso 2.	67
Tabela 16 – Comparação dos resultados para o escoamento em contracorrente. ...	72
Tabela 17 – Comparação dos resultados para o escoamento em corrente paralela.	72
Tabela 18 – Comparação entre os tempos de simulação para o Caso 2.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LabCC - Laboratório de Computação Científica

OpenFOAM - Open Source Field Operation and Manipulation

PIMPLE - Pressure Implicit with splitting of operator for Pressure-Linked Equations

SIMPLE - Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations

STL - Stereolithography

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_x	Dimensão na direção x de um volume diferencial de fluido
δ_y	Dimensão na direção y de um volume diferencial de fluido
δ_z	Dimensão na direção z de um volume diferencial de fluido
ρ	Densidade
t	Tempo
\mathbf{u}	Vetor velocidade
u	Velocidade do escoamento na direção x
v	Velocidade do escoamento na direção y
w	Velocidade do escoamento na direção z
τ	Tensor de tensão
SM_x	Tensor de tensão na direção x
SM_y	Tensor de tensão na direção y
SM_z	Tensor de tensão na direção z
i	Energia interna
T	Temperatura
k	Coefficiente de condutividade térmica
S_i	Termo fonte
p	Pressão
δ	Espessura da camada limite de velocidade
$\delta(x)$	Perfil da camada limite de velocidade
δ_T	Espessura da camada limite térmica
u_∞	Velocidade do fluido em corrente livre
T_∞	Temperatura do fluido em corrente livre
h	Entalpia
V	Volume
C_p	Calor específico a pressão constante
C	Capacidade calorífica
Q	Quantidade de calor fornecida a um corpo
Q_{cond}	Quantidade de calor fornecida a um corpo por condução
μ	Viscosidade absoluta

ν	Viscosidade cinemática
α	Difusividade térmica
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
L	Comprimento característico
U	Velocidade característica
Co	Número de Courant
I	Corrente elétrica
E	Tensão de trabalho
E_{oc}	Tensão em circuito aberto
T_{Ba}	Temperatura da bateria
T_s	Temperatura do sólido
$T_{s,i}$	Temperatura do sólido na interface
T_f	Temperatura do fluido
$T_{f,i}$	Temperatura do fluido na interface
Q_f	Fluxo de calor entrando no fluido
Q_s	Fluxo de calor entrando no sólido
k_f	Condutividade térmica do fluido
k_s	Condutividade térmica do sólido
n	Direção normal a superfície
\emptyset	Valor de uma função com dependência temporal
\emptyset^{00}	Valor de uma função com dependência temporal dois passos de tempo atrás
T_{max}	Temperatura máxima da bateria
T_{min}	Temperatura mínima da bateria
ΔP	Queda de pressão
ΔT	Diferença entre a temperatura máxima e mínima da bateria
Δt	Passo de tempo
Δx	Comprimento de uma célula
GB	Gigabytes
ψ	Variável que determina um campo qualquer
λ	Coeficiente de compensação do método Crank-Nicolson
[A]	Matriz com termos advectivos e difusivos
[B]	Matriz com termos fonte

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	18
1.1.1. Objetivo Geral	18
1.1.2. Objetivos Específicos	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	19
2.1.1 Equações de Conservação	21
2.2 DEFINIÇÃO DAS CAMADAS LIMITE DE VELOCIDADE E TÉRMICA	26
2.3 ENTALPIA, CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE E CAPACIDADE CALORÍFICA	27
2.4 CONDUTIVIDADE TÉRMICA, VISCOSIDADE E DIFUSIVIDADE TÉRMICA	28
2.5 DEFINIÇÃO DE ALGUNS NÚMEROS ADIMENSIONAIS	29
2.6 TAXA DE DESCARGA DE UMA BATERIA	31
2.7 GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL POR MEIO DA FERRAMENTA <i>SNAPPYHEXMESH</i>	32
3. METODOLOGIA	36
3.1 CLUSTER COMPUTACIONAL	36
3.2 CASO 1	37
3.2.1 Parâmetros utilizados	39
3.2.2 Condições de contorno	40
3.3 CASO 2	40
3.3.1 Parâmetros utilizados	43
3.3.2 Condições de contorno	44
3.3.3 Resultados experimentais	45
3.4 MODELO DE SIMULAÇÃO	46
3.4.1 Solver	47
3.4.2 Geração da malha computacional	48
3.4.3 Esquemas numéricos	53
3.4.4 Critérios de convergência	56
4. RESULTADOS PARA O CASO 1	58
4.1 ESTUDO DE REFINO DE MALHA	58

4.2 SIMULAÇÃO	61
5. RESULTADOS PARA O CASO 2	65
5.1 ESTUDO DE REFINO DE MALHA.....	65
5.2 SIMULAÇÃO	69
6. CONCLUSÕES	76
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	77
REFERÊNCIAS.....	78

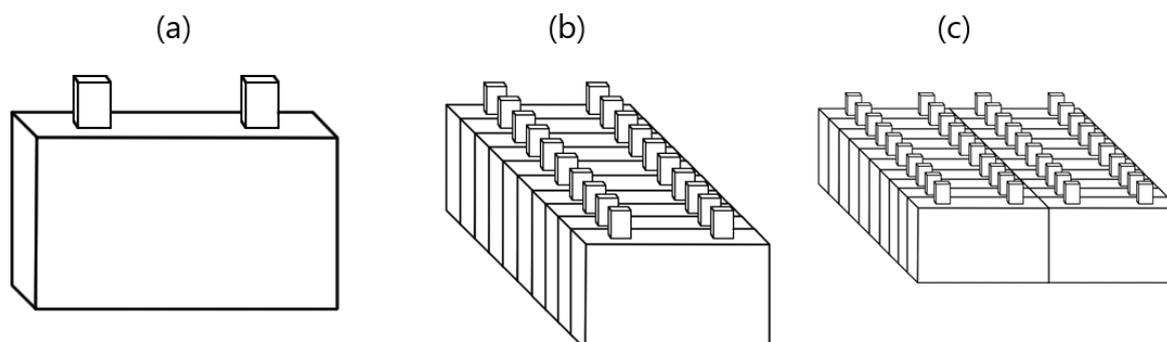
1. INTRODUÇÃO

A utilização e aperfeiçoamento de formas alternativas de geração de energia está se tornando cada vez mais urgente devido ao aumento da poluição ambiental. Nesse contexto, a indústria automotiva está em evidência, pois os meios de transporte são responsáveis por grande parte das emissões de gases poluentes. Em 2019 no Brasil, o transporte de pessoas foi responsável por 20% da energia de origem fóssil consumida no país e 23% das emissões associadas ao uso e à produção de energia (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2019). Os veículos elétricos e híbridos surgem como uma opção para melhorar a perspectiva da situação energética mundial, pois os motores elétricos não geram emissões de gases poluentes durante o seu funcionamento.

Há uma crescente preocupação da indústria com o estudo e projeto de sistemas de baterias, as quais estão diretamente ligadas ao desempenho e autonomia dos veículos com motores elétricos. Atualmente os fabricantes de automóveis utilizam baterias do tipo íon-lítio, as quais apresentam uma vida útil e capacidade de armazenar energia superior, porém, possuem limitações devido a sensibilidade à temperatura. Para atuar com máxima eficiência, esse componente deve operar em uma faixa de temperatura ideal entre 20°C e 40°C, de modo que a temperatura da bateria não seja baixa o suficiente para retardar a taxa de reações químicas, diminuindo a potência de saída, e tampouco alta demais, acelerando o processo de corrosão e reduzindo a sua vida útil (RAO, 2011).

Para suprir a demanda energética de um veículo híbrido ou elétrico, a bateria interna é disposta em forma de pacote, constituído por diversos módulos e células individuais. De acordo com a Figura 1, uma célula (a) é a menor forma que uma bateria pode assumir, um módulo (b) consiste em várias células conectadas e por fim, um pacote de bateria (c) é montado conectando módulos (MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM, 2008).

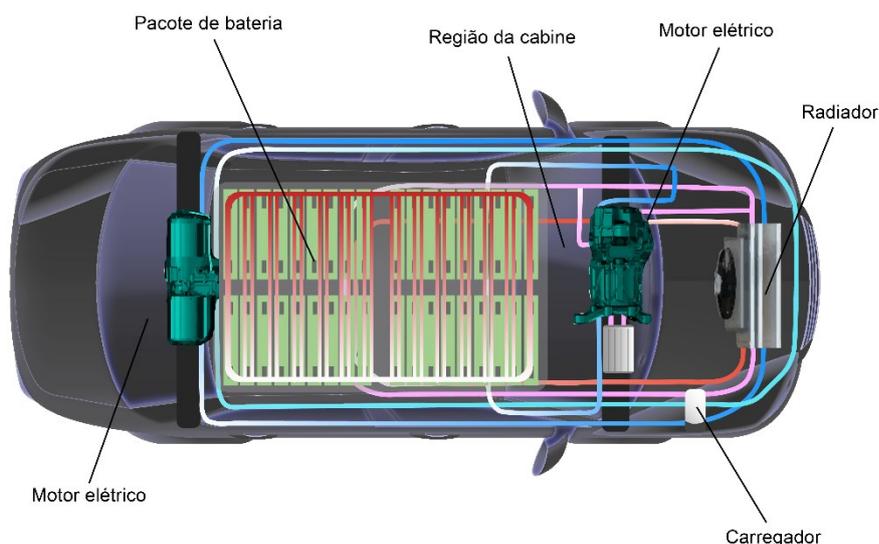
Figura 1 – Conceito de célula, módulo e pacote de bateria



Fonte: Autor (2023).

Na maior parte dos veículos, de modo a garantir uma melhor distribuição de peso e maximizar o espaço interno da cabine, o pacote de bateria fica na parte de inferior do veículo, próximo ao assoalho, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Disposição de um pacote de bateria em um veículo elétrico.



Fonte: CIC energiGUNE (2022).

Além de operar em uma faixa de temperatura específica, é fundamental que um pacote de baterias tenha uma distribuição de temperatura uniforme, pois variações de temperatura farão com que as reações eletroquímicas ocorram com taxas diferentes entre as células, não utilizando o potencial energético máximo da bateria (JARRETT; KIM, 2011). Por essa razão, um sistema de gerenciamento térmico é expressivo, necessitando ser eficiente, mantendo o sistema em uma faixa de temperatura ideal, bem como econômico e compacto, viabilizando o desenho e

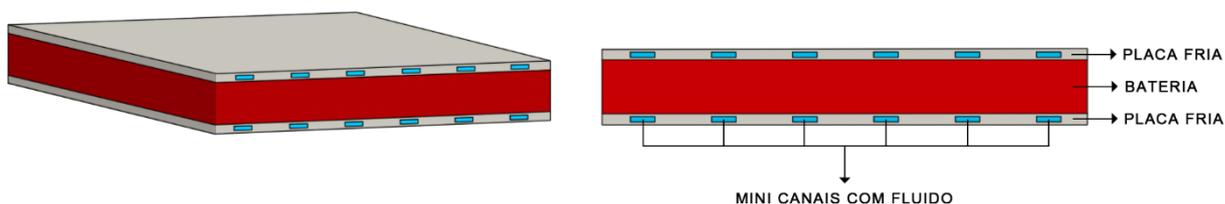
fabricação do veículo (PESARAN et al., 1997). Em algumas situações específicas, como a partida em ambientes frios, pode ser necessário um sistema de aquecimento para a bateria, porém durante a operação do veículo, será necessário um sistema que priorize o resfriamento.

Atualmente se utiliza três principais sistemas para o gerenciamento térmico de baterias para veículos elétricos: ar, líquido e material com mudança de fase. O resfriamento a ar pode ser feito por convecção natural, onde o ar interno da cabine ou o ar externo ambiente, será guiado para a superfície da bateria na região inferior do veículo por meio de dutos. Esse sistema de resfriamento só é utilizado para baterias de menor densidade energética, pois tem uma capacidade de resfriamento limitada e gera uma distribuição de temperatura não uniforme (FERRASO et al., 2020). A indústria tende a descartar sistemas de gerenciamento térmico a convecção forçada de ar, por causa de seu alto consumo energético e baixa eficiência (CIC energiGUNE, 2022).

Taxas superiores de resfriamento podem ser alcançadas em sistemas que empregam líquidos, pois apresentam uma condutividade térmica mais alta que o ar. Sistemas com mudança de fase tem uma grande capacidade de resfriamento devido a quantidade de calor absorvida durante uma mudança de fase líquido-gasoso ou sólido-líquido, contudo, são complexos e ocupam mais espaço (FERRASO et al., 2020).

Veículos atuais dão preferência a sistemas de resfriamento líquido, pois apresentam uma ótima capacidade de resfriamento e são relativamente compactos. O resfriamento líquido geralmente é feito por meio de uma placa fria com mini canais de fluido em seu interior, conforme o exemplo da Figura 3. O calor é conduzido das células da bateria para a placa fria e retirado pelo fluido refrigerante, impulsionado por uma bomba. As características operacionais do sistema são determinadas principalmente pela geometria dos minis canais, tipo de fluido, sentido do fluxo e capacidade da bomba (JARRETT; KIM, 2011).

Figura 3 – Vista ortogonal e frontal de um sistema de resfriamento líquido com duas placas frias de 6 mini canais.



Fonte: Autor (2023).

A fim de analisar sistemas de resfriamento líquido de baterias, este trabalho apresentará simulações no programa de fluidodinâmica computacional Open source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM), fundamentadas nos casos de Lan et al. (2016) e Liu et al. (2019).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Simular e analisar sistemas de resfriamento líquido de baterias para veículos elétricos no software de código aberto OpenFOAM.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Reproduzir os parâmetros e condições de operação de um sistema de resfriamento líquido de baterias em uma simulação numérica;
- Examinar a influência do número de mini canais e sentido do escoamento de fluido sobre o desempenho do sistema;
- Comparar os resultados obtidos com dados utilizados como referência;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

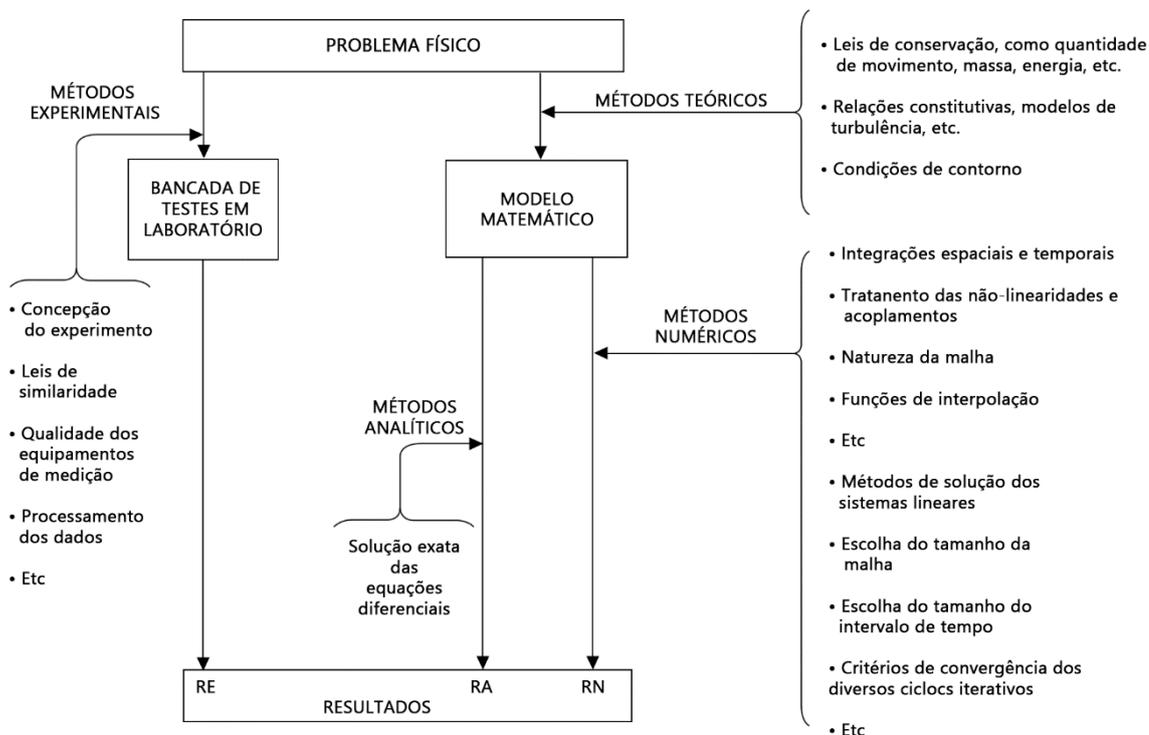
Este capítulo apresenta fundamentos básicos da mecânica dos fluidos computacional, com o objetivo de compreender os métodos numéricos e parâmetros a serem definidos para a simulação numérica de um sistema de resfriamento líquido.

2.1. MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A resolução de um problema da engenharia pode ser feita por métodos experimentais, numéricos ou analíticos. Métodos experimentais englobam procedimentos físicos, realizados em laboratório por meio de uma bancada com equipamentos e profissionais capazes de reproduzir e medir os parâmetros envolvidos. Meios analíticos e numéricos são realizados de forma teórica, utilizando modelos matemáticos. Métodos analíticos geram soluções por integração ou expansões em série, onde a ênfase está em encontrar uma expressão exata. Métodos numéricos operam por intermédio da aproximação da solução de um sistema de equações diferenciais que, em geral, resultam em um sistema de equações lineares (BOYCE; DIPRIMA, 2012).

Resultados analíticos são contínuos e exatos, entretanto, têm a desvantagem de serem obtidos apenas em problemas básicos, com hipóteses simplificativas, geometrias e condições de contorno simples. Já a análise numérica apresenta menores restrições, podendo resolver problemas com condições de contorno e geometrias mais complexas. Os dados obtidos numericamente devem ser, entretanto, confiáveis e o modelo matemático deve ser tal que possa ser resolvido com tempos de computação não-proibitivos (MALISKA, 1995). A Figura 4 esquematiza os métodos de solução.

Figura 4 - Métodos de solução para um problema físico na área de fenômenos de transporte.



Fonte: adaptado de Maliska (1995, p. 12).

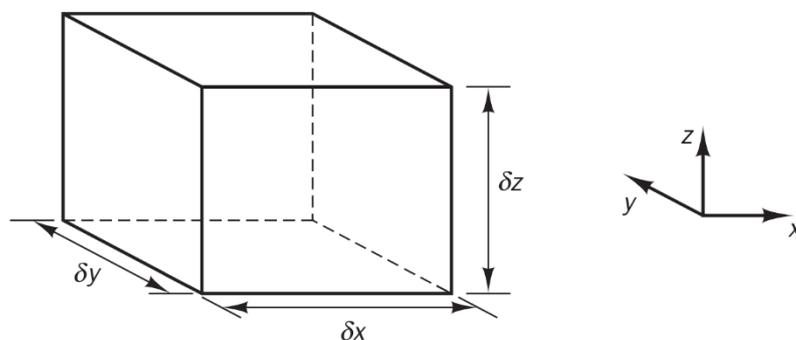
Graças ao avanço na capacidade de processamento e armazenamento dos computadores, atualmente as análises para problemas da engenharia são majoritariamente numéricas. Entretanto, os resultados obtidos computacionalmente estão sujeitos a fontes de erros, seja da resolução incorreta das equações diferenciais, malha computacional grosseira ou ainda devido a utilização de modelos matemáticos que não representam adequadamente o problema. É fundamental, portanto, que sejam feitas verificações analíticas e físicas, para verificar a convergência do algoritmo e a fidelidade das condições impostas ao fenômeno. Um projeto moderno de engenharia deve associar a simulação numérica com selecionadas experiências em laboratório, com o intuito de validar o modelo e fazer a avaliação final. A união dessas técnicas resultará em um projeto melhor e mais barato (MALISKA, 1995).

2.1.1 Equações de Conservação

Softwares atuais de simulações em mecânica dos fluidos majoritariamente aplicam o método dos volumes finitos, no qual as equações são obtidas através de balanços de conservação da propriedade envolvida (massa, quantidade de movimento, entalpia, etc.) em volumes elementares provenientes da decomposição do domínio em volumes de controle (MALISKA, 1995). Propriedades do fluido como velocidade, pressão, densidade e temperatura, e suas derivadas de espaço e tempo devem ser analisadas de forma macroscópica (maior do que $1 \mu\text{m}$), de modo que os efeitos moleculares possam ser ignorados. Portanto, as características intrínsecas do fluido são tidas como medidas médias de uma porção suficientemente grande de moléculas que o compõe (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

As equações diferenciais parciais descritas a seguir são equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia, responsáveis por governar a dinâmica do escoamento e transferência de calor do fluido. Durante a simulação, essas relações serão resolvidas numericamente pelo método de volumes finitos, onde suas soluções acopladas permitirão a obtenção de dados relativos à pressão, temperatura e velocidade em todo o domínio. As leis de conservação serão apresentadas na forma diferencial e tridimensional, para um escoamento compressível e transiente de um fluido Newtoniano, considerando um volume de controle infinitesimal de dimensões δx , δy e δz , de acordo com a Figura 5.

Figura 5 - Representação do volume diferencial utilizado para o desenvolvimento das equações de conservação.



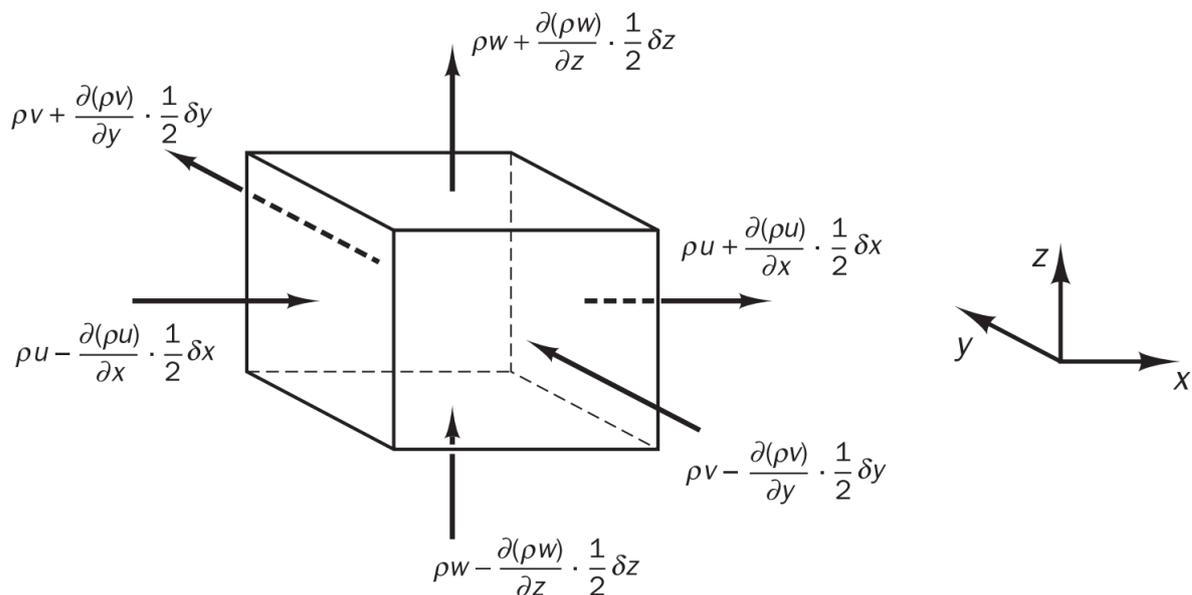
Fonte: adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007, p. 10).

A equação de conservação de massa, também chamada de equação da continuidade, considera que a taxa de variação da massa no volume de controle deve ser igual à taxa líquida de fluxo de massa entrando ou saindo do volume (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A taxa de variação de massa pode ser encontrada fazendo a derivada temporal do produto da densidade ρ pelo volume do elemento, conforme a Equação 1:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (1)$$

O fluxo de massa entrando em uma face do volume de controle é dado pelo produto da densidade, área e a componente da velocidade normal a esta face, denotada por u , v e w , para as coordenadas x , y e z , respectivamente. Os fluxos de massa em cada uma das faces estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6 - Fluxo de massa líquido nas faces do elemento diferencial.



Fonte: adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007, p. 11).

Fazendo o balanço de massa que entra em cada uma das faces do elemento e igualando com Equação 1, tem-se a equação da continuidade, representada na forma conservativa pela Equação 2.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

O primeiro termo do lado esquerdo é a taxa de variação no tempo da densidade. O segundo termo descreve o fluxo líquido de massa nas faces do elemento e é chamado de termo convectivo.

A equação da conservação da quantidade de movimento linear é definida por meio da segunda lei de Newton, a qual afirma que a taxa de variação da quantidade de movimento linear da partícula de um fluido é igual à soma das forças sobre a partícula. As Equações 3, 4 e 5 mostram as taxas de variação da quantidade de movimento linear para uma partícula de fluido nas direções x, y e z respectivamente, onde Du/Dt , Dv/Dt e Dw/Dt representam as derivadas materiais do campo de velocidade.

$$\rho \frac{Du}{Dt} \equiv \text{Taxa de variação da quantidade de movimento linear na direção } x \quad (3)$$

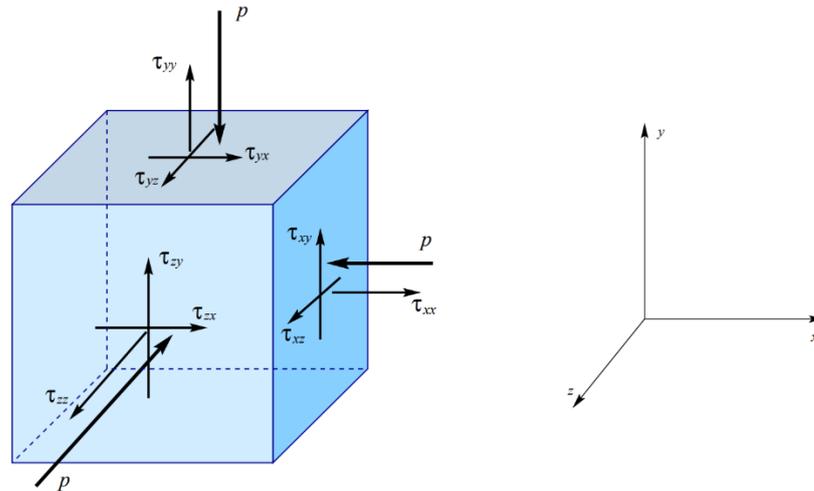
$$\rho \frac{Dv}{Dt} \equiv \text{Taxa de variação da quantidade de movimento linear na direção } y \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} \equiv \text{Taxa de variação da quantidade de movimento linear na direção } z \quad (5)$$

A soma das forças sobre uma partícula de fluido é feita a partir de um balanço da pressão, denotada por p , que age como uma tensão normal e por componentes de tensões de cisalhamento, que surgem devido a viscosidade do fluido (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A Figura 7 mostra o estado de tensão para três faces de um elemento fluido, demonstrando as direções da pressão e da tensão de cisalhamento.

Os componentes da tensão de cisalhamento ou tensão viscosa, são representados pela notação por τ_{ij} designando que a tensão atua na direção j em uma superfície normal à direção i. Realizando os somatórios de forças por unidade de volume que agem em cada umas das direções do elemento fluido e igualando com as Equações 3, 4 e 5, se obtêm as Equações 6, 7 e 8, que representam as equações de conservação da quantidade de movimento linear para as componentes x, y e z respectivamente.

Figura 7 – Estado de tensão em três faces de um elemento fluido.



Fonte: adaptado de McDonough (2009, p. 74).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (6)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (7)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial x} + S_{Mz} \quad (8)$$

Os termos à esquerda das equações representam a taxa de variação da quantidade de movimento linear por unidade de volume da partícula de fluido. As forças totais agindo em cada das direções são descritas pelos termos a direita, onde efeitos de forças de corpo, como por exemplo forças eletromagnéticas ou da gravidade, são contabilizados pelos termos fontes SM_x , SM_y e SM_z .

A determinação da temperatura do fluido dentro do domínio computacional é feita mediante o acoplamento da equação da energia, descrita pela Equação 9, a qual está representada em função da energia interna i do fluido. Esta equação é derivada da primeira lei da termodinâmica, a qual afirma que a taxa de variação de energia de uma partícula de fluido é igual à taxa de adição de calor à partícula de fluido mais a taxa de trabalho realizado sobre a partícula (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$\rho \frac{Di}{Dt} = \text{div}(k \text{ grad}T) + \left[\begin{array}{c} -p \text{ div}\mathbf{u} + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \\ \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \end{array} \right] + S_i \quad (9)$$

O termo a esquerda representa a taxa de variação da energia interna. O termo $\text{div}(k \text{ grad}T)$ provém da lei de Fourier e representa a taxa de adição de calor à partícula de fluido por difusão, onde T é a temperatura e k o coeficiente de condutividade térmica do fluido. Os termos em chaves representam a taxa total de trabalho realizado sobre a partícula de fluido por tensões de superfície. Por fim, S_i é um termo fonte que contabiliza os efeitos de adição de calor por outros meios, como por exemplo reações químicas ou resistência elétrica.

Portanto, a caracterização de um fluido é feita por um sistema de cinco equações diferenciais parciais: conservação da massa (Equação 2), conservação da quantidade de movimento linear (Equações 6, 7 e 8) e conservação da energia (Equação 9). Entre as incógnitas estão quatro variáveis termodinâmicas (ρ, p, i e T), as quais serão relacionadas através da suposição de equilíbrio termodinâmico e posteriormente solucionadas através dos modelos matemáticos adotados no software de simulação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A equação geral do transporte, expressa na Equação 10, simplifica as expressões da conservação de massa, quantidade de movimento linear e conservação de energia em uma única expressão, onde ψ representa uma variável qualquer, Γ o termo difusivo correspondente e S_ψ o termo fonte (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \text{div}(\rho \psi \mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{ grad}\psi) + S_\psi \quad (10)$$

A Equação 10 pode ainda ser escrita na forma de uma equação matricial, conforme a Equação 11,

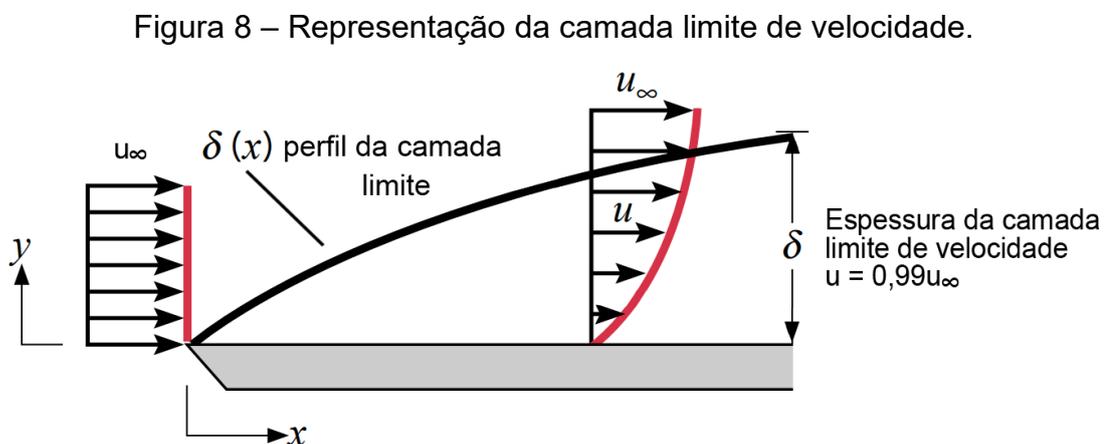
$$[A][\psi] = [b], \quad (11)$$

onde a matriz $[A]$ contém termos advectivos e difusivos e a matriz $[b]$ termos fonte. Os coeficientes de cada uma das matrizes serão determinados por meio de um esquema numérico de discretização. O modelo matricial da Equação 11 é utilizado na maioria dos softwares de fluidodinâmica computacional, pois facilita a implementação e resolução das equações de conservação por intermédio de um algoritmo numérico, permitindo ainda que as condições de contorno do problema sejam posteriormente adicionadas através de ajustes nos coeficientes matriciais (CFD Direct, 2023).

2.2 DEFINIÇÃO DAS CAMADAS LIMITE DE VELOCIDADE E TÉRMICA

Devido as tensões de cisalhamento atuando em planos paralelos à velocidade, as partículas de um fluido assumem velocidade zero quando entram em contato com uma superfície. Essas partículas então, retardam o movimento das partículas adjacentes, até que a uma certa distância da superfície, este efeito se torna insignificante e a velocidade do fluido atinge o valor de velocidade de corrente livre u_∞ (INCROPERA, 2008). A camada limite de velocidade se refere a porção de fluido na qual as partículas estejam submetidas a essa desaceleração devido a presença da superfície.

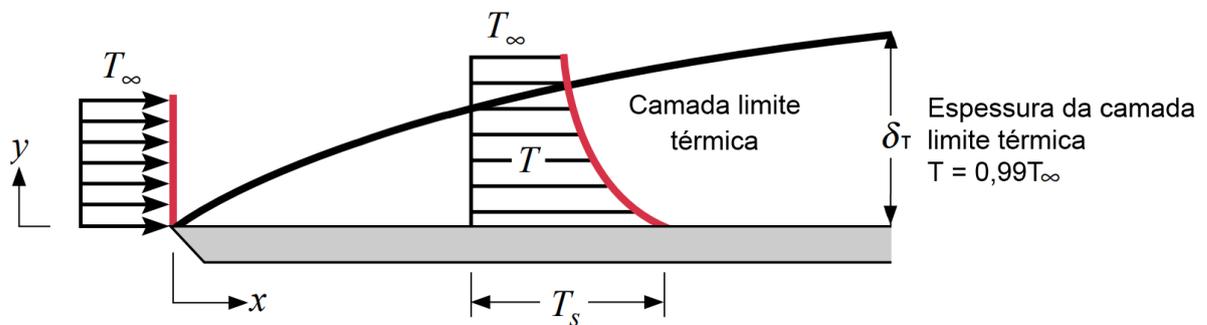
A Figura 8, ilustra o desenvolvimento da camada limite de velocidade sobre uma placa plana. Tipicamente a espessura da camada limite de velocidade δ , é definida como a distância a partir da superfície na qual a velocidade do fluido atinge 99% da velocidade de corrente livre. O perfil $\delta(x)$ se refere a forma como a espessura da camada limite de velocidade varia com a coordenada x .



Adaptado de Incropera (2008, p. 349).

Ao entrar em contato com uma superfície de temperatura diferente, as partículas de um fluido entram em equilíbrio térmico, atingindo a temperatura T_s da parede. As partículas de fluido adjacentes trocam energia com as partículas que estão em contato com a superfície, fazendo com que se desenvolva um gradiente de temperatura até que, a uma certa distância, denominada como a espessura da camada limite térmica δ_T , as partículas atinjam o valor tipicamente assumido de 99% da temperatura do fluido em corrente livre T_∞ . A camada limite térmica se refere a essa região, onde as partículas do fluido são aquecidas ou resfriadas devido a presença da superfície, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Ilustração da camada limite térmica.



Adaptado de Incropera (2008, p. 350).

2.3 ENTALPIA, CALOR ESPECÍFICO A PRESSÃO CONSTANTE E CAPACIDADE CALORÍFICA

A entalpia é uma propriedade que estima a máxima energia presente em um sistema termodinâmico. Segundo Çengel (2006), a entalpia h é definida como a energia interna do sistema mais o produto do volume V pela pressão, conforme a Equação 12.

$$h = i + pV \quad (12)$$

O calor específico a pressão constante C_p , de acordo com Çengel (2006), é definido pela Equação 13, sendo a variação da entalpia dividida pela variação da temperatura de uma substância, mantendo-se a pressão constante. De outra maneira, a propriedade pode ser descrita como a quantidade de calor que deve ser adicionado a

uma unidade de massa de substância para causar um aumento de uma unidade na temperatura, mantendo-se a pressão constante durante o aquecimento

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (13)$$

O produto do calor específico a pressão constante pela densidade, mostrado na Equação 14, é definido como a capacidade calorífica volumétrica C_v , medida em $J/m^3 \cdot K$. Essa propriedade mede a capacidade de uma substância em armazenar energia, relacionando a quantidade de calor Q fornecida e a variação de temperatura T de um corpo (Incropera, 2008).

$$C_v = \rho C_p = \frac{dQ}{dT} \quad (14)$$

2.4 CONDUTIVIDADE TÉRMICA, VISCOSIDADE E DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Segundo Çengel (2006), a condutividade térmica denotada por k , é uma propriedade medida experimentalmente que estima a capacidade de um material em conduzir calor. Materiais como cobre e prata, que são bons condutores de calor, têm altos valores de condutividade térmica. Materiais como borracha, madeira e isopor são maus condutores de calor, e, portanto, têm valores de k baixos. A condutividade térmica é utilizada na Lei de Fourier para condução de calor, mostrada na Equação 15, a qual indica que a condução de calor Q_{cond} em uma direção é proporcional ao gradiente de temperatura nessa direção.

$$Q_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \quad (15)$$

Grande parte das substâncias possui a mesma condutividade térmica em todas as suas direções, entretanto, em alguns materiais denominados como anisotrópicos, há uma variação. Assim, em materiais anisotrópicos, como por exemplo baterias de íons-lítio, a condução de calor varia dependendo da direção em que ocorre a troca de calor.

A viscosidade absoluta μ é uma propriedade que representa a resistência de um fluido ao movimento, indicando, portanto, a resistência interna de um fluido para se deformar quando é aplicado sobre ele uma tensão de cisalhamento (FOX; MCDONALDS 2010). A viscosidade cinemática ν , também chamada de difusividade de momento, é dada pela razão entre a viscosidade absoluta de um fluido e a sua densidade, conforme a Equação 16.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (16)$$

A difusividade térmica de um fluido, representada pela Equação 17, é dada pela razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica. Portanto, é uma propriedade que mede a capacidade de um material em conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazenar energia térmica (INCROPERA, 2008).

$$\alpha = \frac{k}{C_v} \quad (17)$$

Quando submetidos a uma nova condição de temperatura, materiais com grande difusividade térmica tendem a entrar em equilíbrio térmico com o ambiente rapidamente, enquanto materiais com baixa difusividade térmica demoram mais para atingir este estado.

2.5 DEFINIÇÃO DE ALGUNS NÚMEROS ADIMENSIONAIS

O número de Prandtl, denotado por Pr , é um número adimensional dado pela razão entre a viscosidade cinemática ν e a difusividade térmica α de um fluido, conforme a Equação 18.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (18)$$

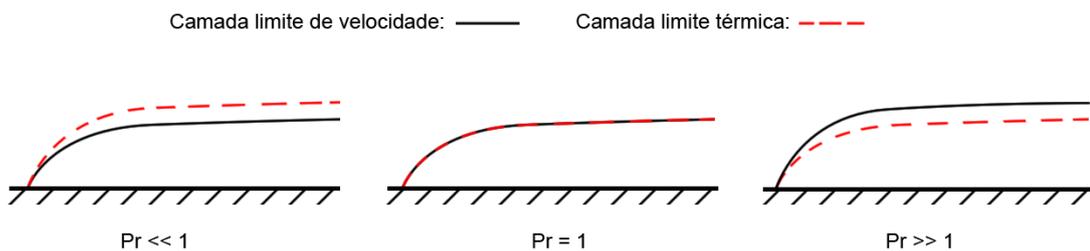
O número de Prandtl fornece uma medida da eficácia relativa entre o transporte de momento e calor por difusão, influenciando crescimento relativo entre a camada limite

de velocidade e a camada limite térmica. Pode-se mostrar que a razão entre as espessuras das camadas limites depende deste número adimensional, na forma descrita pela Equação 19, onde m representa um expoente positivo (INCROPERA, 2008).

$$\frac{\delta}{\delta_T} \approx Pr^m \quad (19)$$

De acordo com a Figura 10, para valores de $Pr = 1$, o transporte de calor e momento por difusão são comparáveis. Em $Pr \ll 1$, a difusividade térmica excede a difusividade de momento, caracterizando um fluido altamente condutor de calor, onde a espessura da camada limite térmica é maior que a da camada limite de velocidade. Em $Pr \gg 1$, a difusividade de momento é maior e, portanto, a camada limite de velocidade tem maior espessura.

Figura 10 – Perfil da camada limite de acordo com o número de Prandtl.



Fonte: Autor (2023).

O número de Reynolds dado pela Equação 20, onde L é um comprimento característico e U uma velocidade característica do escoamento, é um parâmetro adimensional que representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas. O parâmetro é frequentemente utilizado para caracterizar se o escoamento é laminar ou turbulento. Se o número de Reynolds for pequeno, as forças de inércia são insignificantes em relação às forças viscosas, descrevendo então um escoamento de comportamento laminar. Para um grande número de Reynolds, as forças de inércia são consideráveis, podendo fazer com que o escoamento tenha caráter turbulento.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (20)$$

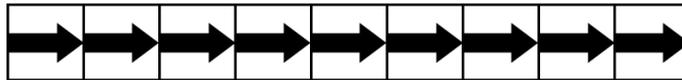
Em simulações numéricas transientes, o número de Courant é um parâmetro adimensional que mede a taxa na qual uma informação é transportada dentro da malha computacional durante um intervalo de tempo. Para um domínio 1D na direção x , o número de Courant denotado por Co , é definido pela Equação 21.

$$Co = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (21)$$

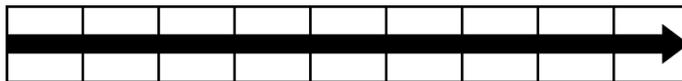
Onde Δt se refere ao tamanho de um intervalo de tempo e Δx o comprimento de cada célula da malha computacional (CFD Direct, 2023). Conforme a Figura 11, o número de Courant deve ser mantido idealmente abaixo de 1, fazendo com que a informação não ultrapasse completamente uma célula vizinha após um único intervalo de tempo. Um número alto de Courant afeta a estabilidade e a confiabilidade dos resultados de uma simulação.

Figura 11 – Ilustração do efeito do número de Courant no transporte da informação sobre a malha computacional.

$Co = 1$: A informação passa por 1 elemento em um intervalo de tempo



$Co = 10$: A informação passa por 10 elementos em um intervalo de tempo



Fonte: Adaptado de Software Cradle Co (2019).

2.6 TAXA DE DESCARGA DE UMA BATERIA

A taxa de descarga de uma bateria é descrita pela taxa C , que mede como uma bateria é descarregada em relação à sua capacidade máxima. Uma bateria de capacidade de 10 Ah completamente carregada, sendo descarregada a taxa $1C$, deve fornecer 10 A em uma hora. A mesma bateria sendo descarregada a uma taxa $2C$, deve fornecer 20 A de corrente, porém em 30 minutos. A Tabela 1 demonstra o tempo de descarga de uma bateria, para diferentes taxas C .

Tabela 1 – Taxa de descarga C de uma bateria.

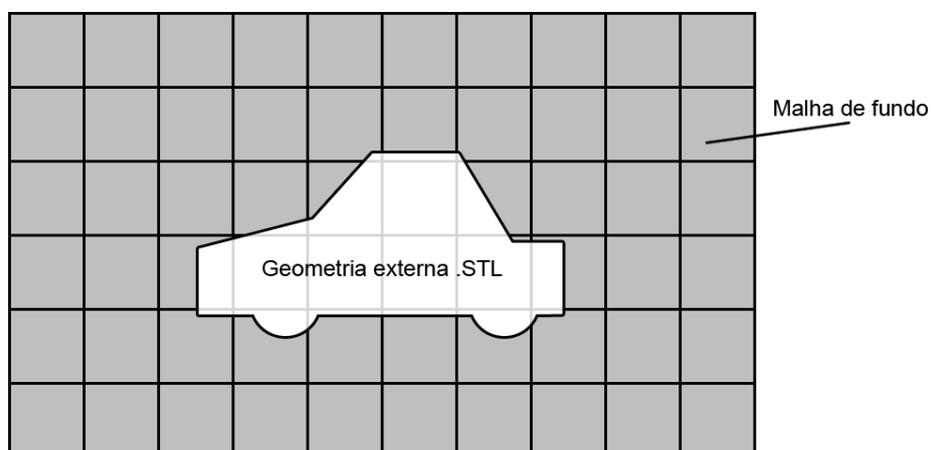
Taxa C	Tempo de descarga
10C	6 minutos
5C	12 minutos
2C	30 minutos
1C	1 hora
0,5 C	2 horas
0,2 C	5 horas
0,1 C	10 horas

Fonte: Power Sonic (2023).

2.7 GERAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL POR MEIO DA FERRAMENTA *SNAPPYHEXMESH*

A malha computacional para os dois casos de sistema de resfriamento líquido estudados foi gerada na ferramenta interna do OpenFOAM *snappyHexMesh*. A ferramenta gera malhas tridimensionais hexaédricas a partir de geometrias externas de superfície trianguladas no formato *Stereolithography* (STL). Antes de executar o *snappyHexMesh*, o usuário deve criar uma malha de fundo com células hexaédricas, de modo a preencher toda a região da superfície STL exportada, conforme o exemplo da Figura 12. A criação da malha de fundo pode ser feita pela ferramenta interna do OpenFOAM *blockMesh*.

Figura 12 - Geração de uma malha de fundo antes de executar o *snappyHexMesh*.



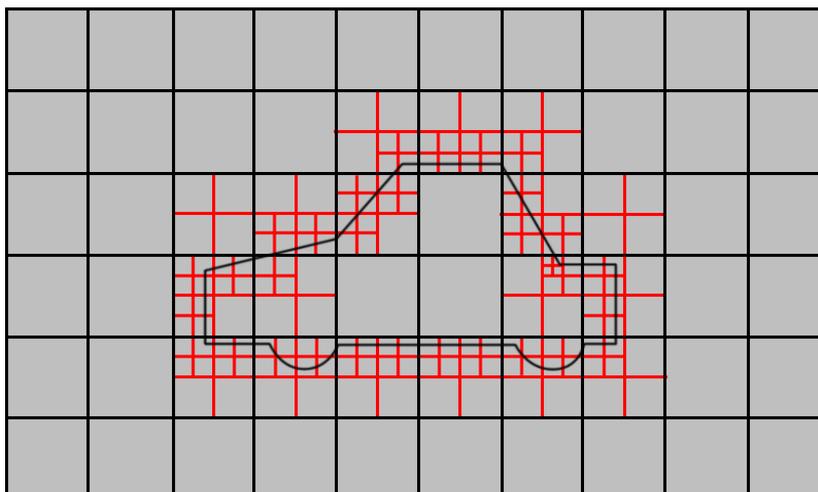
Fonte: Adaptado de OpenCFD LTD (2023).

Segundo o manual de usuário do OpenFOAM (OpenCFD LTD, 2023), para o bom funcionamento do *snappyHexMesh*, é importante que a malha externa:

- Seja puramente hexaédrica;
- A proporção das células que compõe a malha externa deve ser de aproximadamente 1. Ou seja, as células devem ter aproximadamente o mesmo tamanho em todas as direções. Caso contrário, podem haver falhas no processo de criação da malha computacional;
- Pelo menos uma aresta da malha externa deve intersectar uma aresta da malha da geometria STL.

Havendo a malha externa preparada, o usuário deve então configurar parâmetros importantes no dicionário da ferramenta, como por exemplo o número máximo de células da malha, níveis de refino para cada região e número de células entre as regiões. Caso seja necessário, o usuário pode especificar um refino específico para arestas, melhorando a qualidade da malha em quinas e cantos vivos. Feita a configuração, a ferramenta pode ser executada. A primeira etapa de execução, ilustrada na Figura 13, é um processo de divisão de células, de modo a contornar a superfície STL de acordo com os níveis de refino descritos pelo usuário.

Figura 13 – Etapa de divisão de células no *snappyHexMesh*.

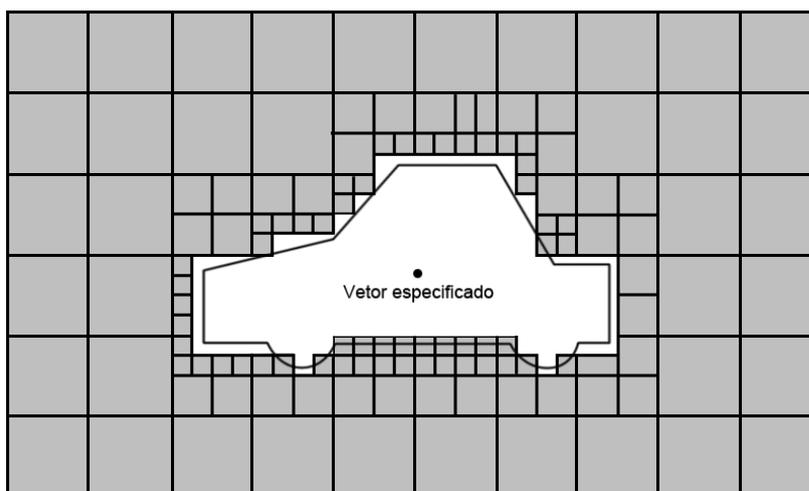


Fonte: Adaptado de OpenCFD LTD (2023).

Após a divisão de células, começa a ser feito um processo de remoção de células. A remoção de células requer que uma ou mais regiões sejam totalmente

delimitadas por uma superfície. A região na qual as células serão removidas é identificada por um vetor de localização dentro dessa região. Se mais de 50% do volume de uma célula ficar dentro da região a ser removida, então a célula será removida. O processo é ilustrado na Figura 14.

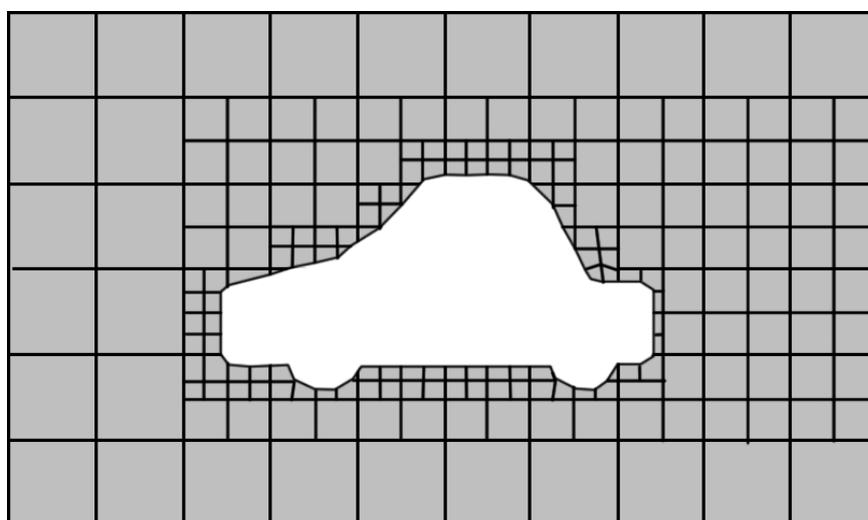
Figura 14 – Processo de remoção de células no *snappyHexMesh*.



Fonte: Adaptado de OpenCFD LTD (2023).

A última etapa no processo de criação da malha consiste na movimentação dos vértices das células para intersectar o formato da superfície STL, removendo as irregularidades dos processos anteriores. A Figura 15 ilustra este processo.

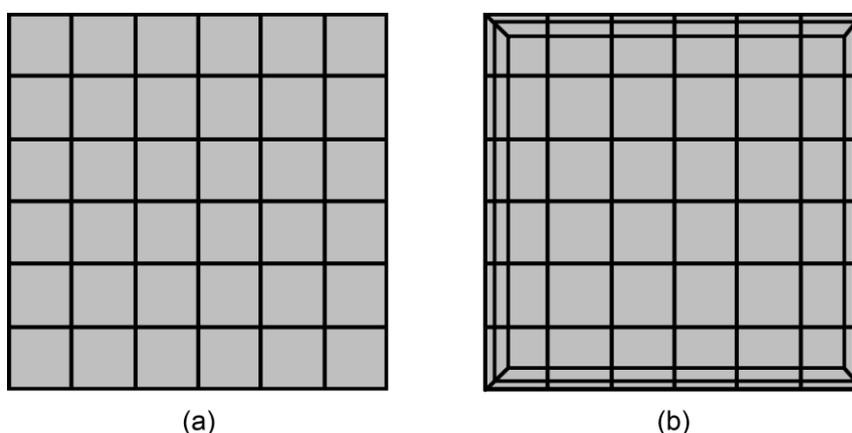
Figura 15 – Processo de movimentação dos vértices para acompanhar a superfície no *snappyHexMesh*.



Fonte: Adaptado de OpenCFD LTD (2023).

Existe ainda uma opção adicional final, para a criação de finas camadas ao redor da superfície, denominadas como camadas prismáticas. A Figura 16 mostra esse processo, onde a malha (a) é gerada normalmente, enquanto a malha (b) é gerada com a adição de camadas. Neste processo, o usuário deve descrever a quantidade de camadas e como será a sua forma de crescimento. Em simulações de fluidodinâmica computacional, essas camadas auxiliam na captação das camadas limite de velocidade e térmica na malha computacional, pois as células de menor espessura próximas a parede conseguem registrar o desenvolvimento dos gradientes de temperatura e a velocidade zero do fluido na parede com maior acurácia.

Figura 16 – Processo de adição de camadas prismáticas na malha computacional.



Fonte: Autor (2023).

Embora contribuam para a melhor resolução dos resultados da simulação, a adição de camadas prismáticas aumenta consideravelmente o tamanho da malha computacional. O *snappyHexMesh* também possui limitações na criação de camadas em malhas com quinas e ângulos retos.

Tanto a acurácia de uma solução quanto o seu custo computacional dependem do nível de refino da malha. Atualmente mais de 50% do tempo gasto na indústria em projetos CFD são dedicados a definição da geometria do domínio e geração de malha. Portanto, esta é uma etapa crucial para a simulação numérica. Malhas otimizadas geralmente não são uniformes, havendo regiões mais refinadas em áreas onde ocorrem grandes alterações nas variáveis de interesse e mais grosseiras em regiões com relativamente pouca mudança (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3. METODOLOGIA

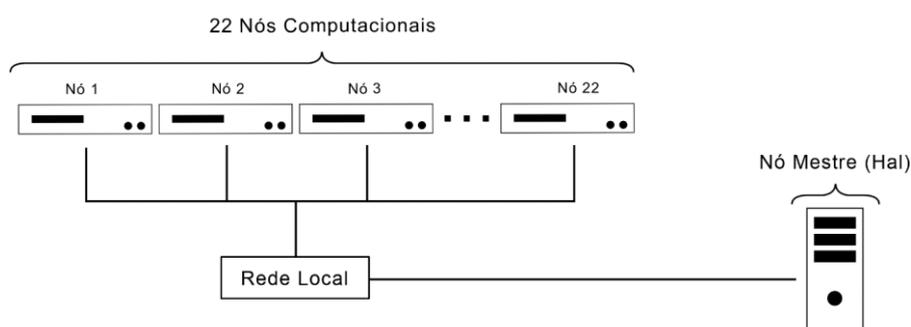
Nesta seção serão retratados os dois estudos utilizados como base para a modelagem de um sistema de resfriamento líquido de baterias, bem como as principais características do software para gerar a malha computacional e simular numericamente cada caso.

3.1 CLUSTER COMPUTACIONAL

De modo a realizar as simulações numéricas em um espaço de tempo viável, este estudo utilizou máquinas remotas do Laboratório de Computação Científica (LabCC) localizado no Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O LabCC fornece aos usuários um cluster computacional, que corresponde a um grupo de computadores vinculados trabalhando em conjunto, formando um único sistema e possibilitando o processamento em larga escala de uma tarefa. O cluster utilizado é do tipo Beowulf, onde uma série de computadores tradicionais, denominados como nós, são interligados através de uma rede local (MELLO, 2011).

Atualmente o cluster do LabCC possui 23 nós, sendo que um deles, denominado hal, é utilizado como nó mestre. Basicamente todas as tarefas passam primeiramente pelo nó mestre, que faz requisições e envia tarefas para os outros nós, denominados como nós computacionais, responsáveis pelo processamento de dados. A Figura 17 e a Tabela 2 mostram, de forma simplificada, a arquitetura e as especificações do Cluster utilizado.

Figura 17 - Arquitetura Cluster Beowulf do Laboratório de Computação Científica.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 2 - Especificação do Cluster do Laboratório de Computação Científica.

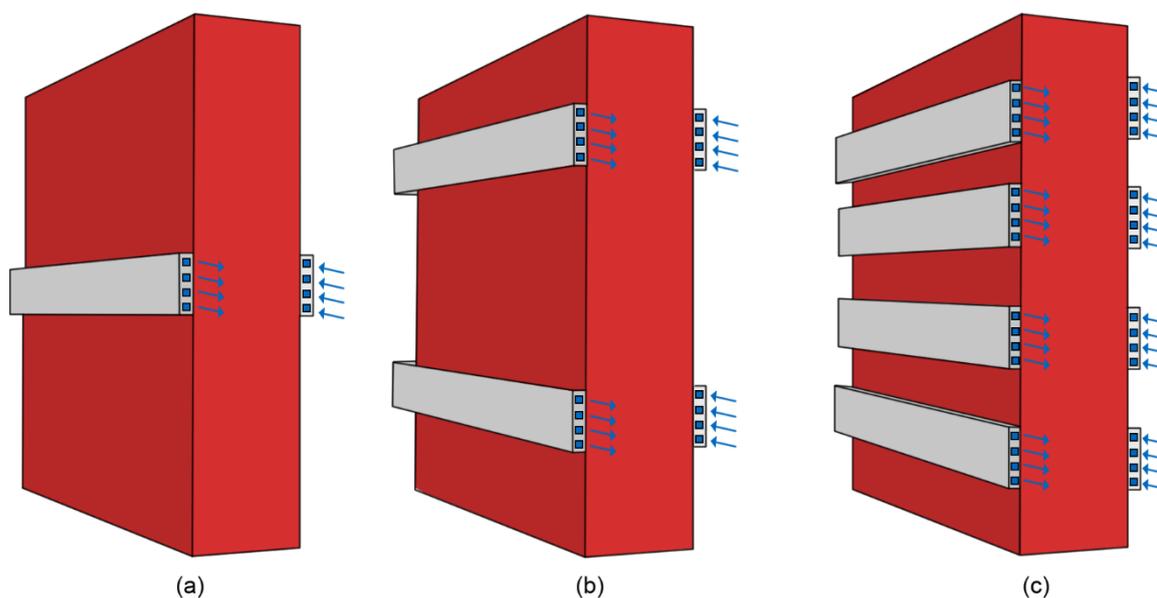
Número de Processadores por Nó	2
Modelo do Processador	Intel® Xeon® CPU E5-2640 v4
Frequência do Processador	2.40GHz
Número de Cores por Processador	10
Memória RAM por Nó	128 GB
Armazenamento	1 TB

Fonte: Laboratório de Computação Científica da UFSC Campus Joinville (2023).

3.2 CASO 1

O primeiro estudo foi feito a partir do sistema de resfriamento líquido modelado por Lan et al. (2016). O caso consiste em uma bateria retangular, envolta por mini canais de seção quadrada, onde ocorre o escoamento de fluido através de uma bomba. Foram simuladas as três configurações de disposição de canais ilustradas na Figura 18.

Figura 18 – Diferentes disposições de canais do estudo de Lan et al. (2016).



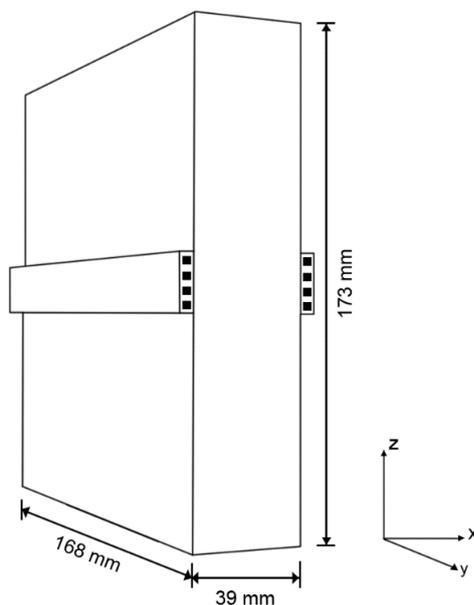
Fonte: Autor (2023).

O caso (a) consiste em uma placa fria, fazendo o contato e troca de calor com a bateria, com 4 mini canais em seu interior. O caso (b) possui duas placas frias de 4 mini canais e por fim, o caso (c) possui quatro placas frias de 4 mini canais.

Conforme apresentado nas Figuras 19 e 20, a bateria possui dimensões 168x39x173 mm e os mini canais, de seção quadrada, possuem 3 mm de lado e espessura

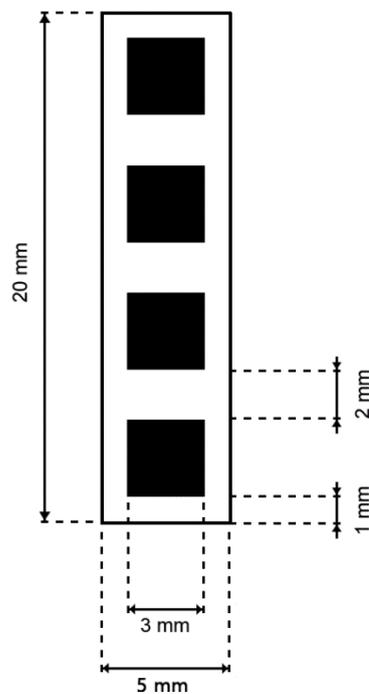
de 1 mm entre eles. Os canais são posicionados de forma simétrica, mantendo a mesma distância entre eles, de acordo com a Figura 21.

Figura 19 – Dimensões da bateria para o Caso 1.



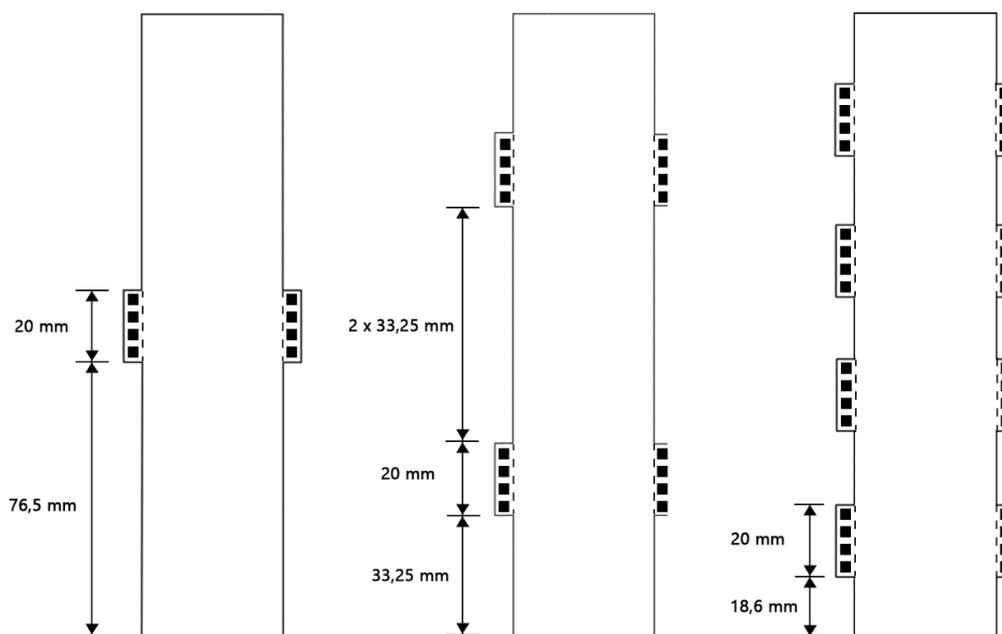
Fonte: Autor (2023).

Figura 20 – Dimensões dos mini canais para o Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 21 – Dimensões para as simulações do Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

3.2.1 Parâmetros utilizados

A bateria é do tipo íons de lítio, as placas frias são de alumínio e fluido que escoia nos mini canais é água. A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas para cada um dos materiais que compõe o sistema de resfriamento, a 300 K.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais do sistema de resfriamento utilizadas por Lan et al (2016).

Propriedade	Bateria de íons lítio	Alumínio (placa fria)	Água
k [W/mK]	(34; 3,4; 34)	238	0,6
ρ [kg/m ³]	1700	2700	997
C_p [J/kgK]	830	900	4182
Pr	-	-	6,12

Fonte: Autor (2023).

Por ser um material anisotrópico, a condutividade térmica da bateria não é igual para todas as direções, portanto, foi especificada a sua condutividade para as coordenadas x, y e z respectivamente. A bateria para este caso possuía capacidade de 55 Ah, foi descarregada a taxa 1C (3600 segundos) e forneceu uma taxa de geração de calor de 7,6 W, de acordo com Lan et al. (2016). A fonte de calor interna da bateria era constante no tempo e o calor gerado era distribuído uniformemente.

3.2.2 Condições de contorno

Para a modelagem do caso, devem ser definidas as condições iniciais, condições de contorno para a interface entre as regiões e também a vazão de fluido. De acordo com Lan et al. (2016), inicialmente todo o sistema foi considerado em equilíbrio térmico a 27°C (300 K) e a pressão atmosférica. A partir do início da simulação, a bateria começa a aquecer a uma taxa de 7,6 W e a água é bombeada para o interior dos mini canais a uma vazão fixada em 0,05 L/min, resultando em uma velocidade de escoamento média de 0,023 m/s. Como o número de Reynolds é 77,47 o escoamento será considerado como laminar. Não será considerada a troca de calor entre a bateria e a placa fria com o ambiente, portanto haverá uma simplificação, assumindo um isolamento do sistema com ar externo. A Tabela 4 ilustra as condições de contorno assumidas.

Tabela 4 – Condições de contorno para o Caso 1.

Região	Condição de contorno
Entrada de água nos mini canais	Velocidade prescrita, $U = 0,023$ m/s; Temperatura prescrita, $T = 300$ K.
Saída de água nos mini canais	Pressão atmosférica, $p = 101325$ Pa
Interface água/placa fria	Velocidade zero nas paredes; Transferência de calor entre as regiões;
Interface placa fria/bateria	Transferência de calor entre as regiões;

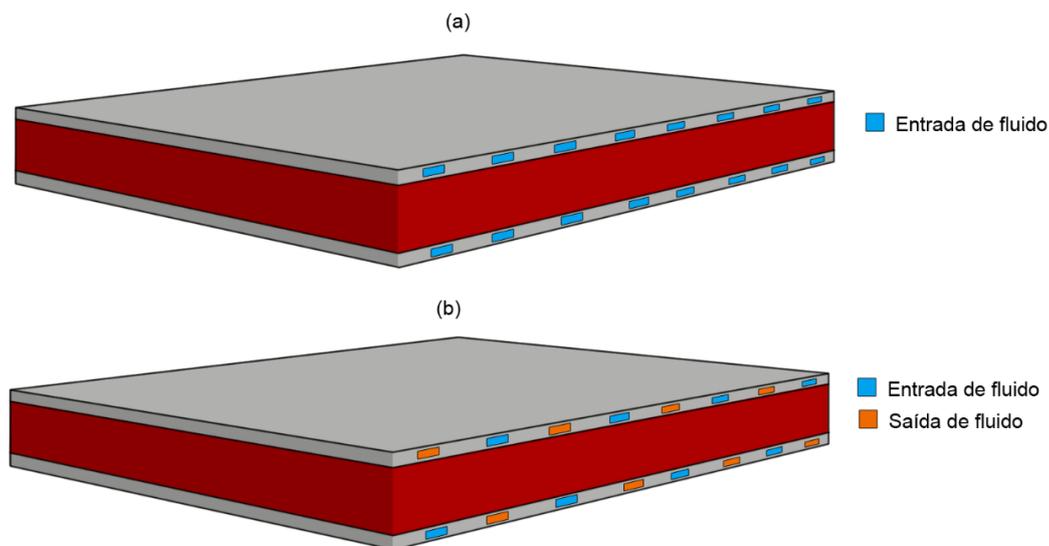
Fonte: Autor (2023).

3.3 CASO 2

O segundo estudo foi feito a partir do sistema de resfriamento líquido modelado por Liu et al. (2019). O caso consiste em uma bateria retangular, ensanduichada entre duas placas frias, de modo a garantir a mesma transferência de calor na superfície superior e inferior. Foram consideradas duas formas de escoamento de fluido para o estudo, conforme mostrado na Figura 22. O caso (a) consiste em um escoamento do tipo corrente paralela, onde todas as entradas de fluidos estão no mesmo lado da placa fria. O caso (b) consiste no escoamento do tipo

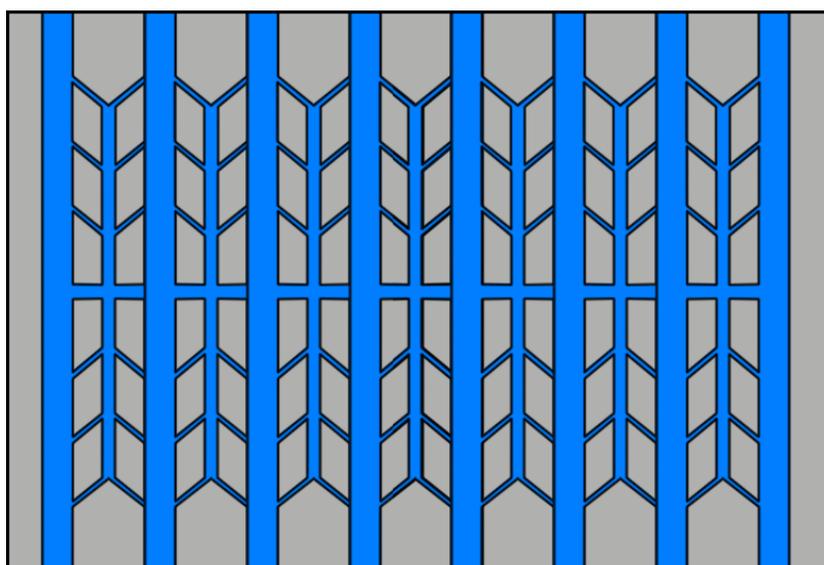
contracorrente, onde se tem entrada e saída de fluidos alternando em um lado da placa fria. As placas frias possuem oito mini canais cada, totalizando 16 mini canais, os quais estão conectados entre si por meio de uma estrutura de árvore, conforme a Figura 23.

Figura 22 – Geometria do segundo caso de estudo. Sendo (a) o modelo de corrente paralela e (b) o modelo de contracorrente.



Fonte: Autor (2023).

Figura 23 – Estrutura em formato de árvore dos canais internos da placa fria.



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2019).

3.3.1 Parâmetros utilizados

A bateria é do tipo íons de lítio e as placas frias são de alumínio, onde escoam água nos minis canais. A Tabela 5 apresenta as propriedades físicas para cada um dos materiais que compõe o sistema de resfriamento, a 298 K.

Tabela 5 – Propriedades dos materiais do sistema de resfriamento utilizadas por Liu et al. (2019).

Propriedade	Bateria de íons lítio	Alumínio (placa fria)	Água
k [W/mK]	(1,02; 1,02; 1,06)	202,4	0,6
ρ [kg/m ³]	2069,6	2719	998,2
C_p [J/kgK]	1423,45	871	4182
Pr	-	-	6,07

Fonte: Autor (2023).

Da mesma forma que a bateria do Caso 1, a bateria do Caso 2 possui uma condutividade térmica anisotrópica, portanto, foram especificados valores para as direções x, y e z. A bateria considerada para este caso possui capacidade de 10 Ah e foi descarregada a taxa 4C (15 minutos). O método teórico utilizado para estimar a geração de calor da bateria durante o funcionamento foi elaborado por Bernardi (1985), com a suposição de que a fonte de calor interna da bateria era constante e o calor gerado era distribuído uniformemente. Desta forma, a geração de calor é calculada por,

$$Q = I \left[(E - E_{oc}) - T_{ba} \frac{dE_{oc}}{dT_{Ba}} \right], \quad (22)$$

onde I é a corrente da bateria, E a tensão de trabalho, E_{oc} a tensão de circuito aberto e T_{Ba} a temperatura da bateria. A tensão de trabalho representa o potencial elétrico entre os terminais da bateria durante o seu funcionamento, quando está passando corrente elétrica no circuito. A tensão de circuito aberto mede o potencial elétrico entre os terminais da bateria quando ela está desconectada de qualquer circuito, não havendo a passagem de corrente elétrica.

A Tabela 6 apresenta os dados utilizados para o cálculo da geração de calor da bateria, especificados por Liu et al. (2019).

Tabela 6 – Parâmetros da bateria para o Caso 2.

Parâmetro	Valor
I	40 A
E	3,7 V
E_{OC}	3 V
T_{Ba}	298 K
dE_{OC}/dT_{Ba}	0,25 mV/K

Fonte Liu et al. (2019).

Substituindo os dados da tabela 6 na Equação 22, encontra-se que a bateria gera 25,02 W de calor durante o seu descarregamento a taxa 4C.

3.3.2 Condições de contorno

De acordo com Liu et al. (2019), inicialmente todo o sistema foi considerado em equilíbrio térmico a 25°C (298 K) e pressão atmosférica. A partir do início da simulação, a bateria começa a aquecer a uma taxa de 25,02 W e a água é bombeada no interior dos mini canais, com vazão e velocidade especificadas na Tabela 7. Da mesma forma que o Caso 1, o escoamento é laminar ($Re = 24,84$) e não será considerada a troca de calor entre a bateria e a placa fria com o ambiente externo. A Tabela 8 lista as condições de contorno assumidas.

Tabela 7 – Vazões de água considerados para o Caso 2.

Vazão da bomba [L/min]	Velocidade da água na entrada dos mini canais [m/s]	Re do escoamento
0,06	0,0156	24,84

Fonte Liu et al. (2019).

Tabela 8 – Condições de contorno para o Caso 2.

Região	Condição de contorno
Entrada de água nos mini canais	Velocidade prescrita, $U = 0,0156$ m/s; Temperatura prescrita, $T = 298$ K.
Saída de água nos mini canais	Pressão atmosférica, $p = 101325$ Pa
Interface água/placa fria	Velocidade zero nas paredes; Transferência de calor entre as regiões;
Interface placa fria/bateria	Transferência de calor entre as regiões;

Fonte Autor (2023).

3.3.3 Resultados experimentais

Além de resolver o sistema de resfriamento numericamente, Liu et al. (2019) também replicou o caso experimentalmente para o modelo de escoamento paralelo, conforme a Figura 25.

Figura 25 – Modelo experimental de Liu et al. (2019).

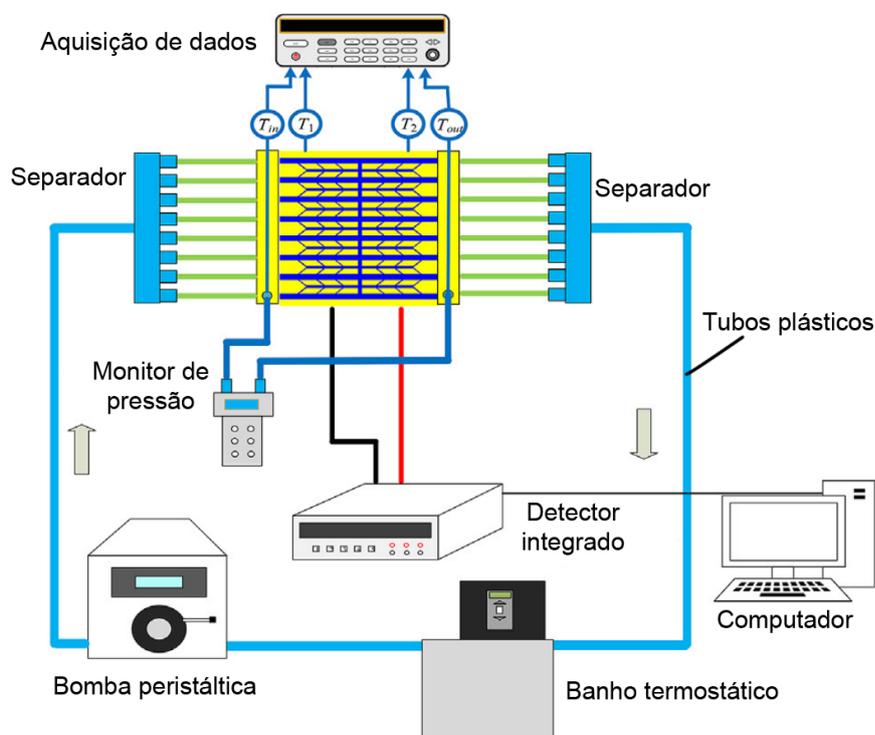


Fonte: Liu et al. (2019).

A Figura 26 mostra um diagrama esquemático da modelagem experimental. A água é mantida em 25°C por meio de um banho termostático e então, por meio de uma bomba peristáltica, é bombeada a vazão de 0,06 L/min para dentro de tubos plásticos. Na próxima etapa, o escoamento de água é segmentado em 16 partes uniformemente por meio de um separador, fazendo com que o fluido entre a uma velocidade de 0,0156 m/s nos mini canais dentro das placas frias. Após absorver o

calor gerado pelo processo de descarregamento da bateria, o fluido retorna novamente para o banho termostático e é resfriado. A taxa de descarga da bateria é controlada por meio de um detector integrado a um computador. Também foram utilizados medidores de pressão digital e termopares para verificar a pressão e temperatura da água na entrada e saída do sistema. Para diminuir a troca de calor com o ambiente externo, o sistema foi encapsulado com um material isolante. Após o sistema entrar em equilíbrio, os dados relativos à pressão e temperatura são gravados.

Figura 26 – Diagrama esquemático do modelo experimental para o Caso 2.



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2019).

3.4 MODELO DE SIMULAÇÃO

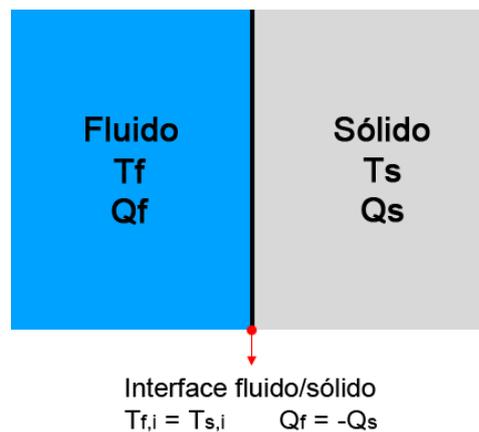
Esta seção apresenta as características do solver, malha computacional e esquemas numéricos utilizados para realizar as simulações numéricas dentro do software OpenFOAM.

3.4.1 Solver

Para realizar a simulação de ambos os casos, foi utilizado o solver *chtMultiRegionFoam*, capaz de resolver problemas para escoamentos laminares ou turbulentos, em regime permanente ou transiente, com transferência de calor conjugada entre as regiões, podendo ainda considerar efeitos de reações químicas, empuxo e radiação. O solver soluciona as equações de conservação de massa, energia e momento de forma segregada, ou seja, as equações para cada variável que caracteriza o sistema são resolvidas sequencialmente, onde a solução da equação anterior é inserida na equação subsequente.

O solver é compressível, portanto, a densidade não é uma variável constante no tempo. Desta forma, uma equação de pressão é usada para estabelecer a conexão entre a equação da conservação de quantidade de movimento e a equação da continuidade. Para resolver as regiões de interface sólido/fluido, considera-se que no ponto de contato na interface ambas as regiões possuem a mesma temperatura e que o fluxo de calor que entra em um lado da interface deve ser igual ao fluxo de calor que sai da outra, conforme a Figura 27.

Figura 27 – Representação da interface fluido/sólido.



Fonte: Autor (2023).

T_f representa a temperatura do fluido e T_s a temperatura do sólido. Na região da interface, $T_{f,i}$ e $T_{s,i}$ representam a temperatura do fluido e do sólido, Q_f o fluxo de calor entrando na região do fluido e Q_s o fluxo de calor entrando na região sólida. Caso a radiação seja negligenciável, então a interface na região pode ser escrita no formato

da Equação 23, onde n representa a direção normal a superfície, k_s a condutividade térmica do sólido e k_f a condutividade térmica do fluido.

$$k_f \frac{dT_f}{dn} \Big|_{interface} = -k_s \frac{dT_s}{dn} \Big|_{interface} \quad (23)$$

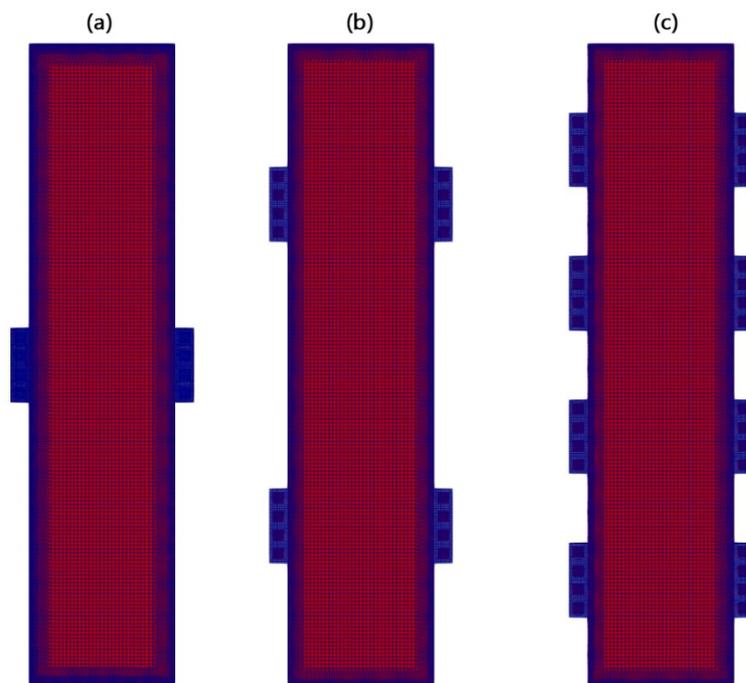
3.4.2 Geração da malha computacional

Para a criação de uma malha computacional otimizada de um sistema de resfriamento líquido de baterias, este estudo seguiu os seguintes princípios:

- Maior refino da malha na região do escoamento de fluido, onde estão as maiores variações em velocidade, temperatura e pressão;
- Menor refino da malha na região da bateria, onde há pouca mudança nos valores das variáveis e só ocorre troca de calor por condução;
- Evitar grandes saltos de refino na malha, de modo a melhorar a convergência dos resultados da simulação e a transferência de informação entre as células da malha computacional;

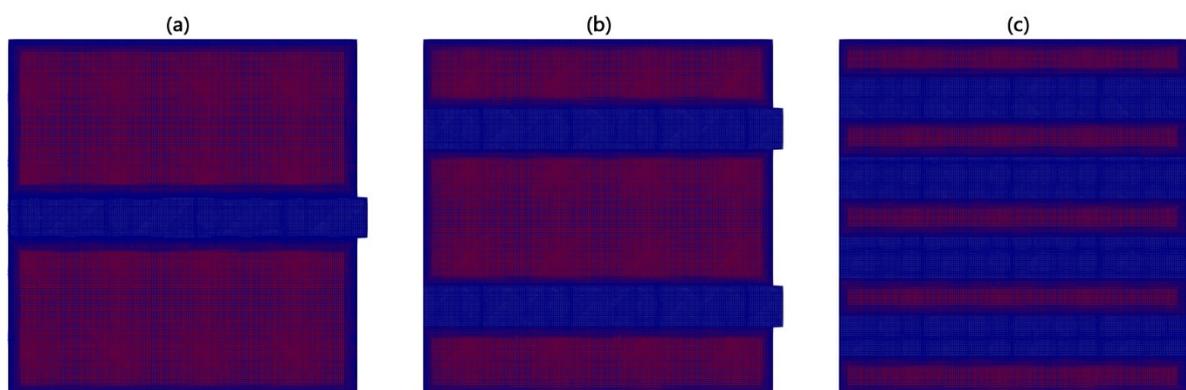
As Figuras 28 e 29 mostram as malhas computacionais, geradas através do *snappyHexMesh*, utilizadas para realizar as simulações numéricas do Caso 1 e comparar com os resultados obtidos por Lan et al. (2016). A parte (a) representa o modelo de 1 canal, (b) dois canais e (c) 4 canais. A Tabela 9 mostra o número de células presentes nas malhas de cada modelo e o tempo de simulação em regime permanente, utilizando 2 nós no cluster computacional do LabCC.

Figura 28 - Vista frontal da malha computacional para os modelos do Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 29 – Vista lateral da malha computacional para os modelos do Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

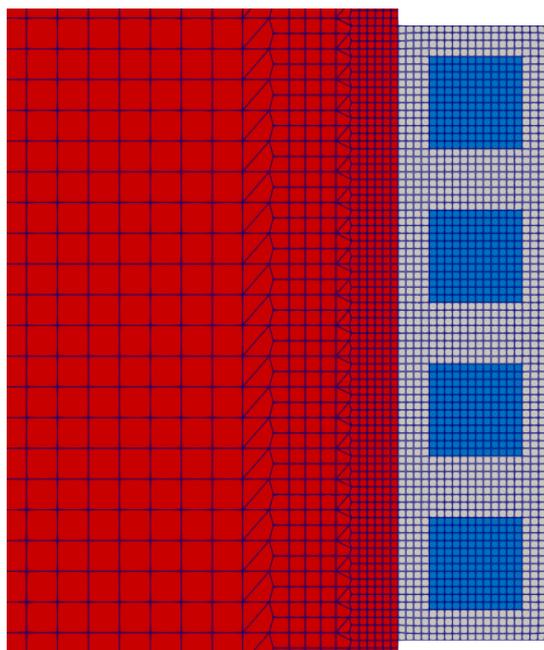
Tabela 9 – Número de células para as malhas geradas no Caso 2.

Modelo	Número de células na malha computacional	Tempo de simulação (Regime permanente)
1 canal	4.547.893	8,6 h
2 canais	7.305.459	23,4 h
4 canais	13.194.657	3 d 8 h

Fonte: Autor (2023).

Foram utilizados diferentes níveis de refinamentos para as regiões da bateria, placa fria e água. A bateria, onde existe uniformidade nos valores das variáveis de interesse possui o menor nível de refinamento. Já para a região do escoamento de água, foi feito um refinamento maior. A Figura 30 detalha a região de entrada dos mini canais.

Figura 30 – Detalhe da malha na região de entrada dos mini canais para o Caso 1.

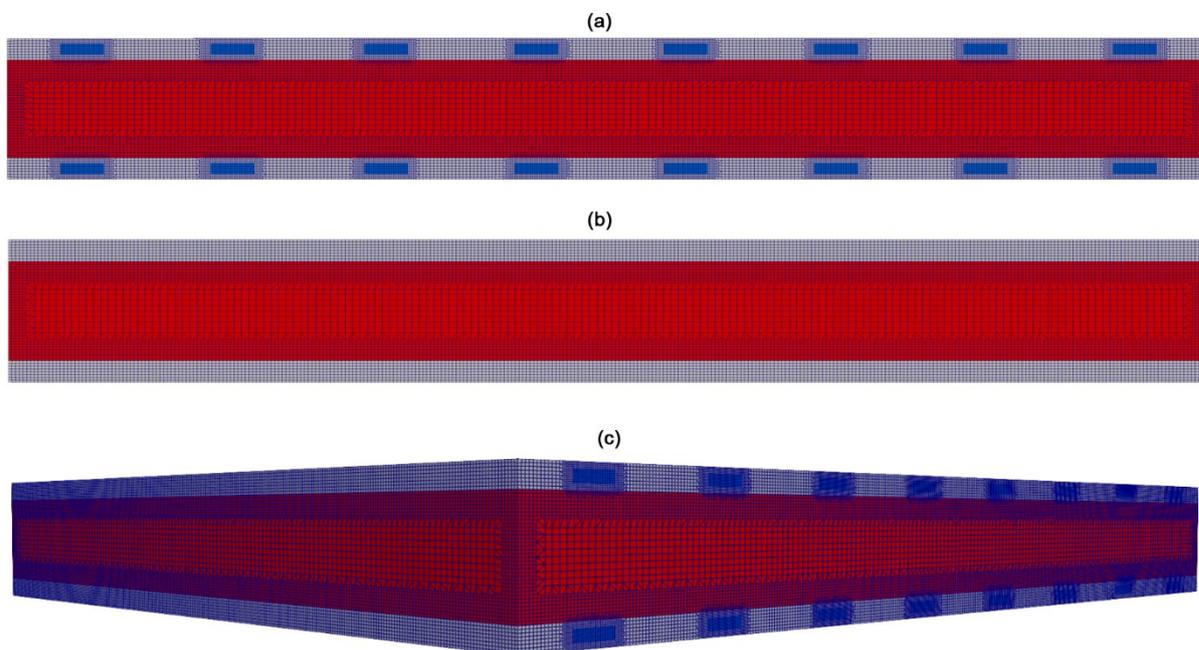


Fonte: Autor (2023).

Devido à natureza da geometria, com a presença de quinas e cantos vivos, não foi possível gerar camadas de elementos prismáticos adjacentes às paredes na região interna dos mini canais sem criar distorções na malha, prejudicando a sua qualidade. Pela limitação de poder computacional, as simulações para este caso foram feitas somente em regime permanente.

A Figura 31 mostra a malha computacional, gerada através do *snappyHexMesh*, utilizada para realizar as simulações numéricas do Caso 2, as quais foram feitas em regime permanente e transiente.

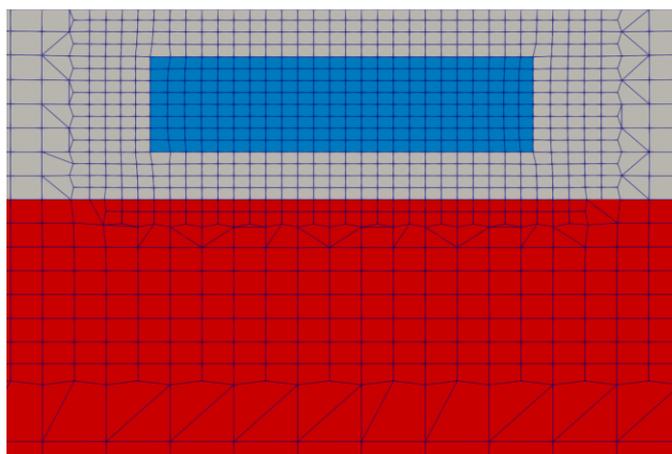
Figura 31 - Malha computacional para o Caso 2, (a) a vista frontal, (b) vista lateral e (c) em perspectiva.



Fonte: Autor (2023).

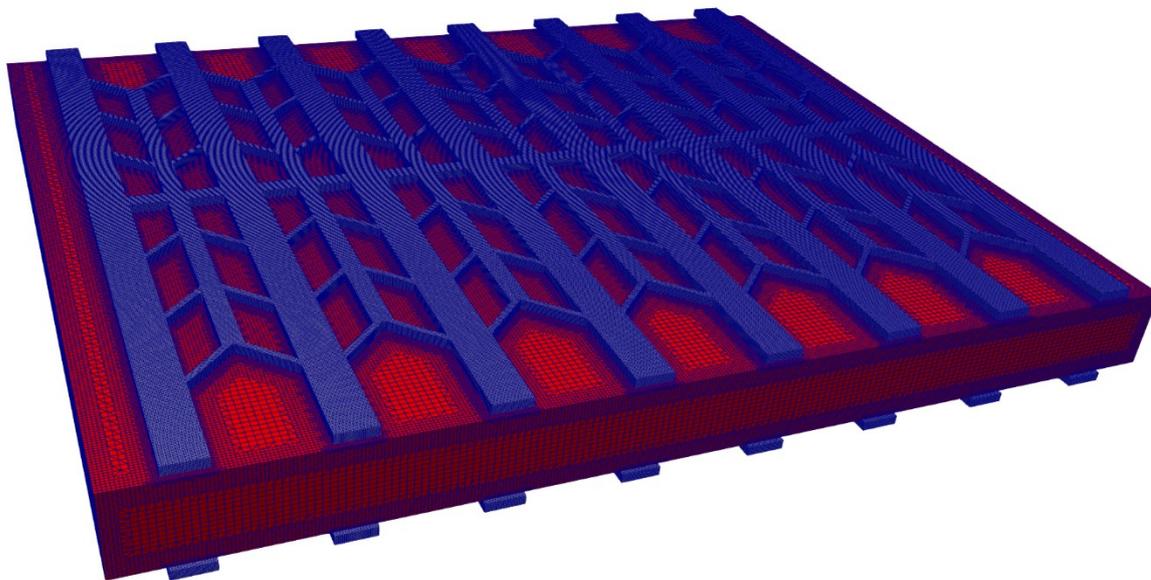
A Figura 32 mostra um corte, detalhando a região interna dos mini canais e a Figura 33 uma visão geral da malha nos canais em árvore.

Figura 32 – Detalhe na entrada de água dos mini canais.



Fonte: Autor (2023).

Figura 33 – Região interna dos canais em forma de árvore na malha computacional.



Fonte: Autor (2023).

A bateria, onde há uma menor diferença na distribuição dos valores das variáveis de interesse possui grau de refino 1, ou seja, possui o mesmo refino da malha base. Na região do escoamento de água, onde existe o desenvolvimento de uma camada limite de velocidade e térmica, se utilizou um grau de refino 3. A Tabela 10 contém mais informações sobre o refino presente na malha.

Tabela 10 - Grau de refino da malha para o Caso 2.

Região	Grau de refino	Número de células em 1 mm
Bateria	1	1,5
Placa fria	2	3
Água	3	6
Número de células da malha		8.593.578

Fonte: Autor (2023).

Devido à complexidade da geometria com a presença de muitos cantos vivos, não foi possível gerar as camadas de elementos prismáticos na região interna dos mini canais. Além disso, a limitação computacional para casos transientes, restringiu o nível de refino da malha computacional utilizada.

3.4.3 Esquemas numéricos

Em uma simulação numérica, o processo de discretização das equações consiste na conversão das equações diferenciais que governam a dinâmica do problema em um sistema de equações algébricas discretas, as quais podem ser resolvidas numericamente (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Devido a substituição da equação exata por uma equação simplificada, o processo de discretização induz erros que contaminam os resultados da simulação, portanto, os esquemas numéricos utilizados devem ser condizentes com o nível de complexidade do problema.

Uma derivada temporal $\partial\psi/\partial t$ de um campo escalar ψ , pode ser discretizada como uma diferença finita no tempo por intermédio de diferentes métodos numéricos. O método de Euler discretiza a derivada temporal a partir da diferença entre o campo calculado no tempo atual ψ e o campo calculado no tempo anterior ψ^0 , considerando um intervalo de tempo Δt , conforme a Equação 24.

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} \rightarrow \frac{\psi - \psi^0}{\Delta t} \quad (24)$$

Para as simulações deste estudo, utilizou-se o método Crank-Nicolson, o qual expressa as variáveis no ponto médio entre o tempo atual e tempo anterior, tornando o esquema de tempo de Euler um procedimento numérico de segunda ordem (CFD DIRECT, 2023). O método está descrito na Equação 25,

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} \rightarrow (1 + \lambda) \frac{\psi - \psi^0}{\Delta t} + \lambda[A|b]^0\psi^0, \quad (25)$$

onde $[A|b]^0\psi^0$ representa, na forma matricial, os termos discretizados (exceto a derivada temporal) do campo ψ , utilizando valores calculados no passo de tempo anterior. Por fim, λ corresponde a um coeficiente de compensação que oscila entre 0 e 1, fornecendo uma combinação entre os esquemas de Euler e Crank-Nicolson da seguinte forma:

- $\lambda = 0$: O esquema numérico se comporta puramente como o método de Euler.

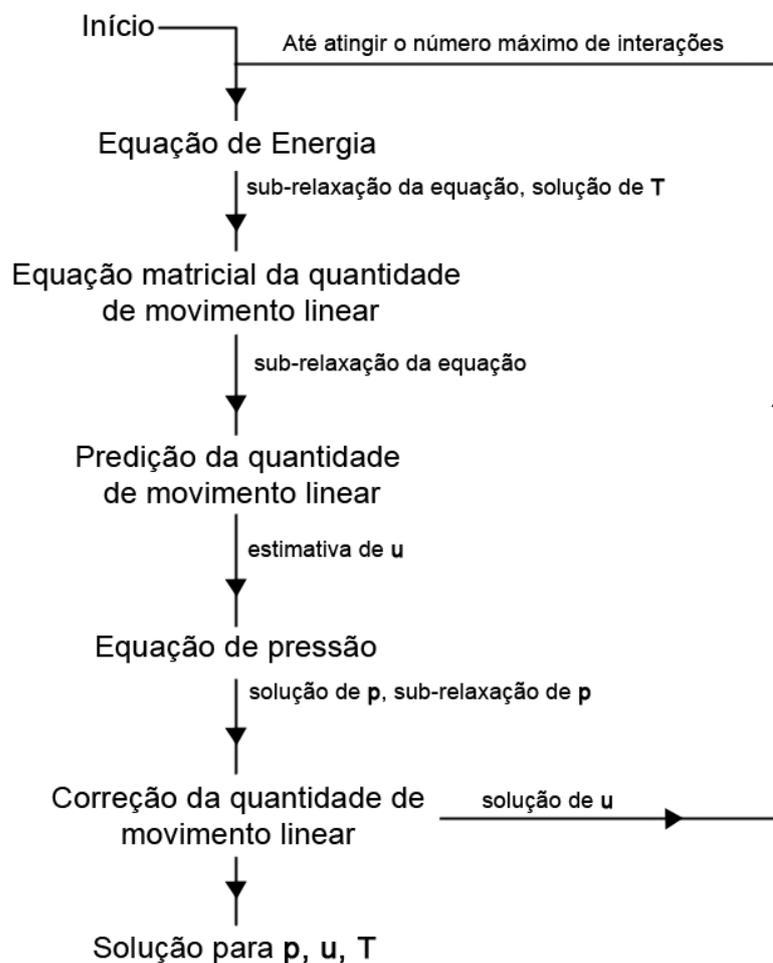
- $\lambda = 1$: O esquema numérico se comporta puramente como o método de Crank-Nicolson.

Neste estudo, foi utilizado um valor de $\lambda = 0,7$ fornecendo uma combinação entre os dois métodos. Em relação aos termos de divergente, utilizou-se o esquema de discretização de segunda ordem *upwind linear* e para os termos de gradiente, o esquema de primeira ordem *gauss linear*.

Além de discretizar as equações, também é necessário indicar um algoritmo para solucionar o acoplamento pressão-velocidade. Para os casos em regime permanente, onde as variáveis do escoamento param de mudar com o tempo, se utilizou o algoritmo Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE). Para a configuração do SIMPLE, o usuário deve especificar os fatores de relaxação, os quais limitam a variação dos valores de um campo ou de uma equação entre as iterações, por meio de uma técnica denominada como sub-relaxação. O algoritmo SIMPLE envolve uma sequência de iterações e irá terminar quando alcançar o número máximo de interações especificado pelo usuário (CFD Direct, 2023).

A estratégia de solução inicia com a construção de uma equação da energia, a qual é sub-relaxada e resolvida para a temperatura T . O valor de temperatura encontrado é utilizado para atualizar o valor da densidade por meio de uma equação de estado. Nas próximas etapas, é montada uma equação matricial para a quantidade de movimento linear, a qual será sub-relaxada e posteriormente solucionada para a velocidade u mediante uma predição da quantidade de movimento linear. Essa primeira aproximação do campo de velocidade obtida a partir da solução da equação de quantidade de movimento linear é utilizada para montar uma equação de pressão, a qual será solucionada para p . Por fim, o campo de pressão é sub-relaxado e utilizado para corrigir a velocidade por meio de uma equação de correção da quantidade de movimento linear. Caso não seja atingido o número máximo de iterações, o ciclo irá se repetir, conforme ilustrado de forma simplificada na Figura 34.

Figura 34 – Esquema de solução simplificado do algoritmo SIMPLE.



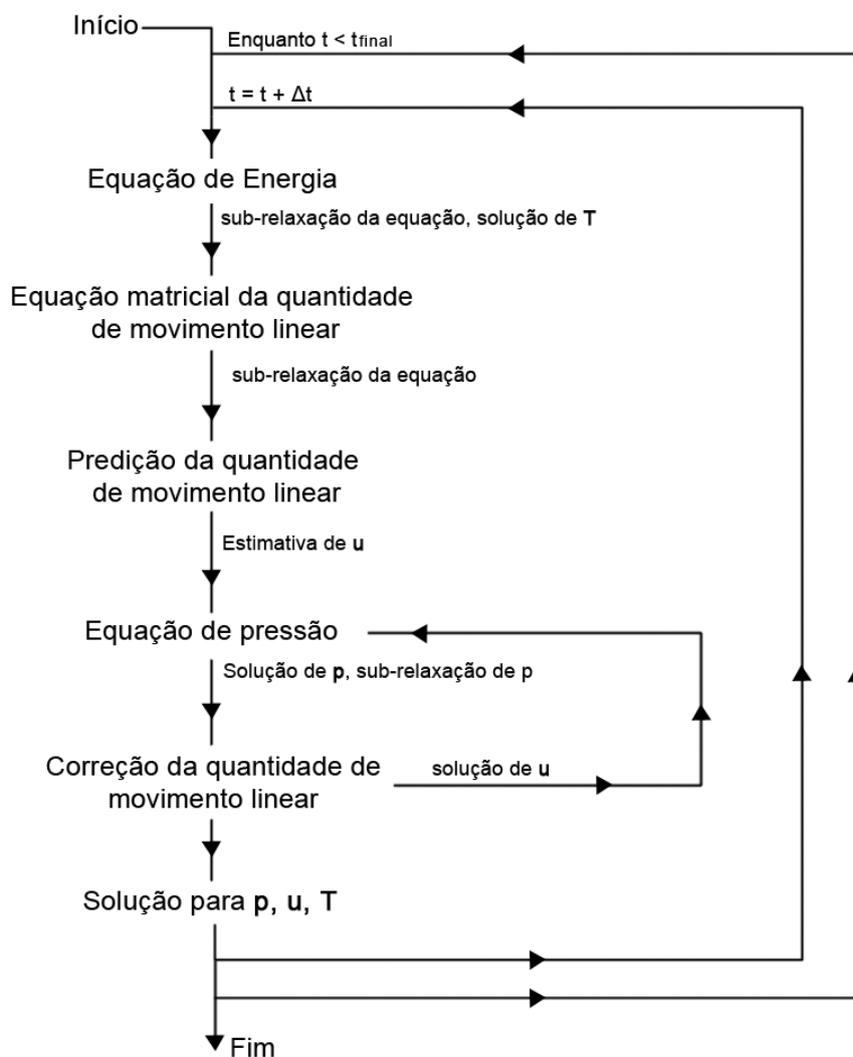
Fonte: adaptado de CFD Direct (2023).

Para os casos em regime transiente, onde as variáveis do escoamento variam com o tempo, foi utilizado o algoritmo Pressure Implicit with splitting of operator for Pressure-Linked Equations (PIMPLE). O PIMPLE é um algoritmo equivalente ao SIMPLE, porém em regime transiente, seguindo uma sequência iterativa onde as equações de p e u são solucionadas em intervalos de tempo sucessivos, entre um tempo inicial t e um tempo final t_{final} . Em uma simulação transiente, o intervalo de tempo deve ser relativamente pequeno para que o número de Courant permaneça abaixo de 1 e a acurácia da solução seja mantida.

O algoritmo segue uma estratégia semelhante à da Figura 34, porém uma sequência iterativa adicional é feita a cada intervalo de tempo, onde o valor de u solucionado na correção da quantidade de movimento linear é inserido na equação de pressão. Assim, a equação de pressão e a equação de correção da quantidade de movimento são resolvidas duas vezes em um intervalo de tempo (CFD Direct, 2023).

Por fim, as equações serão novamente resolvidas usando variáveis atualizadas dentro do intervalo de tempo, até que seja atingido o tempo final, conforme a Figura 35.

Figura 35 – Esquema de solução simplificado do algoritmo PIMPLE.



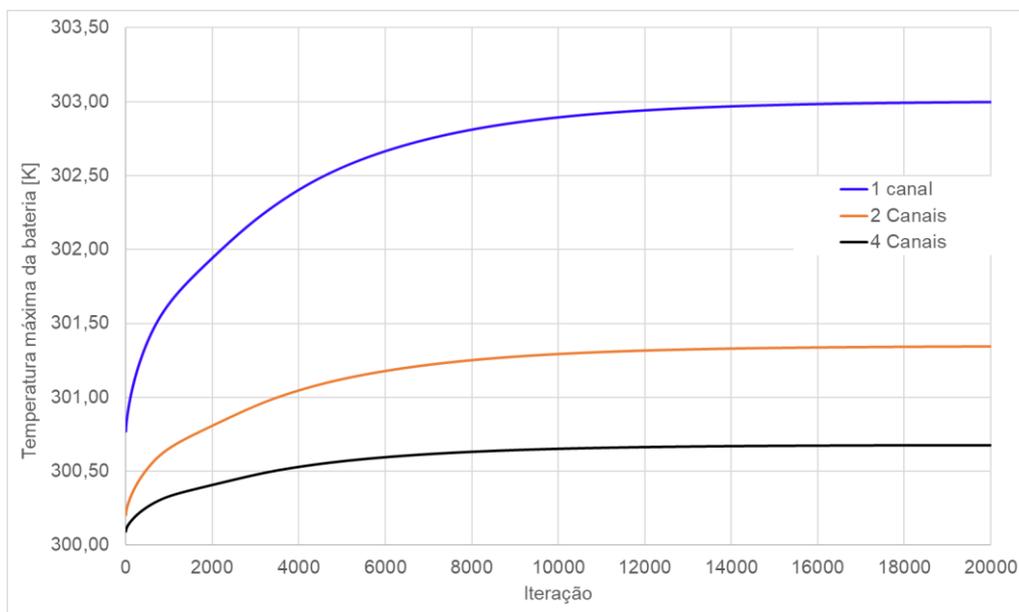
Fonte: adaptado de CFD Direct (2023).

3.4.4 Critérios de convergência

Todas as simulações em regime permanente foram feitas com pelo menos 20.000 iterações. Como critério de convergência, se utilizou uma diferença máxima de 1×10^{-9} entre o valor da variável encontrado na iteração atual, se comparado com a iteração anterior, para as equações de densidade, velocidade, pressão e entalpia. Em termos de variação da temperatura máxima em cada região, se considerou como critério uma diferença máxima de 1×10^{-8} entre cada iteração. As Figuras 36 e 37

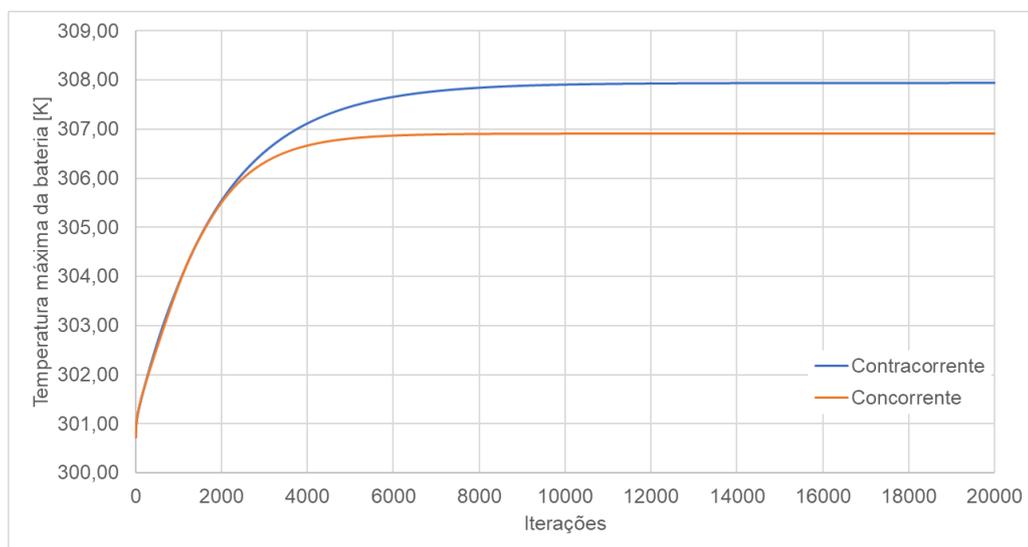
mostram a temperatura máxima da bateria em cada interação nas simulações em regime permanente para os Casos 1 e 2.

Figura 36 - Temperatura máxima da bateria para cada interação do Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 37 - Temperatura máxima da bateria para cada interação do Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

As simulações em regime transiente utilizaram o valor de 1×10^{-7} como diferença máxima para as equações de densidade, velocidade, pressão e entalpia.

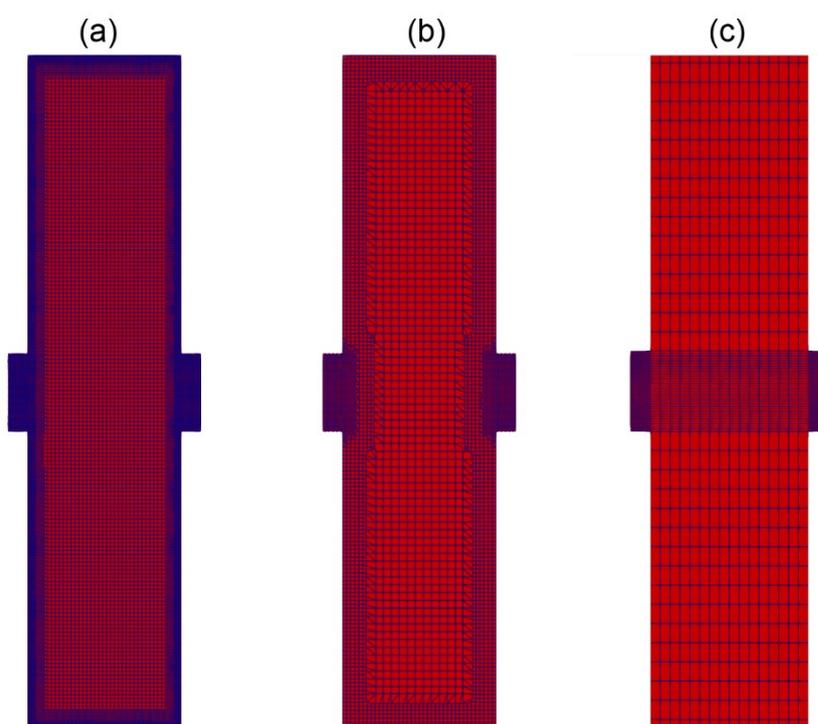
4. RESULTADOS PARA O CASO 1

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio de simulações numéricas no software OpenFOAM relativos ao Caso 1, fundamentado no modelo de resfriamento líquido de baterias proposto por Lan et al. (2016) e analisado posteriormente por Rosa (2022).

4.1 ESTUDO DE REFINO DE MALHA

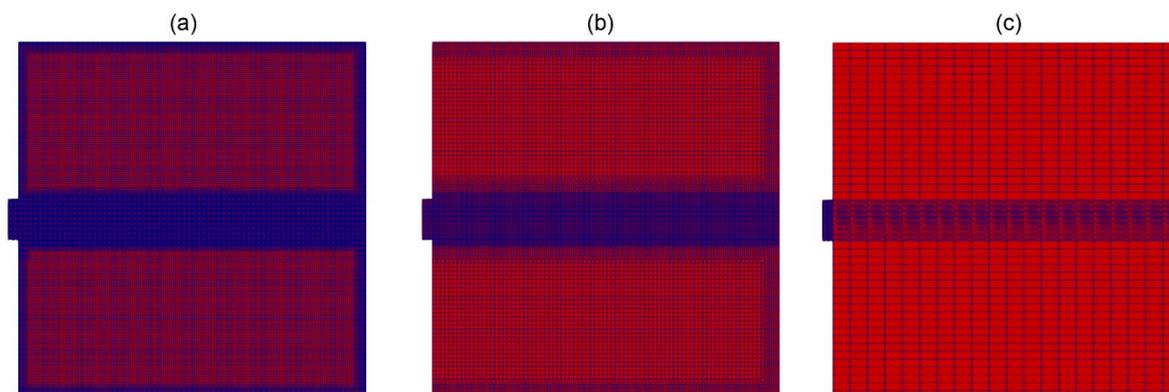
A seguir foi feito um estudo de refino de malha, fazendo uma comparação com a simulação realizada por Rosa (2022) do mesmo caso para o modelo de 1 canal, evidenciando o aprimoramento da qualidade dos resultados da simulação por meio da utilização da ferramenta *snappyHexMesh* para a geração de malhas. As Figuras 38 e 39 mostram 3 malhas, sendo as malhas (a) e (b) geradas através do *snappyHexMesh* e a malha (c), gerada por Rosa (2022), pela ferramenta *blockMesh*. A Tabela 11 descreve os parâmetros de cada malha.

Figura 38 – Comparação em vista frontal de malhas para o Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 39 – Comparação em vista lateral de malhas para o Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 11 – Parâmetro das malhas (a), (b) e (c) para o Caso 1.

	Malha (a)	Malha (b)	Malha (c)
Número de células	4.547.893	741.042	112.000
Ferramenta de geração da malha	<i>snappyHexMesh</i>	<i>snappyHexMesh</i>	<i>blockMesh</i>

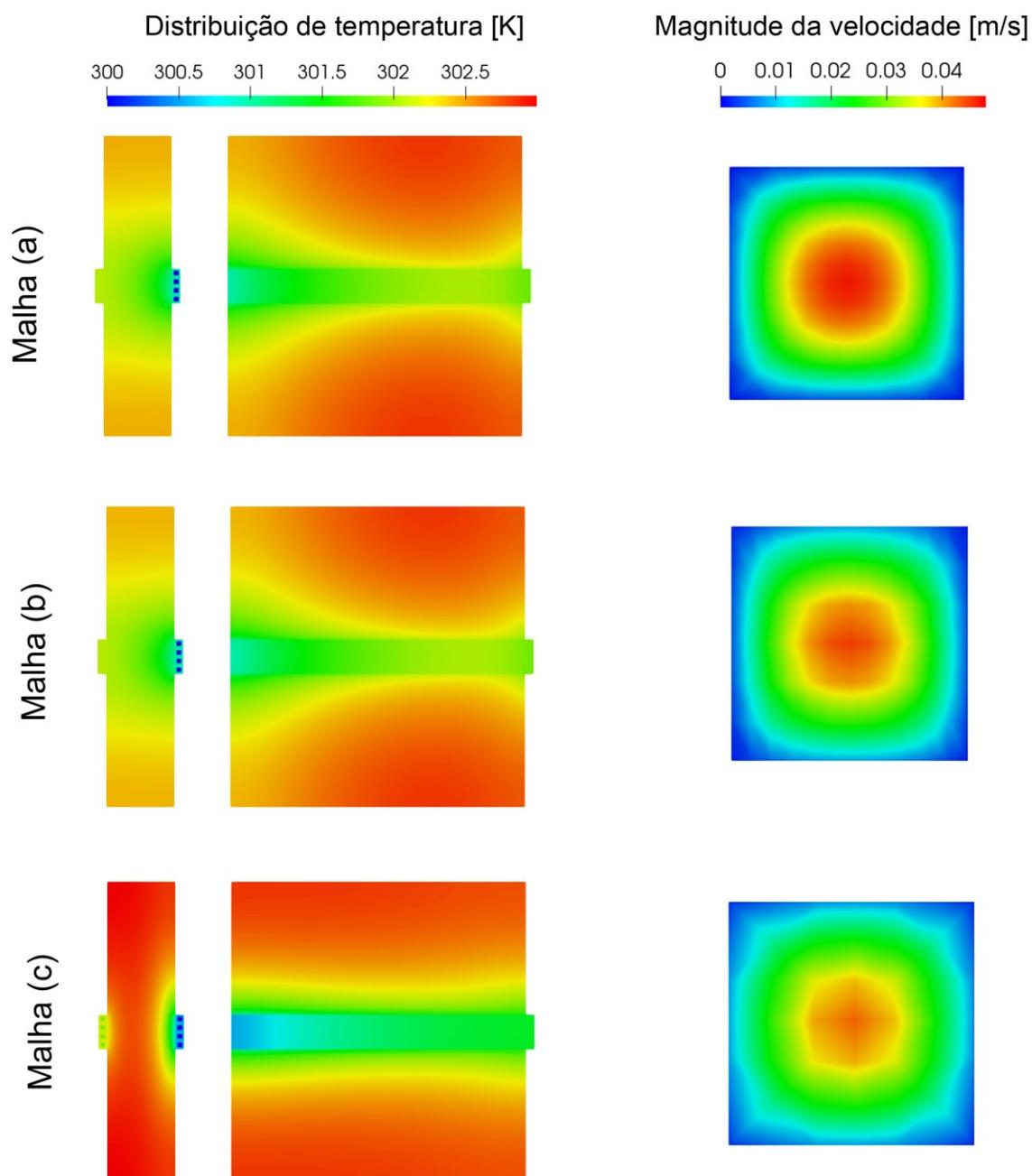
Fonte: Autor (2023).

Pode ser observado que as malhas (a) e (b) possuem uma maior homogeneidade no tamanho de células, evitando saltos de refino entre as regiões e possuindo um maior refino local na região dos mini canais.

A Figura 40 mostra as distribuições de temperatura e magnitude da velocidade desenvolvidas na bateria e saída dos mini canais respectivamente. Devido ao maior refino, a malha (a) possui a maior quantidade de informações em uma mesma medida de espaço, portanto, gera perfis de temperatura e velocidade com maior definição. Por possuir menos células, a malha (c) tem um maior salto de informações entre as células adjacentes, captando com menor acurácia os gradientes de temperatura e velocidade.

Os resultados encontrados em cada simulação estão descritos na Tabela 12, onde T_{max} representa a temperatura máxima da bateria e ΔT a diferença entre a temperatura máxima e mínima na bateria. Em consequência do menor refino e por não possuir camadas de células de transição entre as regiões, a malha (c) não conseguiu captar com acurácia os gradientes de temperatura na bateria produzidos pela presença dos mini canais com água. Apresentando, portanto, uma maior desigualdade nos valores de temperatura máxima e principalmente, uma maior diferença entre a temperatura máxima e mínima da bateria.

Figura 40 – Distribuição de temperatura e magnitude da velocidade na saída do canal para cada malha do Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 12 – Resultados encontrados para as malhas (a), (b) e (c).

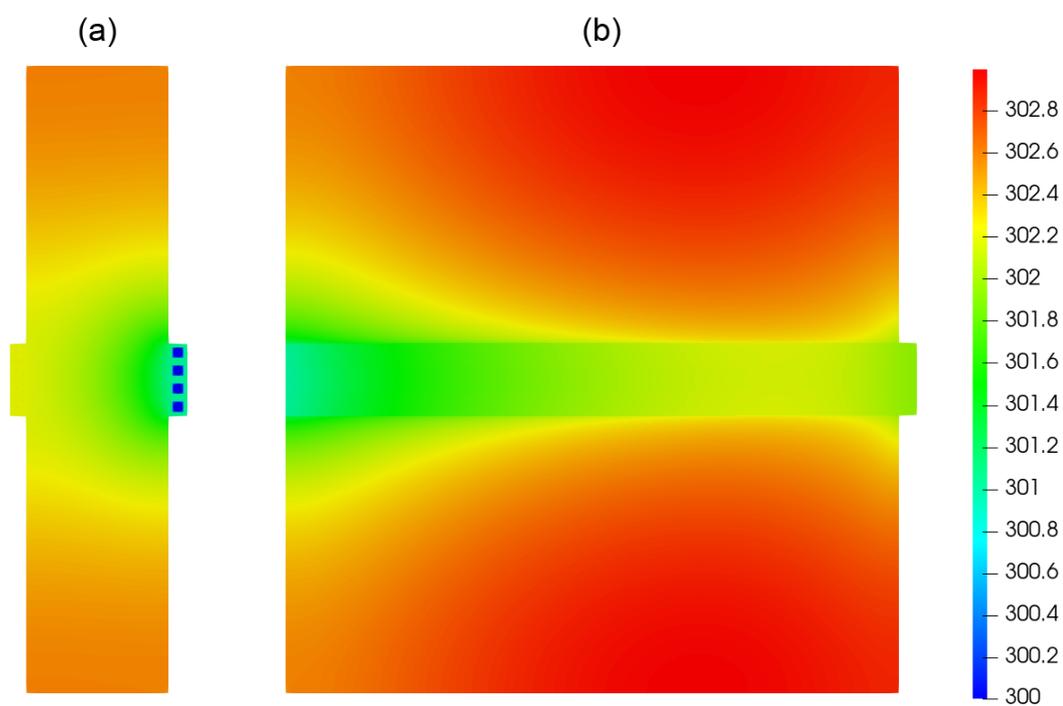
	Malha (a)	Malha (b)	Malha (c)
T_{max} [K]	302,997	302,998	302,988
ΔT_{max} [K]	1,923	1,916	2,97

Fonte: Autor (2023).

4.2 SIMULAÇÃO

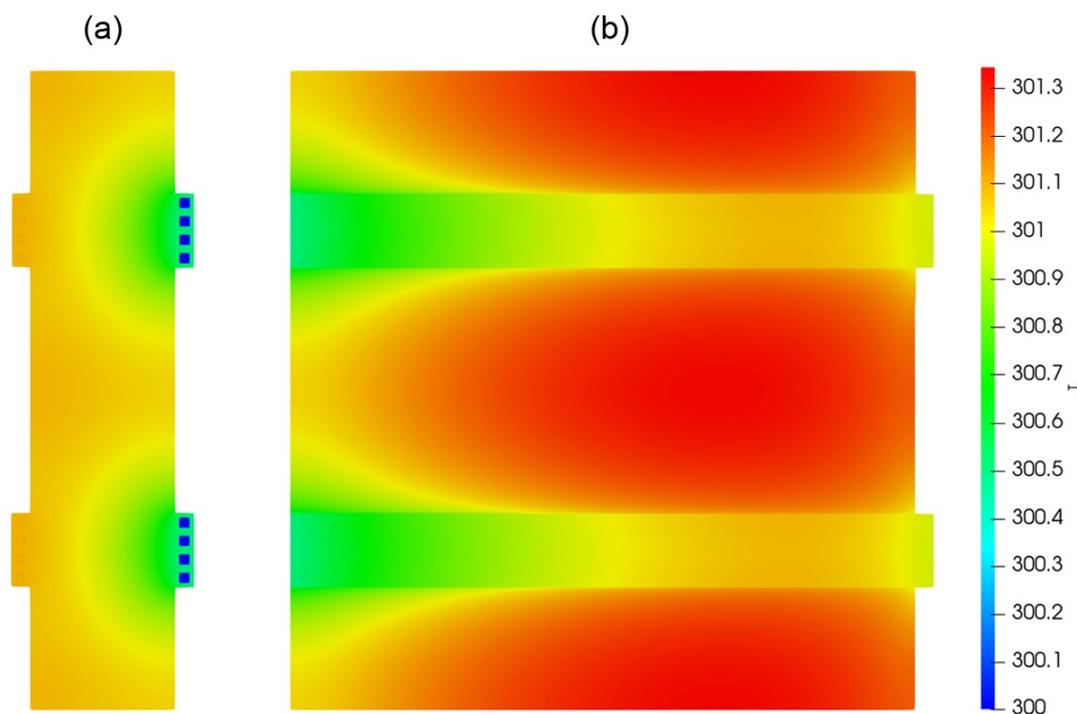
As Figuras 41, 42 e 43 mostram a distribuição de temperatura no sistema de resfriamento para cada modelo, onde (a) representa uma vista frontal e (b) a vista lateral direita, respectivamente. Observa-se uma grande influência da posição nos canais na temperatura da bateria, pois o lado direito, onde ocorre a entrada de água, apresenta as menores temperaturas da bateria.

Figura 41 - Distribuição de temperatura para o modelo de 1 canal.



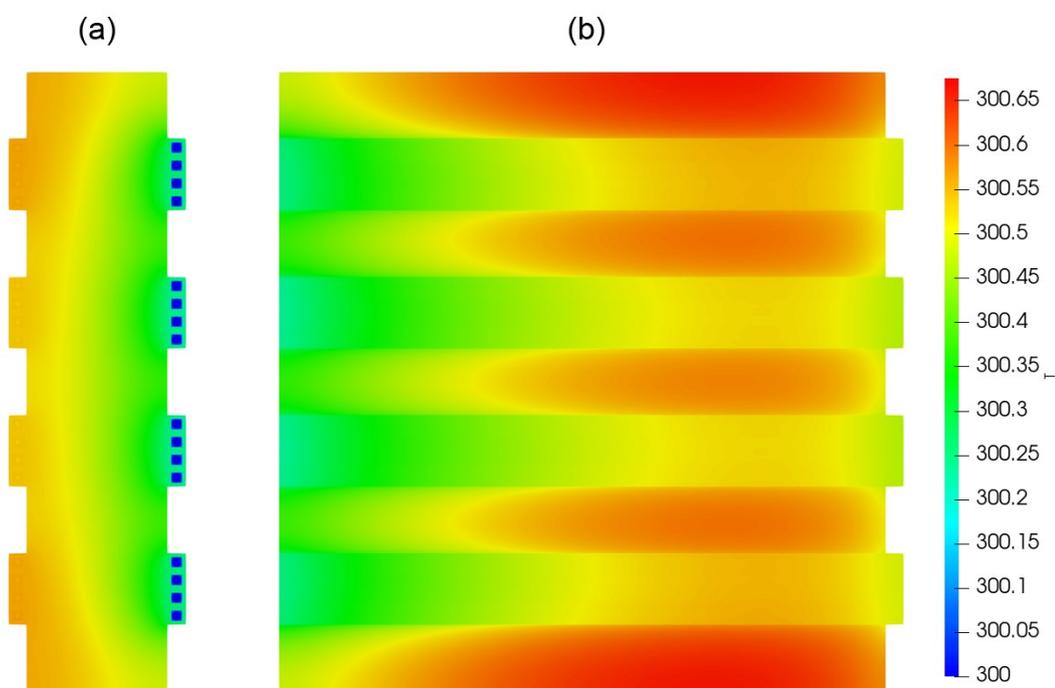
Fonte: Autor (2023).

Figura 42 – Distribuição de temperatura para o modelo de 2 canais.



Fonte: Autor (2023).

Figura 43 - Distribuição de temperatura para o modelo de 4 canais.



Fonte: Autor (2023).

A Tabela 13 mostra os principais resultados obtidos em cada simulação, em comparação com dados de Lan et al. (2016), os quais foram extraídos com auxílio da ferramenta *webplotdigitizer* (2023).

Tabela 13 - Comparação de resultados do Caso 1.

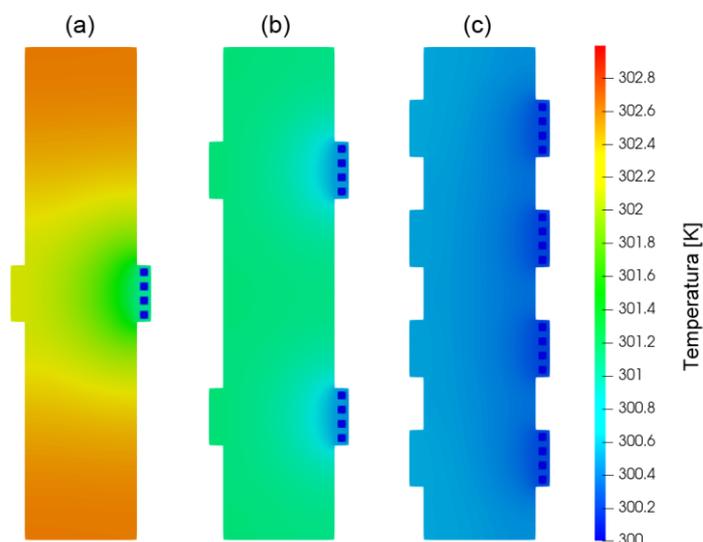
	Simulação no OpenFOAM			Lan et al. (2016).		
	1 canal	2 canais	4 canais	1 canal	2 canais	4 canais
T_{max} [K]	302,997	301,344	300,675	303,08	302,35	302,2
ΔT_{max} [K]	1,923	0,814	0,4285	3,04	2,30	2,18

Fonte: Autor (2023).

Observa-se que a simulação forneceu resultados semelhantes aos encontrados por Lan et al. (2016) no que diz respeito à temperatura máxima. Entretanto, desvios significativos podem ser observados em reação ao ΔT . Além disso, para todos os casos se obteve uma queda de pressão de 27 Pa ao longo do canal, resultado condizente ao modelo analítico de 27,05 Pa, encontrando por Rosa (2022).

Como esperado, o modelo de 4 canais obteve o melhor desempenho térmico, pois a bateria teve a menor temperatura máxima e houve uma maior uniformidade na distribuição da temperatura. A Figura 44 compara, em uma mesma escala, a distribuição de temperatura para cada sistema de resfriamento, sendo (a) o modelo de 1 canal, (b) 2 canais e (c) 4 canais.

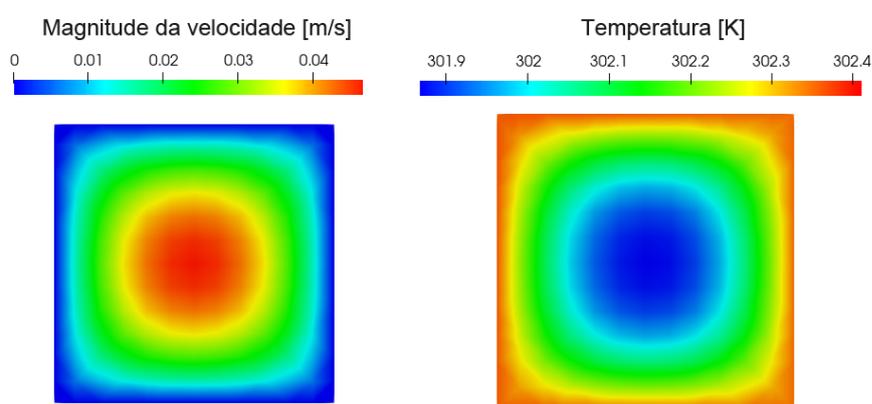
Figura 44 – Comparação das distribuições temperatura entre os modelos do Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

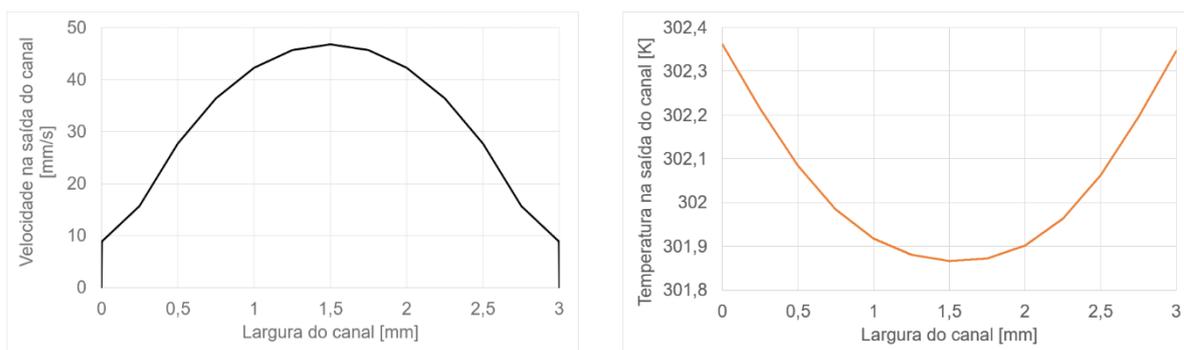
As Figuras 45 e 46 mostram os perfis de velocidade e temperatura da água na saída dos mini canais. Devido a condição de não escorregamento, a velocidade é mínima próxima à parede e máxima no centro do escoamento. O perfil de temperatura tem comportamento oposto ao da velocidade, onde o valor mínimo se encontra no centro e vai crescendo em direção às paredes. Devido a presença da bateria no lado direito do canal, a curva de temperatura não é simétrica.

Figura 45 – Distribuição da magnitude da velocidade e temperatura na saída dos canais para o Caso 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 46 – Perfis de velocidade e temperatura na saída dos canais para o Caso 1.

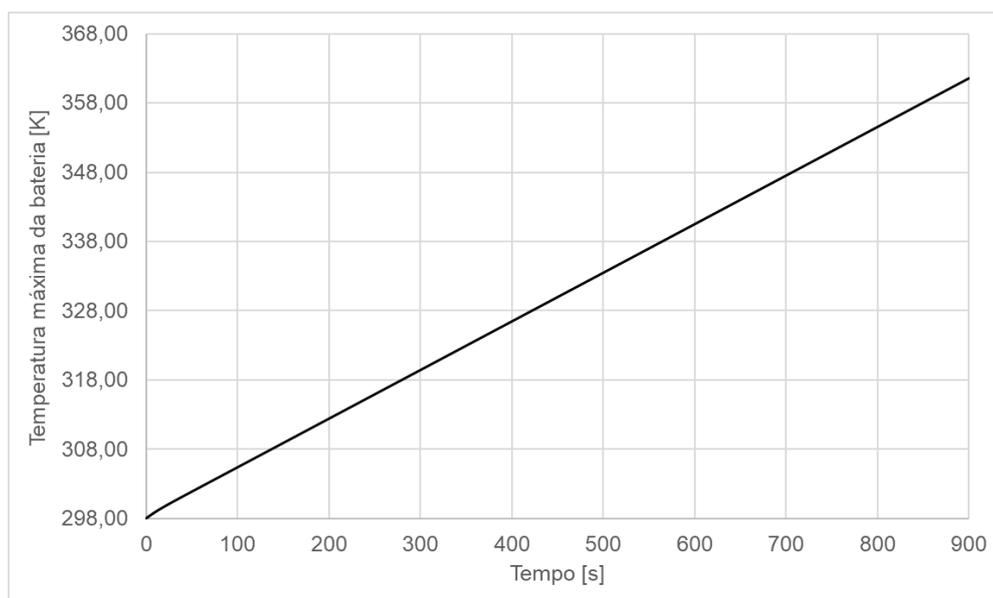


Fonte: Autor (2023).

5. RESULTADOS PARA O CASO 2

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio de simulações numéricas no software OpenFOAM relativos ao Caso 2, fundamentado no modelo numérico e experimental do sistema resfriamento líquido de baterias proposto por Liu et al. (2019). O aquecimento da bateria de 10 Ah, sendo descarregada a taxa 4C, sem a presença da circulação de água no sistema de resfriamento, é mostrado na Figura 47.

Figura 47 – Temperatura da bateria ao longo do tempo sem o sistema de resfriamento, para o Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

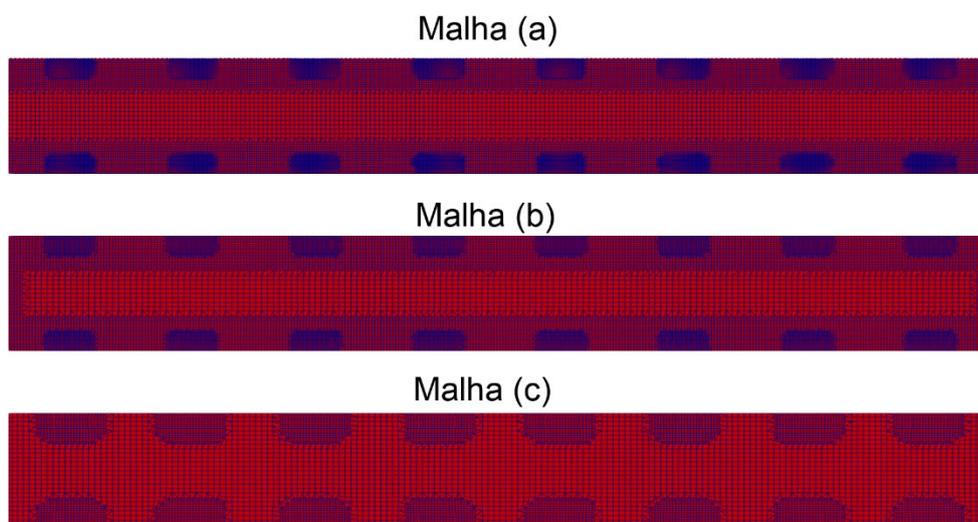
Durante os 900 segundos de funcionamento, a temperatura da bateria tem um crescimento de 20%, iniciando em 298 K e crescendo linearmente até atingir 360 K, mostrando a necessidade de utilização de um sistema de gerenciamento térmico, para controlar o aquecimento.

5.1 ESTUDO DE REFINO DE MALHA

Para realizar uma análise de convergência de malha, utilizou-se três malhas com níveis de refino diferente, ilustradas nas Figuras 48 e 49. A malha (a) representa

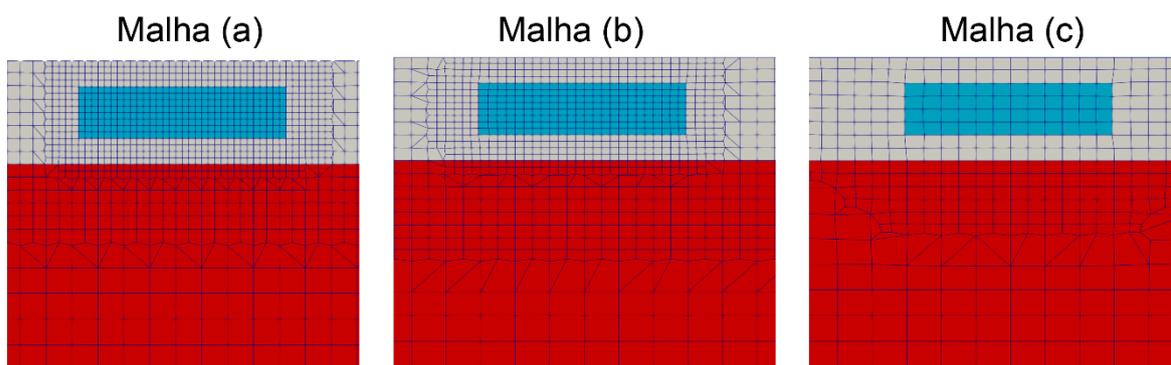
a malha mais refinada, (b) a com refino médio e (c) a mais grosseira. A Tabela 14 apresenta o número total de volumes para cada malha, assim como informações sobre o custo computacional. Para este estudo, foi utilizado o modelo de escoamento em contracorrente, a simulação foi feita em regime permanente e se utilizou 2 nós do cluster computacional.

Figura 48 – Vista frontal das malhas para a análise de convergência do Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

Figura 49 – Detalhe da região dos mini canais nas malhas utilizadas para a análise de convergência do Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 14 – Parâmetros de cada malha computacional do Caso 2.

	Malha (a)	Malha (b)	Malha (c)
Número de células	15.874.500	8.590.015	2.194.183
Tempo de simulação	3 d 17 h	2 d 5 h	4 h
Espaço computacional ocupado pela malha	4,36 GB	2,58 GB	0,97 GB

Fonte: Autor (2023).

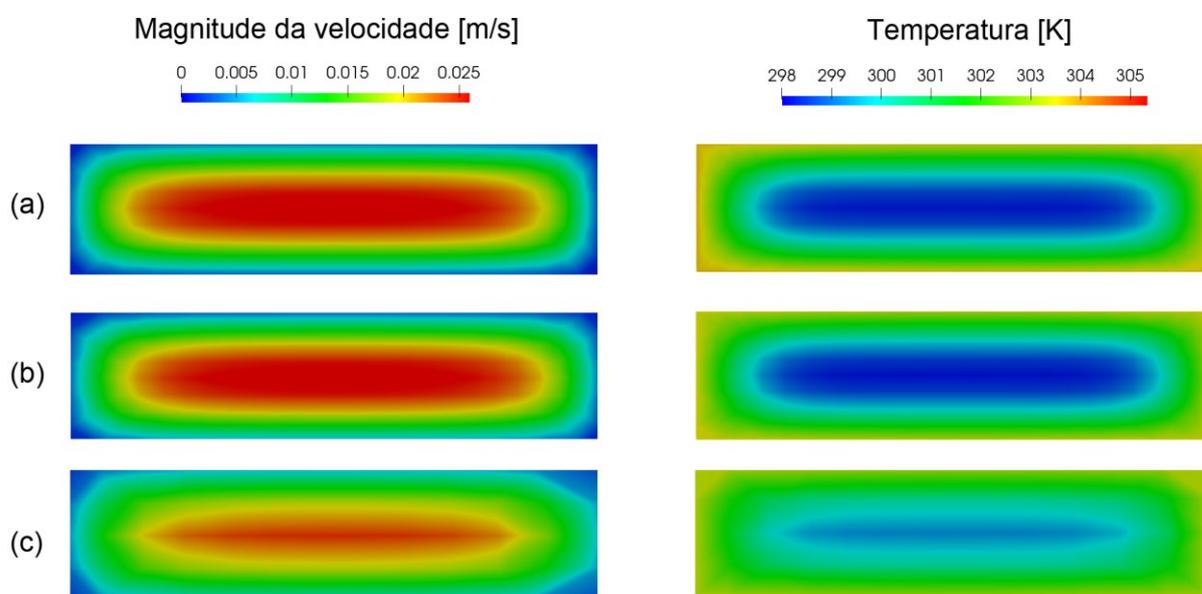
Os resultados encontrados para cada malha estão ilustrados na Tabela 15, onde T_{min} representa a temperatura mínima da bateria. Os resultados das malhas (a) e (b) foram análogos, demonstrando que a malha (b), embora tenha cerca de metade das células, foi suficiente para desempenhar as simulações. A malha (c) por outro lado, devido ao pouco refino, apresentou o desenvolvimento de um perfil de temperatura e velocidade com menor definição, pois há um maior salto de informações entre as células, conforme pode ser visto na Figura 50. Pela Figura 51, é possível observar que quanto maior for a quantidade de células dentro dos canais, mais suave é a transição da condição de velocidade zero na parede no desenvolvimento do perfil de velocidade.

Tabela 15 – Resultados obtidos para cada malha computacional do Caso 2.

	Malha (a)	Malha (b)	Malha (c)
T_{max} [K]	307,906	307,938	308,009
T_{min} [K]	302,137	302,147	302,272
ΔT [K]	5,769	5,791	5,737
ΔP [Pa]	12	12	11

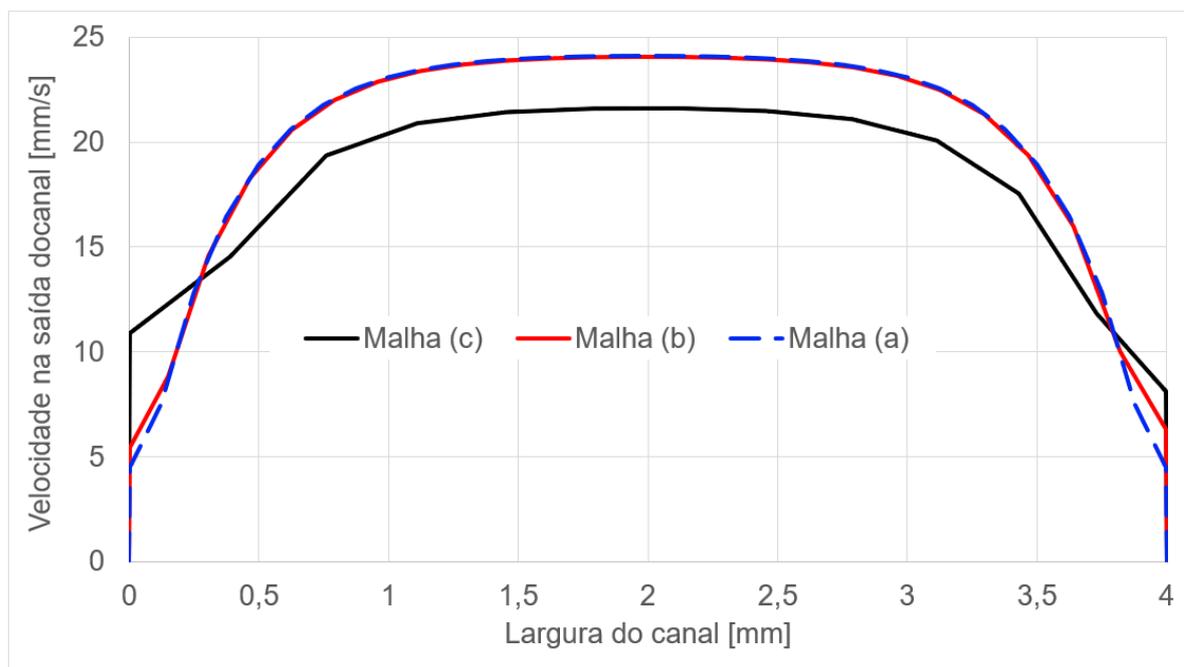
Fonte: Autor (2023).

Figura 50 – Distribuição de velocidade e temperatura para as diferentes malhas do Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

Figura 51 - Perfis de velocidade para as diferentes malhas do Caso 2.

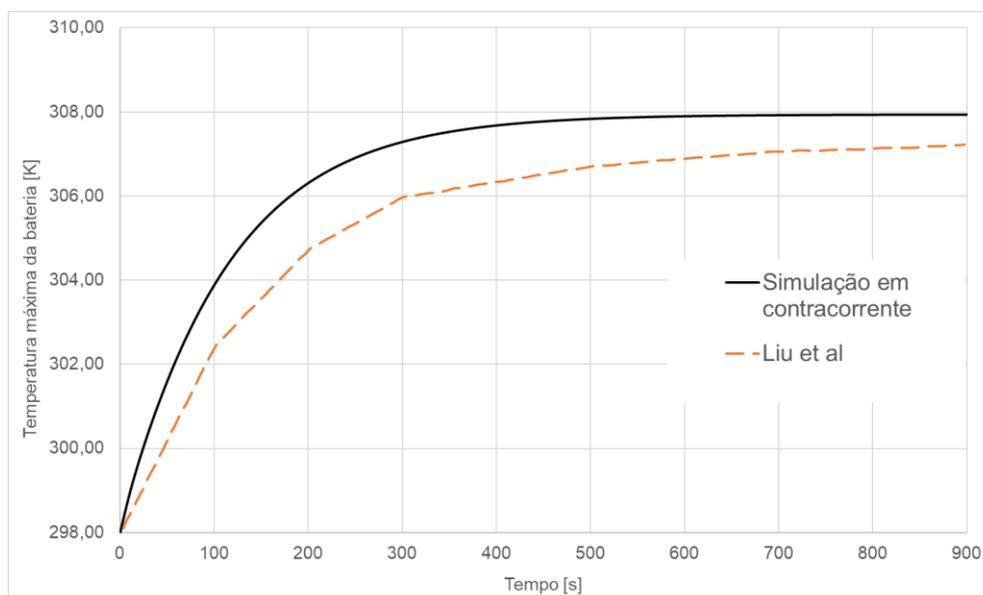


Fonte: Autor (2023).

5.2 SIMULAÇÃO

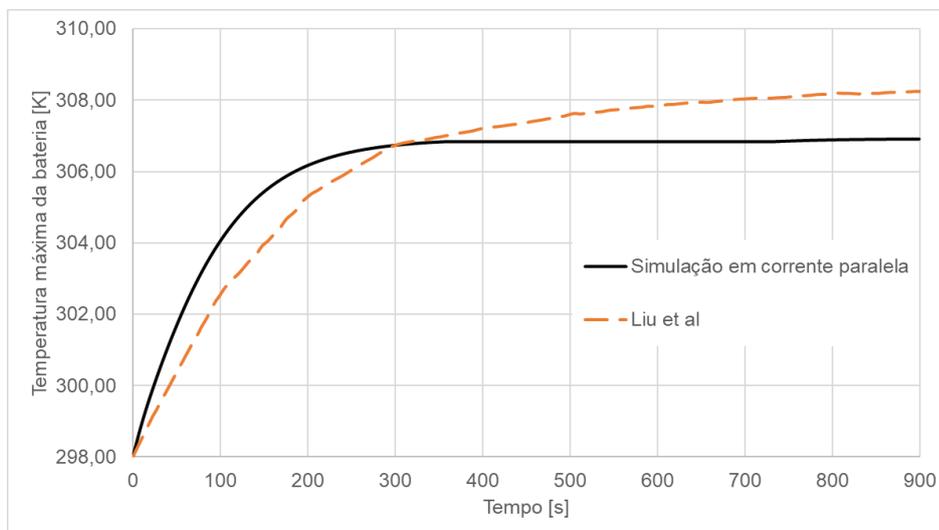
As Figuras 52 e 53 mostram um comparativo da curva de temperatura máxima da bateria ao longo do tempo para as simulações feitas no OpenFOAM em comparação com os resultados da simulação numérica de Liu et al. (2019). As simulações do OpenFOAM foram feitas em regime transiente, utilizando um passo de tempo aproximado de 0,004 s, mantendo o número de Courant próximo de 1.

Figura 52 – Temperatura máxima da bateria ao longo do tempo para escoamento em contracorrente.



Fonte: Autor (2023).

Figura 53 - Temperatura máxima da bateria ao longo do tempo para escoamento em corrente paralela.

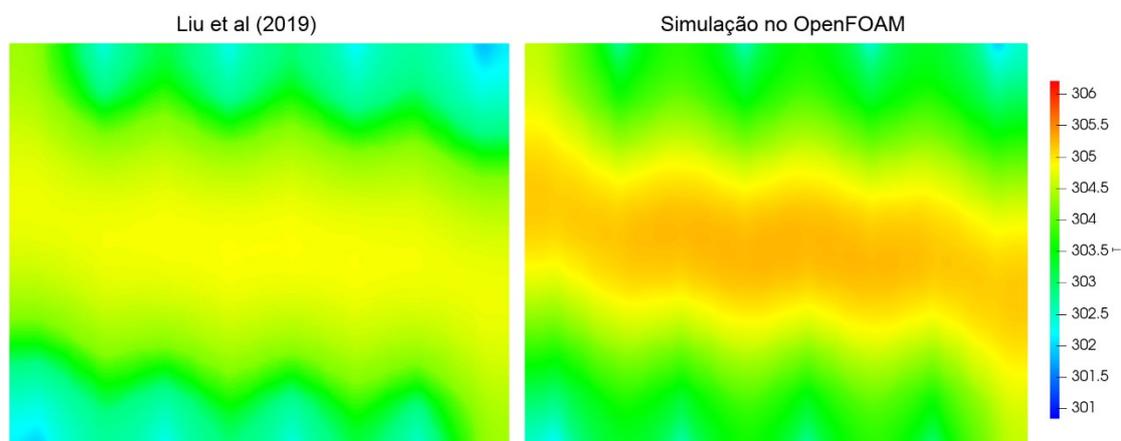


Fonte: Autor (2023).

Conforme pode ser observado, para o escoamento em contracorrente, os resultados obtidos foram muito próximos aos encontrados numericamente por Liu et al (2019). Contudo, para o escoamento em corrente paralela o resultado não foi o esperado, pois a temperatura máxima da bateria foi menor do que a encontrada para o escoamento em contracorrente, tendência inversa a encontrada por Liu et al. (2019).

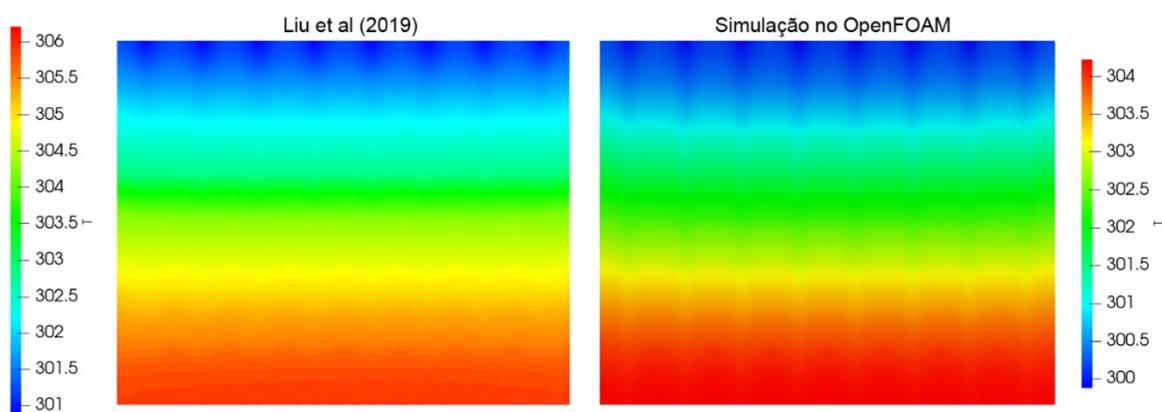
As Figuras 54 e 55 mostram a distribuição de temperatura na placa fria, para 900 segundos, em comparação com os resultados de Liu et al (2019). Para o caso de corrente paralela, pela diferença nos resultados, utilizou-se duas escalas de temperatura para melhorar a visualização. A bateria atingiu a menor temperatura no modelo de corrente paralela, entretanto, há uma grande disparidade na distribuição de temperatura neste modelo, havendo um lado muito quente e um lado muito frio na região da placa fria. Devido a alternância entre entrada e saída de água nos canais, o modelo de contracorrente tem uma maior homogeneidade na distribuição de temperatura na placa fria, havendo apenas uma região ligeiramente mais quente no centro.

Figura 54 – Comparação da distribuição de temperatura na placa fria para o escoamento em contracorrente.



Fonte: Autor (2023).

Figura 55 - Comparação da distribuição de temperatura na placa fria para o escoamento em corrente paralela.



Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 16 se compara os resultados das simulações em regime transiente e permanente feitas no OpenFOAM com os dados numéricos obtidos por Liu et al. (2019), para o modelo de contracorrente. Na Tabela 17 é feita a mesma comparação, porém para o modelo de corrente paralela, onde também foram incluídos os dados experimentais na comparação.

Tabela 16 – Comparação dos resultados para o escoamento em contracorrente.

	Simulação em regime transiente	Simulação em regime permanente	Simulação numérica Liu et al. (2019)
T_{max} [K]	307,937	307,938	307,21
ΔT [K]	5,791	5,791	5,45
ΔP [Pa]	12,36	12	11,284

Fonte: Autor (2023).

Tabela 17 – Comparação dos resultados para o escoamento em corrente paralela.

	Simulação em regime transiente	Simulação em regime permanente	Simulação numérica Liu et al. (2019)	Dado experimental Liu et al. (2019).
T_{max} [K]	306,00	306,90	308,4	-
T_{out} [K]	303,818	303,82	306,07	304,8
ΔT [Pa]	6,907	6,907	7,5	-
ΔP [Pa]	15,838	16	16,872	17,641

Fonte: Autor (2023).

ΔP representa a queda de pressão no escoamento de água e T_{out} a temperatura da água na saída dos canais.

A análise da Tabela 16 mostra que os resultados encontrados para o escoamento em contracorrente nas simulações do OpenFOAM estão condizentes com os de Liu et al (2019), devido à proximidade entre os valores. Já na Tabela 17, se observa uma disparidade maior entre os valores do escoamento em paralelo, tanto para a simulação numérica quanto a simulação experimental de Liu et al (2019).

Os resultados da simulação em regime permanente e transiente tiveram uma grande similaridade, indicando que ambos os modelos possuem a mesma tendência de resultados. Sabendo que a observação em regime permanente da temperatura máxima da bateria e do fluido refrigerante são um dos principais fatores de interesse para um sistema de gerenciamento térmico, a simulação em regime permanente mostra-se vantajosa, pois economiza tempo computacional. A Tabela 18 mostra uma comparação de custo e tempo computacional, entre as simulações em regime transiente e permanente. Todas as simulações possuem a mesma malha computacional, com 8.593.578 células.

Tabela 18 – Comparação entre os tempos de simulação para o Caso 2.

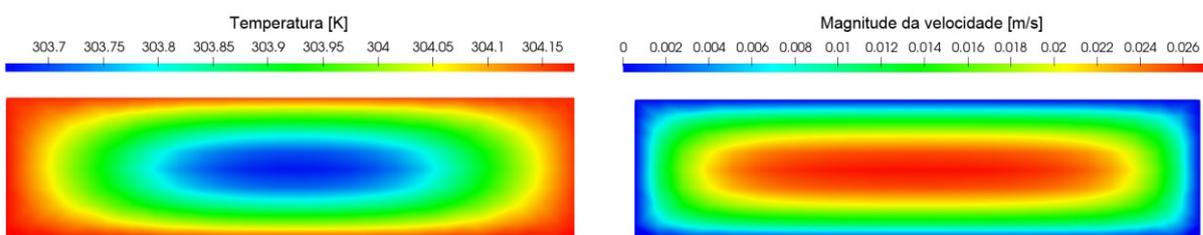
	Contracorrente		Paralelo	
	Regime Permanente	Regime Transiente	Regime Permanente	Regime Transiente
Tempo de simulação	2 d 5 h	7 d 10 h	20 h	6 d 1 h
Nós utilizados	1	3	1	3

Fonte: Autor (2023).

Embora tenha utilizado o triplo de poder computacional, a simulação em regime transiente demora em média 6 vezes o tempo de uma simulação em regime permanente. A principal justificativa para o aumento do tempo de simulação no regime transiente está na necessidade de se trabalhar com passos de tempo muito curtos, de modo a manter o número de Courant sempre abaixo de 1.

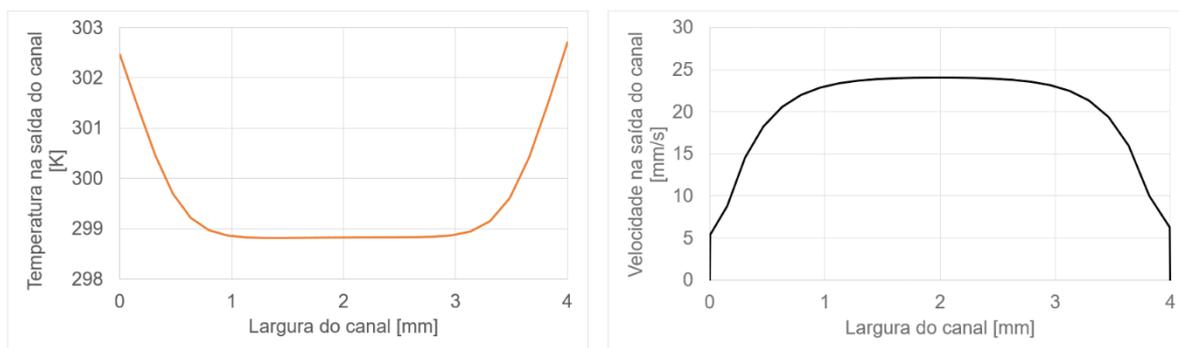
Nas Figuras 56 e 57 se observa os perfis de temperatura e velocidade da água na saída dos mini canais. Para fazer esta análise, se utilizou a simulação em contracorrente e regime permanente, porém, os perfis para todas as simulações têm aspectos muito semelhantes. A investigação destas imagens permite visualizar a condição de não escorregamento nas paredes, bem como a criação de gradientes de temperatura no interior do canal. Quanto maior for o refino da malha, melhor será a transição das variáveis ponto a ponto. Neste caso, a adição de camadas prismáticas durante a geração da malha permitiria a resolução da condição de velocidade nula na parede com maior acurácia no gráfico da Figura 57.

Figura 56 – Distribuição de temperatura e velocidade na saída do canal para o caso 2.



Fonte: Autor (2023).

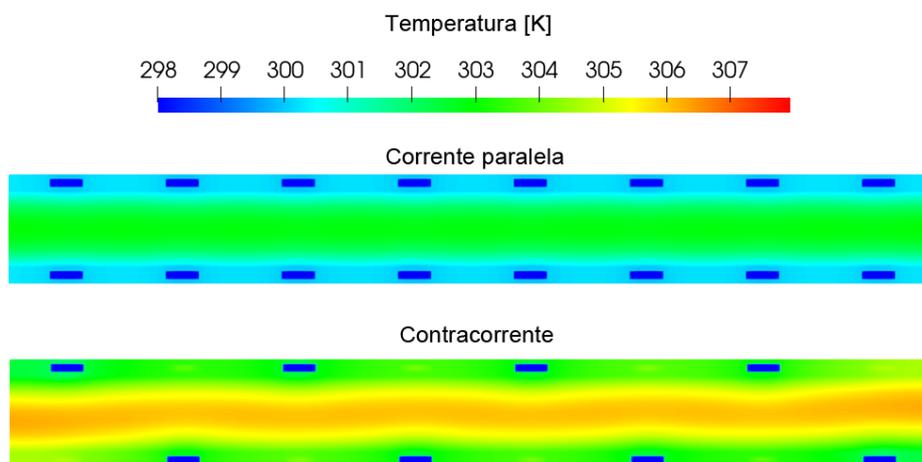
Figura 57 – Perfil de temperatura e velocidade na saída do canal para o Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

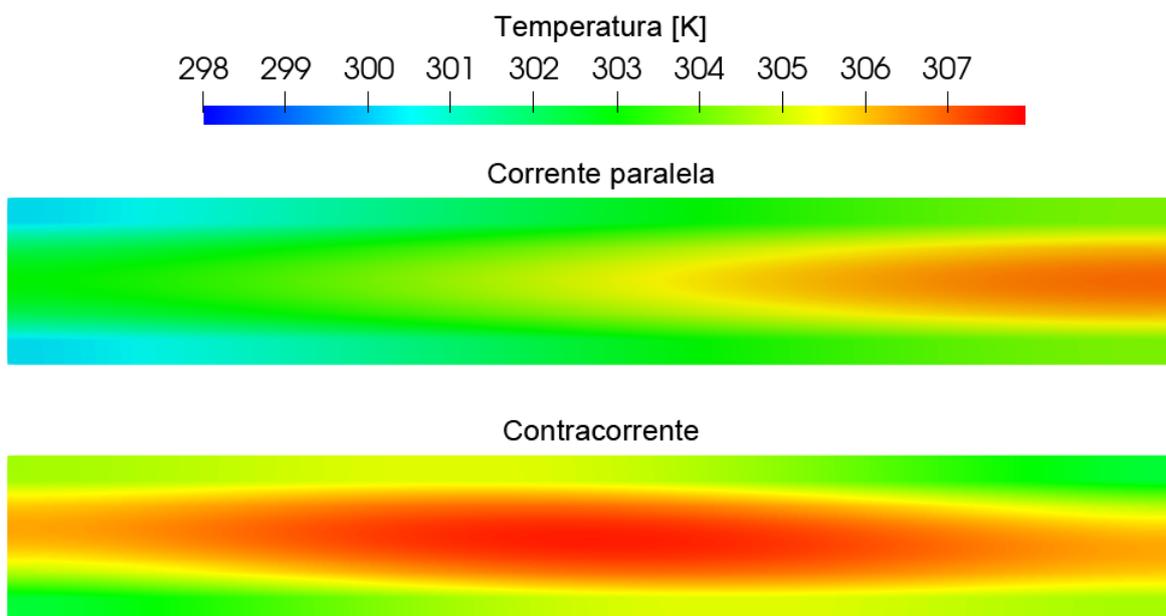
As Figuras 58 e 59 mostram a distribuição de temperatura do sistema de resfriamento em uma vista frontal e lateral, respectivamente. Para o caso de escoamento em corrente paralela, a temperatura da bateria na saída dos mini canais é consideravelmente maior que a temperatura na entrada, criando uma zona quente em uma das laterais. Isso ocorre pois há entrada de água somente de um lado, fazendo com que o lado oposto troque calor com uma água já aquecida. No caso do escoamento em contracorrente, há uma maior uniformidade na temperatura da bateria, visto que ambos os lados possuem as mesmas quantidades de entradas e saídas de água. Isso pode ser observado na Figura 60, que representa a diferença entre a temperatura máxima e mínima da bateria ao longo do tempo. O modelo de contracorrente apresentou um ΔT máximo de $5,8^{\circ}\text{C}$, enquanto o modelo em escoamento paralelo teve um ΔT de $6,9^{\circ}\text{C}$.

Figura 58 - Distribuição de temperatura na vista frontal do sistema para o Caso 2.



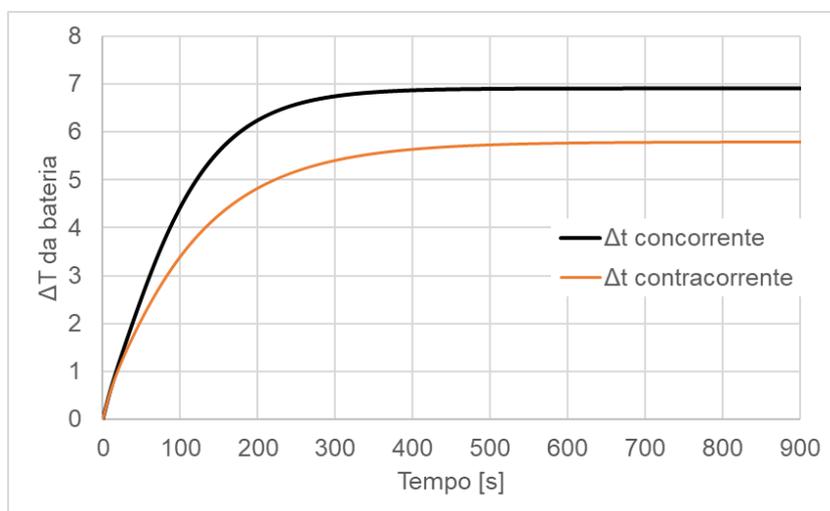
Fonte: Autor (2023).

Figura 59 – Distribuição de temperatura na vista lateral para o Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

Figura 60 - Diferença entre a temperatura máxima e mínima da bateria ao longo do tempo para o Caso 2.



Fonte: Autor (2023).

6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foram analisados dois sistemas de resfriamento líquido para o gerenciamento térmico de baterias em veículos elétricos, baseados nos modelos de Lan et al. (2016) e Liu et al. (2019), com a utilização do software OpenFOAM. Para ambos os casos as simulações em regime permanente mostraram-se vantajosas, pois necessitaram de menos recursos computacionais e mantiveram a acurácia dos resultados. Através da ferramenta interna do OpenFOAM *snappyHexMesh*, foi possível modelar ambos os casos através de malhas computacionais de alta qualidade, havendo diferentes níveis de refino entre as regiões com transições razoáveis nas interfaces, evitando saltos de informações. Entretanto, a ferramenta mostrou algumas limitações, não sendo possível gerar camadas prismáticas sem prejudicar a qualidade final da malha, pois houve a distorção de elementos. Além disso, para os casos estudados, a ferramenta tende a gerar malhas com um grande número de células e alto custo computacional.

Em relação ao Caso 1, o estudo obteve resultados semelhantes aos encontrados por Lan et al. (2016). Como previsto, o modelo com 4 canais alcançou o melhor desempenho térmico, diminuindo a temperatura máxima da bateria e mantendo uma maior uniformidade na distribuição de temperatura. A malha (a), da Figura 38, reproduziu os melhores resultados, capturando com maior acurácia os gradientes de temperatura e o desenvolvimento das camadas limites de velocidade e térmica na região dos mini canais. Por fim, as malhas geradas no *snappyHexMesh* aprimoraram os resultados encontrados por Rosa (2022), demonstrando que a ferramenta é a mais indicada para esse caso.

Para o Caso 2, os resultados do modelo em contracorrente se aproximaram aos encontrados por Liu et al. (2019), havendo pouca diferença nas variáveis de interesse. Apesar disso, o modelo de corrente paralela não obteve o resultado esperado, pois resfriou mais a bateria que o modelo de contracorrente, resposta contrária a esperada e simulada por Liu et al. (2019). Essa contrariedade não pode ser resolvida, porém, se pressupõe que possa haver alguma divergência na modelagem do problema. Vale ressaltar que também não foi realizado um estudo de refino de malha para esta configuração. Ainda assim, o modelo de contracorrente mostrou-se mais interessante, pois resfriou a bateria de forma semelhante ao modelo

de corrente paralela, porém de forma mais uniforme, não criando regiões quentes em um lado da bateria. No estudo de convergência de malhas, a malha (b) da Figura 48 se mostrou mais vantajosa que as outras, pois obteve resultados semelhantes a malha (a) tendo cerca de metade do número de células, poupando assim esforço computacional.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

A seguir, estão listadas sugestões de estudos complementares para trabalhos futuros em simulações de sistemas de gerenciamento térmico de baterias para veículos elétricos.

- Investigar o desempenho térmico dos sistemas do Caso 1 para um escoamento em contracorrente;
- Avaliar os efeitos da variação da velocidade e geometria dos mini canais para o Caso 2;
- Implementar camadas prismáticas na região dos mini canais para ambos os casos;
- Implementar um sistema de resfriamento com mudança de fase do fluido refrigerante para ambos os casos;

REFERÊNCIAS

BERNARDI, D.; PAWLIKOWSKI, E.; NEWMAN, J. A General Energy Balance for Battery Systems. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 132, n. 1, p. 5-12, 1985.

BOYCE, W. E; DIPRIMA, R. C. **Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics An Engineering Approach**. 8th edition. New York City: McGraw Hill Education, 2014.

CFD DIRECT LTD. **Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles**. United States, 2023. Disponível em: <https://cfdirect/>. Acesso em 20/06/2023.

CIC ENERGIGUNE. **Why is thermal management essential for the expansion of the electric car?** Espanha, 2022. Disponível em: <https://cicenergigune.com/en/blog/thermal-management-essential-expansion-electric-car>. Acesso em: 02/07/2023.

FERASSO, C. A.; SCHAEFFER, L.; OLIVEIRA, J. D.; CALABRIA, L.; PANDOLFI, C.; SIVIERO, F. M. et al. Caminhos de controle térmico para baterias de Li-Ion cooling: Uma avaliação. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 75687-75701, 2020.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Relatório Anual 2019**. São Paulo: IEMA, 2020.

JARRETT, A.; KIM, I. Y. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance. **Journal of Power Sources**, v. 196, n. 23, p. 10359–10368, 2011.

LABCC CTJ. **Laboratório de Computação Científica da UFSC Joinville**. Joinville, 2023. Disponível em: <https://labcc.paginas.ufsc.br>. Acesso em: 15/06/2023.

LAN, C.; XU, J.; QIAO, Y.; MA, Y. Thermal management for high power lithium-ion battery by mini channel aluminum tubes. **Applied Thermal Engineering**, v. 101, n. 1, p. 284–296, 2016.

LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY. **Stories of the Development of Large-Scale Scientific Computing**. Lawrence Livermore, 2000. Disponível em: <https://www.computer-history.info>. Acesso em: 13 jul. 2022.

LIU, H.; SHI, H.; SHEN, H.; XIE, G. The performance management of a Li-ion battery by using tree-like mini-channel heat sinks: Experimental and numerical optimization. **Energy**, v. 189, n. 116150, 2019.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MCDONOUGH, J. M. Lectures In Elementary Fluid Dynamics: Physics, Mathematics and Applications. **Mechanical Engineering Textbook Gallery**, v. 1, 2009.

MELLO, P. O. T.; SOUZA, M. G. M.; JÚNIOR, N. A. Uma Introdução a Programação Paralela com Parallel Python. **Notas Técnicas**, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2011.

MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM. **A Guide to Understanding Battery**

Specifications. United States, 2008. Disponível em:

http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf. Acesso em: 13 jul. 2022.

OPENCFD LTD. **About OpenFOAM**. United States, 2023. Disponível em: <https://www.openfoam.com>. Acesso em 15/06/2023.

PESARAN, A. A. et al. Thermal Analysis and Performance of a Battery Pack for a Hybrid Electric Vehicle. In: **Proceedings of ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM AND EXHIBITION**, 15., 1998, Bruxelas, Bélgica. Bruxelas: Avere, 1998.

POWER SONIC. **What is a Battery C Rating?**. United States, 2023. Disponível em: <https://www.power-sonic.com/blog/what-is-a-battery-c-rating>. Acesso em: 15/06/2023.

RAO, ZHONGHAO.; WANG, SHUANGFENG. A review of power battery thermal energy management. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 4554-4571, 2011.

ROSA, Rafael Macedo. **Análise numérica de um sistema de resfriamento líquido para baterias em veículos elétricos**. Orientador: Filipe Dutra da Silva. 2022. 81 f.

TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/237758>.

SOFTWARE CRADLE CO. **Basic Course of Thermo-Fluid Analysis 17: Chapter 5**

Basics of thermo-fluid analyses. United States, 2019. Disponível em:

<https://www.cradle-cfd.com/media/column/a90>. Acesso em: 15/06/2023.

THE OPENFOAM FOUNDATION. **OpenFOAM v9 User Guide**. United States, 2023.

Disponível em: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide>. Acesso em: 15/06/2023.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. London: Pearson Prentice Hall, 2007.

WEBPLOTDIGITIZER. **Web based tool to extract data from plots, images, and**

maps. United States, 2023. Disponível em: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>.

Acesso em 20/06/2023.