

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

RAFAEL MACEDO ROSA

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO LÍQUIDO PARA
BATERIAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Joinville
2022

RAFAEL MACEDO ROSA

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO LÍQUIDO PARA
BATERIAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Filipe Dutra da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Ernane Silva

Joinville
2022

RAFAEL MACEDO ROSA

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO LÍQUIDO PARA
BATERIAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

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

Joinville (SC), 28 de Julho de 2022.

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Filipe Dutra da Silva
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Talita Sauter Possamai
Membra
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcus Vinicius Volponi Morteau
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a todos os envolvidos durante a minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, em especial ao meu pai André, minha mãe, Mônica, e meu padrasto, Alexandre, por estarem ao meu lado em todas situações e acreditarem em mim. Também, por todo suporte financeiro e psicológico durante toda a minha vida. Com toda certeza, muito desta minha conquista eu devo a eles e somente por conta deles este sonho pode se tornar realidade.

Ao professor Dr. Filipe Dutra da Silva por estar ao meu lado desde o início de minha iniciação científica até a fase final de minha graduação. Obrigado por todo conhecimento compartilhado e adquirido.

Ao professor Dr. Ernane Silva por toda disponibilidade para auxiliar tanto na realização deste trabalho, como também nos estudos e pesquisas ao longo de minha jornada na faculdade.

À minha namorada Natalia por acreditar em mim, pelo apoio e pela compreensão em todos momentos difíceis. E também, pela paciência em todas fases enfrentadas desse processo.

Aos meus amigos de faculdade, por desde o início estarem presentes e me acompanhando nas horas boas e complicadas destes anos. Sem vocês eu não teria chegado até aqui, espero levá-los por toda vida.

E, um agradecimento em especial ao meu colega Eric D'Antona, por todas as madrugadas em claro de estudos.

We cannot solve our problems
with the same thinking we used
when we created them.

Albert Einstein

RESUMO

Atualmente tem-se uma grande demanda de substituição dos carros a combustíveis fósseis por veículos elétricos, os quais tendem a ser menos prejudiciais ao meio ambiente e, conseqüentemente, uma ótima alternativa para o problema energético mundial. Um problema no desenvolvimento dos carros movidos a eletricidade é o aquecimento da fonte de energia, a bateria, portanto, investigou-se como o aquecimento da bateria pode ser minimizado e controlado de forma eficiente. Com o auxílio do software de código aberto OpenFOAM, inicialmente foi projetado um modelo numérico de resfriamento líquido com base em uma geometria já existente na literatura. O modelo consiste em uma bateria de íons de lítio envolvida por quatro minicanais de alumínio igualmente espaçados nos quais circulam-se o fluido. A independência dos resultados com o refino de malha foi verificada pelo método de convergência de malha (GCI). Após a malha determinada e convergida, pode-se comparar os resultados computacionais desenvolvidos com os já presentes na literatura e também com equacionamentos analíticos, validando o modelo do caso. Com base nisso, como era esperado, aumentando-se a vazão volumétrica do fluido dentro dos canais foi possível identificar um decréscimo de temperatura final da bateria e do fluido, porém, conseqüentemente, um aumento da perda de carga e potência de bombeamento do sistema. Além disso, investigou-se o efeito da inserção de nanopartículas de alumina em água. Notou-se que para a aplicação em questão, os efeitos foram negativos tanto para a temperatura quanto para a perda de carga. E por fim, variou-se a descarga de bateria no intuito de compreender o quanto o sistema de gerenciamento térmico desenvolvido seria efetivo para manter a temperatura dentro dos padrões de funcionamento adequado.

Palavras-chave: Resfriamento Líquido. OpenFOAM. Nanofluidos. BTMS.

ABSTRACT

Currently, there is a great demand to replace fossil fuel cars with electric vehicles, which tend to be less harmful to the environment and, consequently, a great alternative to the world energy problem. A problem in the development of electric cars is the heating of the energy source, the battery, therefore, it was investigated how the heating of the battery can be minimized and controlled efficiently. With the help of the open source software OpenFOAM, a numerical model of liquid cooling was initially designed based on a geometry already existing in the literature. The model consists of a lithium-ion battery surrounded by four equally spaced aluminum mini-channels in which the fluid circulates. The independence of the results with mesh refinement was verified by the grid convergence method (GCI). After the mesh has been determined and converged, the computational results developed can be compared with those already present in the literature and also with analytical equations, validating the case model. Based on this, as expected, increasing the fluid flow rate inside the channels, it was identified a decrease in the final temperature of the battery and the fluid, however, consequently, an increase in the pressure drop and pumping power of the system. Furthermore, the effect of inserting alumina nanoparticles in water was investigated. For the application in question, the effects were negative for both temperature and pressure drop. Finally, the battery discharge was varied in order to understand how effective the thermal management system developed would be to maintain the temperature within the standards of proper functioning.

Keywords: Liquid Cooling. OpenFOAM. Nanofluids. BTMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Carro Totalmente Elétrico	17
Figura 2 – Carro Híbrido	18
Figura 3 – Sistema de refrigeração de ar da cabine	19
Figura 4 – Resfriamento a Líquido de Tubo de Calor	20
Figura 5 – Método com Material de Mudança de Fase	20
Figura 6 – Desenvolvimento das camadas limite devido a movimentação do fluido sobre uma superfície aquecida	24
Figura 7 – Desenho esquemático de Resfriamento a Ar com Placas.	26
Figura 8 – Sistema Experimental de Resfriamento a Ar realizado em laboratório.	27
Figura 9 – Diagrama de Blocos Modelagem da Bateria.	28
Figura 10 – Temperatura máxima e variação para a bateria.	28
Figura 11 – Configurações de fluxo para pack de baterias.	29
Figura 12 – Configuração dos mini canais sobre a bateria	40
Figura 13 – Geometria dos mini canais	40
Figura 14 – Divisão em blocos com as três regiões da geometria no Paraview.	41
Figura 15 – Vista Frontal no plano YZ da malha de 10x10x10 para cada bloco	45
Figura 16 – Vista Frontal no plano YZ da malha de 20x20x20 para cada bloco	46
Figura 17 – Vista Frontal no plano YZ da malha de 30x30x30 para cada bloco	46
Figura 18 – Comparativo temperatura máxima bateria ao longo do tempo entre a Malha 1, 2 e 3 e modelo numérico de Lan et al. (2016) para o solver <i>chtMultiRegionFoam</i>	55
Figura 19 – Mapa de contorno da temperatura da bateria no plano YZ para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min, respectivamente.	59
Figura 20 – Temperatura da bateria ao longo da direção z na extremidade da saída dos canais para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	60
Figura 21 – Temperatura bateria na direção z no lado de entrada de fluido para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	60
Figura 22 – Temperatura bateria na direção y ao longo entrada e saída de fluido para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	61
Figura 23 – Temperatura do fluido ao longo da direção x na entrada do canal para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	62

Figura 24 – Temperatura do fluido ao longo da direção x na saída do canal para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	63
Figura 25 – Temperatura do fluido ao longo de toda a extensão do canal da direção x para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	64
Figura 26 – Temperatura do fluido no plano YZ na saída do canal para 0,05 L/min.	65
Figura 27 – Temperatura do fluido ao longo da direção y na saída do canal para as vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	65
Figura 28 – Magnitude da velocidade no plano YZ na saída do canal para velocidade de fluxo de 0,05 L/s.	66
Figura 29 – Magnitude de velocidade ao longo do x na saída do canal para as vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min	66
Figura 30 – Temperatura do fluido ao longo da direção y na saída do canal para percentuais de 0,0%, 2,0%, 4,0%, 6,0% e 8,0%.	68
Figura 31 – Temperatura do fluido ao longo da direção x na entrada do canal para percentuais de 0,0%, 2,0%, 4,0%, 6,0% e 8,0%.	69
Figura 32 – Temperatura da bateria na direção z no lado de entrada de fluido para descargas de bateria de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,05 L/min.	70
Figura 33 – Temperatura da bateria na direção z no lado de entrada de fluido para descargas de bateria de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,20 L/min.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Físicas dos materiais.	39
Tabela 2 – Condições Iniciais e de Contorno definidas no OpenFOAM.	42
Tabela 3 – Número de Volumes de Controle para cada Malha e Região.	47
Tabela 4 – Principais propriedades físicas dos nanofludos convencionais à temperatura de 300 K	49
Tabela 5 – Propriedades físicas da mistura de Alumina (Al_2O_3) com Água (H_2O) para razões volumétricas de 2%, 4%, 6% e 8%.	50
Tabela 6 – Diferença percentual entre as propriedades físicas da mistura de Alumina (Al_2O_3) com Água (H_2O) para razões volumétricas de 2%, 4%, 6% e 8%.	51
Tabela 7 – Geração de calor para bateria de íons de lítio 55 Ah para diferentes descargas (XU; HE, 2014).	51
Tabela 8 – Método GCI para o solver <i>chtMultiRegionFoam</i> com Malha 1, 2 e 3.	52
Tabela 9 – Método GCI <i>chtMultiRegionSimpleFoam</i> com Malha 1, Malha 2 e Malha 3.	53
Tabela 10 – Resultados para Malha 1, Malha 2 e Malha 3 obtidos pelo solver <i>chtMultiRegionFoam</i>	54
Tabela 11 – Resultados para Malha 1, Malha 2 e Malha 3 obtidos pelo solver <i>chtMultiRegionSimpleFoam</i>	54
Tabela 12 – Comparativo temperatura máxima bateria entre os dois solvers (Malha 3) e a simulação numérica de Lan et al. (2016).	55
Tabela 13 – Comparativo queda de pressão simulação <i>chtMultiRegionFoam</i> versus modelo analítico.	56
Tabela 14 – Comparativo queda de pressão simulação <i>chtMultiRegionSimpleFoam</i> versus modelo analítico.	56
Tabela 15 – Comparação entre os resultados obtidos pelos solvers <i>chtMultiRegionFoam</i> e <i>chtMultiRegionSimpleFoam</i>	57
Tabela 16 – Tempo de simulação do caso para os diferentes solvers <i>chtMultiRegionFoam</i> e <i>chtMultiRegionSimpleFoam</i>	58
Tabela 17 – Comparativo entre os resultados para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.	58
Tabela 18 – Tabela comparativa de propriedades para proporções de nanofluido de 0%, 2%, 4%, 6% e 8% na água.	67
Tabela 19 – Temperatura máxima na bateria para descargas de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,05 L/min.	69

Tabela 20 – Temperatura máxima na bateria para descargas de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,20 L/min.	71
--	----

LISTA DE SIGLAS

BTMS - Battery Thermal Management System

CFD - Computational Fluid Dynamic

EV - Electric Vehicle

GAMG - Generalized Geometric Algebraic Multigrid

GCI - Grid Convergence Index

HEV - Hybrid Electric Vehicle

MVF - Métodos dos Volumes Finitos

OpenFOAM - Open Source Field Operation and Manipulation

PCG - Preconditioned Conjugate Gradients Method

PCM - Phase Change Material

LISTA DE SÍMBOLOS

q''	Calor gerado por Área	[W/m ²]
κ	Condutividade Térmica	[W/mK]
∂	Derivada Parcial	
i	Coordenada Vetorial na Direção x	
j	Coordenada Vetorial na Direção y	
k	Coordenada Vetorial na Direção z	
T	Temperatura	[K]
h_i	Coeficiente de Transferência de Calor substância i	[W/m ² K]
T_s	Temperatura da Superfície	[K]
T_∞	Temperatura da Corrente Livre	[K]
κ_f	Condutividade Térmica do Fluido	[W/mK]
C_f	Coeficiente de Atrito	
τ_s	Tensão de Cisalhamento	[Nm ²]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
u_∞	Velocidade da Corrente Livre	[m/s]
u	Velocidade	[m/s]
κ_f	Condutividade Térmica do Fluido	[W/mK]
μ	Viscosidade Dinâmica	[Pa·s]
ν	Viscosidade Cinemática	[m ² /s]
α	Difusividade Térmica	[m ² /s]
C_p	Calor Específico a Pressão Constante	[J/kg·K]
Re_L	Número de Reynolds para dada largura L	
S_{Mx}	Termo Fonte para direção x	[W]

S_{My}	Termo Fonte para direção y	[W]
S_{Mz}	Termo Fonte para direção z	[W]
V	Volume	[m ³]
A	Área	[m ²]
t	Tempo	[s]
β	Razão de Aspecto Geométrica	
ρ_{nf}	Densidade do Nanofluido	[kg/m ³]
ρ_p	Densidade da Partícula	[kg/m ³]
ρ_{bf}	Densidade da Base Fluida	[kg/m ³]
ϕ_p	Razão Volumétrica da Mistura	
$c_{p,nf}$	Calor Específico do Nanofluido	[J/kg·K]
$c_{p,p}$	Calor Específico da Partícula	[J/kg·K]
$c_{p,b}$	Calor Específico da Base Fluida	[J/kg·K]
k_{eff}	Condutividade Térmica do Nanofluido	[W/mK]
k_{bf}	Condutividade Térmica da Base Fluida	[W/mK]
k_p	Condutividade Térmica da Partícula Nanofluida	[W/mK]
μ_{eff}	Viscosidade Dinâmica do Nanofluido	[Pa·s]
R_k	Taxa de Reação para espécie k	
h	Tamanho Representativo de Malha	
N	Número total de células em uma malha	
μ_{bf}	Viscosidade Dinâmica da Base Fluida	[Pa·s]
d_p	Diâmetro da Partícula	[nm]
p	Ordem Aparente	
r	Fator de Refinamento de Malha	
GCI	Índice de Convergência de Malha	
A_t	Área da Secção Transversal	[m ²]

Q_v	Taxa de Fluxo Volumétrico	
ΔP	Queda de Pressão	[Pa]
ΔP_{excess}	Excesso de Queda de Pressão	[Pa]
ΔP_t	Queda de Pressão Total	[Pa]
D_h	Diâmetro Hidráulico	[m]
K_L	Coefficiente Geométrico	
f	Fator de Fricção de Darcy	
\dot{v}	Taxa de Fluxo Volumétrico	[L/min]
\dot{W}	Potência de Bombeamento (Pumping Power)	[W]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	23
2.1.1	Condução	23
2.1.1.1	<u>Condutividade Térmica</u>	23
2.1.2	Convecção	24
2.1.2.1	<u>Coeficientes convectivos</u>	24
2.1.3	Resfriamento a ar	26
2.1.4	Resfriamento Líquido	27
2.2	MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	30
2.2.1	Leis de Conservação	30
2.2.2	Equação Geral do Transporte	32
2.3	NANOFLUIDOS	32
2.3.1	Caracterização da mistura	33
2.3.1.1	<u>Densidade</u>	33
2.3.1.2	<u>Calor específico</u>	33
2.3.1.3	<u>Condutividade térmica</u>	34
2.3.1.4	<u>Viscosidade</u>	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	ANÁLISE COMPUTACIONAL	36
3.1.1	Solver	36
3.1.1.1	<u>Equacionamento</u>	37
3.1.1.2	<u>Pré-processamento e Pós-processamento</u>	38
3.2	MODELAÇÃO DO CASO	39
3.2.1	Geometria e Geração de Malha	39
3.2.2	Divisão de Regiões e Malha	40
3.2.3	Condições Iniciais e de Contorno	41
3.2.4	Esquemas de simulação	42
3.3	VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	43
3.3.1	Convergência de Malha	43

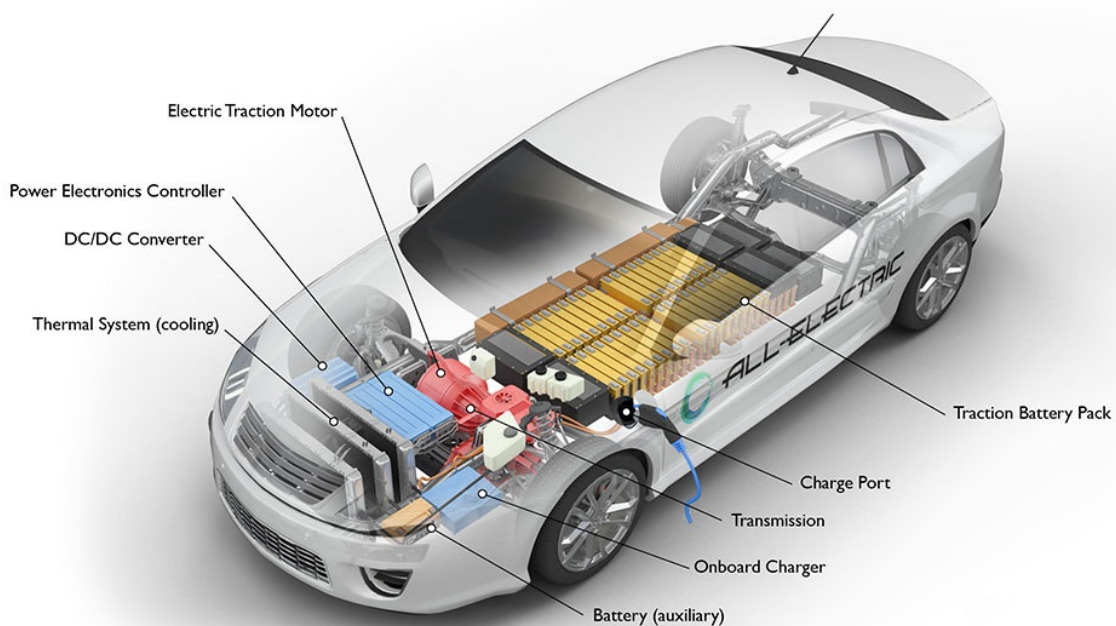
3.3.2	Comparativo Modelo Analítico e Computacional	47
3.3.3	Varição da Vazão Volumétrica do Fluido	48
3.3.4	Avaliação de Nanofluidos no Sistema	49
3.3.5	Varição de Fonte de Calor da Bateria	51
4	RESULTADOS	52
4.1	VERIFICAÇÃO DA CONVERGÊNCIA DE MALHA	52
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO	54
4.3	VARIAÇÃO DE VAZÃO VOLUMÉTRICA DO FLUIDO	58
4.3.1	Análise da Bateria	58
4.3.2	Análise do Fluido	61
4.4	ADIÇÃO DE NANOFLUIDO NO SISTEMA	67
4.5	VARIAÇÃO FONTE DE CALOR DA BATERIA	69
5	CONCLUSÕES	72
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXO A - Bloco de Notas com Pastas Principais do OpenFOAM	78

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, cerca de 13% das emissões anuais de gases do efeito estufa são em decorrência dos meios de transporte convencionais (LAN *et al.*, 2016). Segundo Brandão (2020), a composição atmosférica, principalmente nas áreas urbanas, tem mudado ao longo dos anos devido a emissões por diversas fontes. Com todos esses fatores e preocupações que estamos vivenciando, a demanda por fontes alternativas para o sistema de transporte convencional cresce cada vez mais.

O desenvolvimento e produção tanto de carros híbridos (HEVs) quanto elétricos (EVs) aumentou significativamente nos últimos anos a partir da inovação de empresas automobilísticas já existentes no mercado ou da criação de novas empresas voltadas a esse mercado. Tais veículos, além de menos prejudiciais ao meio ambiente, podem ser economicamente eficientes e com custo operacional, a longo prazo, inferior aos convencionais (XU *et al.*, 2017). As Figuras 1 e 2 demonstram, de forma resumida, os mecanismos dos HEVs e EVs.

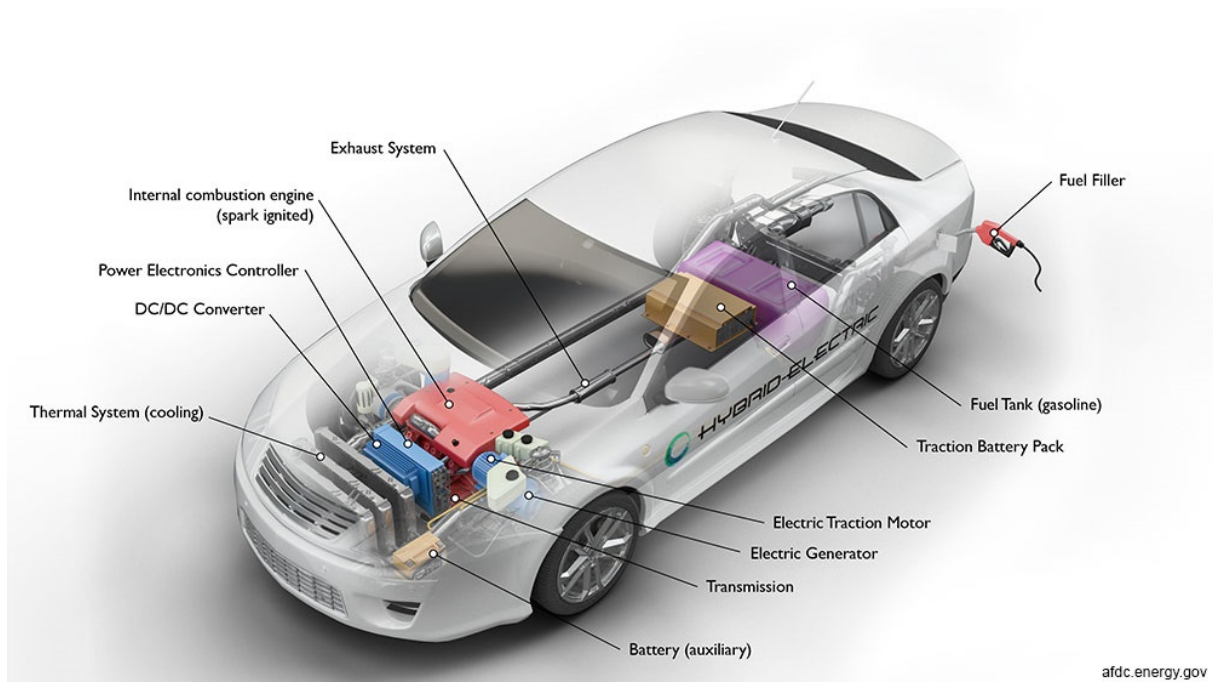
Figura 1 – Carro Totalmente Elétrico



afdc.energy.gov

Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2018).

Figura 2 – Carro Híbrido



Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos (2018).

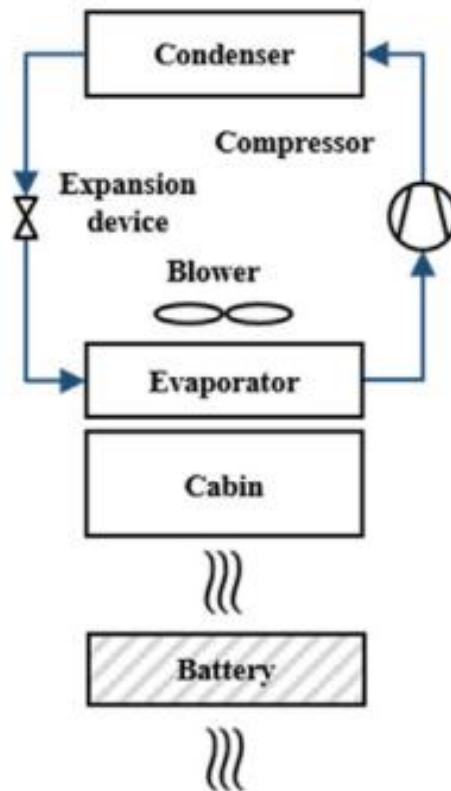
Nestes tipos de veículos, normalmente são utilizadas baterias de íons de lítio, por possuírem alta densidade de energia. A eficácia, a vida útil e o baixo custo operacional estão diretamente relacionados com a eficiência da bateria, que por sua vez está diretamente relacionado a capacidade de mantê-la sempre dentro de uma faixa de temperatura adequada. Normalmente, tem-se um intervalo ideal de operação de 15 °C a 35 °C, sendo que valores inferiores prejudicam o desempenho pelo baixo transporte de íons e valores superiores geram reações mais velozes e degradação dos eletrodos (LAN *et al.*, 2016).

Portanto, é de extrema importância realizar um estudo da manutenção da temperatura da bateria para se obter um bom funcionamento do sistema elétrico do carro como um todo. Esse mecanismo é chamado de *Battery Thermal Management System* (BTMS). Diversos autores, como Kim *et al.* (2019), Lan *et al.* (2016), Xu *et al.* (2014), entre outros, realizaram pesquisas relacionadas a esse tema com os veículos existentes, os quais utilizam, comumente, métodos de gerenciamento térmico com resfriamento a ar, refrigerante, líquido e com material de mudança de fase (PCM).

Muitos HEVs e EVs tem usado o sistema de resfriamento a ar atualmente. Segundo Kim *et al.* (2019), esse é um mecanismo de projeto simples, que se torna possível com um baixo custo de fabricação e manutenção. Comumente, nesta forma de BTMS o próprio ar refrigerado da cabine do veículo é utilizado para resfriar a bateria. Na Figura 3, temos um desenho esquemático de como é seu funcionamento. Em decorrência da baixa condutividade térmica e calor específico do ar, o sistema é pouco

eficiente, necessitando de uma elevada vazão de ar para manter uma variação de temperatura aceitável na bateria (KIM et al., 2019).

Figura 3 – Sistema de refrigeração de ar da cabine



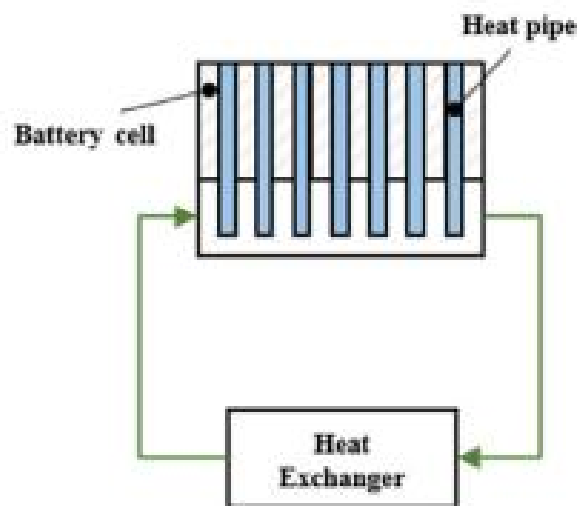
Fonte: Kim et al. (2019, p. 196).

Com isso, torna-se necessário utilizar outros fluidos de maior condutividade térmica a fim de aumentar equilíbrio de calor na bateria. O resfriamento a líquido é uma alternativa e pode ser feito de várias maneiras, com fontes externas de bombeamento gerando fluxo de massa para tubos de calor sobre a bateria ou placas externas. Na Figura 4 observa-se o desenho esquemático do resfriamento líquido por tubo de calores. Ao contrário do método anterior, esse apresenta uma eficiência muito maior com relação a troca de calor, porém, ao mesmo tempo uma complexidade de construção superior (KIM *et al.*, 2019).

Tal método também pode ser utilizado com o ar, porém com as desvantagens já apresentadas. Na referência de Kim et al. (2019) é apresentado um comparativo mais detalhado sobre os dois métodos. Por fim, o Phase Change Material (PCM), BTMS que utiliza-se da mudança de fase de uma substância a uma determinada temperatura, libera uma grande quantidade de calor sem consumo de energia. Isso acontece pelo fato da absorção do calor latente proveniente da troca de fase. Na Figura 5, tem-se o desenho esquemático deste método. O PCM tem como principal

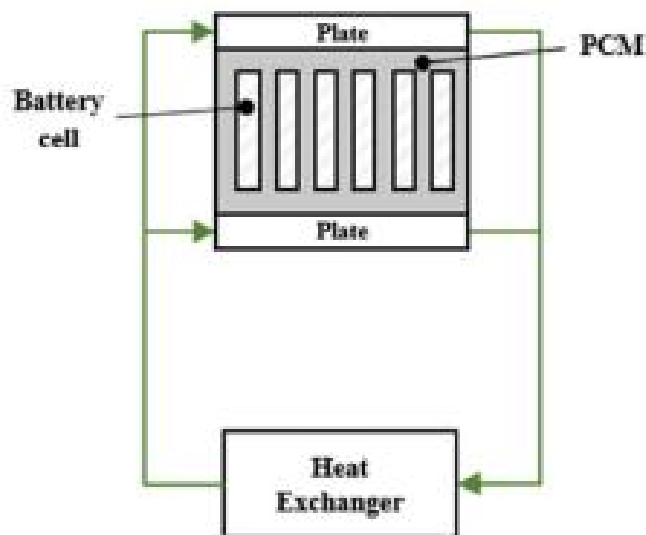
vantagem a eficiência, sem com que o design do modelo seja complexo. Porém, como desvantagem, a complexidade da manutenção do sistema, bem como seu controle (KIM et al., 2019). No texto de Kim et al. (2019) é apresentado um detalhe maior sobre o comparativo entre os métodos e suas variâncias.

Figura 4 – Resfriamento a Líquido de Tubo de Calor



Fonte: Kim et al. (2019, p. 196).

Figura 5 – Método com Material de Mudança de Fase



Fonte: Kim et al. (2019, p. 196).

Atualmente, os carros elétricos presentes no mercado utilizam variadas metodologias das apresentadas acima para o gerenciamento térmico da bateria. Por exemplo, o Toyota Prius, Lexus e Nissan Leaf, apresentam o resfriamento a ar. Enquanto que o Audi, Tesla modelo S e Chevy Volt utilizam o resfriamento líquido. A definição de

qual BTMS deve ser utilizado em um veículo irá depender do modelo da bateria bem como de sua disposição no veículo (LAN *et al.*, 2016).

Neste sentido, o presente trabalho consiste em uma análise de um BTMS com resfriamento líquido utilizando simuações CFD. A escolha do estudo de um BTMS com resfriamento líquido tem como razão dois fatores principais: eficiência e projeto. Eficiência pensando que com a inserção de líquido no sistema pode-se aumentar a condutividade térmica e calor específico, conseqüentemente aumentando o potencial de transferência de calor. Projeto, pensando que consegue-se modelos deste tipo de resfriamento sem ter geometrias muito complexas, com fácil fabricação e manutenção.

O processo de resfriamento líquido foi analisado com diferentes fluidos de trabalho, faixas de velocidade de fluxo, considerando a geometria proposta por Lan et al. (2016), no qual consiste em uma bateria de íons de lítio prismática envolta por quatro mini canais onde circulam-se o fluido. Nela, encontrou-se uma configuração que mais se adequa a cada tipo de aplicação específica, apresentando alta performance (taxa de transferência de calor adequada), custo operacional viável, com segurança e durabilidade. Entre os fluidos de trabalho, considerou-se os nanofluidos, que são dispersões de partículas sólidas em um líquido convencional, como a água, tendo como objetivo melhorar as propriedades físico-químicas do fluido, obtendo um maior potencial de transferência de calor.

O estudo teve o auxílio do programa de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), Open source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM). A análise numérica para casos complexos e que demandem muitos experimentos torna-se algo muito vantajoso. A partir do momento que se obtêm a validação do modelo de aplicação, consegue-se replicar o experimento de forma confiável e ágil, inúmeras vezes.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar e caracterizar um sistema de gerenciamento térmico de baterias a líquido para veículos elétricos através de simulação computacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar uma configuração ideal de malha computacional a partir da comparação de resultados utilizando diferentes refinamentos e prever a necessidade de poder computacional para o processo estudado;
- Examinar qual a influência da velocidade e seu sentido de entrada e saída dos canais para um melhor aproveitamento do sistema;
- Determinar uma relação entre o trabalho de bombeamento e acréscimo de velocidade fluida do sistema;

- Verificar como o sistema analisado consegue ser eficiente para diferentes fontes de calor e descargas energéticas;
- Entender a influência de partículas nanofluidas para o aprimoramento da transferência de calor para o sistema;
- Criar uma metodologia de análise numérica em baterias elétricas para futuros casos e aplicações de engenharia, principalmente aeroespacial e automotiva.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos teóricos sobre transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional, apresentados neste capítulo, são de suma importância para a continuação da leitura do trabalho e entendimento completo do tema.

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.1.1 Condução

O processo de condução de calor deve ser pensado como atividades atômicas e moleculares, nas quais se tem a transferência de energia entre partículas mais e menos energéticas. Ou seja, havendo um gradiente de temperatura de alguma substância, teremos uma movimentação, transferência de energia na direção do local de temperatura mais alta para temperatura mais baixa. Isso ocorre porque uma temperatura maior está associada a uma maior energia molecular, com moléculas se chocando e se movimentando efetiva (INCROPERA *et al.*, 2006). Para quantificar esse fluxo de energia utiliza-se a Lei de Fourier, apresentada na Equação (1).

$$\begin{aligned} q'' &= -\kappa \nabla T \\ &= - \left(\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} i + \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} j + \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} k \right), \end{aligned} \quad (1)$$

onde ∇ é o operador matemático nabla e $T(x, y, z)$ é o campo escalar de temperatura. Essa seria a expressão geral de Fourier, considerando o fluxo térmico como uma grandeza vetorial e assumindo fluxo nas três direções do plano cartesiano, com a qual se consegue determinar o fluxo térmico por unidade de área em cada uma das direções. Além disso, κ_i é a condutividade térmica em cada direção do plano, dependente do material (INCROPERA *et al.*, 2006).

2.1.1.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica mostra, de forma quantitativa, a habilidade do material de transportar energia térmica através da condução, ou seja, materiais com alta condutividade térmica tendem a conduzir uma quantidade maior de energia, conseqüentemente, ter um fluxo de calor maior (INCROPERA *et al.*, 2006). Esse coeficiente é de extrema importância para todas as análises realizadas na pesquisa e foi utilizado no software para os diferentes materiais adotados. Basicamente, pode-se ter a condutividade térmica sendo isotrópica ou anisotrópica, dependendo das características do material. Neste estudo, devido as baterias serem compostas de camadas de vários

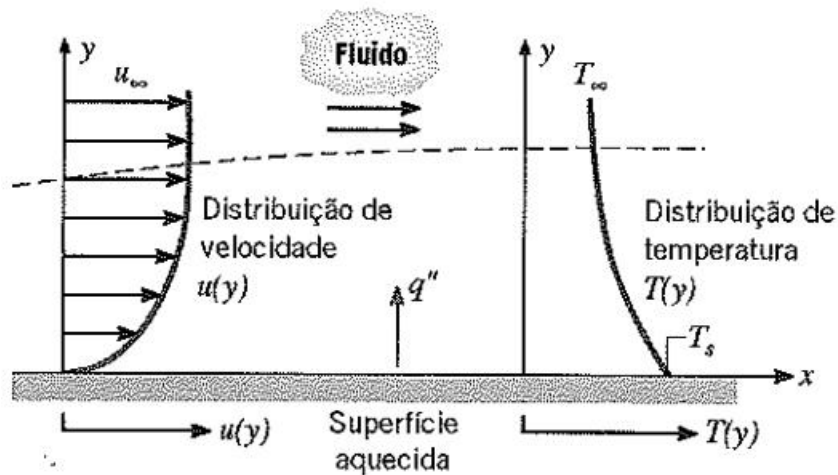
materiais, será assumida condições anisotrópicas, ou seja, a condutividade em cada uma das direções do plano variável.

2.1.2 Convecção

Usamos o termo convecção para descrever a transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento sobre uma superfície. A convecção inclui transferência de energia pelo movimento global do fluido (advecção) e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido (condução e difusão) (INCROPERA *et al.*, 2006, p. 221).

Para o estudo da convecção precisa-se definir dois conceitos importantes, as camadas limites térmica e hidrodinâmica. A medida que se tem o movimento de um fluido sobre alguma superfície, admitindo um gradiente de temperatura entre ambos os corpos, visualiza-se o desenvolvimento de uma região com certo perfil de temperatura e velocidade, chamados, respectivamente, de camada limite térmica e camada limite hidrodinâmica ou de velocidade (INCROPERA *et al.*, 2006). Na Figura 6 observa-se a distribuição de velocidade e temperatura desenvolvida na camada limite por convecção sobre uma placa plana aquecida.

Figura 6 – Desenvolvimento das camadas limite devido a movimentação do fluido sobre uma superfície aquecida



Fonte: Incropera et al. (2006, p. 5).

2.1.2.1 Coeficientes convectivos

A partir das características das camadas limite de velocidade e térmica, serão definidos coeficientes associados importantes e que estarão presentes neste trabalho. Primeiro, com a equação apresentada abaixo, pode ser definido o fluxo de transferência de calor por convecção como:

$$q'' = h(T_s - T_\infty), \quad (2)$$

onde q'' é o fluxo por convecção, T_s e T_∞ , respectivamente, temperatura da superfície e do fluido na corrente livre e h o coeficiente de transferência de calor por convecção. Essa expressão é conhecida como a lei de resfriamento de Newton, com a qual, utilizando as condições apresentadas pela camada limite térmica, consegue-se, expressar esse coeficiente de convecção da seguinte forma (INCROPERA *et al.*, 2006):

$$h = \frac{\kappa_f \partial T / \partial y|_{y=0}}{T_s - T_\infty}, \quad (3)$$

onde o gradiente de temperatura na superfície, dado por $\partial T / \partial y|_{y=0}$, é influenciado, completamente, pelas condições no interior da camada limite térmica. No caso de escoamentos internos, a temperatura do fluido na corrente livre é substituída pela temperatura média do escoamento na seção transversal na Equação (2). Além desse coeficiente, é necessário definir alguns número adimensionais muito utilizados no ramo da mecânica dos fluidos e transferência de calor, como um todo (INCROPERA *et al.*, 2006). Relacionando camada limite de velocidade, mais especificamente, à tensão de cisalhamento na superfície para o efeito de atrito, define-se o coeficiente de atrito como,

$$C_f \equiv \frac{\tau_s}{\rho u_\infty^2 / 2}, \quad (4)$$

onde τ_s é a tensão de cisalhamento na superfície, ρ é a densidade e u_∞ a velocidade da corrente livre.

Outro coeficiente é o número de Prandtl, definido como a razão entre a viscosidade cinamática ν e difusividade térmica α , fornece a efetividade relativa por difusão do momento e energia internamente nas camadas limite de temperatura e velocidade (INCROPERA *et al.*, 2006), e pode ser expresso por,

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad (5)$$

onde $\nu = \mu / \rho$ é a relação entre a viscosidade e densidade e $\alpha = \kappa / (C_p \rho)$ a relação entre a condutividade térmica pela densidade e calor específica a pressão constante. Por fim, o número de Reynolds, representa umarazão entre as forças de inércia e as viscosas. É um número adimensional utilizado para definir se um escoamento é laminar ou turbulento (INCROPERA *et al.*, 2006)¹. Para um determinado comprimento característico L , em certa coordenada, defini-se, (6):

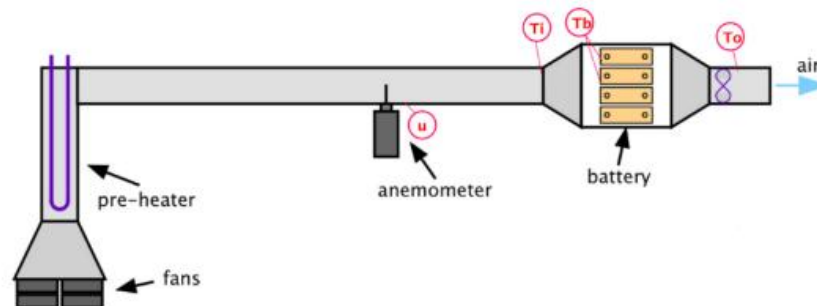
$$Re_L = \frac{u_\infty^2 L}{\nu} \quad (6)$$

No caso de escoamentos internos, o diâmetro é usado como comprimento característico. Convém ressaltar que a transferência de calor por radiação não foi considerada no presente estudo.

¹ Para detalhamento do tema veja Incropera *et al.* (2006).

testadas. Além disso, foram comparados testes realizados com outros fluidos, como o próprio ar, o Óleo de Silicone (Clearco-50cSt) e Poliéter Perfluorado (Galden HT135). Os resultados mostram melhor performance do Galden, limitando de forma mais eficiente a temperatura máxima de superfície dos módulos de baterias.

Figura 8 – Sistema Experimental de Resfriamento a Ar realizado em laboratório.



Fonte: Menale et al. (2012)

Como o presente trabalho foca em sistemas BTMS de resfriamento líquido, este tema será mais aprofundado nas próximas seções. Porém, vale mencionar referências como Yates et al. (2019), Mohammadian et al. (2015) e Park et al. (2013) ainda no que tange a resfriamento a ar. Muitas configurações diferentes foram desenvolvidas ao longo dos anos e muitos dados foram coletados de forma experimental e computacional e pode ser usado como base teórica para análises futuras.

2.1.4 Resfriamento Líquido

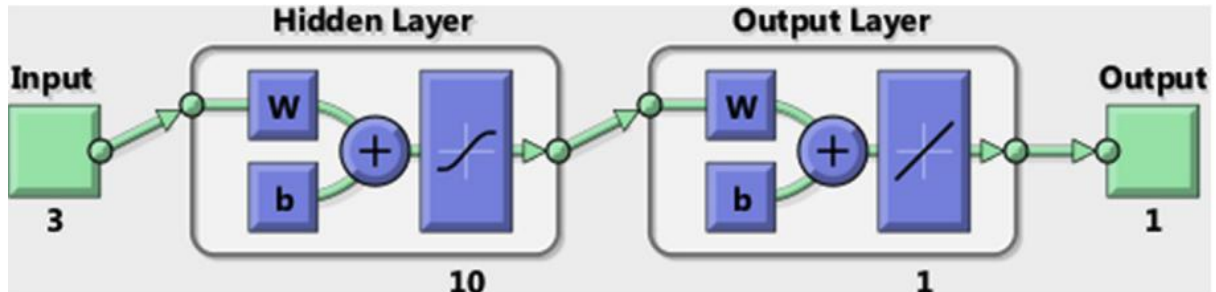
Como os sistemas de resfriamento líquido tendem a ser mais complexos na maioria dos casos, menos estudos foram realizados sobre o tema até o momento atual. Entretanto, cada vez mais este tipo de mecanismo mostra-se presente nos veículos elétricos comercializados atualmente. Com a substituição do ar como fluido circulante, para água, óleos, entre outros, consegue-se obter uma condutividade térmica elevada, e conseqüentemente um maior desempenho do processo em geral.

Panchal et al. (2016), investigou experimentalmente e teoricamente a distribuição de temperatura para uma bateria de íon de lítio prismática. Com base em experimentos, ele conseguiu determinar um equacionamento para calcular o calor gerado pela bateria e os seus efeitos com diferentes descargas, variando de 1 C até 5 C. Na Figura 9, visualiza-se o diagrama de blocos construído para o modelo da bateria, baseado em redes neurais.

Para parâmetros de entrada, o autor utilizou as condições de contorno de 5 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C, taxas de descarga de 1 C, 2 C, 3 C e 4 C e carga e capacidade de 1 C. Ele chegou à conclusão de que dependendo da descarga e temperatura ambiente, a bateria irá suportar até um limite máximo de temperatura de superfície. Pensando

em uma temperatura ambiente padrão de 27 °C, nesta faixa de descarga a bateria alcançaria temperaturas não mais do que 40 °C.

Figura 9 – Diagrama de Blocos Modelagem da Bateria.

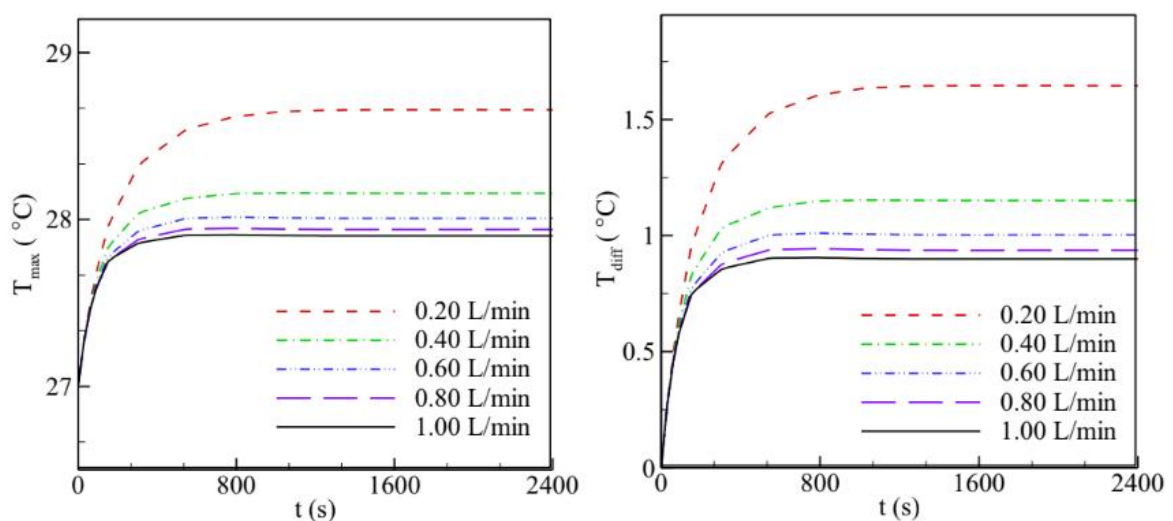


Fonte: Panchal et al. (2016)

Lan et al. (2016) estudou de forma numérica o gerenciamento térmico através do resfriamento líquido em minicanais de alumínio com diferentes geometrias. Nele, foi possível investigar qual disposição de canais, quantidade e sentido de fluxo são mais eficientes para manutenção da temperatura. Foram obtidos variações de temperatura máxima na bateria inferiores a 1 °C para taxas de descarga de 1,5 C vazão de 0,8 L/min e potência de bombeamento de $4,23 \cdot 10^{-4}$ W e taxa de descarga de 2 C com vazão de 2,0 L/min e potência de bombeamento de $5,27 \cdot 10^{-3}$ W.

Com esse resultado, pode-se notar que para descargas de baterias maiores, necessita-se de maior velocidade de fluxo e bombeamento para se obter variações de temperaturas similares. Na Figura 10, tem-se gráficos da temperatura máxima e variação de temperatura para geometria de quatro minicanais igualmente espaçados com uma descarga de 1,5 C em diferentes velocidades.

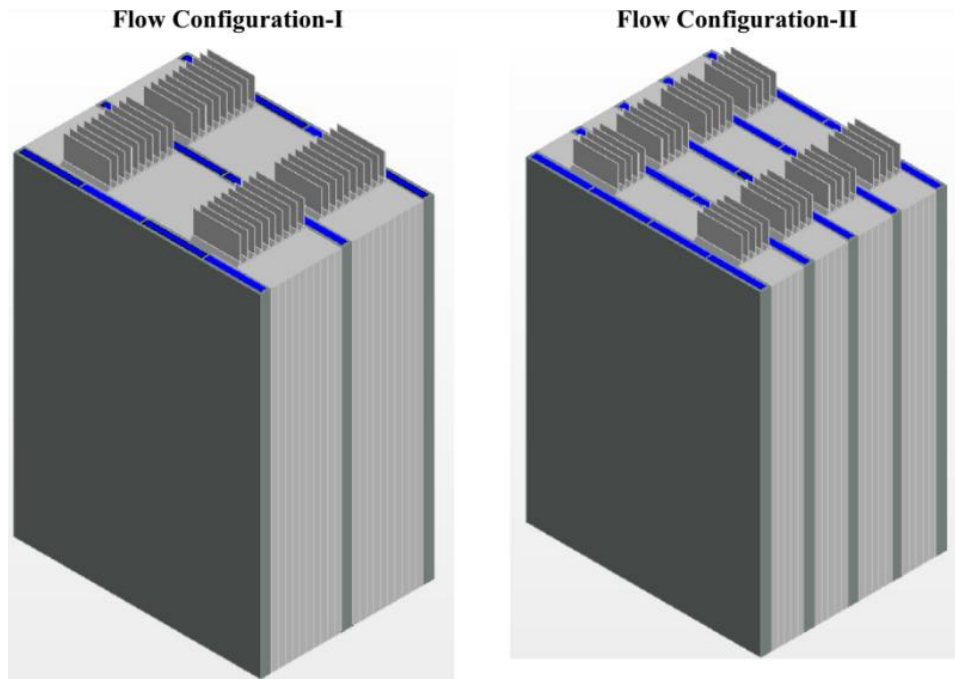
Figura 10 – Temperatura máxima e variação para a bateria.



Fonte: Lan et al. (2016)

Na Figura 11, nota-se que na primeira configuração, tem-se uma distribuição de três canais de fluido, enquanto que na configuração dois estão presentes cinco canais. Os locais em azul da figura são onde estão presentes a movimentação do fluido. Foi analisado, inicialmente, fluidos convencionais como a água, ar e etilenoglicol, e notou-se uma melhor eficiência térmica da água, devido a sua alta condutividade térmica em comparação aos outros fluidos.

Figura 11 – Configurações de fluxo para pack de baterias.



Fonte: Mondal et al. (2017)

Além disso, foi estudado o equilíbrio de concentração de partículas nanofluidas como Alumina (Al_2O_3) e Óxido de cobre (CuO). Notou-se que apesar de as partículas nanofluidas terem um efeito positivo na condutividade térmica, isso era balanceado pelo decréscimo do calor específico do mesmo, devendo ser estudado caso a caso dependendo de variáveis como, geometria, temperatura de operação, descarga da bateria e razão volumétrica das partículas na mistura.

Além dos autores citados acima, existem diversos outros estudos de métodos BTMS utilizando o resfriamento líquido como solução. Para um aprofundamento do assunto e suas variações, autores como Xu et al. (2017), Smith et al. (2014), Cao et al. (2019), entre outros estão presentes nas referências. Atualmente, busca-se maneiras de otimizar a performance do sistema, variando-se configuração, tipo de fluido, vazão e potência de bombeamento.

2.2 MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A mecânica dos fluidos computacional é o estudo e análise de sistemas relacionados a transferência de calor, reações químicas e movimento de fluido baseados na simulação computacional. Ao longo das décadas as técnicas e poder computacional foram se desenvolvendo, e cada vez mais os resultados se aproximaram da condição física real. Hoje, devido à grande evolução de processamento computacional, pode-se investigar diversos sistemas físicos complexos das mais variadas áreas de aplicação da engenharia.

O método dos volumes finitos é utilizado como método numérico por muitos softwares atualmente, como o OpenFOAM, onde as simulações computacionais serão realizadas.

No método dos volumes finitos (MVF) as equações diferenciais são aproximadas através de balanços das propriedades de interesse (massa, quantidade de movimento, entalpia, etc.) em volumes de controle de tamanho finito (MALISKA, 1995, p. 5).

2.2.1 Leis de Conservação

As leis da conservação serão mostradas na forma diferencial conservativa ou divergente. Para todas, deve-se considerar um volume infinitesimal de fluido e analisar as equações governantes neste elemento. Considerando e analisando as propriedades como pressão, temperatura, velocidade e densidade de forma macroscópica (maior do que 1 μm), ou seja, a influência individual molecular não será levada em conta para o sistema macro (MALISKA, 1995).

Primeiramente, a chamada equação de conservação da massa, considera que dentro de um volume de controle do fluido, a massa é conservada, ou seja, a taxa de crescimento de massa no fluido deve ser igual à taxa líquida de fluxo de massa entrando no fluido. Realizando esse conceito sobre o volume de controle analisado utilizando manipulações matemáticas, obtém-se a expressão (Equação 7):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

A equação (7), também chamada de equação da continuidade, está escrita da forma compacta vetorial para um regime transiente, tridimensional, para um fluido compressível, onde ρ e \mathbf{u} são densidade e velocidade, respectivamente. O primeiro termo da esquerda, o termo relacionado à variação temporal da densidade, e o segundo descrevendo a taxa líquida de fluxo de massa que atravessa o elemento, também conhecido como termo convectivo (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A partir da segunda Lei de Newton, dentro de uma partícula fluida a taxa de variação de momento é igual à soma das forças dentro da mesma, e esta é a ideia básica para a construção da expressão de conservação da quantidade de movimento

linear. As três equações, para cada uma das direções do plano cartesiano, são apresentadas nas Equações (8), (9) e (10).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (10)$$

As equações (8), (9) e (10) são as equações de conservação do momento linear para as componentes, x , y e z , onde p é a pressão e u , v e w a respectiva velocidade para cada uma das direções. Além disso, S_M é o termo fonte das forças de corpo por unidade de volume por unidade de tempo para cada direção. Estas expressões estão na forma diferencial para uma partícula fluida incompressível, transiente e Newtoniana.

Por fim, para a conservação da energia, utiliza-se a primeira lei da termodinâmica, descrita na Equação (11). Ela diz que a taxa de variação de energia é igual a soma da taxa de adição de calor e o trabalho realizado em uma partícula fluida (MALISKA, 1995),

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -p \text{div } \mathbf{u} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi, \quad (11)$$

onde i é a energia interna, T a temperatura e Φ a função dissipação. A equação (11) é a equação geral da conservação de energia, para uma partícula fluida da forma vetorial, transiente, compressível e Newtoniana. Existem diversas formas desta expressão, como, por exemplo, em formato de entalpia, e dependendo de como e onde você terá que utiliza-lá para encontrar sua forma apropriada.

Todas essas equações apresentadas anteriormente são de extrema importância para o estudo da transferência de calor e mecânica dos fluidos e são a base para qualquer estudo na área. Com suas soluções, consegue-se encontrar as propriedades físicas de interesse, como temperatura, pressão, densidade, velocidade, etc. Sendo exatamente o que método computacional irá fazer, dependendo somente do método numérico e das considerações específicas utilizadas. Lembrando que todas as expressões foram apenas apresentadas e não deduzidas, pois não é o escopo deste trabalho. Para encontrar uma dedução mais detalhada, assim como as formas discretizadas das equações, aconselha-se consultar a referência (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.2.2 Equação Geral do Transporte

A equação geral do transporte simplifica todas as expressões de conservação apresentadas acima. Considerando uma variável geral ϕ , a forma conservativa de todas as equações fluidas pode ser escrita como apresentado na Equação (12).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S_\phi \quad (12)$$

Esta é a chamada equação de transporte para uma propriedade ϕ , onde Γ é o termo difusivo e S_ϕ o termo fonte para a respectiva propriedade. Cada um desses termos tem um nome apropriado, sendo do lado esquerdo o primeiro termo associado à taxa de variação temporal e o segundo chamado de termo advectivo. Do lado direito, temos o primeiro termo chamado de termo difusivo e o segundo de termo fonte. Integrando-a em um volume de controle finito tridimensional, chega-se a expressão (13).

$$\begin{aligned} \int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho\phi dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) dA dt \\ = \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{CV} S_\phi dV dt \end{aligned} \quad (13)$$

A equação (13) é a forma integral da expressão do transporte para uma propriedade ϕ . Nota-se que esta propriedade ϕ , pode ser qualquer propriedade física, como temperatura, velocidade, entalpia, etc. Substituindo, respectivamente, 1, u , v , w e i em ϕ na equação (12), as cinco expressões de conservação apresentadas acima podem ser novamente encontradas. Com isso, essa expressão pode ser considerada uma generalização de todas as leis de conservação. Por isso, ela é de extrema importância para a mecânica dos fluidos computacional e será muito utilizada no decorrer desta obra. As expressões para a difusividade de cada propriedade e o termo fonte correspondente podem ser obtidos em Maliska (1995).

2.3 NANOFUIDOS

A necessidade de buscar formas de obter maior eficiência em sistemas de refrigeração a partir de diferentes fluido de aplicação, surge, entre outros motivos, pela baixa condutividade térmica dos fluidos convencionais, como água, óleo, entre outros (VECCHIA, 2019). Desde o trabalho teórico de Maxwell (1881), no estudo da condutividade térmica efetiva de substâncias com dispersões de partículas sólidas, diversos estudos teóricos e experimentais vem sendo conduzidos com esse objetivo. Então, Choi e Estman (1995), criaram uma nova classe de fluidos por meio da adição de nanopartículas sólidas metálicas em fluidos de transferência de calor convencionais.

Nanofluidos são dispersões de partículas sólidas em escalas nanométricas, entre 1 a 100 nm , em fluidos bases. Essas dispersões são feitas através do processo

físico chamado de método de passo, no qual as partículas são produzidas e dispersas simultaneamente no fluido base. Ou, através do processo físico de dois passos, em que as mesmas são dispersas posteriormente de sua produção (VECCHIA, 2019). O método do passo única ainda é muito pouco utilizado, porém, diversos estudos vem sendo publicados com o intuito de aprimorar e desenvolver esse processo de dispersão.

Com essas pequenas quantidades de partículas, consegue-se alterar as propriedades do fluido e conseqüentemente o sistema de transferência de calor como um todo. O acréscimo da condutividade térmica, por exemplo, acontece pelas colisões entre partículas, havendo transporte de calor, explicado pelo Movimento Browniano e também pelo estado intermediário físico do fluido base em comparação a sua composição única.

2.3.1 Caracterização da mistura

Para caracterizar um fluido, é necessário determinar suas propriedades termofísicas como densidade, calor específico, viscosidade e condutividade térmica, alteradas devido à presença de partículas sólidas no fluido. Algumas delas conseguem ser determinadas através das relações básicas de misturas, porém outras, necessitam de caracterização experimental. Akilu et al. (2016) apresenta uma síntese de diversos trabalhos e equacionamentos experimentais para uma vasta quantidade de nanofluidos existentes.

2.3.1.1 Densidade

Conforme citado anteriormente (AKILU *et al.*, 2016), para a densidade conseguimos determinar a densidade final da mistura com base na proporção de cada componente, ou seja,

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_p) \rho_{bf} + \phi_p \rho_p, \quad (14)$$

onde ϕ_p é a concentração volumétrica do nanofluido sobre o total, ρ_{bf} a densidade do fluido base e ρ_p a densidade do nanofluido em questão. Pela própria equação nota-se que a adição de partículas traz um aumento da densidade na mistura final.

2.3.1.2 Calor específico

De forma similar à densidade, o calor específico pode ser determinado como uma mistura dos calores específicos da fase sólida e líquida, quando ambas estão em equilíbrio. A partir de Xuan and Roetzel (2000), tem-se:

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi_p) \rho_{bf} c_{bf} + \phi_p \rho_p c_p}{\rho_{nf}}, \quad (15)$$

onde c_{bf} é o calor específico do fluido base, c_p da partícula nanofluida e ρ_{nf} a densidade da mistura calculado pela equação (14). Com isso, dependendo da fração volumétrica da partícula na base inicial, teremos um calor específico maior ou menor da mistura final.

2.3.1.3 Condutividade térmica

Já na condutividade térmica, não existe alguma relação que represente o comportamento de qualquer partícula em qualquer base fluida. Para este caso, deve-se entender características da mistura, como composição das duas substâncias, diâmetro da partícula, concentração volumétrica e temperatura de operação. Estudos conduzidos para as mais variadas aplicações e tipos de fluidos foram desenvolvidos ao longo do tempo, sendo equacionadas teoricamente ou experimentalmente. Uma tabela completa com diversas destas relações estão presentes no texto do Akilu et al. (2016).

Como exemplo, analisando uma mistura de Alumina (Al_2O_3) e água (H_2O), considerando um diâmetro de 36 nm (d_p), dentro de uma faixa de 0-18% de concentração volumétrica (ϕ_p) e temperatura entre 20 °C e 50 °C, Mintsá et al. (2009) mostra que a condutividade térmica é dada por:

$$k_{eff} = (1,0 + 1,72\phi_p) k_{bf}, \quad (16)$$

onde k_{bf} é a condutividade térmica do fluido base. Já para Pak and Cho (1998), para o mesmo nano fluido Alumina (Al_2O_3), porém com uma temperatura de operação de 25 °C e diâmetro de partícula de menor, com 13 nm e qualquer porcentagem volumétrica, encontrou a seguinte relação:

$$k_{eff} = (1,0 + 7,47\phi_p) k_{bf} \quad (17)$$

Já Li e Peterson (2006), encontrou uma relação para condutividade térmica dependente da temperatura de operação. Para eles, com uma faixa de temperatura de 27 °C a 36 °C, com um diâmetro de partícula de 36 nm e faixa de 2-6% de concentração volumétrica de Alumina (Al_2O_3), obteve:

$$k_{eff} = (1 + 0.7645\phi_p + 0.0187T - 0.4621) k_{bf}, \quad (18)$$

onde, T é a temperatura de operação do sistema em graus Celsius (°C). Por fim, uma expressão mais geral, na qual pode ser aplicado para diferentes nanopartículas, como Alumina (Al_2O_3), Óxido de Cobre (CuO), Cobre (Cu) e Dióxido de Titânio (TiO_2) com água (H_2O) e Etilenoglicol (EG), com diâmetro de 11 nm até 150 nm, faixa de 0-10% de

concentração volumétrica e temperatura de operação entre 20 °C a 70 °C, apresentada por Patel et al. (2010):

$$k_{\text{eff}} = \left[1 + 0,135 \left(\frac{k_{bf}}{k_p} \right)^{0,273} \phi^{0,467} \left(\frac{T}{20} \right)^{0,547} \left(\frac{100}{d_p} \right)^{0,234} \right] k_{bf}, \quad (19)$$

onde $\frac{k_b}{k_p}$ é a razão entre a condutividade térmica da base e partícula, ϕ a concentração da mistura, d_p o diâmetro de partícula e T a temperatura de operação.

Muitas outras expressões experimentais e teóricas podem ser encontradas no Akilu et al. (2016). De forma resumida, primeiramente deverá ser determinado o nanofluido desejado, encontrar todas as suas características básicas e então consultar na literatura algum modelo de caso coerente a análise ou realizar experimentos buscando encontrar as propriedades desejadas.

2.3.1.4 Viscosidade

De maneira similar à condutividade, a viscosidade deve ser determinada através de equacionamentos empíricos. Tudo irá depender de qual aplicação o material será utilizado e como é seu comportamento. Utilizando um range de percentual volumétrico de 0-9,4%, temperatura entre 20 °C e 75 °C, diâmetro de partícula de 36 nm, para a Alumina (Al_2O_3) com água (H_2O) a viscosidade da mistura é apresentada por Nguyen et al. (2007), como:

$$\mu_{\text{eff}} = [1 + 0,025\phi_p + 0,015\phi_p^2] \mu_{bf}, \quad (20)$$

onde μ_{bf} é a viscosidade da base fluida e ϕ_p a concentração. E para as mesmas condições, porém agora com um diâmetro de partícula de 47 nm, de forma similar:

$$\mu_{\text{eff}} = [1,475 - 0,319\phi_p + 0,051\phi_p^2 + 0,009\phi_p^3] \mu_{bf} \quad (21)$$

Já para a Dióxido de Titânio (TiO_2), com um diâmetro de partícula de 21 nm, range de percentual volumétrico de 0,2-2% e temperatura de operação de 25 °C, Duangthongsul and Wongwises (2009), propõem:

$$\mu_{\text{eff}} = 1,0113 + 0,0920\phi_p - 0,015\phi_p^2 \quad (22)$$

E por fim, para o Óxido de Cobre (CuO), variando com a temperatura de operação T , em graus Celsius (°C), com um diâmetro de partícula de 29 nm e concentração de 4%, Nguyen et al. (2007) nos mostra que:

$$\mu_{\text{eff}} = 2,1275 - 0,0215T + 0,0002T^2 \quad (23)$$

Da mesma forma, para encontrar mais expressões para cada tipo de aplicação e nanofluido, uma tabela completa para viscosidade é apresentado em Akilu et al (2016).

3 METODOLOGIA

Esta seção descreve os métodos utilizados no trabalho para análise do resfriamento líquido em baterias de veículos elétricos.

3.1 ANÁLISE COMPUTACIONAL

O OpenFOAM é um programa de código aberto em linguagem C++ de análise numérica para soluções de problemas nas mais vastas áreas da engenharia e ciência. Iniciado seu desenvolvimento em 2004, o software é usado de forma comercial e acadêmica, para as áreas de reações químicas, transferência de calor, acústica, electromagnetismo, entre outras (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017). Além disso, tem grande aplicação na dinâmica dos fluidos computacional (CFD), utilizado nesta pesquisa.

3.1.1 Solver

Após extensiva análise do manual OpenFoam (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017), foi escolhido utilizar os dois solvers *chtMultiRegionFoam* e *chtMultiRegionSimpleFoam*, que são adequados para resolver problemas transientes ou permanentes de fluxo de fluido e condutividade térmica sólida, com regiões conjugadas de transferência de calor para caso com turbulência e reações químicas.

Enquanto que o *chtMultiRegionFoam* soluciona problemas transientes (variantes no tempo), o *chtMultiRegionSimpleFoam* é utilizado para soluções permanentes (independentes temporais). Os dois solvers foram testados e comparados e estão apresentados ao longo do trabalho. A partir dos casos do tutorial do OpenFOAM, (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017), adaptou-se a geometria, condições iniciais e de contorno, esquemas numéricos e algoritmos de solução.

Ambos os solvers apresentam um equacionamento muito similar, divergentes pela solução para cada intervalo de tempo ao longo da simulação. Eles seguem uma estratégia de solução segregada, isso quer dizer que as equações para cada variável, que irão caracterizar o sistema, são resolvidas sequencialmente e a solução anterior é utilizado na equação subsequente.

O acoplamento entre o fluido e sólido também segue esta mesma estratégia, ou seja, primeiro as equações para o fluido são resolvidas usando a temperatura do sólido da iteração anterior para definir as condições de contorno para a temperatura do fluido. Depois disso, a equação para o sólido é resolvida usando a temperatura do fluido da iteração anterior para definir a condição de contorno da temperatura do sólido,

então, o procedimento de iteração é executado até alcançar a convergência.

3.1.1.1 Equacionamento

O solver soluciona as equações de conservação de massa, energia e momento, além de algumas outras necessárias, equações que podem ser encontradas no código fonte do solver. Vê-se a equação da massa ou continuidade, na Equação (24).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (24)$$

O subscrito j representa a coordenada que irá ser analisada, na qual, sendo cartesiano, será x , y e z . Essa nomenclatura segue a nomenclatura adotada pelo software em seu manual, podendo ser consultado em (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017). Da mesma forma, para a conservação do momento, tem-se:

$$\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_r u_j) = -\frac{\partial p_{rgh}}{\partial x_j} - + \text{div}(\mu \text{grad } u_j) + S_{M_j}, \quad (25)$$

onde u_r é a velocidade relativa, g_i a aceleração gravitacional, $p_{rgh} = p - \rho g_j x_j$ a pressão menos a pressão hidrostática e S_{M_j} é a fonte de calor da bateria em cada direção.

Da mesma forma, adotando a nomenclatura indicial descrita pelo solver, chega-se a conservação da energia, dada por:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \text{div}(k \text{grad } T) + \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (26)$$

onde h é a entalpia total do sistema. Nessa equação, tem-se o equacionamento da conservação de energia no formato de entalpia total e não energia interna, apresentada anteriormente pela Equação 11.

Para solução relacionada a região fluida e sólida do sistema, como previamente comentado, deve-se resolver cada região de forma segregada, utilizando-se da condição de contorno térmica entre as duas. Para a equação sólida, tendo que resolver somente a equação da energia, usamos:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (27)$$

Na equação (27), h é a entalpia específica, ρ a densidade e $\alpha = \kappa/c_p$ é a difusividade térmica, definida pela condutividade térmica κ e calor específico C_p .

Já para a região fluida será avançada a solução no tempo através de etapas do equacionamento. A interface entre as duas regiões, determinada pela condição de contorno térmica sólida e líquida, tem a mesma temperatura. Da mesma forma, o fluxo de calor entrando em uma região é igual ao fluxo saindo em outra. Estas duas condições são impostas no acoplamento sólido-fluido e apontadas pelas expressões (28) e (29). Descrições da nomenclatura de todo o equacionamento apresentado pode

ser encontrado dentro do código fonte (MOUKALLED *et al.*, 2016).

$$T_f = T_s \quad (28)$$

$$\kappa_f \frac{dT_f}{dn} = -\kappa_s \frac{dT_s}{dn} \quad (29)$$

Nas duas relações mostradas acima, T_f é a temperatura do fluido, T_s a temperatura do sólido, e κ_f e κ_s , a condutividade térmica, respectivamente, do fluido e sólido.

3.1.1.2 Pré-processamento e Pós-processamento

A etapa de pré-processamento consiste na preparação da geometria e malha, além da configuração do caso com as informações de propriedades físicas e condições iniciais e de contorno. No que diz respeito à configuração do caso, foram realizadas alterações nos arquivos de entrada do caso base do tutorial do solver (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017), adaptando-os para os dados de entrada desejados. A etapa de processamento ocorre na sequência e consiste na solução iterativa das equações governantes discretizadas. Por fim, segue-se para a etapa de pós-processamento, na qual os resultados são analisados.

Para determinação da geometria e geração de malha é utilizado o código *blockMesh*, cujo qual foi configurado a partir do arquivo *blockMeshDict*. Nele, determina-se toda a geometria, dividindo em diversos pontos, superfícies e blocos. Além disso, a partir destes blocos previamente criados são definidos os parâmetros de malha, ou seja, quantos volumes terá em cada um desses blocos para cada uma das direções do plano. Então, pode-se dizer que este dicionário do solver é a primeira etapa do pré-processamento.

Posteriormente, tendo a geometria e malha definidas, havendo mais de um tipo de material, deve-se configurar as regiões. Para isso, utiliza-se o comando *topoSet*, configurado a partir do arquivo *topoSetDict*. Nele, a geometria é dividida, sendo informado ao software onde estarão dispostos estes diferentes materiais. Desta forma, tem-se o bloco e malha inicial, juntamente com as subdivisões de blocos por região. Note-se que, a partir deste momento o programa além de reconhecer os diferentes materiais e como eles estão distribuídos, deve encontrar as interfaces entre esses materiais, para cada um dos casos.

E por fim, com a execução do comando *splitMeshRegions* foram divididos os volumes para cada uma das regiões de sólido/fluido definidas anteriormente. Essa etapa é de extrema importância, pois mais do que reconhecer estes fluidos e sólidos, o software tem que ser capaz de dividir a malha entre eles, de acordo com cada uma de suas geometrias. Após tais etapas, basta ser rodado o solver e o processamento de solução do equacionamento da seção anterior será resolvido. Todos os detalhes

referente a simulação e pós-processamento serão devidamente apresentados na próxima próxima seção. Mais informações sobre o uso dos comandos podem ser encontrados no Manual do solver (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017).

3.2 MODELAÇÃO DO CASO

Para o presente estudo, foi escolhida a geometria de bateria e sistema de resfriamento líquido de Lan et al. (2016). Esta geometria é usada tanto para a validação do modelo de simulação, pela comparação dos resultados com dados numéricos de Lan et al. (2016), quanto para as posteriores análises de variação de parâmetros.

3.2.1 Geometria e Geração de Malha

A bateria de íons de lítio foi modelada envolta de um conjunto de mini canais de alumínio, no interior dos quais ocorrerá o escoamento de água. As propriedades físicas para cada um dos materiais citados estão apresentadas na Tabela 1. Nota-se que a condutividade térmica da bateria tem dois valores, ou seja, diferentes κ para cada uma das coordenadas do plano cartesiano. Como citado no item 2.1.1.1, isso é uma condição de material anisotrópico, ou seja, a condutividade térmica não é igual em todas as direções. Neste caso, o κ_x e κ_z assumem o valor de 34,0 W/mK, enquanto que κ_y vale 3,4 W/mK.

Tabela 1 – Propriedades Físicas dos materiais.

Parâmetros	Alumínio	Bateria
$\kappa(\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$	238	3,4/34,0
$\rho(\text{kg m}^{-3})$	2700	1700
$C_p(\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$	90	830

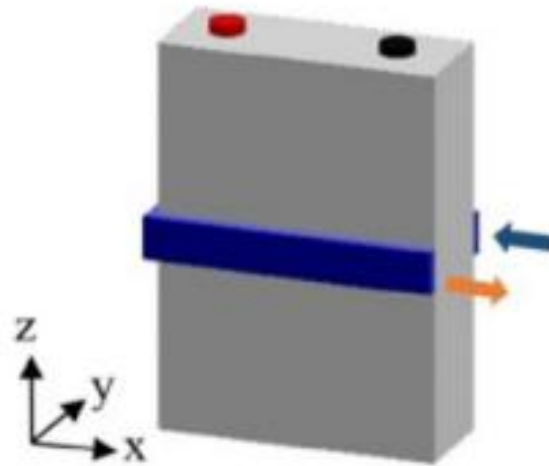
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A bateria tem as dimensões de 168 x 39 x 173 mm, respectivamente, nos eixos x , y e z . Uma das quatro geometrias propostas por Lan et al. (2016) esta apresentada na Figura 12. Ela foi utilizada para validação do modelo computacional e a sua geometria servirá de base durante o decorrer do trabalho Na Figura 13, pode ser visto a geometria dos minicanais, tendo cada canal 3 mm de altura (h) e largura (w) e 1 mm de espessura (δ). Com isso consegue-se garantir uma geometria interna de cada canal como quadrada, com uma área de secção transversal (A_t) de 9 mm³.

Na Figura 13 o comprimento L irá depender do comprimento da dimensão x da bateria, neste caso, 168 mm, no final do comprimento da bateria. Pensando no comprimento total do canal que envolve a bateria, deve-se contabilizar duas vezes o comprimento da bateria, ou seja, extensão de entrada e saída. Além de adicionar 5 mm

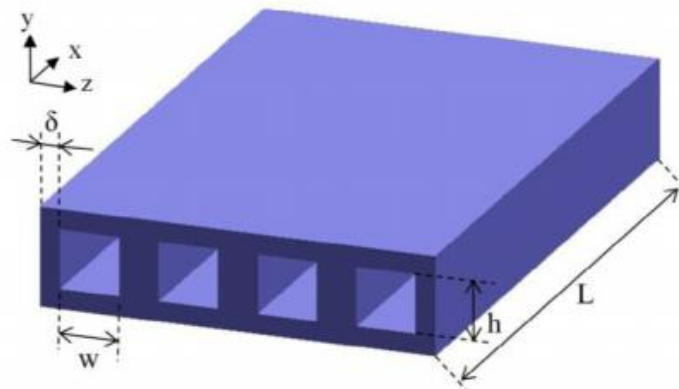
para cada uma das duas quinas, totalizando um L total do canal de 346 mm.

Figura 12 – Configuração dos mini canais sobre a bateria



Fonte: Lan et al. (2016, p. 285).

Figura 13 – Geometria dos mini canais



Fonte: Lan et al. (2016, p. 285).

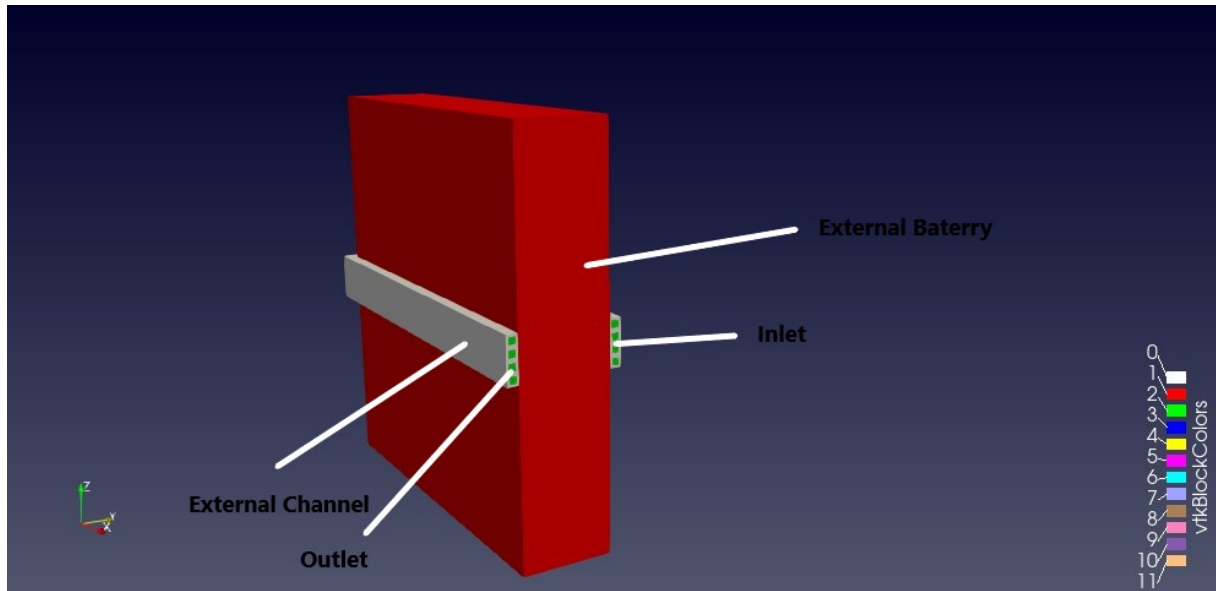
3.2.2 Divisão de Regiões e Malha

A próxima etapa após a geometria e a malha serem bem definidas é a correta separação das regiões. No caso em específico tem-se três diferentes materiais de interesse, o fluido, inicialmente sendo a água, os mini canais de alumínio e a bateria de íons de lítio. Dividir corretamente estas regiões é essencial, visto que para o reconhecimento do software com relação às propriedades físicas e condições iniciais e de contorno isto deve estar bem definido.

Na Figura 14, com auxílio do software ParaView, visualiza-se a representação da geometria após subdividida as regiões e a malha. Em vermelho encontra-se a bateria, de íons de lítio, em cinza os mini canais, de alumínio, e em verde, o fluido. Isto

mostra que o software fez o reconhecimento correto de cada região. Também, estão representados as fronteiras que deverão ser utilizadas para as condições de contorno na próxima seção, como, entrada e saída do fluido e partes externas da bateria e dos canais.

Figura 14 – Divisão em blocos com as três regiões da geometria no Paraview.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Dois pontos importantes valem ser comentados nessa etapa. Primeiro, deve-se tomar cuidado ao fazer essa subdivisão de regiões, pois para o software reconhecer corretamente cada local, devemos ter uma malha conforme entre os materiais. Isto quer dizer, torna-se necessário ter o mesmo número de malhas em cada uma das direções nas interfaces de contato. Pois, se este número de malhas que se encontram tiverem valores diferentes, o equacionamento em cada uma das fronteiras do volume não poderão ser reconhecido e calculado corretamente.

Além disso, todas as interfaces entre estes materiais tem que ser automaticamente entendidas pelo programa, pois serão necessárias para a seção subsequente.

3.2.3 Condições Iniciais e de Contorno

A partir do momento que essas regiões tiverem sido divididas, haverá as três principais pastas do OpenFOAM, $\backslash 0$, $\backslash constant$ e $\backslash system$ separadas para cada um dos materiais, neste caso, bateria, canais e água. Com isso, pode-se definir as condições iniciais, propriedades físicas e característica de esquema de simulação para cada uma destas regiões. Todos os valores deverão ser devidamente definidos em cada uma destas pastas, separadamente, para cada material.

Na pasta $\backslash constant$, serão definidas as propriedades físicas apresentadas

previamente pela Tabela 1. No Anexo A, são apresentadas cada umas dessas pastas com as propriedades físicas de cada material definidos no software. Além disso, para a geração de calor na bateria, utilizou-se um dicionário presente na biblioteca do OpenFOAM, chamada de *fvOptions*, também apresentado no Anexo A para consulta. Nela, pode-se utilizar a fonte de calor específica ou absoluta, sendo colocado por unidade de volume ou uniforme dentro do volume, respectivamente. Para início de análise, será estabelecido um valor de 1 C, que representa uma carga completa de uma hora da bateria, com o valor de 7,6 W, como presente no artigo base (LAN *et al.*, 2016).

Na pasta \0 os valores para as condições iniciais e de contorno foram definidos. Neste caso, considerando a temperatura inicial da bateria, canais e água fixadas a 27 °C. Para as entradas de fluxo de água no canal, será assumido a velocidade e temperatura uniforme e constante. Para a primeira análise e comparação ao artigo base (LAN *et al.*, 2016), utilizou-se uma vazão fixada em 0,05 L/min.

Sabendo que o canal completo é composto por quatro minicanais, devidamente espaçados e de mesma área, consegue-se calcular a velocidade de entrada individual, com,

$$v = \frac{Q_v}{A_t}, \quad (30)$$

onde Q_v é a vazão volumétrica e A_t é a área de seção transversal do canal. Este valor será dividido entre os quatro canais, obtendo uma velocidade de cada canal de 0,023 m/s. A pressão de saída do fluido foi assumida como 0 Pa.

Para as condições de contorno, deve ser definir os acoplamentos a partir das interfaces entre regiões, reconhecidas anteriormente pelo software. Além disso, será assumido que a bateria só irá trocar calor com os canais, ou seja, haverá uma condição de isolamento térmico entre a bateria e o ar externo a ela. Na Tabela 2 estão presentes todos as condições iniciais e de contorno inseridas para o caso.

Tabela 2 – Condições Iniciais e de Contorno definidas no OpenFOAM.

Regiões	Fronteira	Temperatura	Pressão	Velocidade
Fluido	Inlet	fixedValue	zeroGradient	fixedValue
	Outlet	inletOutlet	fixedValue	pressureInletOutletVelocity
Canais	External Channel	zeroGradient	calculated	-
Bateria	External Battery	zeroGradient	calculated	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2.4 Esquemas de simulação

Após todos os parâmetros das seções anteriores definidos, como geometria, malha, propriedades físicas, condições de contorno e iniciais, pode-se configurar os

esquemas de simulação na pasta `\system` e simular o caso.

Para os materiais sólidos do sistema, como a bateria e os canais, na pasta `fvSchemes`, será utilizado o esquema de simulação `GaussLinear`, método das Diferenças Centrais (CDS) e para o líquido, o CDS para o termo difusivo e `GaussUpwind`, método Upwind (UDS) para o termo advectivo, do equacionamento do MVF presente nas seções acima. Para mais detalhes sobre cada esquema de simulação presente na biblioteca do software, deverá ser feita a utilização do User Guide oficial do OpenFOAM (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017). O `timeStep` utilizado para o solver transiente `chtMultiRegionFoam` foi de 0,01 s.

E por fim, na pasta `fvSolution`, define-se a forma de solução do sistema algébrico de equações utilizados no MVF e software. Neste caso, a partir dos métodos iterativos Gradiente Conjugado Pré-condicionado (PCG) e Multigrid (GAMG), especificou-se o critério de convergência, `tolerance` e fator de relaxação, `relaxationFactors`. Detalhes estão presentes em cada uma das pastas no Anexo A.

3.3 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

3.3.1 Convergência de Malha

Para determinação do número de volumes adequado para a simulação, utilizou-se o método GCI (Grid Convergence Index) (CELIK *et al.*, 2008). O método se resume na seleção de três malhas com número de volumes distintos, no qual foi calculado parâmetros chave baseados em determinada propriedade física simulada do sistema.

Inicialmente, calcula-se o tamanho representativo de cada uma das malhas, h , a partir da equação:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3}, \quad (31)$$

onde ΔV_i é o volume e N o número total de células utilizados. Com esses valores, torna-se possível encontrar a razão entre o tamanho representativo das malhas, conhecido como, fator de refinamento de malha, dado pela equação (32) e que deve ser obrigatoriamente maior que 1,3.

$$r = \frac{h_{grosseira}}{h_{refinada}} \quad (32)$$

Assumindo que, $h_3 < h_2 < h_1$, $r_{12} = h_1/h_2$ e $r_{23} = h_2/h_3$, pode-se calcular a ordem aparente com o equacionamento apresentado por (33), (34) e (35).

$$p = \frac{1}{\ln(r_{12})} |\ln|\varepsilon_{23}/\varepsilon_{12}| + q(p)| \quad (33)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{12}^p - s}{r_{23}^p - s} \right) \quad (34)$$

$$s = 1 \cdot \text{sinal}(\varepsilon_{23}/\varepsilon_{12}), \quad (35)$$

onde $\varepsilon_{12} = \phi_1 - \phi_2$ e $\varepsilon_{23} = \phi_2 - \phi_1$, sendo ϕ a variável de interesse de análise para a solução da malha k^{th} . As equações deverão ser calculadas a partir de algum método de iteração, para encontrar as variáveis dentro das equações. Valores negativos de $\varepsilon_{12}/\varepsilon_{23}$, evidenciam uma convergência oscilatório.

Com a ordem aparente, p , pode-se encontrar o valor da variável física de análise extrapolada, para os comparativos entre os diferentes refinamentos, dado pelas equações:

$$\phi_{ext}^{12} = \frac{(r_{12}^p \phi_2 - \phi_1)}{(r_{12}^p - 1)} \quad (36)$$

$$\phi_{ext}^{23} = \frac{(r_{23}^p \phi_3 - \phi_2)}{(r_{23}^p - 1)} \quad (37)$$

E então, encontrar o erro relativo aproximado e erro relativo extrapolado, respectivamente, dados pelas equações (38) e (39), (40) e (41) para os dois comparativos entre refinamentos de malha.

$$e_a^{12} = \left| \frac{\phi_2 - \phi_1}{\phi_2} \right| \quad (38)$$

$$e_a^{23} = \left| \frac{\phi_3 - \phi_2}{\phi_3} \right| \quad (39)$$

$$e_{ext}^{12} = \left| \frac{\phi_{ext}^{12} - \phi_2}{\phi_{ext}^{12}} \right| \quad (40)$$

$$e_{ext}^{23} = \left| \frac{\phi_{ext}^{23} - \phi_3}{\phi_{ext}^{23}} \right| \quad (41)$$

Por fim, tem-se que o índice de convergência de malha refinada e grosseira, pode ser encontrado pelas equações (8) e (9), respectivamente.

$$GCI_{fine}^{12} = \frac{1,25e_a^{12}}{r_{12}^p - 1} \quad (42)$$

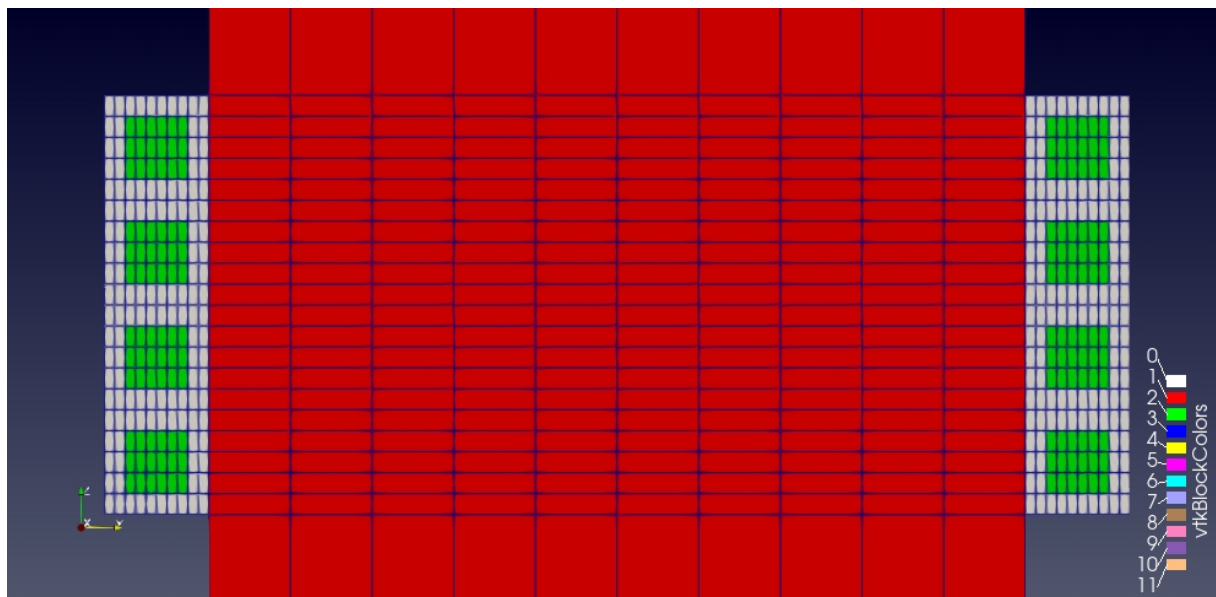
$$GCI_{fine}^{23} = \frac{1,25e_a^{23}}{r_{23}^p - 1} \quad (43)$$

Mais detalhes sobre o passo a passo do método GCI estão disponíveis em Celik et al. (2008).

O método foi utilizado com malhas de 10, 20 e 30 volumes em cada direção, para cada um dos blocos de formação. Para a geometria completa foram necessários quatorze blocos, formando todas as regiões. Utilizou-se um mesmo número de volumes para cada direção e cada bloco devido ao requisito de continuidade de malha em diferentes regiões, explicado na seção 3.2.2. e pela necessidade de mesmo espaçamento ditado pelo método GCI. Nas Figuras 15, 16 e 17, tem-se as malhas geradas para os diferentes refinamentos. Nelas, mostra-se as vistas do plano YZ, na região de entrada do fluido nos canais, região mais crítica e necessária para o refino de malha.

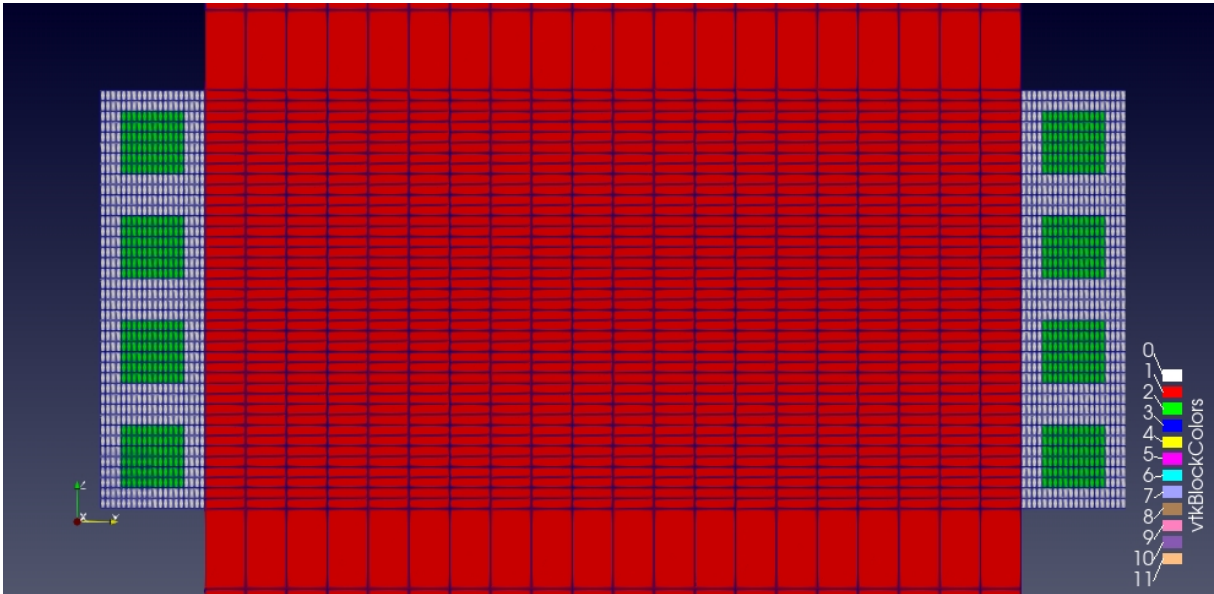
Nota-se que a medida que o volume cresce, quase não consegue-se notar o espaçamento entre cada volume. Nota-se que devido a diferença de tamanho em cada uma das direções do plano, com o aumento dos volumes, tem-se um controle maior em cada sentido. Além disso, constata-se que mesmo para um número de 20x20x20 na malha, se tem uma distribuição de volumes dentro do canal e na região do fluido razoável.

Figura 15 – Vista Frontal no plano YZ da malha de 10x10x10 para cada bloco



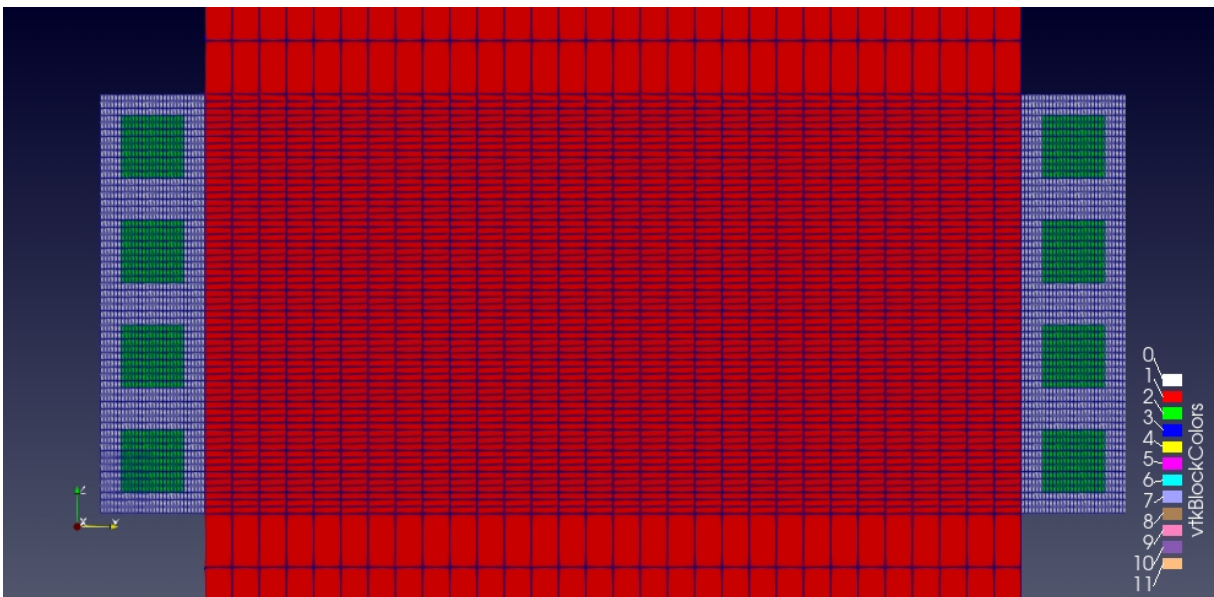
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 16 – Vista Frontal no plano YZ da malha de 20x20x20 para cada bloco



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 17 – Vista Frontal no plano YZ da malha de 30x30x30 para cada bloco



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 3, visualiza-se a quantidade de volumes totais por malha, bem como o número de volumes para cada uma das regiões da geometria. Com base nesses números totais de volume, além dos dados de propriedades importantes da simulação, utilizou-se o método GCI para calcular a convergência de malha.

Tabela 3 – Número de Volumes de Controle para cada Malha e Região.

Volumes por Região	Malha 1 (10x10x10)	Malha 2 (20x20x20)	Malha 3 (30x30x30)
Volumes na Bateria	4000	32000	108000
Volumes nos Canais	6400	51200	172800
Volumes no Fluido	3600	28800	97200
Total de Volumes	14000	112000	378000

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.3.2 Comparativo Modelo Analítico e Computacional

Os modelos desenvolvidos do caso transiente e permanente foram validados com os resultados obtidos pelas mesmas configurações no artigo de Lan et al. (2016). Também, foi possível fazer uma validação do modelo com base em equacionamentos analíticos presentes na literatura. Com os valores de fluxo de massa do fluido, propriedades físicas e temperatura de entrada e saída nos canais, pode-se calcular de forma aproximada a geração de calor do fluido, pela Equação (44). Comparado com o geração de calor pela descarga de bateria proposta, inicialmente, com valor de 1 C, ou seja, 7,6 W.

$$q_w = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (44)$$

onde \dot{m} é o fluxo de massa do fluido e ΔT a variação de temperatura do fluido na entrada e saída do canal.

Similarmente, validou-se o queda de pressão do fluido no canal calculado na simulação computacional com o equacionamento de queda de pressão para escoamento laminar completamente desenvolvido dentro de canais retangulares. De acordo com Shah e London (2014), o fator de fricção (f) de Darcy, pode ser calculado como,

$$(f Re)_{fd} = 24 \left(1 - 1,3553/\beta + 1,9467/\beta^2 - 1,7012/\beta^3 + 0,9564/\beta^4 - 0,2537/\beta^5 \right), \quad (45)$$

onde Re é o número de Reynolds e β a razão de aspecto geométrica, calculados, respectivamente, como:

$$Re = \frac{\rho_w u D_h}{\mu_w} \quad (46)$$

$$\beta = \frac{w}{h} \quad (47)$$

Nas equações, u é a velocidade de entrada no canal, D_h o diâmetro hidráulico de canal retangular, ρ_w e μ_w a densidade e viscosidade do fluido, respectivamente. Visto que o canal tem um seção transversal quadrada, $\beta = 1$ e então, $(f Re)_{fd} = 14,23$. Considerando a vazão volumétrica inicialmente como 0,05 L/min, encontra-se o valor de Reynolds de 73,80. E com isso, calcula-se a queda de pressão para cada faixa do canal, de largura L , dada pela expressão:

$$\Delta P = \frac{(\frac{1}{2}\rho_w U_0^2 * 4L * f)}{D_h} \quad (48)$$

Além deste valor, deve-se contabilizar a perde de carga causada pelas duas juntas quadradas com 90° na troca de direção do fluxo ao longo do canal. Para números de Reynolds pequenos, assumindo uma queda de pressão linear, esse excesso pode ser encontrado (KOCH *et al.*, 2007) como:

$$\Delta P_{\text{excess}} = K_L \frac{\mu U_0}{D_h}, \quad (49)$$

onde K_L é o coeficiente relacionado a geometria da junta, tendo o valor de 4,2 para quinas quadradas tridimensionais (KOCH *et al.*, 2007). Encontrando a perda de carga total presente em toda a extensão do canal retangular, levando em considerando o efeito de quina, com a Equação (50).

$$\Delta P_t = \Delta P + \Delta P_{\text{excess}} \quad (50)$$

Para maiores detalhes do equacionamento apresentado sugere-se a leitura do livro de Liu *et al.* (2004).

3.3.3 Variação da Vazão Volumétrica do Fluido

Com a malha e todo o modelo definido e validado, pode-se fazer variações de diversas formas buscando entender como o sistema como um todo se comporta. Sabe-se que aumentando a velocidade do fluido o mesmo removerá mais energia para da bateria, porém haverá um aumento na perda de carga ao longo do canal, o que demanda maior potência da bomba. Essa potência foi calculada com a relação entre a queda de pressão, ΔP , e vazão volumétrica, \dot{v} , presente na Equação (51).

$$\dot{W} = \Delta P \cdot \dot{v} \quad (51)$$

Mantendo o fluido dentro do regime laminar, foi variada a vazão do fluido para compreender o seu efeito com a eficiência do sistema, mas ao mesmo tempo, verificando a viabilidade de esforço de bomba requisitado.

3.3.4 Avaliação de Nanofluidos no Sistema

Após variações relacionadas a modelação do caso, velocidade do escoamento e descarga da bateria, foi analisada a operação com diferentes fluidos de trabalho. O objetivo de tal análise é verificar como a variação de propriedades físico-químicas da substância, altera os processos de transferência de calor.

Para o software, diferentes métodos relacionados a funções de misturas podem ser desenvolvidas (THE OPENFOAM FOUNDATION, 2017), porém, para praticidade de usabilidade e até mesmo para validação de métodos experimentais, considerou-se o nanofluido como uma substância simples. Com isso, utilizou-se as expressões analíticas e experimentais explicadas acima e expostas anteriormente. Descritos na seção 2.3.1., para dados de entrada no software, precisa ser encontrado as propriedades como densidade, calor específico, condutividade térmica e viscosidade dinâmica.

A densidade e calor específico, como citado anteriormente, utiliza-se de um equacionamento baseado na proporção volumétrica apresentada pela mistura, dados pelas equações (14) e (15).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_p) \rho_{bf} + \phi_p \rho_p \quad (14)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi_p) \rho_{bf} c_{bf} + \phi_p \rho_p c_p}{\rho_{nf}} \quad (15)$$

Para o nanofluido, será utilizada a Alumina (Al_2O_3), devido a sua alta condutividade térmica, calor específico e difusividade. A tabela apresentada por Akilu et al. (2016), pode ser vista na Tabela 4, no qual é mostrado um comparativo entre diferentes nanofluidos e suas principais características físicas na temperatura de 300 K. As informações foram mostradas pelas referências de Sharma et al. (2012), Kamyar et al. (2012) e Sattler (2016).

Tabela 4 – Principais propriedades físicas dos nanofluidos convencionais à temperatura de 300 K.

Nanopartícula	Condutividade Térmica [W/mK]	Densidade [kg/m ³]	Calor Específico [J/kg]	Difusividade Térmica x 10 ⁻⁶ [m ² /s]
Alumina	39	3970	775	11,9
Cobre	0,385	8940	401	0,107
Óxido de Cobre	17,65	6500	525	5,17
Silica	1,4	2200	745	0,854
Prata	0,235	10490	429	0,031
Titânia	8,4	4000	711	2,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Nota-se que ao mesmo tempo que temos altos valores de condutividade térmica e calor específico na tabela, a densidade se mantém em um valor intermediário, equilibrando um pouco o lado negativo de se ter uma alta viscosidade e, conseqüentemente, influência na queda de pressão do sistema. Assumindo o diâmetro de partícula (d_p) com 36 nm, sabendo que a temperatura de entrada do fluido será 300 K, realizou o cálculo da condutividade térmica e viscosidade da mistura pelo modelo de Mintsa et al. (2009) e Nguyen et al. (2007), respectivamente, apresentados pelas equações (16) e (20).

$$k_{eff} = (1,0 + 1,72\phi_p) k_{bf} \quad (16)$$

$$\mu_{eff} = [1 + 0,025\phi_p + 0,015\phi_p^2] \mu_{bf} \quad (20)$$

Variando o percentual volumétrico da partícula nanofluida na água (ϕ_p), para valores entre 2% a 8%, construiu-se a Tabela 5. Nela, visualiza-se que com o aumento do percentual volumétrico, proporciona-se à mistura, um aumento da densidade, condutividade térmica e viscosidade e uma diminuição do calor específico. Também, na Tabela 6, observa-se a diferença percentual das propriedades na mistura em relação a água. Conclui-se que, a propriedade com maior diferença percentual com o fluido base é o calor específico, com variação negativa para percentuais até 6% e a densidade para valores maiores que essa porcentagem.

Esses valores de densidade, calor específico, condutividade térmica e viscosidade, são definidos como dados de entrada para o programa e realizar a simulação. Com os resultados, será avaliado como a presença da substância nanofluido e a diferença de percentual de sua concentração influencia fatores como, a temperatura máxima na bateria, a perda de carga nos canais, e a potência de bomba requerida pelo sistema.

Tabela 5 – Propriedades físicas da mistura de Alumina (Al_2O_3) com Água (H_2O) para razões volumétricas de 2%, 4%, 6% e 8%.

Razão Volumétrica Percentual	2%	4%	6%	8%
Densidade [kg/m^3]	1055,86	1114,72	1173,58	1232,44
Calor Específico [J/kg]	3902,63	3653,65	3429,65	3227,04
Condutividade Térmica [W/mK]	0,6587	0,6806	0,7025	0,7244
Viscosidade [$mPa \cdot s$]	0,9326	0,9330	0,9335	0,9340
Difusividade Térmica x 10^{-6} [m^2/s]	0,1598	0,1671	0,1745	0,1821

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 6 – Diferença percentual entre as propriedades físicas da mistura de Alumina (Al_2O_3) com Água (H_2O) para razões volumétricas de 2%, 4%, 6% e 8%.

Razão Volumétrica Percentual	2%	4%	6%	8%
Densidade [kg/m^3]	5,90%	11,81%	17,71%	23,61%
Calor Específico [J/kg]	-6,66%	-12,61%	-17,97%	-22,82%
Condutividade Térmica [W/mK]	3,44%	6,88%	10,32%	13,76%
Viscosidade [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]	0,05%	0,10%	0,16%	0,21%
Difusividade Térmica $\times 10^{-6}$ [m^2/s]	4,64%	9,39%	14,25%	19,23%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.3.5 Variação de Fonte de Calor da Bateria

Para verificar a eficiência do sistema, e o quanto de descarga ele resiste, mantendo uma temperatura máxima de bateria aceitável, investigou-se qual o efeito do aumento de fonte de calor com os limites da bateria. Então, variou-se a descarga em diferentes valores, como 1,5 C e 2 C, analisando as curvas de temperatura ao longo do tempo. Na Tabela 7, estão apresentados os valores de geração de calor para diferentes valores de descarga para uma bateria de íons de lítio 55 Ah (XU; HE, 2014). Com isso, conseguiu-se entender o comportamento do sistema para diferentes intensidades de fonte de calor.

Tabela 7 – Geração de calor para bateria de íons de lítio 55 Ah para diferentes descargas (XU; HE, 2014).

Taxa de Descarga Bateria	1,0 C	1,5 C	2,0 C
Geração de Calor Bateria [W]	7,60	15,60	23,89

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4 RESULTADOS

Nesta seção mostra-se os resultados obtidos através das simulações feitas do modelo de resfriamento líquido em baterias proposto por Lan et al. (2016). Inicialmente apresenta-se a verificação da convergência de malha e validação do modelo para os dois solvers utilizados, através da comparação com o modelo computacional de Lan et al. (2016) e equacionamentos analíticos. Em seguida, utilizando o modelo definido, analisa-se o comportamento do sistema com alterações de vazão volumétrica do fluido, inserção de nanopartículas e aumento na taxa de descarga da bateria.

4.1 VERIFICAÇÃO DA CONVERGÊNCIA DE MALHA

Abaixo, na Tabela 8, estão indicados os valores resultantes da aplicação do método GCI, descrito na seção 3.3.1, para as Malhas 1, 2 e 3, com o solver *chtMultiRegionFoam*. O fluido utilizado nessa análise foi a água. Foram selecionadas para análise do método as variáveis de temperatura e pressão. Para a temperatura, avaliou-se a variação de temperatura na bateria em regime permanente, definida como a diferença entre a máxima e mínima temperatura alcançada pela bateria após o equilíbrio térmico do sistema. Já para a pressão utiliza-se a perda de carga no canal.

Tabela 8 – Método GCI para o solver *chtMultiRegionFoam* com Malha 1, 2 e 3.

Parâmetros Método GCI	Variação Temperatura Bateria [K]	Queda de Pressão [Pa]
r_{12}	2,00	2,00
r_{23}	1,50	1,50
ϕ_1	3,48	21,81
ϕ_2	3,18	25,69
ϕ_3	3,11	26,62
p	2,31	2,27
ϕ_{ext}^{12}	3,10	26,70
ϕ_{ext}^{23}	3,06	27,23
e_a^{12}	9,43%	15,10%
e_a^{23}	2,25%	3,49%
e_{ext}^{12}	2,43%	3,79%
e_{ext}^{23}	1,47%	2,26%
GCI^{12}	2,97%	4,93%
GCI^{23}	1,81%	2,89%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Nota-se que os valores da razão de convergência para as duas propriedades apresentam valores positivos, dentro do intervalo entre 0 e 1, denotando uma convergência monótona. Além disso, verifica-se que o fator de refinamento de malha entre as Malhas 1 e 2, e entre as Malhas 2 e 3, são de 2 e 1,5, respectivamente, respeitando o valor mínimo de 1,3 proposto pelo método (CELIK *et al.*, 2008).

Com relação ao índice de convergência de malha, observa-se que o GCI^{32} é menor que o GCI^{21} para as duas variáveis, ou seja, o índice tende a ficar menor conforme a malha se torna mais refinada. Isso mostra que a solução torna-se independente ao aumento refino de malha. Para as duas propriedades, obtêm-se valores para os índices de convergência na malha mais refinada (GCI^{32}) inferiores a 3%.

De forma similar, na Tabela 9, estão dispostos os valores calculados para o GCI através da simulação com o solver *chtMultiRegionSimpleFoam* para as Malhas 1, 2 e 3. Também, encontram-se valores positivos e menores que 1 para a razão de convergência, confirmando a convergência monótona, evidenciada na tabela através dos parâmetros ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 de temperatura e pressão.

Tabela 9 – Método GCI *chtMultiRegionSimpleFoam* com Malha 1, Malha 2 e Malha 3.

Parâmetros Método GCI	Variação Temperatura Bateria [K]	Queda de Pressão [Pa]
r_{21}	2	2
r_{32}	1,5	1,5
ϕ_1	3,16	21,81
ϕ_2	3,03	25,69
ϕ_3	2,96	26,62
p	2,2462	2,2726
ϕ_{ext}^{21}	2,9641	26,7175
ϕ_{ext}^{32}	2,9239	27,2557
e_a^{21}	4,29%	14,82%
e_a^{32}	1,68%	3,49%
e_{ext}^{21}	2,22%	3,81%
e_{ext}^{32}	1,92%	2,30%
GCI^{21}	2,72%	4,95%
GCI^{32}	2,35%	2,94%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

E novamente, consegue-se valores de índice de convergência de malha para o caso refinado inferiores a 3%. Concluindo que, para os dois solvers utilizados, o índice de convergência de malha entre as malhas mais refinadas, 2 e 3, (GCI^{32}), para as duas variáveis analisadas ficam menor que 3%, ou seja, um valor baixo e aceitável para o propósito do presente trabalho, evidenciando a redução da dependência do resultado com o aumento do número de volumes de controle.

Nas Tabelas 10 e 11, estão presentes os principais resultados de interesse para os solvers *chtMultiRegionFoam* e *chtMultiRegionSimpleFoam*, respectivamente. Nelas, as temperaturas máximas na bateria e água, bem como queda de pressão entre as extremidades do canal e magnitude da velocidade máxima do fluido. Nota-se que, da mesma forma que o apresentado nas Tabelas 8 e 9, para todas as propriedades tem-se um valor positivo na razão de convergência, convergência monótona, e também variações de resultado decrescentes com o aumento de refino de malha.

Tabela 10 – Resultados para Malha 1, Malha 2 e Malha 3 obtidos pelo solver *chtMultiRegionFoam*.

Resultados	Malha 1 (10x10x10)	Malha 2 (20x20x20)	Malha 3 (30x30x30)
Temperatura Máxima Bateria [K]	303,48	303,18	303,11
Temperatura Máxima Água [K]	302,36	302,28	302,23
Queda de Pressão [Pa]	21,81	25,68	26,62
Velocidade Máxima [m/s]	0,0401	0,0445	0,0469

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 11 – Resultados para Malha 1, Malha 2 e Malha 3 obtidos pelo solver *chtMultiRegionSimpleFoam*.

Resultados	Malha 1 (10x10x10)	Malha 2 (20x20x20)	Malha 3 (30x30x30)
Temperatura Máxima Bateria [K]	303,15	303,02	302,97
Temperatura Máxima Água [K]	302,40	302,32	302,28
Queda de Pressão [Pa]	21,89	25,70	26,63
Velocidade Máxima [m/s]	0,0404	0,0447	0,0470

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a temperatura máxima na bateria e na água, a simulação utilizando o solver *chtMultiRegionFoam* tende para o valores de 303,11 K e 302,23 K, respectivamente. Enquanto que para o solver *chtMultiRegionSimpleFoam*, estes mesmos resultados, tendem a 302,97 K e 302,28 K, respectivamente. Já a pressão e velocidade máxima convergem a valores muito similares nos dois solvers, de 26,62 Pa e 0,047 m/s, respectivamente. Com todos o resultados encontrados e apresentados acima, confirma-se a convergência de malha pelo método GCI. A Malha 3 será utilizada daqui em diante no desenvolvimento deste trabalho para todas as análises.

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

A Tabela 12 mostra uma comparação entre os resultados obtidos pelos dois solvers e o resultado numérico de Lan et al. (2016). Analisando o comportamento a diferença entre os valor máximo e mínimo de temperatura na bateria após o equilíbrio

térmico, para o solver *chtMultiRegionFoam* encontra-se 3,09 K, resultando em uma diferença percentual menor que 1% em comparação ao resultado apresentado por Lan et al. (2016). Já para o solver *chtMultiRegionSimpleFoam*, encontrou-se uma diferença de temperatura de 2,96 K, resultando em uma diferença percentual de aproximadamente 2,3%. Isso mostra que os dois solvers apresentam bons resultados em comparação a simulação utilizada como base (LAN et al., 2016).

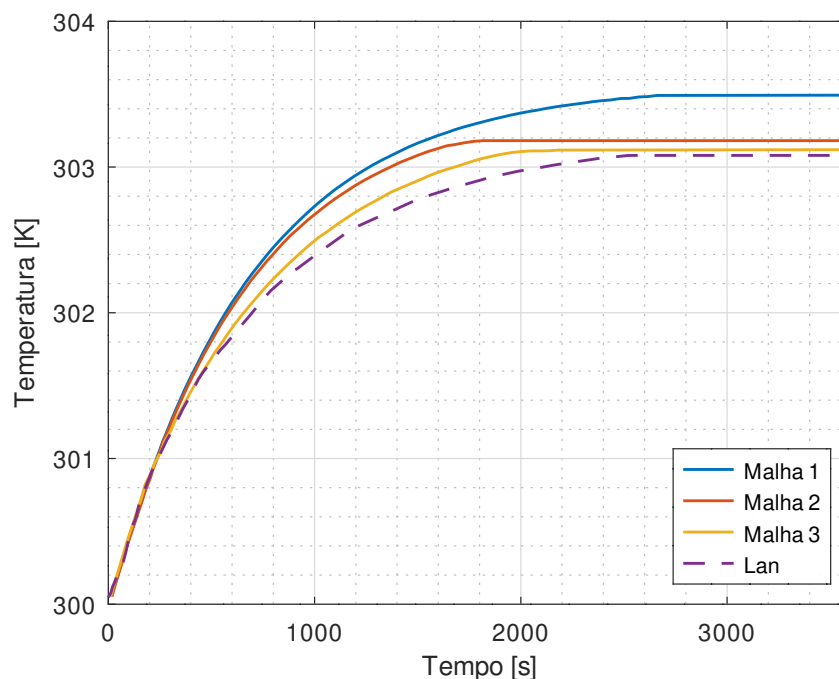
Tabela 12 – Comparativo temperatura máxima bateria entre os dois solvers (Malha 3) e a simulação numérica de Lan et al. (2016).

Método de Simulação	Temperatura Máxima Bateria [K]	Temperatura Mínima Bateria [K]	Diferença Temperatura Bateria [K]
Solver <i>chtMultiRegionFoam</i>	303,11	300,02	3,09
Solver <i>chtMultiRegionSimpleFoam</i>	302,97	300,01	2,96
Simulação Numérica Lan et al. (2009)	303,08	300,04	3,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 18 é mostrado o comparativo da curva de temperatura máxima da bateria ao longo do tempo para as três malhas e a simulação numérica de Lan et al. (2016). Como já era esperado, verifica-se que com o aumento do refino de malha a curva tende a se aproximar cada vez mais do modelo de Lan et al. (2016).

Figura 18 – Comparativo temperatura máxima bateria ao longo do tempo entre a Malha 1, 2 e 3 e modelo numérico de Lan et al. (2016) para o solver *chtMultiRegionFoam*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a temperatura final da bateria, após atingido o regime permanente, a Malha 2 já demonstra bons resultados, como já concluído na Tabela 10. No regime transiente, as malhas 1 e 2 apresentam um comportamento muito próximo do artigo de Lan et al. (2016) até aproximadamente 500s, enquanto que na malha 3 esse comportamento estende-se até 1000s. Após esse valor, a curva da Malha 3 tende a crescer mais rápido ao longo do tempo, porém, mantendo-se muito próxima até o final do tempo de simulação. Além disso, o tempo no qual o sistema atinge o regime permanente é similar, ficando perto do 2000s para a Malha 3 e próximo a 2300s para o proposto por Lan et al. (2016).

Na Tabela 13, são comparados os resultados obtidos pelo solver *chtMultiRegionFoam* com os resultados analíticos obtidos pela equação (50) para a perda de carga. Para os resultados analisados, obtêm-se resultados de simulação com diferença percentual menor do que 2% em comparativo aos equacionamentos analíticos.

Tabela 13 – Comparativo queda de pressão simulação *chtMultiRegionFoam* versus modelo analítico.

Método Utilizado	Queda de Pressão [Pa]
Simulação	26,62
Método Analítico	27,05
Erro Percentual	1,89%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De forma similar, o mesmo comparativo foi realizado para o solver *chtMultiRegionSimpleFoam*, ilustrado na Tabela 14. Neste caso, referente à perda de carga, encontra-se um erro percentual ainda menor, com o valor de 1,55%. E de forma similar, os erros encontrados para todos os casos estão inferiores a 2%, mostrando uma grande similaridade entre ambas as simulações e os equacionamentos.

Tabela 14 – Comparativo queda de pressão simulação *chtMultiRegionSimpleFoam* versus modelo analítico.

Método Utilizado	Queda de Pressão [Pa]
Simulação	26,63
Método Analítico	27,05
Erro Percentual	1,55%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Após a validação dos dois solvers utilizados com os modelos analíticos e computacionais da literatura, foi realizada uma comparação entre ambos para as

principais propriedades do sistema convergido. Como o principal objetivo do mecanismo é realizar o gerenciamento térmico da bateria, os principais fatores de interesse são as temperaturas tanto da bateria quanto do fluido atingidos no regime permanente. Além disso, faz necessário entender a perda de carga do sistema, visto que ela irá ditar qual será a potência de bombeamento necessária para manter a vazão de fluido através dos canais.

Na Tabela 15, mostram-se os valores das principais propriedades para o projeto deste tipo de aplicação. Nota-se que para a temperatura máxima, obtêm-se um erro percentual máximo inferior a 5%, com o valor de 4,18% e 2,24%, respectivamente, para a bateria e água. Já para a queda de pressão esse diferença, tende a zero, ficando muito próxima do valor analítico calculado e mostrado acima. Isso demonstra que os dois solvers, para todas as variáveis de interesse, apresentam resultados similares em regime permanente.

Tabela 15 – Comparação entre os resultados obtidos pelos solvers *chtMultiRegionFoam* e *chtMultiRegionSimpleFoam*.

Resultado	<i>chtMultiRegionFoam</i>	<i>chtMultiRegionSimpleFoam</i>	Diferença Percentual
Variação Temperatura Máxima Bateria [K]	3,11	2,98	4,18%
Variação Temperatura Máxima Água [K]	2,23	2,28	2,24%
Queda de Pressão [Pa]	26,62	26,63	0,04%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Todas as análises mostradas acima nos permitem verificar a independência dos resultados com refino de malha e validar os resultados obtidos. Além disso, confirma-se a similaridade de resultados entre os equacionamentos para regimes transiente e permanente, como definido para cada um dos solvers. Além disso, o uso da simulação permanente (*chtMultiRegionSimpleFoam*) permite uma economia de custo computacional em comparação ao solver transiente (*chtMultiRegionFoam*). Na Tabela 16, os tempos de simulação para cada uma das malhas testadas para ambos os solvers demonstra isso.

Para a Malha 2, por exemplo, nota-se que o solver *chtMultiRegionFoam* já demanda um esforço computacional alto, tendo um tempo de simulação de 60,35h, próximo a 3 dias. E na Malha 3, esse tempo sobe para 692,62h, chegando a quase um mês (29 dias) totais de simulação. Essa diferença ocorre pelo fato desse solver contabilizar o estado transiente do problema, além de resolver todo o equacionamento para cada intervalo de tempo de simulação. Portanto, devido a necessidade de poder computacional, objetivo do estudo e similaridade entre o solver transiente e modelos

analíticos e numéricos, define-se o solver *chtMultiRegionSimpleFoam* como modelo aplicado. Todas as análises subsequentes foram feitas com esse solver e geometria discretizada através da Malha 3.

Tabela 16 – Tempo de simulação do caso para os diferentes solvers *chtMultiRegionFoam* e *chtMultiRegionSimpleFoam*.

Solver Utilizado	Malha 1 (10x10x10)	Malha 2 (20x20x20)	Malha 3 (30x30x30)
Simulação Transiente	2,19h	60,35h	692,62h
Simulação Permanente	0,72h	4,03h	16,64h

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3 VARIAÇÃO DE VAZÃO VOLUMÉTRICA DO FLUIDO

Nesta seção são apresentados os resultados comparativos para diferentes vazões de fluido aplicados aos canais em torno da bateria.

4.3.1 Análise da Bateria

A Tabela 17 mostra os valores de temperatura máxima na bateria, perda de carga e potência de bombeamento para as diferentes vazões volumétricas testadas. Observa-se que com um aumento da vazão tem-se um decréscimo na temperatura final alcançada pela bateria e aumento na perda de carga e potência de bombeamento.

Tabela 17 – Comparativo entre os resultados para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.

Vazão Volumétrica [L/min]	Queda de Pressão [Pa]	Potência de Bombeamento [W]	Temperatura Máxima Bateria [K]	Número de Reynolds
0,05	26,63	$5,55 \cdot 10^{-6}$	302,97	73,80
0,10	57,06	$2,38 \cdot 10^{-5}$	302,22	147,61
0,15	91,58	$5,72 \cdot 10^{-5}$	301,97	221,41
0,20	130,14	$1,08 \cdot 10^{-4}$	301,83	295,22

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

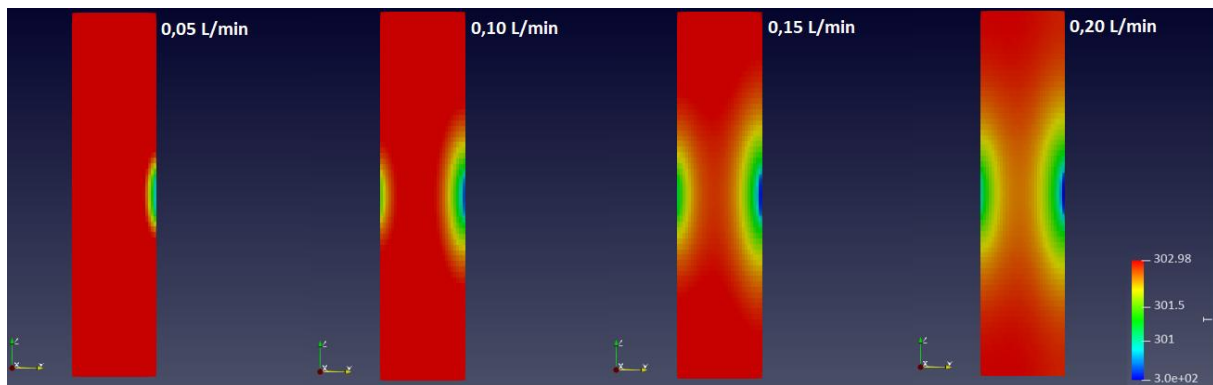
Isso já era esperado devido à maior necessidade de aplicação de esforço no fluido para conseguir aumentar a velocidade ao longo dos canais e consequentemente uma maior eficiência na transfêrencia de calor para manter a temperatura do sistema.

Outro fato é perceber que por mais que o aumento da velocidade do fluido proporcione maior eficiência do sistema (menor diferença de temperatura na bateria), esse desempenho tende a se estabilizar a certa temperatura a uma

determinada velocidade. Porém, a necessidade de potência aplicada ao processo cresce significativamente rápido à medida que alcançamos maiores velocidades fluida.

Na Figura 19, são apresentados cortes no plano YZ para a bateria no lado de entrada e saída do fluido. Nela, da esquerda para direita tem-se de forma crescente, para variações de vazão entre 0,05 L/min e 0,20 L/min, os diferentes mapas de contorno da bateria. Observa-se a influência na presença dos canais na área central da bateria, apresentando valores de temperatura inferiores no lado direito da geometria, entrada do fluido, e superiores no lado esquerdo, correspondente à saída do fluido.

Figura 19 – Mapa de contorno da temperatura da bateria no plano YZ para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min, respectivamente.

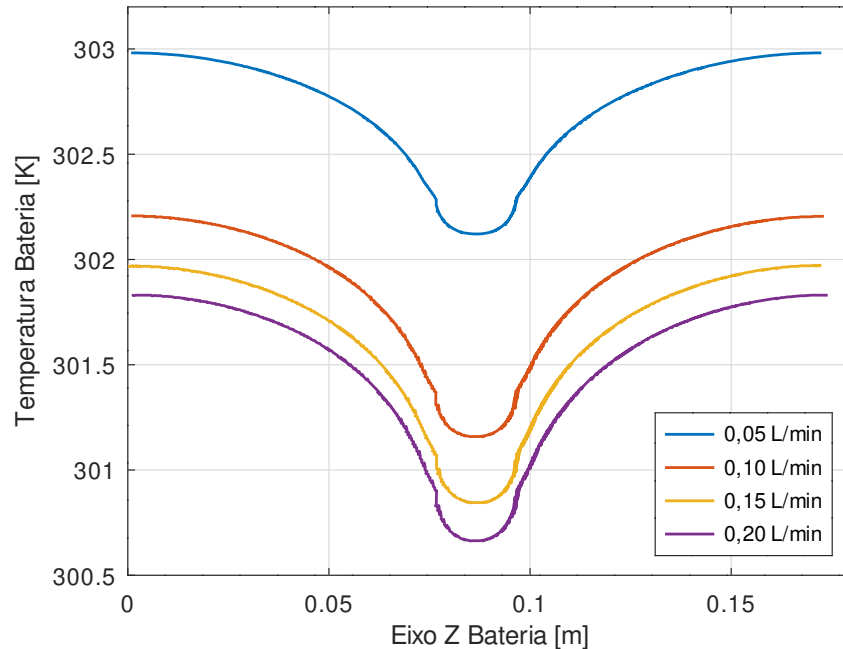


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Além disso, na Figura 19 visualiza-se a eficiência em manter uma temperatura menor na bateria com o aumento de vazão volumétrica, bem como a similaridade entre os mapas de contorno na bateria a medida que dispõem-se maiores fluxos de fluido. Na Figura 20, encontram-se os perfis de temperatura ao longo da direção Z da bateria na extremidade esquerda, ou seja, área de contato da bateria e canais na saída do fluido. Para a velocidade de 0,05 L/min, visualiza-se que para a extremidade da geometria com valores no Eixo Z de 0 e 0,173 m alcançasse os valores máximos de 302,97 K, presentes anteriormente na Tabela 17. Em velocidades superiores a isso, as curvas de temperatura deslocam-se para baixo, e tendem a se aproximar cada vez mais.

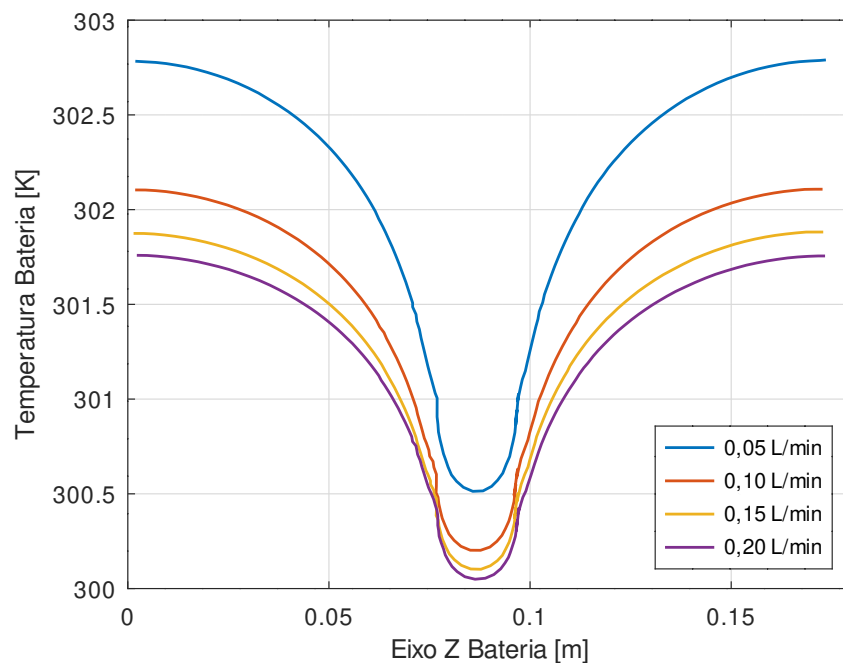
As curvas acentuadas presentes nas posições entre 0,0765 m e 0,0965 m ocorrem na adjacência do conjunto de canais na bateria. Para as velocidades de 0,15 L/min e 0,20 L/min esse valor mínimo fica inferior a 301 K, tornando portando a temperatura de saída do fluido menor. Por outro lado, a temperatura máxima atingida para essas velocidades ficam menor do que 302 K, ou seja, uma diferença em relação a temperatura inicial do sistema inferior a 2 K. De forma similar, na Figura 21, mostra-se o mesmo gráfico da figura anterior ao longo da direção z, porém, analisado na extremidade direita da bateria, ou seja, entrada do fluido.

Figura 20 – Temperatura da bateria ao longo da direção z na extremidade da saída dos canais para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 21 – Temperatura da bateria na direção z no lado de entrada de fluido para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.



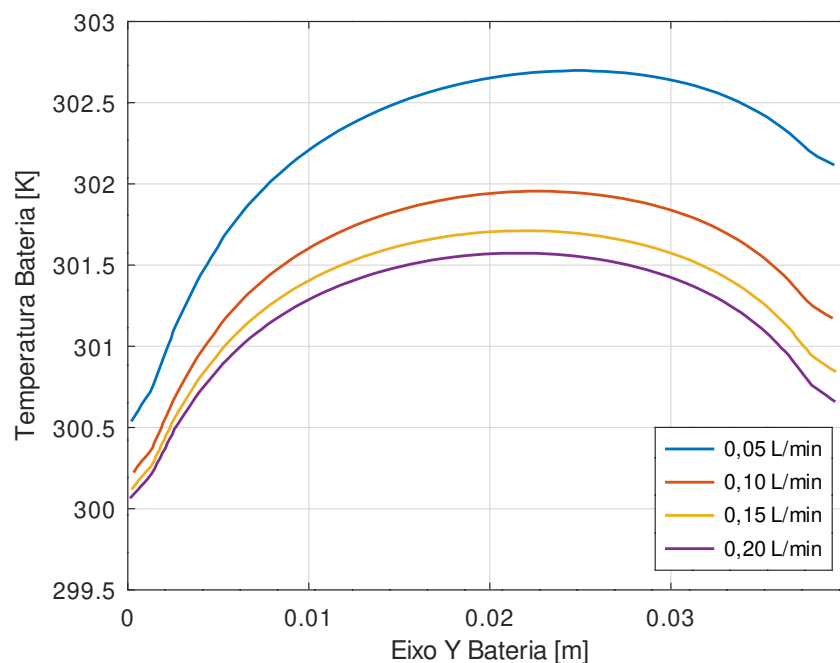
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Também, visualiza-se o mesmo comportamento de curva apresentado na Figura 21, porém com uma amplitude de variação de temperatura muito maior, visto que o fluido irá entrar a uma temperatura de 300 K e remover o calor gerado pela descarga

de bateria. As temperaturas máximas estão localizadas em $Z = 0$ e $Z = 0,173$ m. Esses valores serão menores do que os encontrados no lado da saída do fluido, já que o fluido encontra-se em menor temperatura nesta região, favorecendo a transferência de calor. Agora, realizando um corte em $Z = 0$, consegue-se verificar o perfil de temperatura ao longo do eixo -Y, na Figura 22.

A direção está apontado para o lado negativo de Y, iniciando no lado da bateria onde se tem a entrada de fluido e finalizando na saída. Nota-se que no lado da entrada, tem-se os valores mínimos encontrados na Figura 21 e na saída os valores mínimos encontrados na Figura 20.

Figura 22 – Temperatura bateria na direção y ao longo entrada e saída de fluido para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

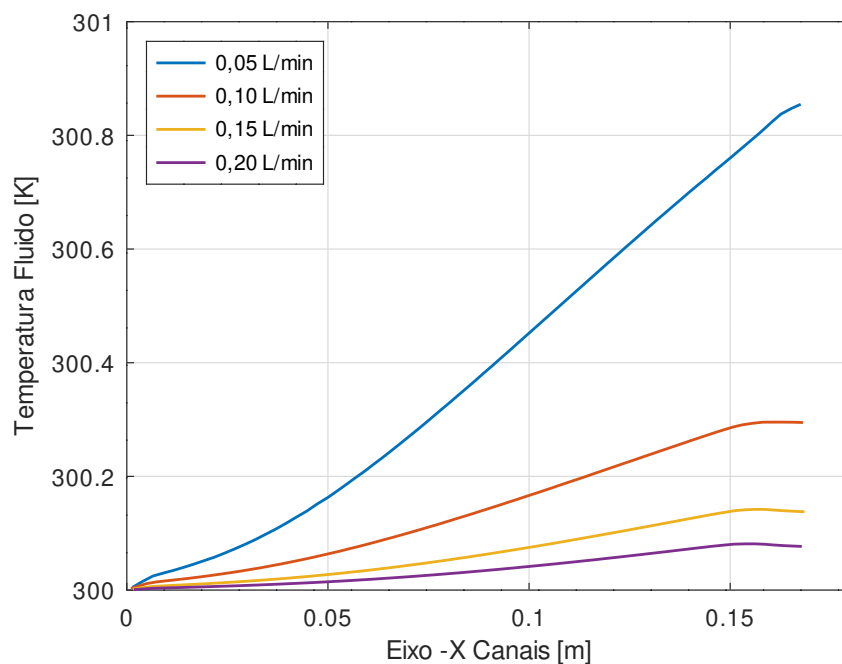
Outro ponto importante é que os valores máximos da Figura 22 estão deslocados para a direita, e não exatamente no centro, evidenciando o efeito da entrada de fluido e diferenças de temperatura na entrada e saída. Da mesma forma, nota-se que com o aumento da velocidade faz com que as curvas tendam a se aproximar cada vez mais, com um maior efeito nos pontos iniciais do gráfico, ou seja, pontos na coordenada $Y = 0$ m, e menor efeito nos pontos finais do gráfico, ou seja, em $Y = 0,039$ m. E por consequência, a diferença de temperatura entre os pontos extremos do gráfico torna-se cada vez menor.

4.3.2 Análise do Fluido

Agora será analisado como a temperatura do fluido se comporta ao longo do sistema em diferentes direções. Inicialmente, realizou-se um corte no plano XZ somente

no fluido, no lado da entrada dos canais. Como a temperatura de entrada da água é uma condição de contorno e foi fixada em 300 K, o que irá mudar dos perfis será a forma com que o fluido irá aquecer ao longo dos canais. Esse fato torna-se visível na Figura 23. No gráfico, a direção do eixo está apresentada na direção de -X, mostrando a evolução da temperatura na entrada dos canais até o encontro com a primeira quina, ou seja, acompanhado o sentido do escoamento do fluido. Então, a temperatura inicia a 300 K e irá esquentar a medida que sofre a influência da fonte de calor na bateria, até chegar a uma valor máximo próximo a quina.

Figura 23 – Temperatura do fluido ao longo da direção x na entrada do canal para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.



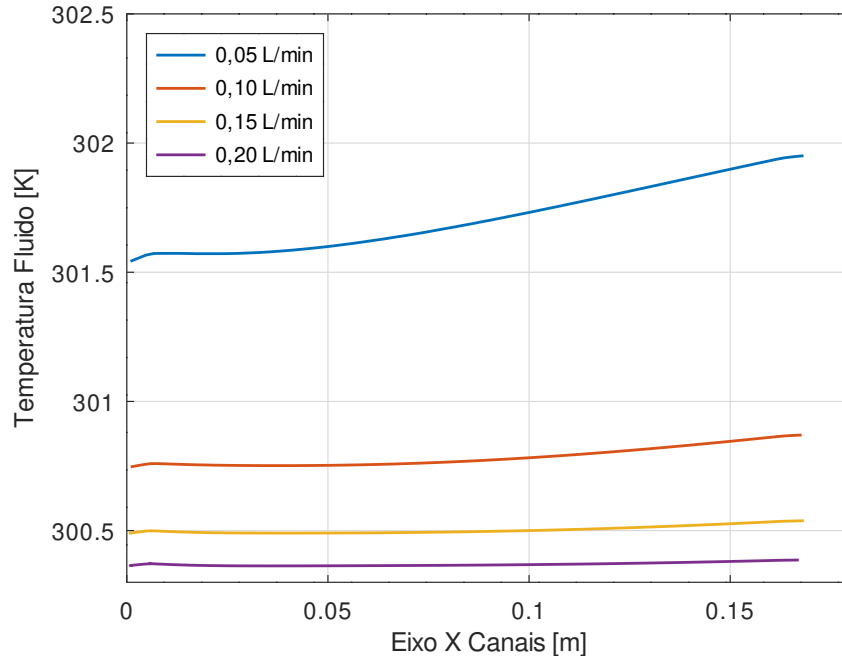
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A curva presente no gráfico próximo a extremidade final do eixo Y se dá devido à influência do encontro à quina. Nota-se que, em baixas velocidades, as inclinações das curvas são bem maiores, ou seja, a temperatura ao longo do escoamento irá crescer de forma muito mais rápida. Enquanto que, com a vazão de 0,05 L/min, a temperatura no final da primeira seção dos canais chega a quase 301 K, para velocidades de 0,15 L/min e 0,20 L/min, esta temperatura não chega a 300,2 K.

De forma similar, na Figura 24 encontram-se os mesmos perfis de temperatura, porém, para a saída do fluido. Agora, mantendo a mesma convenção de sentido, foi analisada a temperatura ao longo do eixo X positivo, visto que será a direção do escoamento. Nesse caso, nota-se que os perfis de temperatura apresentados um comportamento mais uniforme, pois o escoamento já foi desenvolvido ao longo dos canais e sua temperatura se encontra elevada em relação ao seu valor inicial. Confirmado pelo perfil de temperatura apresentado na Figura 24, no qual todas as

curvas apresentam um comportamento horizontal.

Figura 24 – Temperatura do fluido ao longo da direção x na saída do canal para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

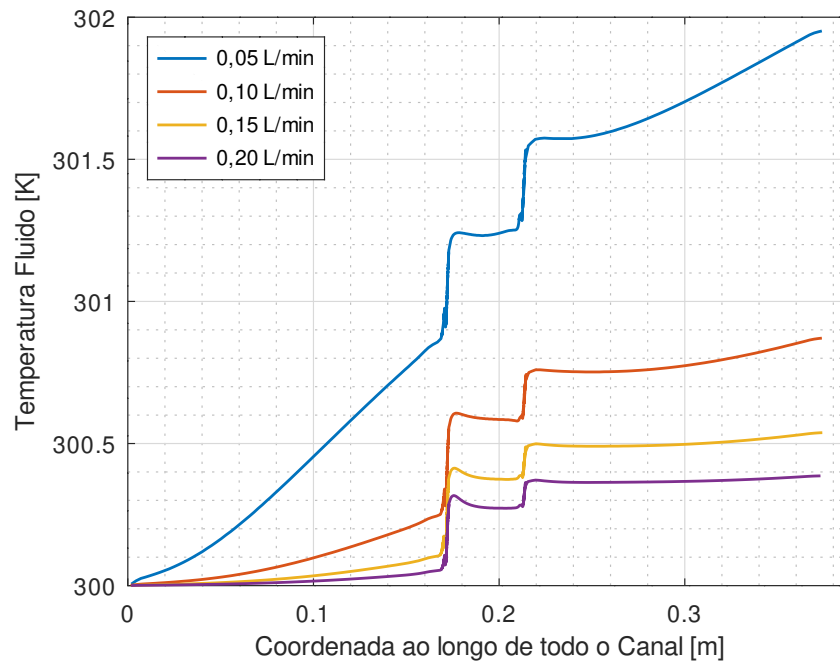
Novamente, o efeito de quina é evidenciado no início da curva do gráfico na Figura 24. A temperatura inicial, vista na posição $X = 0$ m, na Figura 24 será a temperatura final da Figura 23, em $X = 0,168$ m, com a adição do efeito do canal através das duas quinas e extensão na direção Y dos eixos da geometria. Já a temperatura final na extremidade direita, em $X = 0,168$ m, na Figura 24, será a temperatura de saída do fluido nos canais. Portanto, para 0,05 L/min o fluido sairá com uma temperatura de 301,95 K, enquanto que para 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min ele sairá com 300,85 K, 300,51 K e 300,32 K, respectivamente.

Ou seja, com apenas a aumento da vazão volumétrica da água de 0,05 L/min para 0,10 L/min, consegue-se baixar a temperatura final e próximo a 1 K. E esse valor tende a se estabilizar a medida que a velocidade é aumentada, onde com os mesmos acréscimos de 0,05 L/min em seu valor, de 0,15 L/min para 0,20 L/min, tem-se uma redução de temperatura inferior a 0,2 K. Além disso, é notável que os gráficos nas Figuras 23 e 24 se complementam, e juntos demonstram todo o perfil de temperatura na entrada e saída do fluido ao longo dos canais.

E por fim, na Figura 25 estão mostrados o perfil de temperatura para cada uma das vazões volumétricas para toda a extensão dos canais, considerando tanto a entrada (0 m) e saída (0,3825 m), quanto a primeira (0,168 m) e a segunda (0,212 m) quina. Nela, nota-se que o efeito da quina fica evidenciado pelo salto da temperatura. Além disso, que quanto maior a velocidade do fluido, menor a influência da extensão

de saída do canal, visto que a variação de temperatura após a segunda quina é bem menor.

Figura 25 – Temperatura do fluido ao longo de toda a extensão do canal da direção x para vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

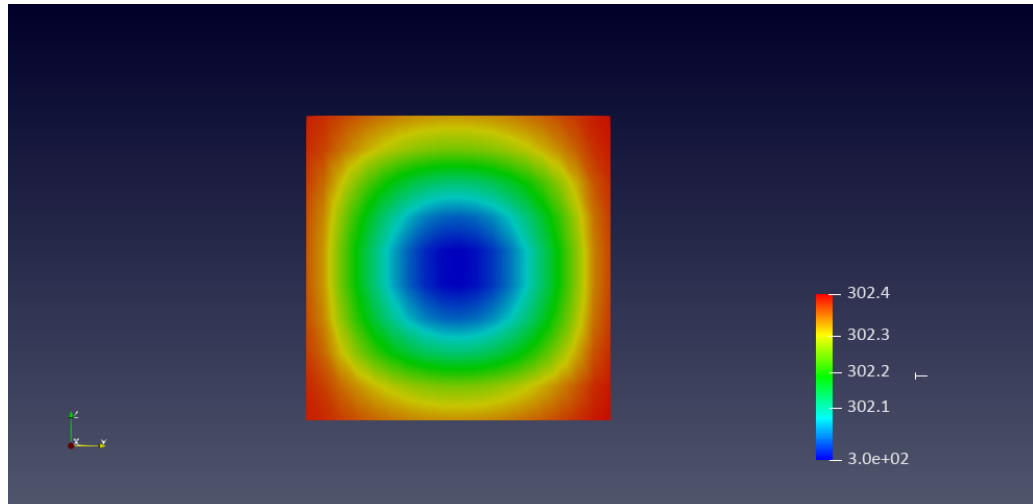
Posteriormente, foi analisado como o fluido se comporta dentro de um único canal, ao longo do plano YZ. Com isso, fez um corte no fluido na saída de um único canal, apresentado na Figura 26. Nela, se tem o mapa de contorno da temperatura para a vazão volumétrica da água em 0,05 L/min. Observa-se que a temperatura mínima se encontra no centro do volume de água e o máximo nas bordas, devido a influência da temperatura dos canais pela fonte de calor da bateria. Na Figura 27 analisou-se o perfil de temperatura ao longo do eixo positivo de Y no centro de um único canal de água.

Percebe-se que temperatura máxima se encontra na extremidade direita do gráfico da Figura 26 e gráfico da Figura 27, pelo contato dos canais com a bateria. Já no lado esquerdo, o contato dos canais está com o ambiente externo, no caso, no qual foi fixado com o isolamento térmico. Além disso, nota-se que a temperatura mínima encontrada na posição $Y = 0,0015$ m, é a mesma temperatura presente na Figura 24 na saída do canal. Isso acontece pelo fato de que o perfil de temperatura da Figura 24 foi encontrado exatamente para o centro da espessura do canal, equivalente ao que visualiza-se na Figura 26.

Portanto, por mais que a temperatura mínima se encontre no centro do eixo Y do plano YZ, a curva de temperatura não é simétrica, apresentando valores diferentes entre as duas extremidade. Em $Y = 0,003$ m, a temperatura será maior, devido a interface entre o canal e a bateria em comparativo ao ponto em $Y = 0$ m, interface entre

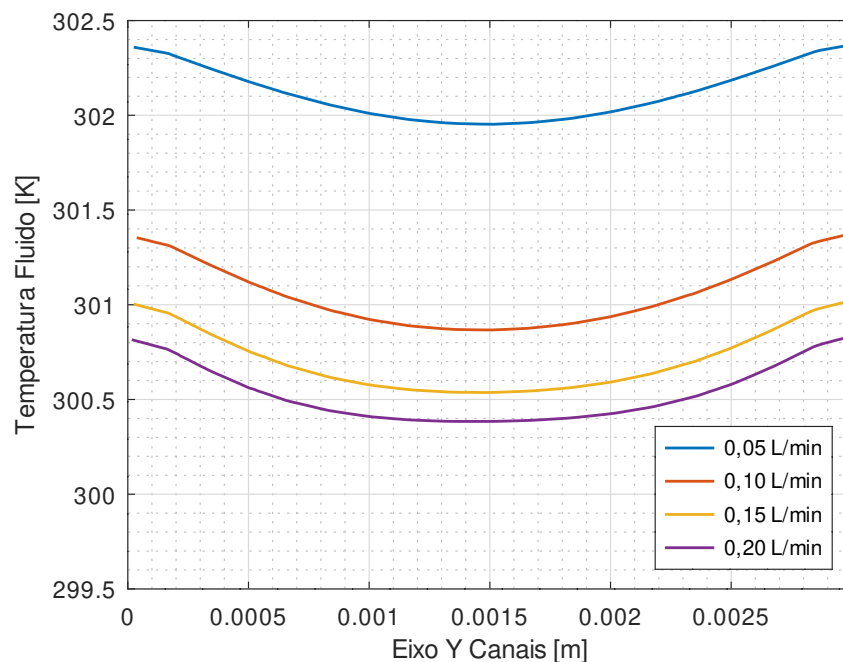
os canais e o meio externo. O fato de cada vez mais com o aumento de velocidade as curvas tenderem a se aproximar, reafirma o fenômeno de após um certo valor de velocidade o efeito de crescer a vazão impacta menos na temperatura do sistema.

Figura 26 – Temperatura do fluido no plano YZ na saída do canal para 0,05 L/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 27 – Temperatura do fluido ao longo da direção y na saída do canal para as vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min.

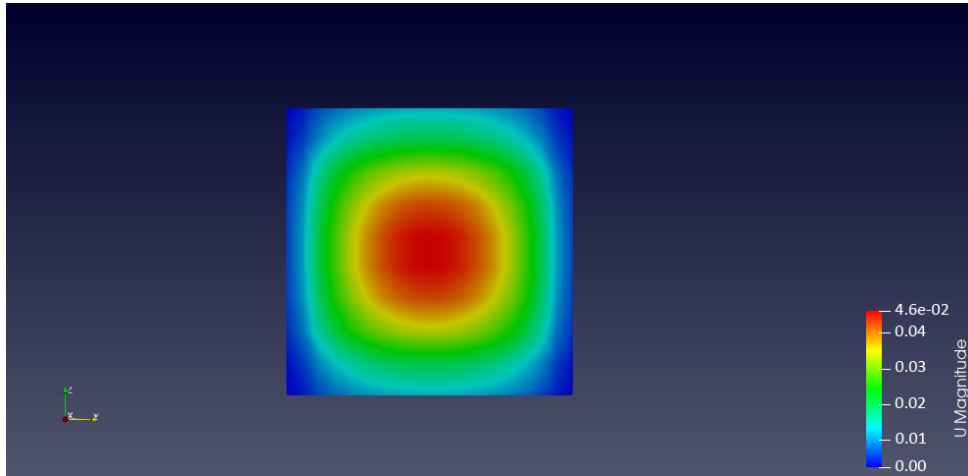


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De forma similar, na Figura 28 e 29, encontramos o mapa de contorno e perfil da magnitude de velocidade para as mesmas posições e direções das figuras anteriores. Nota-se que na Figura 28 tem-se o comportamento oposto ao da Figura 26, no qual a velocidade é mínima na parede e máxima exatamente do centro da espessura do fluido. Porém, de forma diferente da temperatura, o perfil de velocidade será simétrico

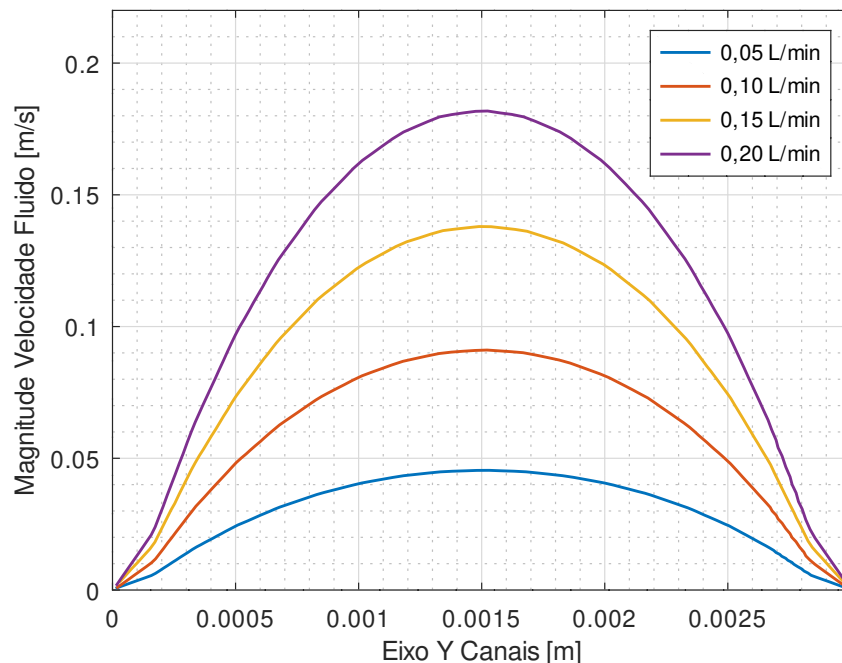
a geometria, pois a temperatura e presença dos canais e bateria não irá influenciar na velocidade, ao contrário da temperatura. Esse fato fica evidente na Figura 29.

Figura 28 – Magnitude da velocidade no plano YZ na saída do canal para velocidade de fluxo de 0,05 L/s.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 29 – Magnitude de velocidade ao longo do x na saída do canal para as vazões volumétricas de 0,05 L/min, 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Nela, visualiza-se o mesmo comportamento para cada metade da geometria, comprovando a simetria de comportamento com relação a velocidade. Na posição $Y = 0,0015$ m, consegue-se o valor do valor da magnitude máxima da velocidade ao longo do canal. Para uma vazão volumétrica inicial de 0,05 L/min, alcança-se uma velocidade máxima de 0,046 m/s, enquanto que para as vazões de 0,10 L/min, 0,15 L/min e 0,20 L/min essa velocidade chega a 0,092 m/s, 0,139 m/s e 0,185 m/s, respectivamente.

Fica evidente a velocidade nas extremidades do gráfico limitada a velocidade nula na parede, condição de contorno imposta na modelagem. Diferente do perfil de temperatura apresentado na Figura 27, com o aumento da velocidade não se tem uma aproximação entre as curvas como acontece com a temperatura, visto que a velocidade crescerá de forma proporcional com a velocidade inicial imposta.

Essa fenômeno fica visível com relação a perda de carga e potência de bomba presente na Figura 17, no qual os parâmetros tendem a crescer de forma proporcional ao acréscimo na velocidade inicial. Com isso, foram apresentados todos os fenômenos relevantes relacionados ao comportamento do sistema sobre o efeito de variar a velocidade na entrada. Todos as propriedades como, temperatura, velocidade, perda de carga e também potência de bomba apresentaram uma influência diferente com essa variação e puderam ser compreendidos ao longo dessa seção.

4.4 ADIÇÃO DE NANOFLUIDO NO SISTEMA

Ao longo desta seção são apresentados os resultados relacionados a inserção da Alumina (Al_2O_3) sobre um fluido base, neste caso a água. Variações referentes a diferentes proporções do nanofluido na água puderam ser avaliadas e um entendimento sobre como o nanofluido altera as propriedades físicas da mistura e conseqüentemente os efeitos relacionados a transferência de calor do sistema.

Inicialmente, variou-se percentuais de 2%, 4%, 6% e 8% de alumina na composição de água, fixando a vazão volumétrica em 0,05 L/min, e os resultados estão apresentados na Tabela 18. Como já era de se esperar, alterando a composição da água e inserindo nanopartículas na mistura, a condutividade térmica tenderá a aumentar e o efeito do escoamento de fluido no sistema irá se alterar. Porém, com a inserção do nanofluido, as temperaturas máximas na bateria e fluido apresentam um aumento praticamente desprezível, com aumento da perda de carga e potência de bombeamento também pouco significativo.

Tabela 18 – Tabela comparativa de propriedades para proporções de nanofluido de 0%, 2%, 4%, 6% e 8% na água.

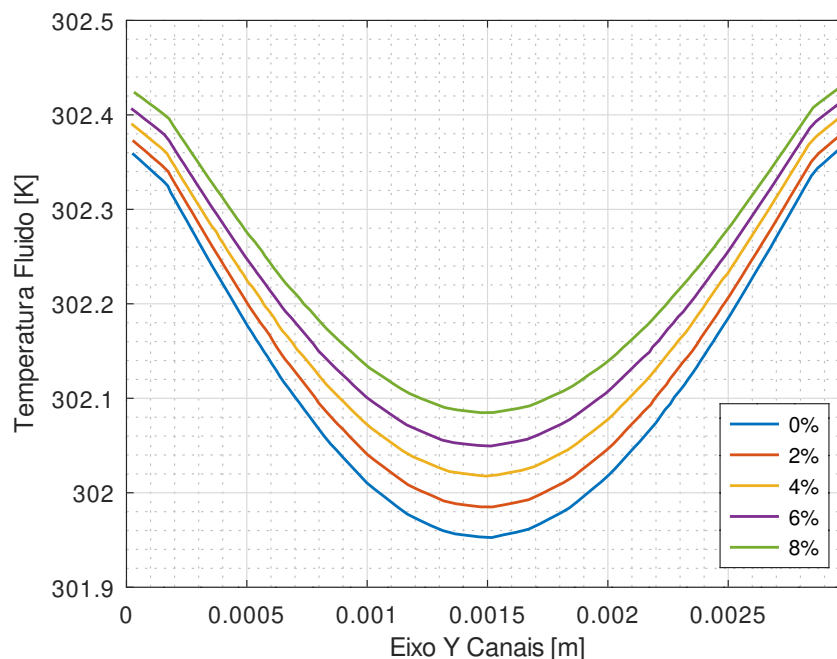
Razão Volumétrica Percentual	Queda de Pressão [Pa]	Potência de Bombeamento [W]	Temperatura Máxima Bateria [K]	Temperatura Máxima Fluido [K]
0%	26,63	$5,55 \cdot 10^{-6}$	302,97	302,43
2%	26,75	$5,57 \cdot 10^{-6}$	302,98	302,44
4%	26,88	$5,60 \cdot 10^{-6}$	302,98	302,45
6%	26,99	$5,62 \cdot 10^{-6}$	302,99	302,47
8%	27,11	$5,65 \cdot 10^{-6}$	303,00	302,48

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na tabela, observa-se que a adição de nanopartículas influencia muito pouco no sistema e essa influência tem um efeito negativo comparado aos casos anteriores. Com 2% de razão volumétrica, aumentamos a temperatura máxima da água e fluido em 0,01 K e a perda de carga de 26,63 Pa para 26,75 Pa. No mesmo caminho, a potência de bombeamento aumenta de $5,55 \cdot 10^{-6}$ W para $5,57 \cdot 10^{-6}$ W. E quanto maior esse percentual, maior será esse aumento nas propriedades. Isso evidencia que a inserção de alumina, para essa aplicação, tende a piorar a performance do sistema, aumentando a temperatura e potência de bombeamento de fluido necessária.

Através do gráfico da Figura 30, mostra-se o perfil de temperatura ao do fluido longo do eixo Y na saída dos canais para os diferentes percentuais simulados. Nele, verifica-se que a temperatura de saída do fluido aumenta com o aumento do percentual, o que faz com que a temperatura final da bateria também aumente, mostrado anteriormente. Além disso, novamente, valores maiores na extremidade direita em relação a esquerda, devido ao contato com a bateria.

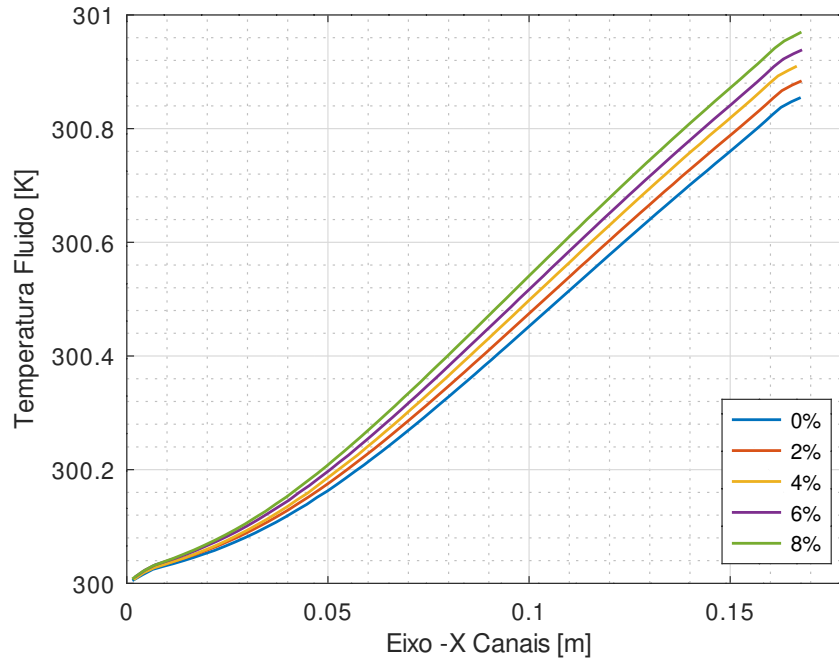
Figura 30 – Temperatura do fluido ao longo da direção y na saída do canal para percentuais de 0,0%, 2,0%, 4,0%, 6,0% e 8,0%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

E de forma similar, na Figura 31, tem-se a evolução da temperatura do fluido na entrada dos canais para os mesmos percentuais. A curva em verde, para 8% de nanofluido em água, tem uma maior inclinação, ou seja, o fluido tende a esquentar de forma mais rápida do decorrer do escoamento nos canais. Com isso, para esse percentual, tem-se uma temperatura de chegada do fluido na primeira quina do canal muito próximo de 301 K.

Figura 31 – Temperatura do fluido ao longo da direção x na entrada do canal para percentuais de 0,0%, 2,0%, 4,0%, 6,0% e 8,0%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.5 VARIAÇÃO FONTE DE CALOR DA BATERIA

Primeiramente foi variada a taxa de geração de calor da bateria para 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C com a vazão de fluido fixada a 0,05 L/min. Na Tabela 19 estão mostradas as temperaturas máximas alcançadas pela bateria para cada uma das descargas de bateria. Como esperado, com o aumento de descarga na bateria o sistema entra em equilíbrio e atinge o regime permanente com valores finais de temperatura elevados.

Tabela 19 – Temperatura máxima na bateria para descargas de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,05 L/min.

Taxa de Descarga Bateria	1,0 C	1,5 C	2,0 C
Temperatura Máxima Bateria [K]	302,97	306,11	309,35

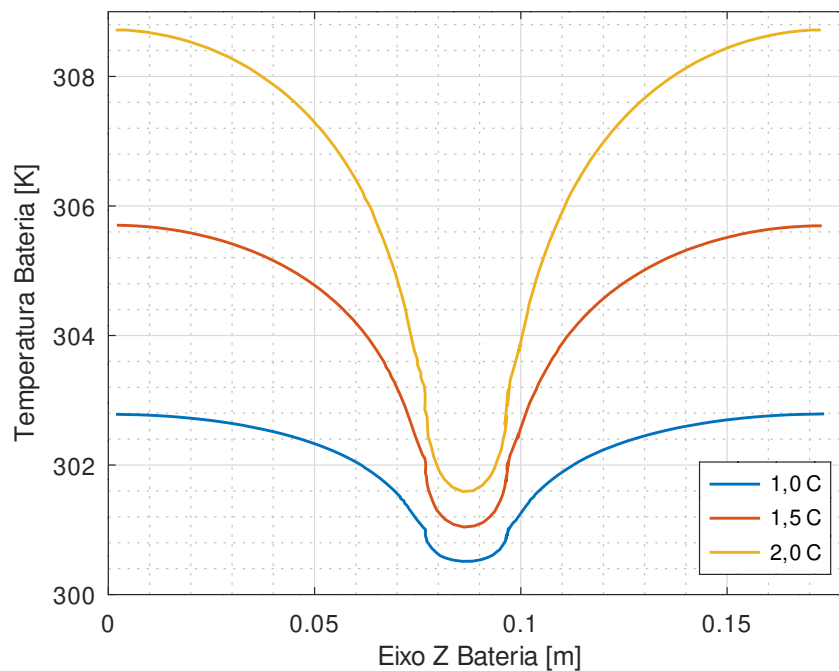
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para uma fonte de bateria de 2 C, a bateria atinge valores acima de 309,35 K, muito acima do valores permitido para um funcionamento adequado da mesma. Na Figura 32, isso é evidenciado pelo perfil de temperatura na bateria na extremidade de entrada dos canais. Apesar de a temperatura mínima na extremidade de entrada do canais da bateria não variar muito entre as diferentes descargas, a temperatura máxima apresentou diferenças representativas.

Além disso, a variação entre valores máximos e mínimos torna-se muito maior

para valores maiores de descarga, sendo expressados por curvas mais acentuadas no gráfico. Esses valores confirmam que para valores de 1,5 C e 2,0 C, o sistema desenvolvido para gerenciamento térmico não garante uma performance suficiente para a temperatura de operação da bateria dentro dos limites adequados. Nos dois casos, alcançam-se variações de temperatura superiores aos 305 K, máximo permitido para o modelo de bateria de íons de lítio de 55 Ah.

Figura 32 – Temperatura da bateria na direção z no lado de entrada de fluido para descargas de bateria de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,05 L/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como na seção 4.3.1 conclui-se que das diferentes vazões volumétricas simuladas obteve-se menor temperatura máxima final da bateria para o caso 0,20 L/min, realizou a mesma variação de descarga de bateria para essa velocidade. Na Tabela 20, estão apresentadas os perfis de temperaturas máximas para o vazão volumétrica de 0,20 L/min para descarga entre 1,0 C e 2,0 C na extremidade de entrada dos canais da bateria. Com essa velocidade, nota-se que o sistema térmico consegue operar até uma faixa de descarga de 1,5 C, mantendo-se dentro da variação máxima de 5 K.

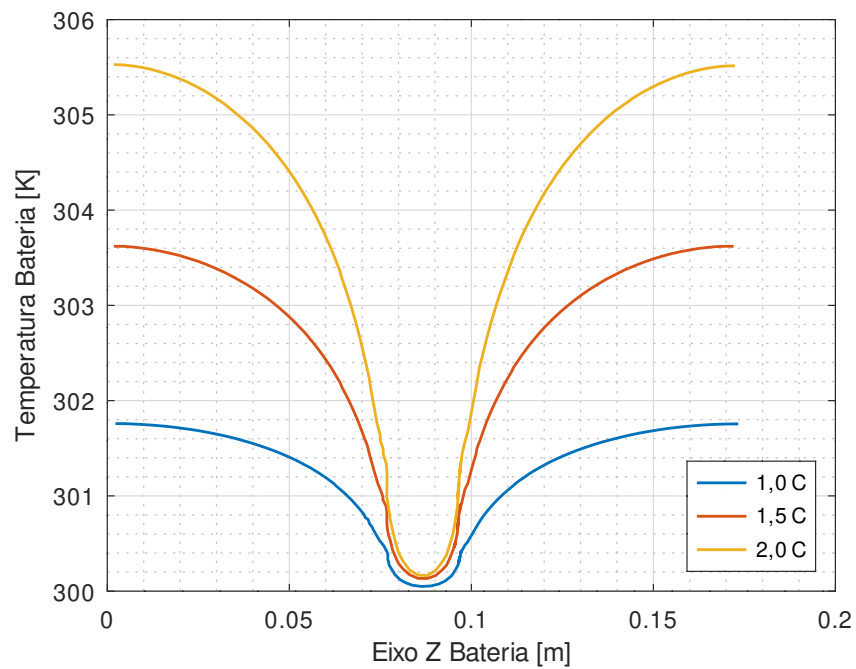
Para 2,0 C, a temperatura final atingida pela bateria encontra-se em 305,77, ficando um pouco acima do faixa de operação para uma bateria de íons de lítio de 55 Ah. Também, na Figura 33, estão representados os perfis de temperatura para a mesma variação de descarga e velocidade fixada. Para valores superiores de vazão, como no caso de 0,20 mostrado na Figura 33, tem-se valores mínimos de bateria muito mais próximos para diferentes taxas de descarga, comparados aos presentes na Figura 32.

Tabela 20 – Temperatura máxima na bateria para descargas de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,20 L/min.

Taxa de Descarga Bateria	1,0 C	1,5 C	2,0 C
Temperatura Máxima Bateria [K]	301,83	303,77	305,77

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 33 – Temperatura da bateria na direção z no lado de entrada de fluido para descargas de bateria de 1,0 C, 1,5 C e 2,0 C para vazão volumétrica de 0,20 L/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi desenvolvido o estudo de um sistema de resfriamento líquido para o gerenciamento térmico de baterias para veículos elétricos. Com a utilização do software de CFD OpenFOAM, construiu-se um modelo de simulação numérica a partir da geometria proposta por Lan et al. (2016). O modelo consistiu na presença de uma bateria de íons de lítio envolta por quatro canais de alumínio centralizados, no qual o fluido circulava internamente. O principal objetivo era desenvolver esse modelo no software e entender como ele se comportava com a variação de diferentes parâmetros na busca de melhora de performance do sistema.

Inicialmente, foi modelado a geometria do caso e realizado testes de sensibilidade ao refino de malha. Os resultados da aplicação do método GCI para as propriedades de temperatura e pressão indicaram uma convergência monótona para ambos os casos. Para o comparativo entre as malhas mais refinadas, encontrou-se valores de índice de convergência de malha inferiores a 3% tanto para temperatura quanto para a pressão.

Como o foco do trabalho era investigar como o sistema se comportava após o equilíbrio térmico, as propriedades físicas de interesse deviam ser analisadas após o regime permanente ser atingido. Por conta disso, utilizou-se dois solvers diferentes, *chtMultiRegionFoam*, variante no tempo e *chtMultiRegionSimpleFoam*, invariante no tempo, os quais puderam ser comparados.

Para os resultados de temperatura, os dois solvers apresentaram valores com uma divergência menor do que 5%, e já para perda de carga e velocidade, esse número ficou menor que 1%. Além disso, observou-se que o custo computacional era significativamente mais baixo para o segundo solver. Por todos esses motivos, todas as análises subsequentes foram realizadas pelo segundo solver.

Em sequência, os valores obtidos para as variáveis de interesse puderam ser comparados aos encontrados na literatura por Lan et al. (2016), e também através de modelos analíticos. Para a temperatura, os resultados comparados a literatura ficaram inferiores a 4%, e a perda de carga e fluxo de calor, inferiores a 2% e 5%, respectivamente, em relação ao equacionamento analítico. Os erros percentuais encontrados demonstram uma boa acurácia do modelo de simulação.

Após definição do modelo de simulação numérico a ser utilizado, validação de malha e resultados, puderam ser realizadas as análises de sensibilidade. Variou-se a vazão volumétrica do fluido nos canais a fim de entender de que forma esse parâmetro influenciava no gerenciamento térmico da bateria. O aumento da velocidade do fluido mostrou uma diminuição na temperatura final atingida pela bateria, porém,

consequentemente um aumento de perda de carga do processo.

A diferença entre a temperatura na bateria em cada incremento de velocidade (a cada 0,05 L/min), mostrou-se maior para pequenas velocidades e menor a medida que ela aumentava. Os resultados demonstram que a partir de certo ponto, o aumento da vazão tendia a gerar uma temperatura final da bateria cada vez mais próximas. Em decorrência a isso, concluiu-se que a vazão volumétrica mais eficiente ocorria em 0,15 L/min, proporcionando uma diferença de temperatura final da bateria inferior a 2 K e somente com a necessidade de $5,72 \cdot 10^{-5}$ W de potência de bombeamento.

Analizou-se também a inserção do nanofluido alumina no sistema para diferentes concentrações de nanopartículas. Os resultados obtidos evidenciam que não se tem uma boa performance do sistema com a presença de nanopartículas de alumina na base de água. Com o aumento percentual da mesma na mistura, obtêm-se valores superiores de temperatura de fluido e líquido, bem como maior queda de pressão e potência de bombeamento em comparativo ao sistema somente com água.

E por fim, variando valores de descarga de bateria de 1,5 C e 2,0 C, como já esperado, encontra-se valores superiores de temperatura final. Para a velocidade de 0,05 L/min, com os dois valores de carga conclui-se que o funcionamento da bateria seria afetado devido a temperatura elevada. Mostrando que o sistema não é eficiente em manter o gerenciamento térmico de bateria necessário para sua faixa de operação. Já para vazões superiores, como 0,20 L/min, o sistema torna-se eficiente em manter a temperatura inferior a os 5 K máximos de variações de operação para 1,5 C e um pouco acima desse valor em 2,0 C

Portanto, com base em todos os resultados obtidos e apresentados, o modelo criado tornou-se uma excelente ferramenta para estudo do resfriamento líquido em baterias. Diversas geometrias poderiam ser aplicadas com apenas pequenas variações de parâmetros. O custo computacional mostrou-se baixo comparado à complexidade do problema. Além disso, como os dois solvers foram devidamente validados, aplicações compressíveis e na qual se tenha a necessidade de analisar o estado transiente, torna-se possível a utilização do modelo criado pelo autor.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à importância do estudo do gerenciamento térmico de baterias para veículos elétricos, abaixo, estão citados estudos e considerações que poderiam ser implementadas em próximos trabalhos:

- Considerar a mudança de fase para diferentes fluidos no sistema;
- Avaliar o efeito de diferentes descargas de bateria no sistema e seu comportamento;
- Investigar o funcionamento do sistema com o acoplamento de maiores

quantidades de canais e baterias;

- Fazer a avaliação de diferentes nanofluidos com propriedades descritas na literatura.

REFERÊNCIAS

- AKILU, S.; SHARMA, K.; BAHETA, A. T.; MAMAT, R. A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 654–678, 2016.
- BRANDÃO, P. V. R. Comparative study between the methodologies for conducting pollutant gas emission inventories by automotive sources: Cetesb x ministry of the environment. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 5, p. 25544–25554, 2020.
- CAO, W.; ZHAO, C.; WANG, Y.; DONG, T.; JIANG, F. Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 138, p. 1178–1187, 2019.
- CELIK, I.; GHIA, U.; ROACHE, P.; FREITAS, C.; COLOMAN, H.; RAAD, P. Procedure of estimation and reporting of uncertainty due to discretization in cfd applications. *J. Fluids Eng.*, v. 130, p. 078001, 07 2008.
- CHOI, S. U.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. v. 66, 10 1995.
- DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of tio₂-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 33, n. 4, p. 706–714, 2009.
- GIULIANO, M. R.; PRASAD, A. K.; ADVANI, S. G. Experimental study of an air-cooled thermal management system for high capacity lithium–titanate batteries. *Journal of Power Sources*, v. 216, p. 345–352, 2012.
- HO, C.; LIU, W.; CHANG, Y.; LIN, C. Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 49, n. 8, p. 1345–1353, 2010.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New Jersey: New Jersey: John Wiley Sons, 2006.
- KAMYAR, A.; SAIDUR, R.; HASANUZZAMAN, M. Application of computational fluid dynamics (CFD) for nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 55, n. 15, p. 4104–4115, 2012.
- KIM, J.; OH, J.; LEE, H. Review on battery thermal management system for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, v. 149, p. 192–212, 2019.
- KOCH, M. V.; VANDENBUSSCHE, K. M.; CHRISMAN, R. W.; CHRISMAN, R. W. *Micro instrumentation: for high throughput experimentation and process intensification-a tool for PAT*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- LAN, C.; XU, J.; QIAO, Y.; MA, Y. . Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes. *Applied Thermal Engineering*, v. 101, n. 1, p. 284–296, 2016.

- LI, C.; PETERSON, G. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity nanoparticle suspensions (nanofluids). *Journal of Applied Physics*, v. 99, 05 2006.
- LIU, D.; GARIMELLA, S. V. Investigation of liquid flow in microchannels. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, v. 18, n. 1, p. 65–72, 2004.
- MALISKA, C. R. *Trasferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- MAXWELL, J. C. *A Treatise on electricity and magnetism*. London: Clarendon Press, 1881.
- MENALE, C.; D'ANNIBALE, F.; MAZZAROTTA, B.; BUBBICO, R. Thermal management of lithium-ion batteries: An experimental investigation. *Energy*, v. 182, p. 57–71, 2019.
- MINTSA, H. A.; ROY, G.; NGUYEN, C. T.; DOUCET, D. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 48, n. 2, p. 363–371, 2009. Nano Micro Mini Channels and Computational Heat Transfer.
- MOHAMMADIAN, S. K.; RASSOULINEJAD-MOUSAVI, S. M.; ZHANG, Y. Thermal management improvement of an air-cooled high-power lithium-ion battery by embedding metal foam. *Journal of Power Sources*, v. 296, p. 305–313, 2015.
- MONDAL, B.; LOPEZ, C. F.; MUKHERJEE, P. P. Exploring the efficacy of nanofluids for lithium-ion battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 112, p. 779–794, 2017.
- MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. *An introduction to computational fluid dynamics*. London: Springer International Publishing, 2016.
- NGUYEN, C.; DESGRANGES, F.; ROY, G.; GALANIS, N.; MARÉ, T.; BOUCHER, S.; Angue Mintsa, H. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 28, n. 6, p. 1492–1506, 2007. Revised and extended papers from the 5th conference in Turbulence, Heat and Mass Transfer.
- PAK, B. C.; CHO, Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, Taylor Francis, v. 11, n. 2, p. 151–170, 1998.
- PANCHAL, S.; DINCER, I.; AGELIN-CHAAB, M.; FRASER, R.; FOWLER, M. Experimental and theoretical investigation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 99, p. 204–212, 2016.
- PARK, H. A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, v. 239, p. 30–36, 2013.
- PATEL, H.; SUNDARARAJAN, T.; DAS, S. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 12, p. 1015–1031, 03 2010.

- SATTLER, K. D. *Handbook of nanophysics: nanoparticles and quantum dots*. London: CRC Press, 2016.
- SHAH, R. K.; LONDON, A. L. *Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data*. Cambridge: Academic Press, 2014.
- SHARMA, K.; SARMA, P.; AZMI, W.; MAMAT, R.; KADIRGAMA, K. Correlations to predict friction and forced convection heat transfer coefficients of water based nanofluids for turbulent flow in a tube. *IJMNTFTP*, v. 3, p. 1–25, 01 2012.
- SMITH, J.; HINTERBERGER, M.; HABLE, P.; KOEHLER, J. Simulative method for determining the optimal operating conditions for a cooling plate for lithium-ion battery cell modules. *Journal of Power Sources*, v. 267, p. 784–792, 2014.
- THE OPENFOAM FOUNDATION. *OpenFOAM v9 User Guide*. United States, 2017. Disponível em: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide>. Acesso em: 2021-10-10.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. *Alternative fuels data Center*. United States, 2018. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>. Acesso em: 2021-05-12.
- VECCHIA, L. C. D. *Estudo da transferência de calor de nanofluidos submetidos à convecção natural em uma cavidade*. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics*. London: Pearson Prentice Hall, 2007.
- XU, J.; LAN, C.; QIAO, Y.; MA, Y. Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling. *Applied Thermal Engineering*, v. 110, p. 883–890, 2017.
- XU, X.; HE, R. Review on the heat dissipation performance of battery pack with different structures and operation conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 29, p. 301–315, 2014.
- XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 43, n. 19, p. 3701–3707, 2000.
- YATES, M.; AKRAMI, M.; JAVADI, A. A. Analysing the performance of liquid cooling designs in cylindrical lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, v. 33, p. 100913, 2021.

**ANEXO A - PASTAS CONSTANT E FVSOLUTION PARA CADA MATERIAL DO
OPENFOAM**


```

/*-----* C++ *-----*\
=====
\\      /   F ield           |   OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /   O peration       |   Website:  https://openfoam.org
\\      /   A nd              |   Version:   7
\\      /   M anipulation     |
\*-----*

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant/Channel";
    object       thermophysicalProperties;
}
// *****

thermoType
{
    type          heSolidThermo;
    mixture       pureMixture;
    transport     constIso;
    thermo        hConst;
    equationOfState rhoConst;
    specie        specie;
    energy        sensibleEnthalpy;
}

mixture
{
    // Aluminium

    specie
    {
        molWeight      27;
    }
    equationOfState
    {
        rho            2700;
    }
    transport
    {
        kappa          238;
    }
    thermodynamics
    {
        Hf              0;
        Cp              900;
    }
}
// *****

```

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
|  \ \ /  | F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
|  \ \ /  | O p e r a t i o n | Version: v2012
|  \ \ /  | A n d             | Website: www.openfoam.com
|  \ \ /  | M a n i p u l a t i o n |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant/heater";
    object       thermophysicalProperties;
}
// * * * * * //

thermoType
{
    type          heSolidThermo;
    mixture       pureMixture;
    // transport  constIso;
    transport     constAnIso;
    thermo        hConst;
    equationOfState rhoConst;
    specie        specie;
    energy        sensibleEnthalpy;
}
coordinateSystem
{
    type          cartesian; // global co-ordinate system (redundant)
    origin        (0 0 0); // redundant in this case
    coordinateRotation
    {
        type      axesRotation; // local Cartesian co-ordinates
        e1        (1 0 0);
        e2        (0 1 0);
        e3        (0 0 1);
    }
}
mixture
{
    specie
    {
        nMoles      1;
        molWeight    7;
    }

    transport
    {
        //kappa      34;
        kappa        (34 3.4 34);
    }

    thermodynamics
    {
        Hf          0;
        Cp          830;
    }
}

```

```
equationOfState
{
    rho      1700;
}
// ***** //
```

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
|  \ \ /  | F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
|  \ \ /  | O p e r a t i o n | Version: v2012
|  \ \ /  | A n d             | Website: www.openfoam.com
|  \ \ /  | M a n i p u l a t i o n |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant/Water";
    object       thermophysicalProperties;
}
// *****

thermoType
{
    type          heRhoThermo;
    mixture       pureMixture;
    transport     const;
    thermo        hConst;
    equationOfState rhoConst;
    specie        specie;
    energy        sensibleEnthalpy;
}

mixture
{
    specie
    {
        molWeight      18;
    }
    equationOfState
    {
        rho            997;
    }
    thermodynamics
    {
        Cp             4182;
        Hf             0;
    }
    transport
    {
        mu             932e-6;
        Pr             6.12;
    }
}
// *****

```

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
|  \ \ /  | F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
|  \ \ /  | O p e r a t i o n   | Version: v2012
|  \ \ /  | A n d                 | Website: www.openfoam.com
|  \ \ /  | M a n i p u l a t i o n |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system/Channel";
    object       fvSolution;
}
// ***** //
solvers
{
    h
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0.1;
    }
}
SIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}
relaxationFactors
{
    equations
    {
        h              0.7;
    }
}

// ***** //

```

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
|  \ \ /  | F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
|  \ \ /  | O p e r a t i o n   | Version: v2012
|  \ \ /  | A n d                | Website: www.openfoam.com
|  \ \ /  | M a n i p u l a t i o n |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system/heater";
    object       fvSolution;
}
// ***** //
solvers
{
    h
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance        1e-06;
        relTol           0.1;
    }
}

SIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}

relaxationFactors
{
    equations
    {
        h                0.7;
    }
}

// ***** //

```



```
    //rhoMax      2;
}
relaxationFactors
{
    fields
    {
        rho      1.0;
        p_rgh    0.7;
    }
    equations
    {
        U      0.3;
        h      0.7;
        "(k|epsilon|omega)" 0.7;
        G      0.7;
        "ILambda.*" 0.7;
        qr     0.7;
    }
}
}
```

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