



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação e Optimização de Sistemas de Refrigeração de Baterias em
Veículos Eléctricos

Autor:

Bulha, Milton José

Supervisora:

Eng.^a Isaura Moacha Tobela Msc

Co - Supervisor:

Prof. Dr. Eng^o. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Agosto 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica.

Simulação e Optimização de Sistemas de Refrigeração de Baterias em Veículos Eléctricos

Autor:

Bulha, Milton José

Supervisora:

Eng.^a Isaura Moacha Tobela Msc

Co - Supervisor:

Prof. Dr. Eng^o. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Maputo, Agosto 2025



Simulação e Optimização de Sistemas de Refrigeração de Baterias em Veículos Eléctricos

Bulha, Milton José



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante, **Bulha, Milton José**, entregou no dia ____ de Agosto de 2025 as ____
cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____ intitulado:
Simulação e Optimização de Sistemas de Refrigeração de Baterias em Veículos Eléctricos.

Maputo, ____ de Agosto de 2025

O/A chefe de Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Milton José Bulha, declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura com o tema, **Simulação e Optimização de Sistemas de Refrigeração de Baterias em Veículos Eléctricos**, que apresento para o cumprimento dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica, foi por mim realizado, com base nos recursos que no mesmo se faz referência.

(Milton José Bulha)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a ALLAH, sem deixar para trás aos meus pais, José Maurício Bulha e Rassula Abiba Ussi Maulide que sempre me deram apoio e me tornaram a pessoa que sou hoje.

A minha namorada, Jamila Neves que ofereceu o seu colo em muitos momentos da minha caminhada e ao meu irmão, Zaid José Bulha que do mesmo modo se faz presente em todos os momentos da minha vida e serviu de pilar para o meu progressivo desenvolvimento. Agradecer a toda minha família e aqueles que passaram pela minha vida pois apesar de não estarem mais presentes deixaram vários ensinamentos que me tem guiado.

A minha Supervisora Eng.^a Isaura Moacha Tobela Msc, pela paciência e pelos conselhos que me tornaram num melhor estudante e futuro engenheiro, e ao meu Co-Supervisor Prof. Doutor. Eng^o. Jorge Olívio Penicela Nhambiu, que tornou o processo de aprendizado divertido ao mesmo tempo que estava recheado de muito conhecimento.

Ao meu primo Elves Bainilo Bulha ao meu amigo Edmilson, que têm estado comigo desde o ensino secundário. Aos meus amigos Ivânio Kamota, Ângelo Libombo, Timóteo Macuacua, Belarmino Chaúque e Pedro Ndoa com quem partilho a vida desde o início da Faculdade. E a todos os meus colegas que aqui não foram mencionados saibam que sempre terão um lugar muito especial na minha vida.

E por último, mas não menos importante a professora Rute Helena Macandza que me apoiou no ensino secundário acreditando no meu potencial, a dona Telma por nunca ter nos deixado sem lanche e a todos os professores que participaram na minha educação e formação dentro e fora no ensino Universitário.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Rassula Abiba Ussi e as minhas irmãs, Yara José Bulha e Djanifa José Bulha, três mulheres fortes que sempre estarão no meu coração.

RESUMO

O presente trabalho analisa e optimiza a refrigeração de baterias de iões de lítio em veículos eléctricos utilizando simulação CFD (Computational Fluid Dynamics). A eficiência térmica das baterias é crucial para seu desempenho e segurança, pois temperaturas elevadas podem comprometer a vida útil e causar falhas catastróficas como degradação dos materiais, redução da capacidade e eficiência, curto-circuito interno, fuga térmica assim como danos mecânicos induzidos pelo calor. O estudo compara diferentes métodos de arrefecimento, compreendendo a refrigeração por ar, líquido e materiais de mudança de fase (PCM), utilizando *software Ansys Fluent* para modelagem e análise numérica. A pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de soluções térmicas mais eficientes e viáveis para o sector da electromobilidade.

Palavras-chave: Simulação CFD, baterias de iões de lítio, gestão térmica, veículos eléctricos.

ABSTRACT

The present work analyses and optimises the thermal management of lithium-ion batteries in electric vehicles using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. Thermal management of batteries is crucial for their performance and safety, as elevated temperatures can compromise their useful life and cause catastrophic failures such as degradation of materials, reduction of capacity and efficiency, internal short-circuit, and mechanical damage induced by heat. The study compares different cooling methods, including air cooling, liquid cooling, and phase change materials (PCM), utilising Ansys Fluent software for modelling and numerical analysis. The research seeks to contribute to the development of more efficient and viable thermal solutions for the electromobility sector.

Keywords: CFD Simulation, Lithium-Ion Batteries, Thermal Management, Electric Vehicles.

Índice Geral

DECLARAÇÃO DE HONRA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
DEDICATÓRIA	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
1. Introdução	1
1.1. Considerações Preliminares	1
1.2. Justificativa.....	3
1.3. Estrutura do trabalho	3
1.4. Objectivos.....	4
1.4.1. Geral.....	4
1.4.2. Específicos	4
1.5. Metodologia	4
2. Estado da Arte.....	5
2.1. Baterias.....	5
2.1.1. Tipos de Baterias e suas Características	5
2.2. Importância das baterias nos veículos eléctricos.....	7
2.2.1. O Papel das Baterias nos Veículos Eléctricos.....	7
2.2.1.1. Fonte de Energia Primária	7
2.2.1.2. Eficiência e Autonomia	8
2.2.1.3. Sustentabilidade e Redução de Emissões	8
2.2.1.4. Recarga e Integração com a Rede Eléctrica	8
2.2.1.5. Segurança e Desempenho	8
2.2.1.6. Redução de Custos Operacionais	8
2.3. Refrigeração de Baterias em Veículos Eléctricos	11
2.3.1. Baterias de Iões de Lítio e seu Funcionamento	11
2.3.2. Importância do Gerenciamento Térmico	12
2.4. Métodos de Refrigeração	15
2.4.1. Refrigeração por Ar	15
2.4.2. Refrigeração por Líquido	15
2.4.3. Materiais de Mudança de Fase (PCM).....	16
2.5. Trabalhos Relacionados	16
2.5.1. Comparação e Tendências Futuras	17
3. Simulação CFD.....	18
3.1. Fundamentos da Simulação CFD	18

3.1.1.	Processo de Simulação CFD	18
3.1.2.	Vantagens da Simulação CFD	19
3.1.3.	Limitações da Simulação CFD	19
3.2.	Equações Governantes:	20
	<i>cp</i> - Calor específico à pressão constante (J/kg.K);	21
3.3.	Modelagem dos Sistemas no <i>Software Ansys</i>	21
3.3.1.	Justificativa da Utilização do Modelo de Energia no <i>Software Ansys Fluent</i> ...	22
4.	CrITÉrios de avaliação e modelos de simulação	24
4.1.	CrITÉrio de avaliação.....	24
4.1.1.	Geometria e Modelagem Computacional de Arrefecimento a Ar	24
4.1.1.1.	Especificações Dimensionais.....	25
4.1.1.2.	Justificativa da Configuração.....	25
4.1.1.3.	Condições de Operação.....	25
4.1.1.4.	Pré-processamento:	25
4.1.1.5.	<i>Solver</i> e Configurações:	26
4.1.2.	Geometria e Modelagem Computacional da Refrigeração Líquida	27
2.2.1.7.	Condições de Contorno	28
4.1.3.	Refrigeração com Materiais com Mudança de Fase (PCM).....	30
5.	Análise dos resultados.....	32
5.1.	Análise Comparativa dos Métodos de Refrigeração	32
5.2.	Eficiência Térmica e Consumo de Energia	34
6.	Conclusões e Recomendações	38
6.1.	Conclusões	38
6.2.	Recomendações.....	39
7.	Referências Bibliográficas	41
	ANEXOS	44
	ANEXO A.....	45
	ANEXO B.....	48
	ANEXO C	51

Índice de figuras

Figura 1 - Projecção de frotas de veículos eléctricos até 2030 [4]	1
Figura 2 - Média de emissões de diferentes motores [5]	2
Figura 3 - Evolução da densidade de energia da bateria e custo [4].....	10
Figura 4 - Bateria de iões de lítio Fonte: [14].....	11
Figura 5 - Integração da temperatura com a potência da bateria [28]	13
Figura 6 - Integração da temperatura com o ciclo de vida da bateria [26]	13
Figura 7 - Células Cilíndricas (Fonte: Autor)	24
Figura 8 - Geometria do módulo (Fonte: Autor)	26
Figura 9 - Canal e célula, Refrigeração Líquida (Fonte: Autor).....	27
Figura 10 - Distribuição da temperatura refrigeração líquida (Fonte: Autor)	29
Figura 11 - Fracção líquida o PCM (Fonte: Autor)	30
Figura 12 - Distribuição da temperatura PCM (Fonte: Autor)	31
Figura 13 - Arrefecimento a Ar (Fonte: Autor)	34
Figura 14 - Refrigeração a Água (Fonte: Autor)	35
Figura 15 - Refrigeração a PCM (Fonte: Autor).....	36

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Vida útil em anos de uma bateria de ion-lítio [15].....	10
Gráfico 2: Consumo de Energia por Método de Refrigeração (Fonte: Autor)	36
Gráfico 3: Temperatura Média da Bateria por Método de Refrigeração (Fonte: Autor).....	37

Índice de Tabelas

Tabela 1: Tipos de baterias e suas características	6
Tabela 2: Parâmetros Computacionais (Fonte: Autor)	26
Tabela 3: Resultados (Fonte: Autor).....	32

Sigla

ANSYS - Software de Simulação por Elementos Finitos (do inglês *Analysis System*)

CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics*)

EA 2DS - Agência Internacional de Energia cenário do segundo grau (do inglês *International Energy Agency*)

EUA - Estados Unidos da América

EV - Veículos Eléctricos (do inglês *Electrical Vehicles*)

EVI - Iniciativa de Veículos Eléctricos (do inglês *Electrical Vehicles Initiative*)

GEE - Gases do Efeito Estufa

HEV – Veículos Eléctricos Híbridos (do inglês *Hybrid Electric Vehicle*)

ICE - Motores de Combustão Interna (do inglês *Internal Combustion Engine*)

LCO - Óxido de Cobalto

LFP - Fosfato de Ferro

LMO - Óxido de Magnésio

Ni-Cd - Níquel-Cádmio

Ni-MH - Níquel-Hidreto Metálico

NMC - Níquel-Manganês-Óxido de Cobalto

PbSO₄ - Baterias de Chumbo-Ácido

PCM - Materiais de Mudança de Fase (do inglês *Phase Change Material*)

PHEV - Veículos Híbridos Plug-in (do inglês *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*)

UK - Reino Unido

V2G - Veículo para Rede (do inglês *Vehicle-to-Grid*)

Abreviaturas

ANSYS - *Software* de Simulação por Elementos Finitos (do inglês *Analysis System*)

Nomenclatura

E_a	Energia de activação	J/mol
h	Entalpia ou coeficiente de transferência de calor	J/kg ou W/m ² ·K
k	Condutividade térmica	W/m·K
Nu	Número de Nusselt	Adimensional
p	Pressão	Pa (Pascal)
q	Fluxo de calor	W (Watts)
Q	Quantidade de calor	J (Joules)
R	Constante universal dos gases	8,314 J/mol·K
Re	Número de Reynolds	Adimensional
T	Temperatura	K (Kelvin) ou °C
t	Tempo	s (segundos) ou anos
η	Eficiência térmica	Adimensional (%)
μ	Viscosidade dinâmica	Pa·s
ρ	Densidade do fluido	kg/m ³
$\vec{v}$	Vector velocidade	m/s
c_p	Calor específico a pressão constante	J/kg·K

1. Introdução

1.1. Considerações Preliminares

O uso de combustível fóssil continua sendo questionado em função de seu já conhecido impacto ambiental sendo estes o aumento do efeito estufa e das alterações climáticas devido às emissões de dióxido de carbono (CO_2), emissão de metano (CH_4) e óxidos nitrosos (N_2O) durante a extração e transporte; a poluição atmosférica devido a emissão de óxidos de enxofre (SO_x) (chuva ácida, smog, partículas tóxicas); a degradação de ecossistemas terrestres e marinhos por extração e derrames; o esgotamento de recursos não renováveis; e graves efeitos sobre a saúde humana e a qualidade de vida.

Sob a óptica da mobilidade, os veículos eléctricos (EV) e/ou híbridos (HEV e PHEV) colocam-se como alternativas para a redução dos gases do efeito estufa (GEE) [1]. A seriedade desta proposta pode ser avaliada nos objectivos estabelecidos até 2030 pelos órgãos internacionais, conforme projecções da Figura 1. A Iniciativa de Veículos Eléctricos (EVI) 2020 visou uma frota global de veículos eléctricos de 20 milhões até 2020 enquanto a Declaração de Paris sobre a Mobilidade Eléctrica e Mudanças Climáticas estabelece um objectivo de implantação global de 100 milhões de veículos eléctricos e 400 milhões de veículos de 2 ou 3 rodas em 2030. Além disso, dados da IEA 2DS (International Energy Agency 2 degree scenario) mostram que manter taxas de crescimento anual superiores a 25% até 2025 e na faixa de 7% a 10% entre 2030 e 2050, limitam em 2° C o aumento da temperatura global [2, 3]

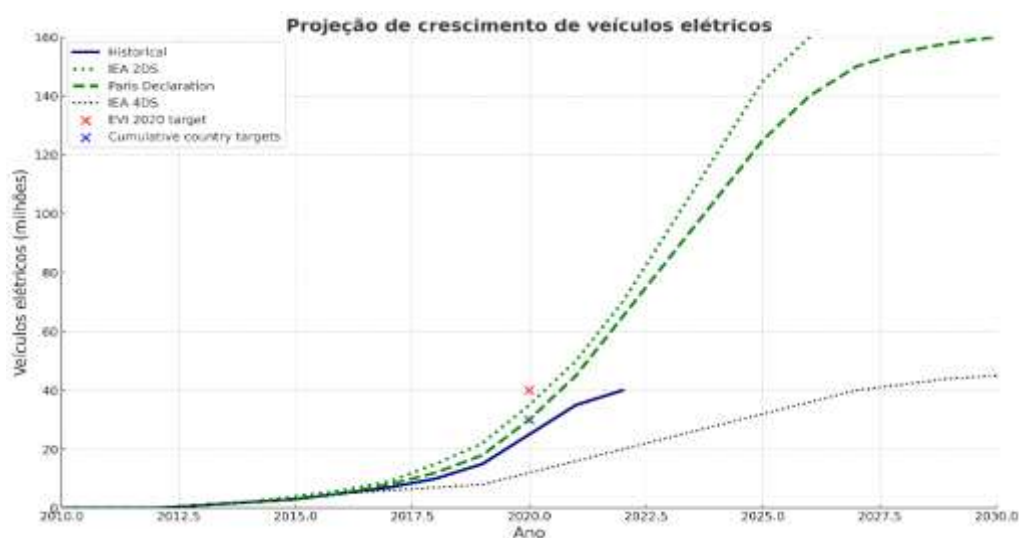


Figura 1 - Projecção de frotas de veículos eléctricos até 2030 [4]

Nos últimos anos, o avanço da electromobilidade tem impulsionado o desenvolvimento de veículos eléctricos como alternativa sustentável aos motores a combustão interna. No entanto, um dos principais desafios enfrentados por esses veículos é a gestão térmica das baterias, que desempenham um papel crucial na eficiência, segurança e vida útil do sistema de armazenamento de energia.

Vale ressaltar ainda que em países cuja matriz de produção de electricidade esteja fortemente vinculada ao petróleo ou carvão, os veículos eléctricos apresentam índices de emissões de CO_2 menores quando comparados aos de combustão interna (ICE), mesmo considerando que serão obtidos indiscutíveis avanços tecnológicos nos motores convencionais até 2030 [5]. A Figura 2 mostra um comparativo no nível de emissões de carbono em gramas de CO_2 por milha percorrida para ICE e EV em países dependentes de fontes de energia eléctrica geradas a carvão (a partir de 2015 até progressões do ano 2030), como Reino Unido (UK), China e Estados Unidos (EUA).

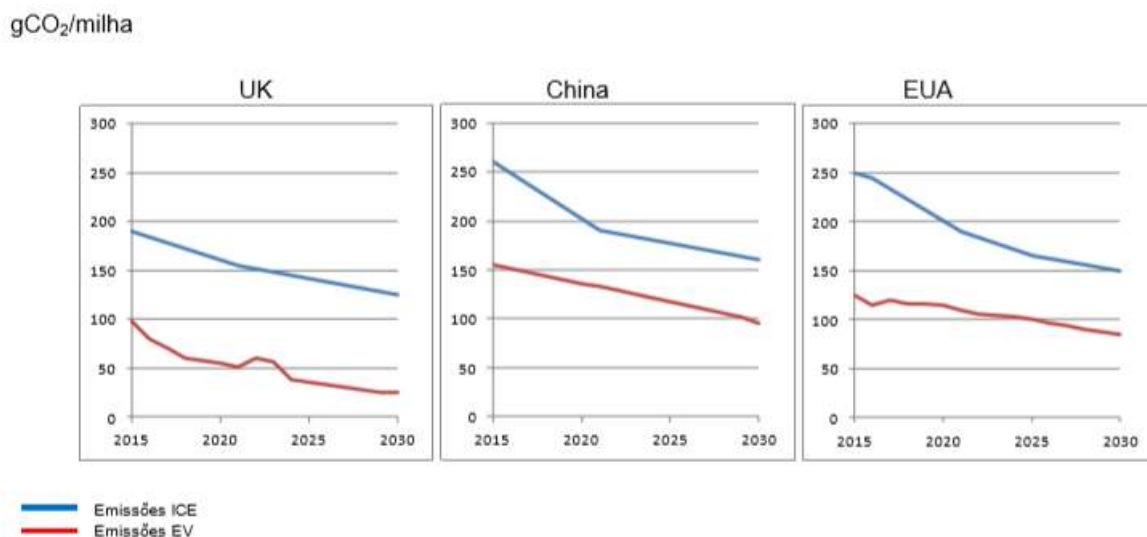


Figura 2 - Média de emissões de diferentes motores [5]

O superaquecimento das baterias pode levar à degradação acelerada dos materiais, redução da capacidade de armazenamento e, em casos extremos, falhas térmicas que comprometem a segurança do veículo. Para mitigar esses efeitos, diversas técnicas de arrefecimento são empregues, incluindo sistemas de arrefecimento a ar, arrefecimento líquido e materiais de mudança de fase (PCM) [6].

Neste contexto, a modelagem e simulação computacional via Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) têm se mostrado ferramentas essenciais para optimizar o projecto de

sistemas de refrigeração de baterias. A análise CFD permite avaliar diferentes geometrias e condições operacionais, reduzindo custos experimentais e tempo de desenvolvimento [7].

Dessa forma, este trabalho tem como objectivo estudar e comparar diferentes configurações de arrefecimento para baterias de veículos eléctricos, utilizando simulação CFD para determinar a eficiência de cada método, buscando contribuir para o desenvolvimento de soluções térmicas mais eficientes e viáveis para o sector da electromobilidade.

1.2. Justificativa

A necessidade de soluções eficientes para o gerenciamento térmico das baterias é um factor determinante para a evolução dos veículos eléctricos. A avaliação e optimização de sistemas de arrefecimento contribuem directamente para o aumento da segurança, eficiência e durabilidade (tempo de vida útil) das baterias. O uso de simulação CFD possibilita um estudo detalhado das condições operacionais, reduzindo a necessidade de experimentos custosos (do ponto de vista económico e prático) e acelerando o desenvolvimento de tecnologias inovadoras. Assim, este estudo se justifica pela sua relevância na busca por soluções térmicas avançadas para o sector da mobilidade eléctrica.

1.3. Estrutura do trabalho

No Capítulo 1 é feita a introdução, as considerações preliminares e a justificativa do estudo.

No Capítulo 2, é elaborado o estudo do estado da arte, que consiste na revisão do conceito das baterias, é realizada uma abordagem geral sobre as fontes de energia electroquímica, explorando os diferentes tipos de baterias disponíveis, suas principais características e identificando as mais adequadas para aplicação em veículos eléctricos.

No Capítulo 3, são apresentadas as simulações CFD e os fundamentos da simulação, posteriormente as equações governantes e a modelagem dos sistemas no *Ansys*.

No Capítulo 4, será descrito o processo de modelagem dos sistemas de refrigeração no *software Ansys Fluent*, abordando desde a criação da geometria até a configuração dos parâmetros físicos e numéricos.

No Capítulo 5, é feita a análise os resultados dos três métodos de refrigeração.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e recomendações relativamente ao trabalho.

Com essa abordagem, espera-se contribuir para o aprimoramento de sistemas de refrigeração de baterias, fornecendo *insights* para a otimização da eficiência térmica em veículos eléctricos.

1.4. Objectivos

1.4.1. Geral

- Modelar e simular sistemas de refrigeração de baterias em veículos eléctricos, utilizando CFD *Ansys*, avaliando sua eficiência térmica.

1.4.2. Específicos

- Modelar diferentes sistemas de refrigeração utilizando CFD *Ansys*;
- Compreender os efeitos da temperatura na eficiência e durabilidade das baterias de veículos eléctricos;
- Identificar os principais métodos de refrigeração utilizados na indústria automotiva;
- Comparar os resultados obtidos em termos de distribuição de temperatura e eficiência térmica;

1.5. Metodologia

O presente estudo foi conduzido recorrendo ao *software* comercial *ANSYS Fluent*. O modelo matemático adoptado é composto pelas equações de fecho que descrevem as fases líquida e sólida do sistema. Para garantir maior precisão numérica, foram geradas malhas computacionais com diferentes níveis de refinamento, sobretudo nas regiões onde se observam gradientes mais acentuados das variáveis de interesse. Adicionalmente, realizaram-se análises de independência e de convergência das malhas, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos. A validação do modelo numérico foi efectuada por meio da comparação com dados numéricos previamente reportados na literatura especializada, reforçando a consistência da metodologia empregue.

2. Estado da Arte

Este capítulo fornece as informações fundamentais para esta monografia. Primeiramente, é realizada uma abordagem geral sobre as fontes de energia electroquímica, explorando os diferentes tipos de baterias disponíveis, suas principais características e identificando as mais adequadas para aplicação em veículos eléctricos.

2.1. Baterias

As fontes de energia electroquímica ou baterias, são dispositivos que possibilitam a transformação de energia química em electricidade a partir da energia libertada por reacções químicas que ocorrem no seu interior. Na sua génese, as baterias permitem duas grandes funções, fontes de potência eléctrica portáteis e a possibilidade de armazenarem energia eléctrica fornecida por uma fonte externa [8].

A primeira função possibilitou o desenvolvimento de dispositivos portáteis, como telemóveis, relógios de pulso, computadores portáteis, além de veículos eléctricos e híbridos. Já os sistemas que utilizam a segunda função incluem fontes de alimentação de emergência e sistemas *stand-alone* (sistemas autónomos) em redes de energia renovável.

As baterias podem ser classificadas em primárias ou secundárias. As baterias primárias são as que, após o consumo total dos reagentes, não conseguem armazenar energia novamente, enquanto, as baterias secundárias são aquelas cuja reacção electroquímica pode ser revertida ao aplicar uma corrente eléctrica no sentido oposto ao da descarga, permitindo que elas sejam recarregadas e reutilizadas [9].

As baterias secundárias são consideradas dispositivos de armazenamento de energia. É de notar que a energia armazenada neste tipo de baterias não é eléctrica, mas química.

2.1.1. Tipos de Baterias e suas Características

Entre os diversos tipos de baterias disponíveis no mercado, as de iões de lítio são as mais utilizadas em EVs e HEVs. Em comparação com outros tipos, como as baterias de chumbo-ácido (PbSO_4), Níquel-Cádmio (Ni-Cd) e Níquel-Hidreto Metálico (Ni-MH), elas apresentam vantagens significativas. As baterias de iões de lítio não sofrem com o efeito de memória, isto é, a sua capacidade não diminui pelo simples facto de serem carregadas parcialmente, possuem um custo relativamente mais baixo, oferecem flexibilidade de *design* e garantem maior segurança em condições extremas [10].

Tabela 1: Tipos de baterias e suas características

Baterias	Chumbo-Ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Energia Específica (Wh/kg)	30 - 50	45 - 80	60 - 120	110 - 60
Potência Específica (W/kg)	180	150	250 - 1000	1800
Tensão Nominal	2V	1.25V	1.25V	3.7V
Tolerância sobre carregamento	Moderada	Moderada	Baixa	Muito Baixa
Taxa auto - descarga	Baixa	Moderada	Alta	Muito Baixa
Temperaturas de Funcionamento (°C)	-20 a 60	-40 a 60	-20 a 60	-20 a 60
Ciclo de vida (número de ciclos)	200 - 300	1500	300 - 500	500 - 1000

Fonte: (Adaptado) [11]

Na maioria das baterias de íons de lítio, o ânodo (eléctrodo negativo) é composto por grafite de carbono, enquanto o cátodo pode apresentar diferentes configurações, como Óxido de Cobalto (LiCoO_2 - LCO), Óxido de Magnésio (LiMn_2O_4 - LMO), Fosfato de Ferro (LiFePO_4 - LFP) e Níquel-Manganês-Óxido de Cobalto ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ - NMC) [12]. Segundo [13] as baterias com Óxido de Cobalto oferecem melhor desempenho em termos de energia e potência, embora o custo do cobalto seja elevado. Como alternativa, surgiram opções mais acessíveis e seguras, sendo que as de Níquel-Manganês-Óxido de Cobalto se tornaram as mais comercializadas devido à sua alta densidade energética.

No contexto dos veículos eléctricos, as baterias de Fosfato de Ferro destacam-se como a melhor escolha, pois apresentam menor impacto ambiental, maior durabilidade, menor custo e um desempenho mais estável ao longo do tempo [14].

A estrutura das baterias de íons de lítio é relativamente simples, composta por quatro elementos essenciais: ânodo, cátodo, electrólito e separador. O ânodo, que actua como eléctrodo negativo, recebe os electrões do cátodo durante o carregamento e serve como meio de migração para os electrões durante a descarga. O cátodo, por sua vez, desempenha a função oposta ao ânodo. O electrólito possibilita o transporte dos íons de lítio entre os eléctrodos, enquanto o separador funciona como uma barreira física para evitar curto-circuitos dentro da bateria, permitindo apenas a passagem dos íons [15].

2.2. Importância das baterias nos veículos eléctricos

2.2.1. O Papel das Baterias nos Veículos Eléctricos

As baterias desempenham um papel fundamental nos veículos eléctricos (EVs), sendo responsáveis pelo armazenamento e fornecimento de energia eléctrica para o funcionamento do motor eléctrico. Elas substituem os sistemas de combustão convencionais, permitindo uma mobilidade mais limpa e eficiente.

Além de fornecer energia para a propulsão, as baterias também alimentam sistemas auxiliares como iluminação, climatização, controle electrónico de estabilidade e sistemas de infoentretenimento. A *performance* de um veículo eléctrico, como sua autonomia, tempo de recarga e aceleração, está directamente ligada à capacidade, densidade energética e eficiência térmica da bateria.

Entre os diferentes tipos de baterias, as de íões de lítio tornaram-se a tecnologia dominante devido à sua alta densidade energética (200 – 250 Wh/kg), baixo peso, vida útil prolongada e boa eficiência de carga/descarga [3].

O dimensionamento da bateria influencia directamente na autonomia do veículo, sendo um dos factores mais críticos para a aceitação do consumidor. Além disso, a durabilidade da bateria afecta os custos operacionais e o valor residual do veículo. Assim, o gerenciamento térmico e a protecção contra sobrecarga, descarga profunda e variações de temperatura são aspectos essenciais para a segurança e longevidade das baterias [6].

2.2.1.1. Fonte de Energia Primária

Diferente dos veículos convencionais movidos a combustíveis fósseis, os EVs dependem exclusivamente das baterias para fornecer energia ao motor eléctrico. Isso permite um funcionamento mais limpo e sustentável, reduzindo a dependência de fontes de energia não renováveis [8]. Além disso, os veículos eléctricos não produzem emissões directas de CO₂ durante a operação, o que contribui significativamente para a mitigação dos impactos ambientais, especialmente em centros urbanos com alta concentração de poluentes atmosféricos.

A eficiência energética dos EVs é superior a dos veículos com motores de combustão interna, pois estes operam com eficiência térmica média entre 25–30%, os motores eléctricos podem ultrapassar 90% de eficiência na conversão da energia armazenada em trabalho mecânico [16]. Isso resulta em menor desperdício de energia e menor custo por quilómetro rodado.

2.2.1.2. Eficiência e Autonomia

A autonomia dos EVs depende directamente da capacidade e densidade energética da bateria. Quanto maior a densidade energética, maior será a distância percorrida com uma única carga [13]. As baterias de iões de lítio, amplamente utilizadas em veículos eléctricos, apresentam alta eficiência energética e menor taxa de perdas em comparação com motores de combustão interna [17].

2.2.1.3. Sustentabilidade e Redução de Emissões

O uso de baterias nos veículos eléctricos contribui significativamente para a redução das emissões de gases poluentes, como CO₂ e óxidos de nitrogénio. Isso ajuda a mitigar os efeitos das mudanças climáticas e melhora a qualidade do ar nas cidades [8]. Além disso, a integração dos EVs com fontes de energia renovável torna o carregamento das baterias ainda mais sustentável [18].

2.2.1.4. Recarga e Integração com a Rede Eléctrica

As baterias dos EVs podem ser carregadas por meio de carregadores domésticos ou estações de carregamento rápido. Além disso, tecnologias como *Vehicle-to-Grid* (V2G) permitem que os veículos eléctricos forneçam energia de volta à rede eléctrica em momentos de alta demanda, auxiliando no equilíbrio do sistema eléctrico [19].

2.2.1.5. Segurança e Desempenho

As baterias modernas são projectadas para garantir segurança e confiabilidade, incorporando sistemas avançados de gerenciamento térmico e protecção contra sobrecarga. Isso evita superaquecimento, curto-circuitos e outros riscos, tornando os EVs mais seguros para condutores e passageiros [20].

2.2.1.6. Redução de Custos Operacionais

Os veículos eléctricos possuem menor custo de manutenção em comparação com os veículos a combustão, pois os motores eléctricos são mais simples e as baterias, quando bem gerenciadas, possuem uma vida útil prolongada [17]. Além disso, os custos de abastecimento com electricidade são inferiores aos dos combustíveis fósseis, tornando os EVs uma opção mais económica a longo prazo [13].

Para avaliar a vida útil em anos, os fabricantes de células geralmente armazenam as baterias a diferentes temperaturas por grandes períodos e verificam periodicamente a capacidade restante. Fazer um gráfico com esses dados proporciona uma relação entre tempo, temperatura e capacidade restante. Após terem sido colectados dados suficientes, é possível adequar os dados a uma equação geralmente aceite para a vida útil em anos, a qual foi comprovada por décadas de experiência no campo das baterias de íon-lítio [21].

$$Q(t) = Q_0 - k \cdot t^n \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (1)$$

Onde:

$Q(t)$ – Capacidade restante da bateria no tempo (t)

Q_0 – Capacidade inicial da bateria

k – Constante de envelhecimento (dependente do tipo de célula e condições de teste)

t – Tempo (em anos ou horas)

n – Expoente empírico (geralmente próximo de 0,5 a 1)

E_a – Energia de activação da degradação (em J/mol)

R – Constante universal dos gases (8,314 J/mol·K)

T – Temperatura absoluta (em Kelvin)

O Gráfico 1 mostra que 80% da capacidade inicial permanece após aproximadamente dez anos a temperaturas de 23°C (73°F) para a bateria de íon-lítio em particular testada. O que é importante é que capacidade de 80% não é um marco significativo na vida útil de uma bateria de íões de lítio porque a taxa de degradação anual está desacelerando ao redor de 80% e continuará a degradar de forma previsível.

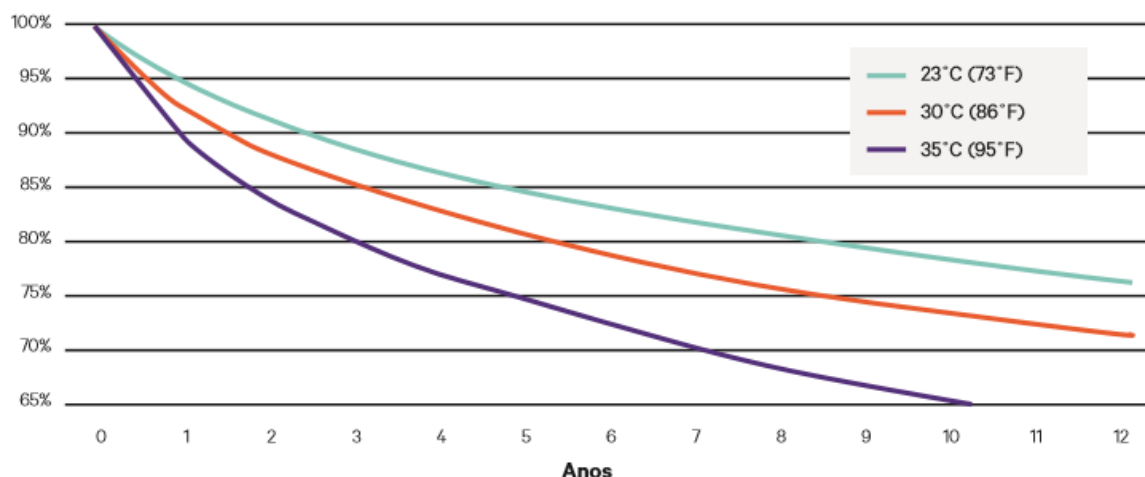


Gráfico 1: Vida útil em anos de uma bateria de ion-lítio [15]

As baterias são o elemento central dos veículos eléctricos, determinando seu desempenho, autonomia, impacto ambiental e custo operacional. Com os avanços contínuos na tecnologia de baterias, espera-se que como mostrado na Figura 3 os EVs se tornem ainda mais eficientes, acessíveis e sustentáveis, acelerando a transição para um sistema de transporte mais limpo e económico.



Figura 3 - Evolução da densidade de energia da bateria e custo [4]

A Figura 3 ilustra que a densidade energética (energia armazenável por unidade de volume) e o custo das baterias de íões de lítio têm evoluído significativamente ao longo do tempo (como evidenciam as curvas 2008-2016), com avanços notáveis em ambos os aspectos. A densidade energética que se refere à quantidade de energia que pode ser armazenada em relação ao tamanho e peso da bateria, tem aumentado, permitindo que veículos eléctricos e outros dispositivos portáteis tenham maior autonomia e sejam mais leves.

Em paralelo, o custo das baterias de íões de lítio tem diminuído consideravelmente, tornando a tecnologia mais acessível e impulsionando sua adopção em diversas aplicações.

2.3. Refrigeração de Baterias em Veículos Eléctricos

As baterias de íões de lítio desempenham um papel fundamental na transição para a mobilidade eléctrica, sendo amplamente utilizadas em veículos eléctricos devido à sua alta densidade energética e longa vida útil [22]. No entanto, a eficiência dessas baterias é altamente dependente do seu gerenciamento térmico, uma vez que temperaturas elevadas podem acelerar reacções parasitas, reduzindo a capacidade e a segurança do sistema [23]. Nesse contexto, a simulação CFD (Computational Fluid Dynamics) tem sido amplamente utilizada para analisar e otimizar sistemas de refrigeração de baterias em veículos eléctricos, permitindo prever padrões de fluxo de calor e comportamento térmico [24].

2.3.1. Baterias de Íões de Lítio e seu Funcionamento

As baterias são dispositivos electroquímicos que convertem energia química em energia eléctrica por meio de reacções de oxidação-redução que ocorrem nos eléctrodos [22]. No caso das baterias de íões de lítio, o ânodo é tipicamente composto de grafite, enquanto o cátodo pode conter diferentes materiais, como LiCoO_2 , LiFePO_4 ou LiMn_2O_4 . Durante a descarga, os íões de lítio migram do ânodo para o cátodo através do electrólito, enquanto os electrões fluem pelo circuito externo, gerando corrente eléctrica [25].



Figura 4 - Bateria de íões de lítio Fonte: [14]

2.3.2. Importância do Gerenciamento Térmico

O principal factor limitante no desenvolvimento da bateria, afectando especialmente o desempenho, vida útil e segurança, que deve ser controlado cuidadosamente é a temperatura de trabalho, pois tanto o excesso quanto a falta de calor poderão ocasionar diferentes problemas, isto é, o excesso de calor acelera a degradação, reduz a vida útil, aumenta o risco de incêndio e a falta de calor reduz o desempenho, dificulta o carregamento e pode causar deposição de lítio (formação de lítio metálico indesejado no ânodo) [8].

Em temperaturas abaixo do ideal, ocorrerá uma diminuição na taxa de reacção química da bateria, pois essas taxas possuem relação linear com a temperatura, e redução da capacidade de transportar corrente durante a carga e descarga. Além disso, a redução da taxa de reacção torna mais difícil inserir íões de lítio em espaços de intercalação. O resultado é a redução de potência e do revestimento de lítio causando a perda de capacidade de armazenagem de carga [26].

Em contrapartida, altas temperaturas aumentam as taxas de reacção gerando cada vez mais potência. No entanto, essa alta taxa de reacção também aumenta a dissipação de calor e gera temperaturas ainda mais elevadas. A menos que o calor seja dissipado mais rapidamente do que ele é gerado, a temperatura será cada vez maior até o ponto que poderão ocorrer danos irreversíveis ou até mesmo o curto-circuito da bateria [26].

A temperatura de operação das baterias de íões de lítio é um factor crítico para sua eficiência e segurança. Nos trabalhos [23, 6], os autores demonstram que temperaturas acima de 50°C podem acelerar a degradação dos materiais activos e provocar fuga térmica, resultando em risco de incêndio ou explosão. Por outro lado, temperaturas muito baixas afectam a condutividade do electrólito, reduzindo a capacidade da bateria [27].

Como já foi referido, a temperatura da bateria deve ser controlada para evitar diversos problemas térmicos, melhorar sua vida útil e performance. As Figuras (5 e 6) mostram a interacção da temperatura com a potência e o ciclo de vida da bateria.

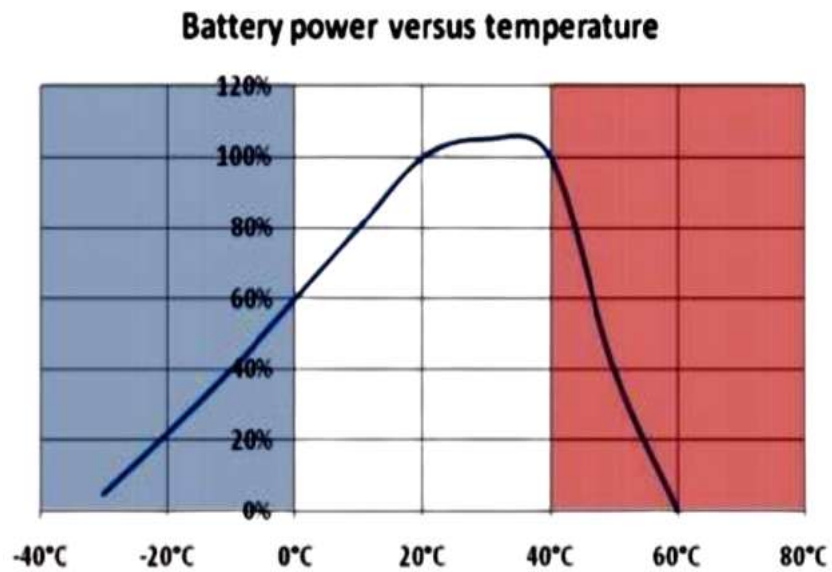


Figura 5 - Integração da temperatura com a potência da bateria [28]

Observa-se na Figura 5 que a curva de potência da bateria atinge seu ponto máximo entre 20°C e 40°C.

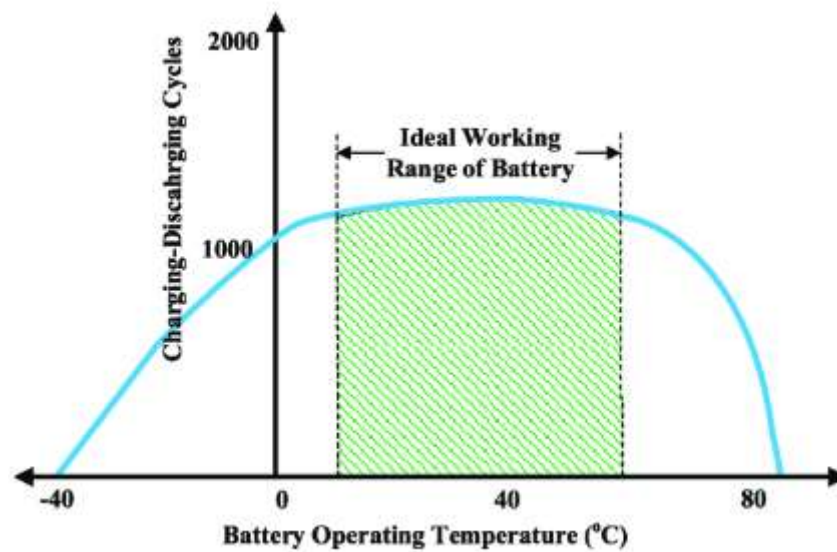


Figura 6 - Integração da temperatura com o ciclo de vida da bateria [26]

Na Figura 6 nota-se que o ciclo de vida da bateria se mantém estável entre as temperaturas de 10°C a 60°C.

É necessário um gerenciamento térmico da bateria para se manter a temperatura entre 20 °C e 40 °C, podendo haver alterações em caso de diferentes composições das baterias. Além disso, para garantir a segurança operacional e prolongar a vida útil das células, a diferença máxima de temperatura entre elas deve ser limitada a 5 K. Variações superiores a esse valor podem causar degradação acelerada dos materiais activos, formação de depósitos de lítio e risco de instabilidade térmica [30].

O calor gerado durante a carga e descarga de baterias veiculares (particularmente baterias de íões de lítio usadas em veículos eléctricos) resulta de vários fenómenos físicos e químicos, e pode ser estimado usando modelos termoeléctricos.

O processo de carga e descarga da bateria segundo [29] é dado pela equação:

$$\dot{Q} = I(U_{ocv} - U_i) - IT \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} - \sum_i \Delta H_i^{avg} r_i - \int \sum_i (\bar{H}_j - \bar{H}_j^{avg}) \frac{\partial c_j}{\partial t} dv \quad (2)$$

A primeira parte do lado direito indica o calor resistivo de Joule (abreviado como Q_{jou}), que ocorre devido à resistência interna da bateria (r_{int}) e ao fluxo de corrente (I); A segunda parte é o calor entrópico reversível ou calor de reacção (abreviado como Q_{ent}), indicando a variação da entropia no processo de carga e descarga.

A terceira parte é o calor gerado por reacções secundárias indicando o processo de envelhecimento (abreviado como Q_{sr}), e a quarta parte é o calor gerado no processo da mistura (abreviado como Q_{mix}).

O processo de envelhecimento das baterias de íões de lítio é muito lento, o que significa uma taxa muito baixa de reacções secundárias em um único ciclo de carga/descarga [29].

O calor no processo da mistura ocorre devido a formação e ao relaxamento dos gradientes de concentração na célula, sendo mais relevante em perfis dinâmicos de carga/descarga e pouco significativo em aplicações com corrente constante [29].

Neste trabalho, a bateria foi testada principalmente com corrente constante de carga e descarga, portanto, Q_{sr} e Q_{mix} são insignificantes em comparação com calor de Joule e calor de reacção.

Como resultado a geração de calor durante os processos carga e descarga pode ser calculada pela Equação 3:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{jou} + \dot{Q}_{re} = I(U_{OCV} - U_i) - IT \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \quad (3)$$

Conforme mostrado na Equação 3, o calor de Joule é determinado pela corrente de operação da bateria e pela sobretensão, sendo que a sobretensão pode ser interpretada como a queda de tensão na resistência interna da bateria.

2.4. Métodos de Refrigeração

São diferentes as estratégias de refrigeração empregues para manter as baterias dentro da faixa térmica ideal (20°C - 40°C).

2.4.1. Refrigeração por Ar

A refrigeração por ar é um método simples e económico, amplamente utilizado em aplicações de baixo custo. Consiste no uso de ventiladores para forçar a circulação de ar ao redor das células da bateria, dissipando calor por convecção [23]. Apesar da sua simplicidade, a eficiência desse método é limitada, especialmente em condições de alta carga térmica, pois a capacidade térmica do ar é relativamente baixa em comparação com outros fluidos refrigerantes. Estudos mostram que a refrigeração por ar pode ser eficaz em baterias de baixa potência, mas em aplicações automotivas mais exigentes, esse método pode não ser suficiente para manter a temperatura dentro dos limites recomendados [24].

2.4.2. Refrigeração por Líquido

A refrigeração líquida é amplamente utilizada em veículos eléctricos comerciais devido à sua maior capacidade de remoção de calor. Esse método emprega circuitos de arrefecimento onde um fluido térmico, como água ou mistura de etileno glicol, circula ao redor das células da bateria, absorvendo e transportando calor para um radiador externo [25]. Pesquisas indicam que a refrigeração líquida pode reduzir significativamente a temperatura média das baterias e melhorar a uniformidade térmica dentro do pacote [6]. No entanto, esse sistema apresenta

desafios técnicos, como a necessidade de bombas, tubulações e trocadores de calor, aumentando o custo e a complexidade do projecto.

2.4.3. Materiais de Mudança de Fase (PCM)

Os materiais de mudança de fase (PCM) são uma alternativa inovadora para o gerenciamento térmico de baterias. Esses materiais absorvem calor durante a transição de fase sólido-líquido, mantendo a temperatura do sistema estável por mais tempo [27].

A principal vantagem dos PCM é a capacidade de armazenar grandes quantidades de calor sem necessidade de componentes activos, como ventiladores ou bombas. Estudos recentes mostram que a combinação de PCM com sistemas de refrigeração activa pode melhorar significativamente a eficiência térmica das baterias [31]. No entanto, a baixa condutividade térmica dos PCM pode limitar a taxa de dissipação de calor causando o acúmulo de calor dentro PCM durante o processo de fusão levando ao aumento gradual da temperatura da bateria, tornando necessário o uso de materiais condutores de calor para otimizar o desempenho do sistema [32].

2.5. Trabalhos Relacionados

O gerenciamento térmico de baterias em veículos eléctricos é um campo de estudo essencial para garantir a eficiência energética e a segurança operacional desses sistemas. Diferentes métodos de refrigeração têm sido investigados, incluindo refrigeração a ar, líquida e o uso de materiais de mudança de fase (PCM).

No trabalho [33], os autores mostram que a refrigeração a ar é um método amplamente utilizado devido à sua simplicidade e baixo custo. No entanto, sua eficiência é limitada em condições de alta demanda térmica. Indicam ainda que a optimização do *design* dos ductos de ar pode melhorar a dissipação de calor e a uniformidade térmica das células da bateria.

No trabalho [34], os autores descrevem que a refrigeração líquida tem se mostrado mais eficaz na gestão térmica das baterias, pois proporciona maior capacidade de remoção de calor em comparação com a refrigeração a ar. Demonstram que o uso de trocadores de calor compactos e circuitos de arrefecimento activo pode reduzir significativamente a temperatura operacional das células. No trabalho [35], os autores enfatizam que esse método apresenta desafios relacionados ao custo e à complexidade de implementação.

O uso de PCM tem sido explorado como uma alternativa para mitigar variações extremas de temperatura. No trabalho [36], os autores apontam que a integração de PCM com sistemas

de arrefecimento activo pode reduzir picos de temperatura e melhorar a distribuição térmica dentro do módulo da bateria. No entanto, a baixa condutividade térmica dos PCM ainda é um desafio que requer a incorporação de aditivos ou estruturas condutivas.

2.5.1. Comparação e Tendências Futuras

Comparações entre diferentes métodos de refrigeração mostram que a refrigeração líquida é a mais eficiente, mas apresenta desafios estruturais [37]. Sistemas híbridos que combinam PCM e refrigeração líquida vêm se destacando como soluções promissoras para equilibrar eficiência térmica e custo [38]. Além disso, o desenvolvimento de algoritmos baseados em aprendizado de máquina para otimizar a gestão térmica das baterias está emergindo como uma tendência relevante para o futuro dos veículos eléctricos [39].

3. Simulação CFD

3.1. Fundamentos da Simulação CFD

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta baseada em métodos numéricos que visa resolver, com elevada precisão, as equações que governam o comportamento dos fluidos e os processos de transferência de calor.

Tais equações incluem a equação da continuidade (conservação de massa), as equações de Navier-Stokes (conservação de quantidade de movimento) e a equação da energia (conservação de energia térmica). O domínio físico é discretizado em uma malha composta por volumes de controlo, nos quais essas equações são aplicadas [40].

No contexto da engenharia, a CFD tem-se consolidado como uma ferramenta indispensável para o projecto e optimização de sistemas térmicos, principalmente quando se busca compreender fenómenos complexos sem recorrer a protótipos físicos, que são onerosos em termos de tempo e recursos.

Assim, a CFD torna-se essencial para:

- Visualizar e quantificar a distribuição de temperatura nas células e módulos de baterias sob diferentes condições operacionais;
- Comparar diferentes métodos de arrefecimento, como ar forçado, líquido (água ou refrigerantes) e materiais com mudança de fase (PCM);
- Avaliar o impacto de diferentes geometrias de canais de arrefecimento, velocidades de fluxo e propriedades térmicas dos materiais usados;
- Simular ciclos de carga e descarga, considerando a geração de calor por efeitos Joule e reacções electroquímicas;
- Optimizar a eficiência térmica e energética do sistema, garantindo uniformidade de temperatura e redução de *hotspots*.

3.1.1. Processo de Simulação CFD

O processo de simulação geralmente segue as seguintes etapas:

1. Criação da geometria do sistema, que pode incluir células, canais de arrefecimento, condutores térmicos e compartimentos.

2. Geração da malha computacional (mesh), com refinamento adequado em regiões críticas (interfaces, paredes, zonas de gradiente térmico elevado).
3. Definição das propriedades dos materiais e das condições de contorno, como tipo de fluido refrigerante, vazão, temperatura de entrada, geração interna de calor, etc.
4. Escolha do modelo físico adequado, incluindo escoamento laminar/turbulento, regime estacionário/transiente, e, quando necessário, modelos para materiais com mudança de fase (PCM).
5. Resolução das equações pelo *solver* numérico, utilizando *softwares* como o *Ansys Fluent*, que empregam métodos como o *Pressure-Based Solver* ou *Density-Based Solver*, acoplados com algoritmos de segregação ou acoplamento de variáveis.
6. Pós-processamento dos resultados, com geração de gráficos, perfis de temperatura, linhas de corrente e análise quantitativa dos gradientes térmicos [23] [12] [26].

3.1.2. Vantagens da Simulação CFD

- Redução de custos com protótipos e experimentação física;
- Rapidez no desenvolvimento e avaliação de soluções;
- Capacidade de explorar cenários extremos ou perigosos, que seriam inviáveis experimentalmente;
- Flexibilidade para ajustes paramétricos, sem necessidade de alterar fisicamente o sistema [11] [18].

3.1.3. Limitações da Simulação CFD

Apesar de suas vantagens, a simulação CFD apresenta limitações, como:

- Dependência de modelos de turbulência e simplificações geométricas ou físicas;
- Necessidade de alto poder computacional, principalmente em modelos tridimensionais e transientes;
- Risco de erros numéricos ou de convergência se a malha, modelos ou condições de contorno forem inadequados;
- Acurácia dos resultados depende da validação experimental [11] [23].

3.2. Equações Governantes:

A modelagem numérica dos fenômenos de escoamento de fluidos e transferência de calor em CFD baseia-se na solução das equações governantes da mecânica dos fluidos e da termodinâmica. As principais equações envolvidas são [33]:

- Conservação de massa (continuidade):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

Onde:

ρ - É a densidade do fluido [kg/m³],

$\vec{v}$ - É o vector velocidade [m/s],

t - É o tempo [s].

Para escoamentos incompressíveis (densidade constante), essa equação se simplifica para:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

- Conservação de momento (Navier-Stokes):

Estas equações descrevem o comportamento dinâmico do fluido, considerando as forças actuantes, como pressão, viscosidade e forças externas [33]:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{F} \quad (5)$$

Onde:

p - É a pressão estática [Pa],

μ - É a viscosidade dinâmica [Pa·s],

$\vec{F}$ - Representa forças externas por unidade de volume (gravidade, forças de Lorentz etc.)

Essas equações são aplicadas separadamente para cada componente da velocidade (u, v, w) em um sistema tridimensional.

- Conservação de energia:

A equação da energia descreve a troca de calor por condução, convecção e, em alguns casos, por geração interna de calor [33]:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = (k \nabla^2 T) + \dot{Q} \quad (6)$$

Onde:

c_p - Calor específico à pressão constante (J/kg.K);

T - Temperatura (K);

k - Condutividade térmica (W/m.K);

$\dot{Q}$ - Taxa de geração de calor volumétrico (W/m³).

Nos sistemas de gerenciamento térmico de baterias, $\dot{Q}$ representa o calor gerado pelas reações eletroquímicas e perdas resistivas internas (efeito Joule).

A taxa de geração de calor $\dot{Q}$ pode ser calculada com base na Equação (7) [2]:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (7)$$

O calor total absorvido pelo PCM é calculado a partir da soma do calor sensível Equação (7) e do calor latente Equação (8), onde L_f é o calor latente de fusão e m é a massa do PCM [2].

$$Q_{latente} = m \cdot L_f \quad (8)$$

Daí a partir da soma das Equações (5 e 6):

$$Q_{total} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T + m \cdot L_f \quad (9)$$

O fluxo de calor q é calculado dividindo o calor pela área de contacto entre fluido e as paredes e é dado pela equação:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

3.3. Modelagem dos Sistemas no Software Ansys

A modelagem computacional tem se consolidado como uma ferramenta essencial no desenvolvimento e optimização de sistemas térmicos, especialmente em aplicações que envolvem veículos eléctricos. Entre as diversas abordagens disponíveis, a simulação numérica por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) se destaca pela capacidade de prever com precisão o comportamento térmico e fluido-dinâmico dos sistemas de refrigeração de baterias [41].

Inicialmente, será apresentada a definição da geometria e a escolha dos métodos de malha, buscando um equilíbrio entre precisão e custo computacional. Em seguida, serão discutidos os modelos físicos adoptados, as condições de contorno e as parametrizações necessárias para representar adequadamente o sistema de refrigeração por ar, água e PCM.

Este capítulo abordará a configuração dos métodos de solução e os critérios de convergência estabelecidos para garantir resultados confiáveis e precisos. Por fim, serão descritas as estratégias de pós-processamento e extracção de dados relevantes, como campos de temperatura, distribuição de velocidade e análise da eficiência térmica.

A modelagem criteriosa e a simulação numérica realizadas neste estudo permitem compreender os aspectos críticos do desempenho térmico das baterias em veículos eléctricos, oferecendo subsídios para a tomada de decisões sobre a escolha do método de refrigeração mais eficiente e economicamente viável.

3.3.1. Justificativa da Utilização do Modelo de Energia no *Software Ansys Fluent*

A análise térmica de sistemas de refrigeração de baterias em veículos eléctricos exige o conhecimento detalhado do comportamento da temperatura no domínio simulado. Para tal, é imprescindível a activação do modelo de energia no *software Ansys Fluent*, uma vez que ele permite a resolução da equação de conservação da energia, essencial para simular fenómenos de transferência de calor [42].

O modelo de energia resolve a Equação (5), que representa o balanço térmico de um elemento de fluido ou sólido.

Com esse modelo activado, é possível analisar não apenas a distribuição de temperatura, o fluxo de calor nas paredes, o desempenho do sistema de arrefecimento e o coeficiente de transferência de calor por convecção (h). Este coeficiente é particularmente importante, pois representa a eficiência da troca térmica entre a superfície da bateria e o fluido de arrefecimento. Sua determinação é feita a partir da seguinte expressão:

$$h = \frac{Q}{A*(T_{superfície}-T_{fluido})} \quad (11)$$

Onde:

- Q - É o calor na superfície da bateria (W);
- A - É a área de troca térmica (m^2);
- $T_{superfície}$ - É a temperatura da superfície da bateria (K);
- T_{fluido} - É a temperatura média do fluido próximo à bateria (K).

A aplicação do modelo de energia é essencial para garantir a fidelidade dos resultados simulados e permitir comparações técnicas entre diferentes métodos de arrefecimento utilizados em veículos eléctricos. Ele também possibilita a optimização da geometria do sistema de ventilação e a definição de condições de operação mais eficientes [42].

A inclusão da equação de energia é indispensável em simulações onde os efeitos térmicos têm papel relevante, como no caso da transferência de calor por convecção e condução em problemas acoplados de fluidos e sólidos [43].

4. Critérios de avaliação e modelos de simulação

Neste capítulo, será descrito o processo de modelagem dos sistemas de refrigeração no *software Ansys Fluent*, abordando desde a criação da geometria até a configuração dos parâmetros físicos e numéricos. A utilização de técnicas avançadas de modelagem visa garantir a representatividade dos fenómenos térmicos envolvidos, promovendo uma análise detalhada da eficiência de diferentes métodos de arrefecimento.

4.1. Critério de avaliação

4.1.1. Geometria e Modelagem Computacional de Arrefecimento a Ar

A geometria do sistema de arrefecimento a ar foi desenvolvida directamente no *Ansys Design Modeler*, utilizando uma configuração que representa um conjunto de células cilíndricas organizadas dentro de um canal rectangular. O objectivo dessa estrutura é garantir uma eficiente troca térmica entre as células e o ar de refrigeração que flui através do canal.

A estrutura geométrica é composta pelos seguintes elementos:

- Células Cilíndricas (Figura 7): Representam as baterias individuais (18650) que geram 4W, dispostas de maneira compacta para otimizar o espaço e o arrefecimento.

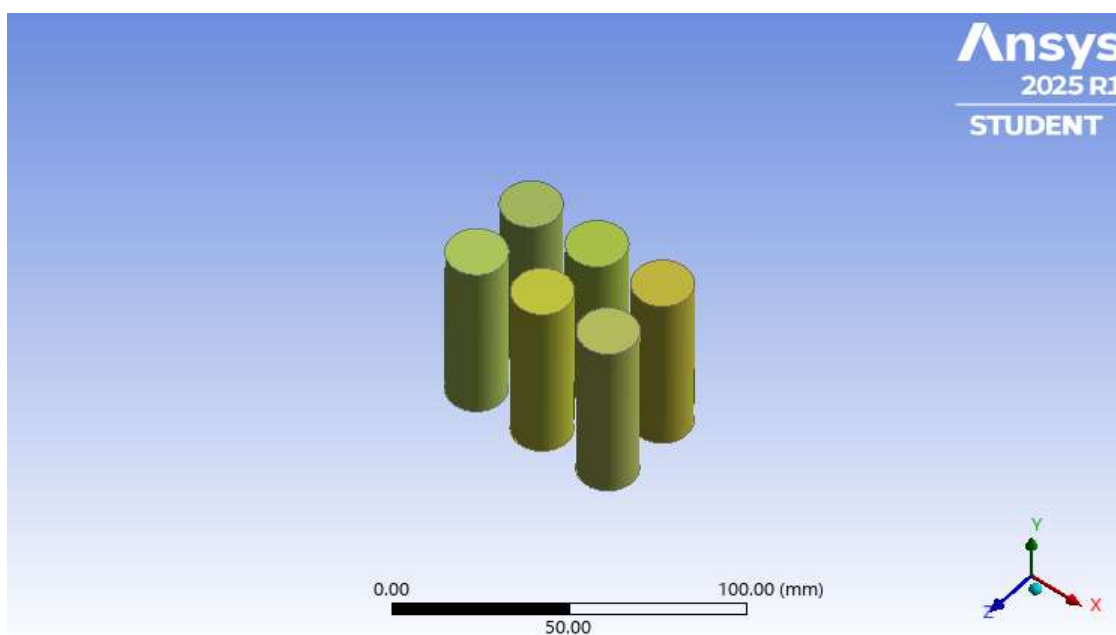


Figura 7 - Células Cilíndricas

- Canal Rectangular (apresentado no Anexo B.1): Actua como ducto de passagem do ar de refrigeração, garantindo fluxo uniforme sobre as células.

4.1.1.1. Especificações Dimensionais

Para a modelagem geométrica foram adoptadas as seguintes dimensões:

- Diâmetro das Células: 18 mm
- Altura das Células: 65 mm
- Número de Células: 6
 - Comprimento: 72 mm
 - Largura: 48 mm
 - Altura: 65 mm
- Dimensões das Entradas/Saídas: 48x65 mm

4.1.1.2. Justificativa da Configuração

A configuração cilíndrica das células facilita o empacotamento eficiente e promove um fluxo de ar otimizado entre as baterias. A disposição compacta maximiza a troca térmica por condução e convecção, garantindo que o calor gerado pelas células seja dissipado rapidamente.

4.1.1.3. Condições de Operação

- Fluido Refrigerante: Ar
- Velocidade do Ar na Entrada: 1 m/s
- Temperatura do Ar na Entrada: 25 °C

4.1.1.4. Pré-processamento:

A fase de pré-processamento é crucial para preparar os dados e o modelo para análises subsequentes, garantindo a precisão e a eficiência dos resultados. Nesta etapa, a geometria do pacote de baterias e do sistema de refrigeração é detalhadamente modelada em 3D.

- Geometria: Modelagem 3D do pacote de baterias e sistemas de refrigeração (Figura 8).

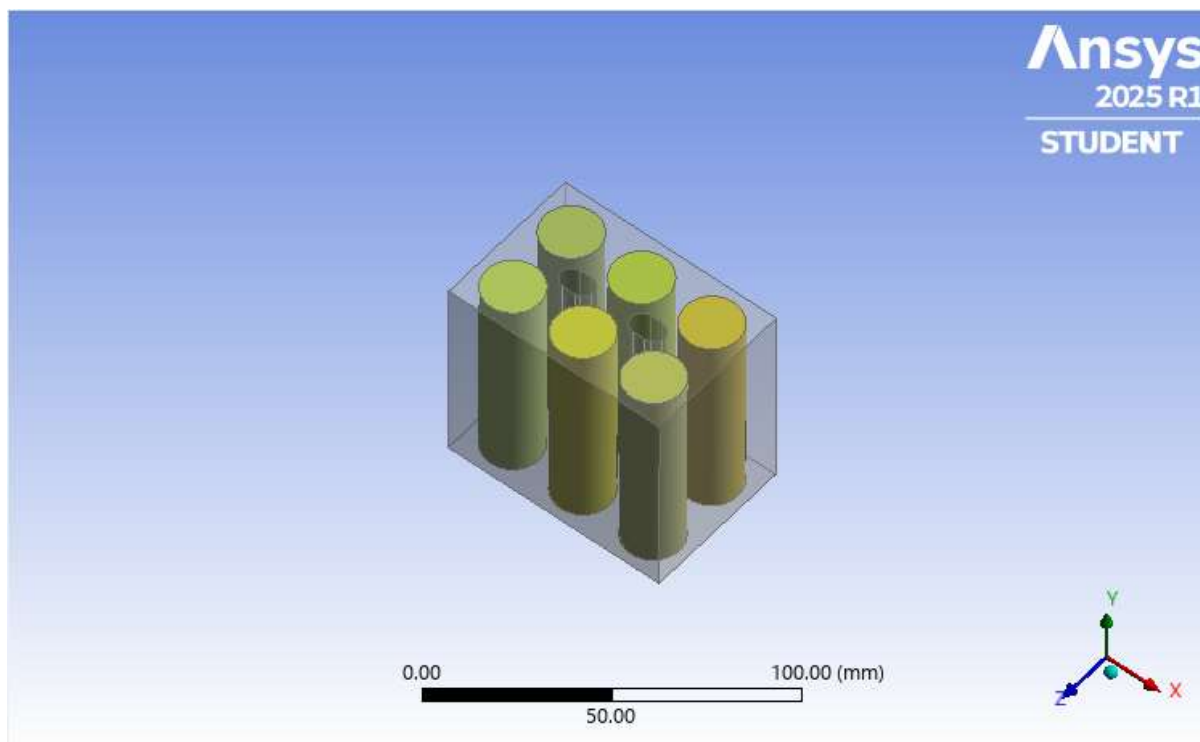


Figura 8 - Geometria do módulo

- Malha computacional: Refinamento em regiões críticas (interfaces célula-fluido) para garantir precisão. Malha não estruturada com elementos tetraédricos como apresentado no Anexo B.1.

Tabela 2: Parâmetros Computacionais

Parâmetro	Valor
Número de células	6
Tamanho das células	18650
Qualidade (Skewness)	0.25

4.1.1.5. Solver e Configurações:

Após a preparação do modelo, a secção de *Solver* e Configurações detalha como o sistema de equações do problema é numericamente resolvido. As taxas de carga e descarga de uma bateria são controladas pelas taxas C (C-Rate) de bateria. A classificação C da bateria é a medição da corrente na qual uma bateria é carregada e descarregada. Aqui, são definidos os parâmetros para que o *solver* do ANSYS possa computar a solução.

- Modelo de turbulência: $k - \epsilon$ para escoamentos turbulentos em ductos de refrigeração.
- Condições de contorno:

- ✓ Velocidade de entrada do ar/líquido: 1 m/s,
- ✓ Temperatura inicial da bateria: 25°C,
- ✓ Taxa de geração de calor: 4 W/célula (simulando descarga a 1C–3C).

4.1.2. Geometria e Modelagem Computacional da Refrigeração Líquida

A refrigeração líquida em sistemas de baterias de veículos eléctricos (Figura 9) é crucial para manter a temperatura ideal e garantir a eficiência. Essa tecnologia utiliza um líquido refrigerante que circula, permitindo um controle térmico eficaz, melhorando a performance e a vida útil das baterias.

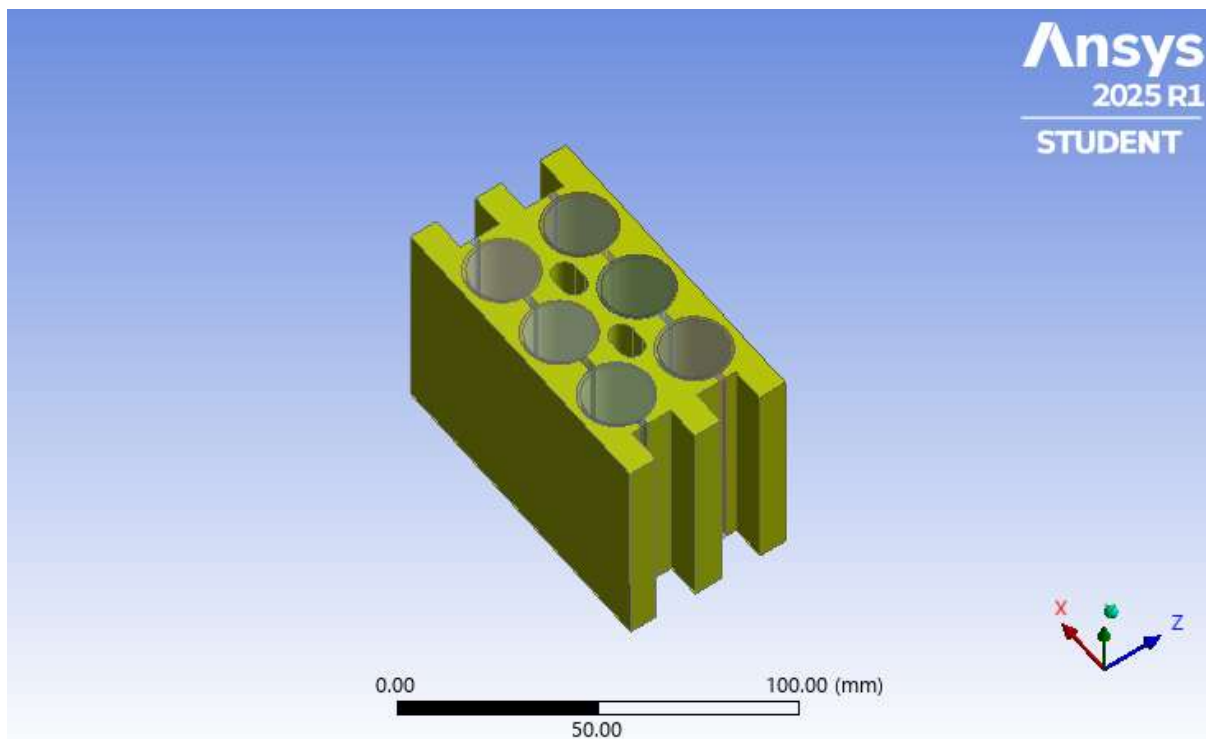


Figura 9 - Canal e célula, Refrigeração Líquida

O sistema de refrigeração líquida envolve a circulação de um fluido refrigerante que absorve o calor gerado pelas baterias durante a operação. Esse calor então é dissipado em um radiador ou trocador de calor [44].

A refrigeração líquida tem se destacado como uma solução eficiente para o gerenciamento térmico de baterias em veículos eléctricos, especialmente quando comparada a métodos passivos ou baseados em convecção de ar. Nesse sistema, um fluido refrigerante é

conduzido através de canais projectados no módulo da bateria, promovendo a remoção activa do calor gerado durante os ciclos de carga e descarga.

Neste trabalho, foi utilizado um canal rectangular apresentado no Anexo A.4 como geometria para condução do fluido refrigerante, com o objectivo de maximizar a área de troca térmica e promover um arrefecimento uniforme. O fluido utilizado foi água pura, à temperatura de entrada de 25 °C e velocidade de 1 m/s, uma escolha justificada por sua alta capacidade calorífica, baixo custo e ampla disponibilidade.

As simulações foram realizadas no *software ANSYS Fluent 2025 R1*, utilizando um modelo tridimensional com malha estruturada. Para resolver o escoamento turbulento no interior dos canais, foi adoptado o modelo de turbulência $k-\epsilon$ (k-epsilon) padrão, amplamente utilizado em aplicações de engenharia devido ao seu bom equilíbrio entre precisão e custo computacional. Esse modelo é eficaz na simulação de escoamentos internos com desenvolvimento completo e fornece uma previsão robusta do campo de velocidades e gradientes térmicos [45].

Os resultados mostraram que o sistema de refrigeração líquida apresentou desempenho satisfatório, mantendo as temperaturas das células em níveis seguros. A temperatura máxima observada foi de aproximadamente 316,6 K, enquanto a mínima foi de 298,4 K, com a região central, mais próxima aos canais, apresentando menores gradientes térmicos.

Tais resultados confirmam a eficiência do sistema de arrefecimento líquido, que promoveu uma distribuição térmica homogénea e evitou a formação de pontos críticos de superaquecimento. Isso está em conformidade com a literatura, que aponta que sistemas de refrigeração líquida são capazes de remover até dez vezes mais calor do que sistemas baseados em ar [46].

A refrigeração líquida, portanto, apresenta-se como uma alternativa promissora para aplicações em veículos eléctricos, especialmente em regiões de clima quente como Moçambique, onde o controlo térmico eficiente é essencial para garantir o desempenho e a segurança dos acumuladores de energia [47].

2.2.1.7. Condições de Contorno

As condições de contorno foram definidas de forma a representar um cenário realista de operação de baterias em veículos eléctricos. A entrada de fluido foi configurada como uma *inlet* (entrada) com velocidade constante de 1 m/s e temperatura uniforme de 25 °C (298,15 K). A saída do canal foi modelada como *outlet* (saída) com pressão relativa nula. As paredes do

canal e das superfícies da bateria foram tratadas como paredes com condição de não deslizamento (no-slip).

A geração de calor (Figura 10) nas células foi simulada como uma fonte térmica volumétrica constante, representando o aquecimento interno típico durante o funcionamento da bateria [48].

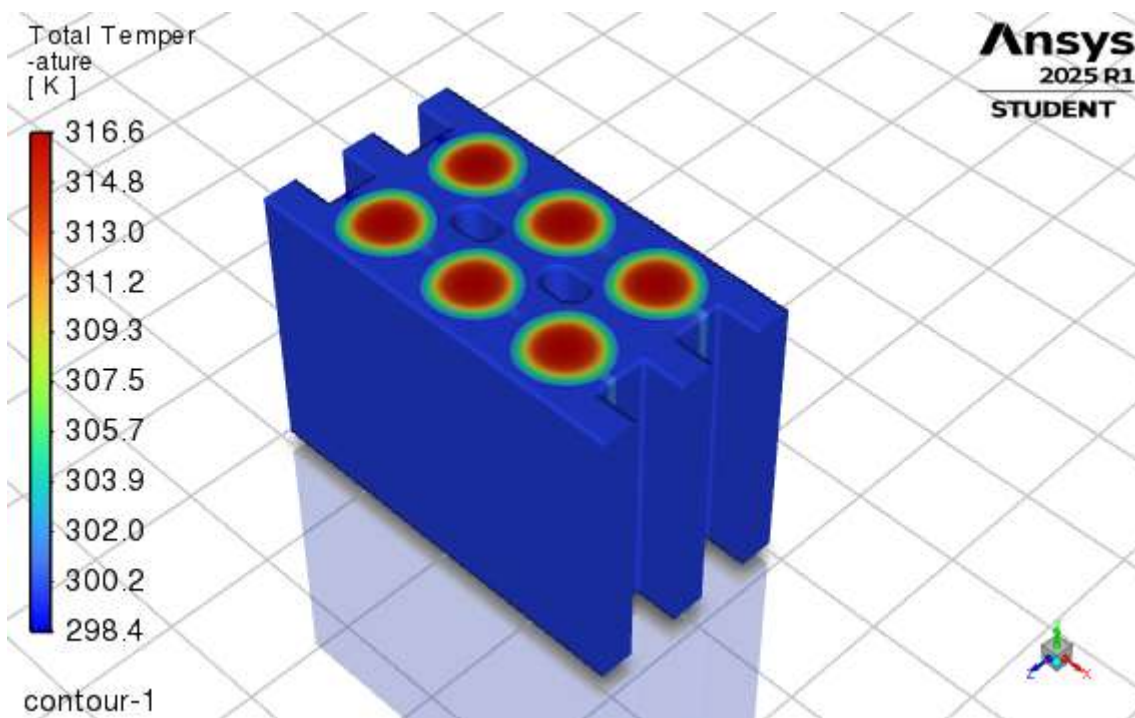


Figura 10 - Distribuição da temperatura refrigeração líquida

A geometria do canal de arrefecimento e das células foi discretizada utilizando uma malha hexaédrica estruturada como está apresentado no Anexo B.2, com refino nas regiões próximas às paredes, a fim de capturar com maior precisão os gradientes térmicos e o desenvolvimento da camada limite.

A malha foi avaliada através do parâmetro *Skewness*, mantendo-se abaixo de 0.25 na maior parte do domínio, o que indica boa qualidade numérica. A dependência da malha foi verificada por meio de um estudo de independência, onde variações inferiores a 1% nos resultados de temperatura média foram observadas entre duas versões refinadas, assegurando a confiabilidade dos dados obtidos [49].

4.1.3. Refrigeração com Materiais com Mudança de Fase (PCM)

A utilização de materiais com mudança de fase (PCM – *Phase Change Materials*) representa uma abordagem inovadora e eficiente na gestão térmica de baterias em veículos eléctricos. Este método aproveita a capacidade dos PCM de absorver e libertar grandes quantidades de calor latente durante as transições de fase (geralmente de sólido para líquido), mantendo a temperatura do sistema relativamente constante durante o processo de fusão ou solidificação.

Durante o funcionamento das baterias, especialmente sob cargas elevadas ou durante ciclos rápidos de carga e descarga, ocorre uma geração significativa de calor. Caso este calor não seja eficientemente dissipado, pode haver degradação dos componentes internos da bateria, redução da sua vida útil e até riscos de segurança. O uso de PCM como meio de controlo térmico permite retardar a elevação da temperatura ao absorver calor durante a fusão, proporcionando um arrefecimento passivo altamente eficiente [50].

Além da sua elevada capacidade térmica, os PCM podem ser integrados directamente ao encapsulamento das baterias ou inseridos em estruturas especiais, como cápsulas ou microcanais com interface térmica. Na simulação realizada, foi utilizado um PCM com temperatura de fusão próxima à temperatura operacional ideal da bateria (entre 305 K e 315 K), permitindo uma absorção eficaz do calor gerado durante o ciclo de operação [50].

O modelo implementado no *software Ansys Fluent* utilizou o método *enthalpy-porosity*, disponível no módulo *Solidification/Melting*, o qual considera a zona de transição de fase como uma região porosa visualizar Anexo B.3. A porosidade é directamente proporcional à fracção de líquido, esse modelo permite uma simulação realista da interacção térmica entre a bateria e o PCM durante os processos de fusão e solidificação [51].

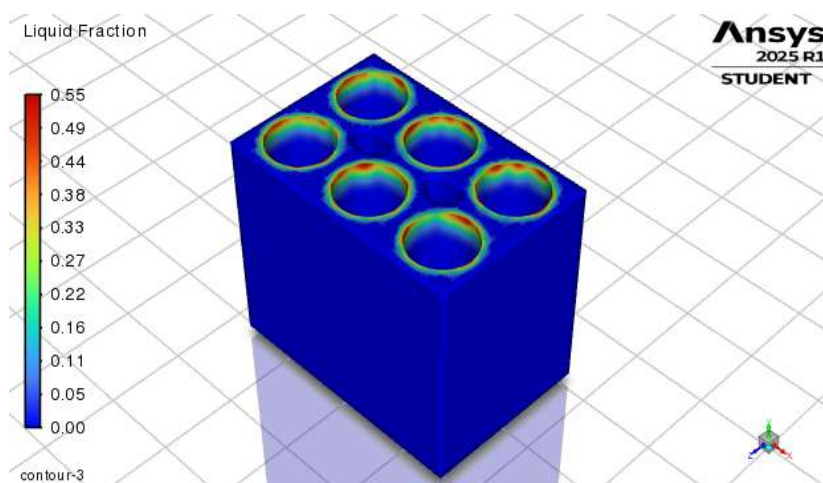


Figura 11 - Fracção líquida o PCM

Comparando com os métodos anteriores, refrigeração a ar e líquida, a técnica com PCM demonstrou maior estabilidade térmica, reduzindo os picos de temperatura como se apresenta na Figura 12 sem a necessidade de fluxo contínuo de fluido, o que representa vantagens em termos de simplicidade de projecto e consumo de energia. Contudo, destaca-se que a eficiência do PCM depende directamente da sua condutividade térmica, que geralmente é baixa. Por isso, em aplicações práticas, costuma-se utilizar aditivos como grafite expandido ou estruturas metálicas para melhorar a condutividade e garantir uma resposta térmica mais rápida [52].

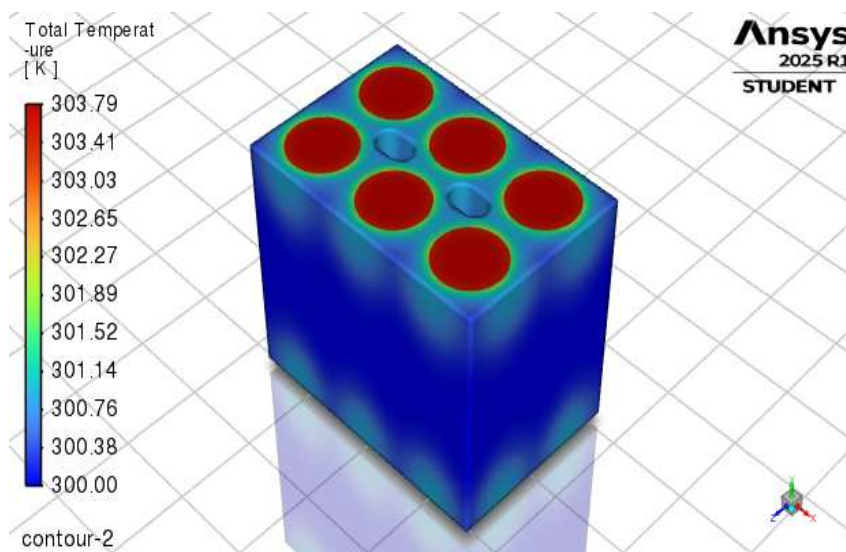


Figura 12 - Distribuição da temperatura PCM

5. Análise dos resultados

5.1. Análise Comparativa dos Métodos de Refrigeração

A primeira simulação CFD foi realizada considerando um sistema de arrefecimento por ar forçado em torno de uma bateria prismática, com canal rectangular e fluxo em regime transiente. O fluido de trabalho utilizado foi o ar atmosférico, modelado como incompressível e com propriedades térmicas constantes, o segundo foi arrefecimento a água e por último arrefecimento com PCM.

A convergência das simulações foi verificada com base nos resíduos numéricos. Os gráficos correspondentes estão apresentados no Anexo C. Observa-se que os resíduos das equações de momentum, energia e continuidade decresceram de forma estável até valores inferiores a 10^{-4} indicando boa convergência da solução.

Os principais resultados obtidos foram:

Tabela 3: Resultados

Parâmetro	Arrefecimento a Ar	Arrefecimento a Água	Arrefecimento com PCM
Temperatura de entrada do fluido (K)	298	298	N/A
Temperatura de saída do fluido (K)	300	302	N/A
Temperatura média das células (K)	330	306	313
Temperatura máxima das células (K)	333	310	318
Vazão mássica (kg/s)	0.000119	0.001435	N/A
Calor específico do fluido (J/kg.K)	1005	4182	2200
ΔT do fluido (K)	2	4	N/A
Calor gerado (W)	24	24	24
Calor removido (W)	0.24	24	18
Fluxo de calor total nas paredes (W/m^2)	70.7	7692.3	257.1
Coeficiente de transferência de calor ($W/m^2.K$)	2.02	1020	100

- Área superficial da bateria (A): 0.00312 m²

A partir da fórmula de convecção (5), foi possível determinar o valor do coeficiente de transferência de calor, que representa a capacidade do sistema de remover calor da bateria.

Esse valor indica uma transferência de calor relativamente moderada, característica do ar como fluido de arrefecimento. Embora o ar tenha vantagens como custo reduzido, segurança e facilidade de implementação, seu baixo coeficiente de transferência limita a eficiência do sistema, especialmente em condições de alta carga térmica.

A comparação entre os métodos de refrigeração a ar, líquido e PCM, revela diferenças significativas em termos de desempenho térmico, consumo energético e complexidade do sistema.

A refrigeração a ar destaca-se pela sua simplicidade e baixo custo de implementação. No entanto, devido à baixa capacidade térmica específica do ar e à sua reduzida condutividade térmica, este método apresenta a maior elevação de temperatura na bateria como mostrado no anexo B.4, resultando em picos térmicos que podem comprometer a segurança e o desempenho do sistema [48]. A estabilidade térmica é também a mais limitada, com uma variação significativa de temperatura ao longo do tempo e da geometria.

A refrigeração líquida, utilizando água pura a 25 °C e velocidade de 1 m/s, mostrou-se muito mais eficiente na remoção de calor. A água, com sua alta capacidade térmica, proporciona maior controlo da temperatura, com menores picos e melhor uniformidade térmica. No entanto, este método requer componentes adicionais como bombas, tubulações e dissipadores, aumentando a complexidade do sistema e o consumo energético [49].

A terceira abordagem, com materiais com mudança de fase (PCM), representa um meio termo interessante. Embora opere de forma passiva, sem necessidade de fluxo de fluido ou componentes activos, o PCM absorve calor latente durante sua fusão, mantendo a temperatura quase constante durante longos períodos. Isso garante excelente estabilidade térmica, mesmo sem movimentação de fluido. No entanto, o desempenho pode ser limitado pela baixa condutividade térmica dos PCM, exigindo soluções híbridas ou aditivos para maximizar a eficiência [53].

De acordo com os dados simulados, verificou-se que a refrigeração líquida e com PCM apresentem desempenho superior ao sistema com ar, sendo que a escolha entre elas dependerá dos objectivos do projecto: desempenho térmico máximo (líquido) ou simplicidade e economia energética (PCM).

5.2. Eficiência Térmica e Consumo de Energia

A eficiência térmica de um sistema de refrigeração de baterias está directamente relacionada à sua capacidade de manter as células dentro da faixa ideal de temperatura de operação, minimizando os gradientes térmicos e evitando o superaquecimento [6]. Esta secção analisa a eficiência térmica dos três métodos de refrigeração simulados: ar forçado, refrigeração líquida e refrigeração com material de mudança de fase (PCM), com base nos resultados obtidos nas simulações numéricas e usando a equação (12):

$$\eta = \frac{q_{\text{removido}}}{q_{\text{gerado}}} \quad (12)$$

Onde:

η - Eficiência térmica do sistema de refrigeração (adimensional).

q_{removido} - Taxa de calor removida pelo sistema de refrigeração (em watts, W).

q_{gerado} - Taxa de calor gerada pelas próprias baterias devido a resistências internas e reacções electroquímicas (em watts, W).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3, a eficiência da remoção de calor calculada usando a Equação 6 é de 1% para o sistema de refrigeração a ar.

No sistema de refrigeração a ar Figura 17, observou-se que, embora a simplicidade do projecto e a leveza do sistema sejam vantagens consideráveis, a capacidade de remoção de calor é limitada devido à baixa capacidade térmica do ar. Como consequência, as baterias operam em temperaturas ligeiramente mais elevadas, especialmente em regimes de maior carga térmica, o que pode comprometer sua vida útil a longo prazo.

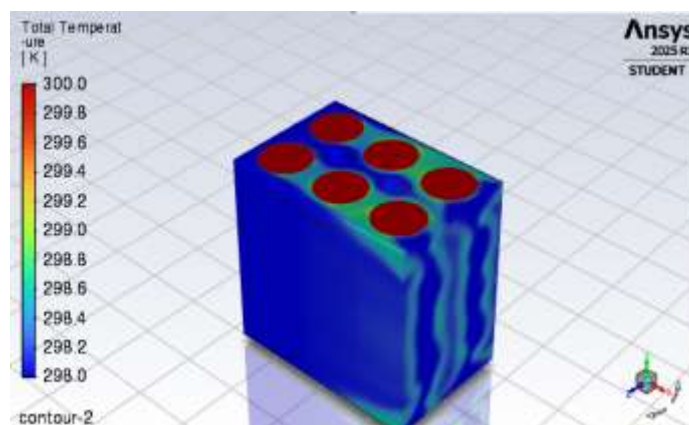


Figura 13 - Arrefecimento a Ar

O consumo de energia associado ao ventilador, embora baixo, não compensa o desempenho térmico inferior quando comparado aos demais métodos. Por outro lado, o sistema de refrigeração líquida Figura 18, demonstrou desempenho térmico significativamente superior com eficiência de 100%, mantendo as temperaturas das células mais próximas da faixa ideal de operação, graças à maior condutividade térmica e capacidade calorífica da água. No entanto, este método implica um consumo energético adicional associado ao bombeamento do fluido refrigerante, além de exigir maior complexidade de projecto e manutenção.

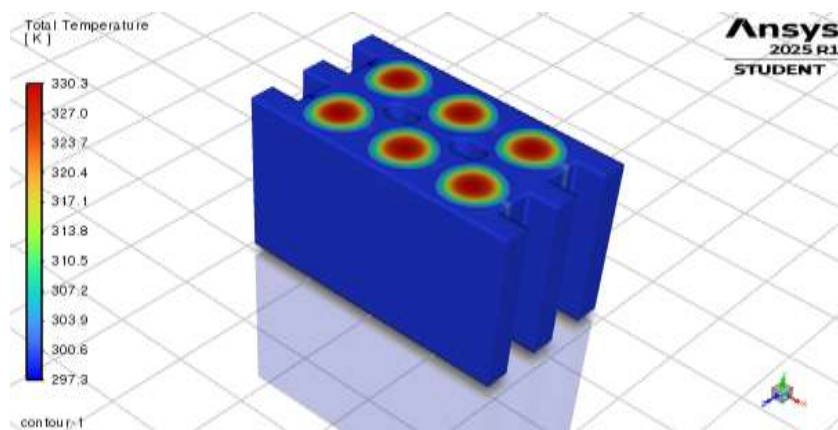


Figura 14 - Refrigeração a Água

A eficiência térmica, neste caso, é favorecida principalmente em aplicações de alta exigência térmica, como veículos eléctricos operando em condições severas. O método de refrigeração com PCM apresentou comportamento térmico estável durante os ciclos de carga e descarga simulados, devido à capacidade do material de absorver grandes quantidades de calor latente durante a fusão apresentando uma eficiência de 75%. Este método mostrou-se eficaz na atenuação de picos térmicos, sem a necessidade de dispositivos mecânicos adicionais para circulação do fluido, o que representa uma vantagem em termos de consumo energético.

Contudo, uma limitação observada foi a saturação do PCM após um determinado tempo de operação, reduzindo sua eficácia até que o material volte ao estado sólido.

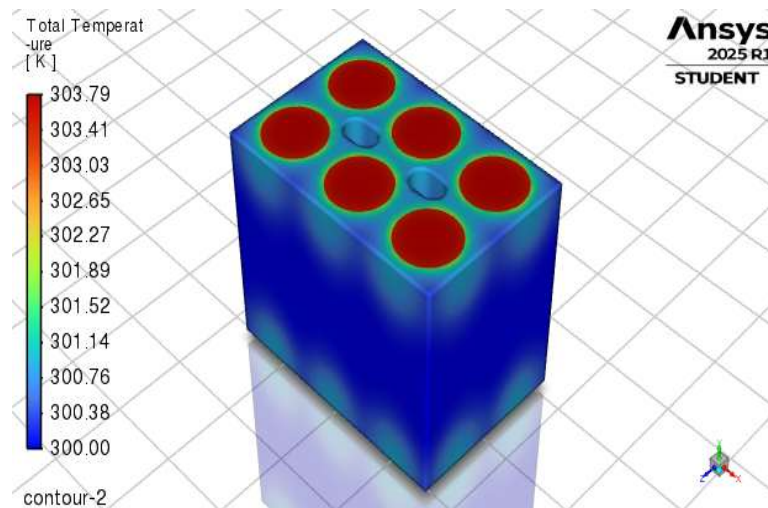


Figura 15 - Refrigeração a PCM

De forma geral, a análise comparativa entre os métodos de refrigeração evidencia que há um *trade-of* entre desempenho térmico e consumo energético Gráficos (2 e 3). O sistema líquido oferece a melhor eficiência térmica, mas ao custo de maior consumo de energia. O sistema com PCM se destaca por sua eficiência passiva, sendo ideal para aplicações intermitentes ou de curta duração, enquanto o sistema por ar representa uma solução mais simples e leve, porém menos eficaz termicamente [54].

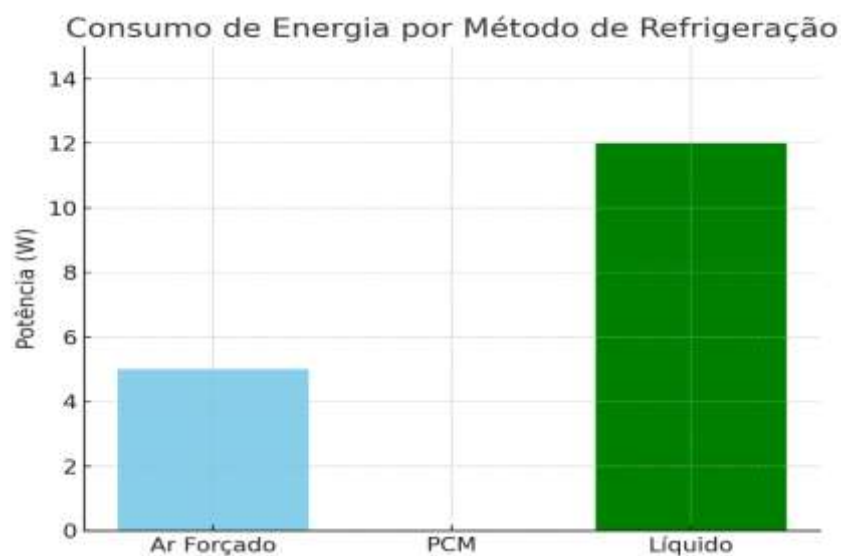


Gráfico 2: Consumo de Energia por Método de Refrigeração

O Gráfico 2 apresenta o consumo de energia dos diferentes métodos de refrigeração analisados. Observa-se que o sistema de refrigeração líquida apresenta o maior consumo

energético devido a potência necessária para bombear o fluido, enquanto o ar forçado apresenta consumo intermediário, e o PCM, por não necessitar de dispositivos activos de circulação, praticamente não consome energia durante a operação.

Esses resultados indicam que, embora métodos activos possam oferecer melhor desempenho térmico, seu custo energético deve ser ponderado na escolha do sistema, especialmente em aplicações automotivas onde a eficiência global é determinante.

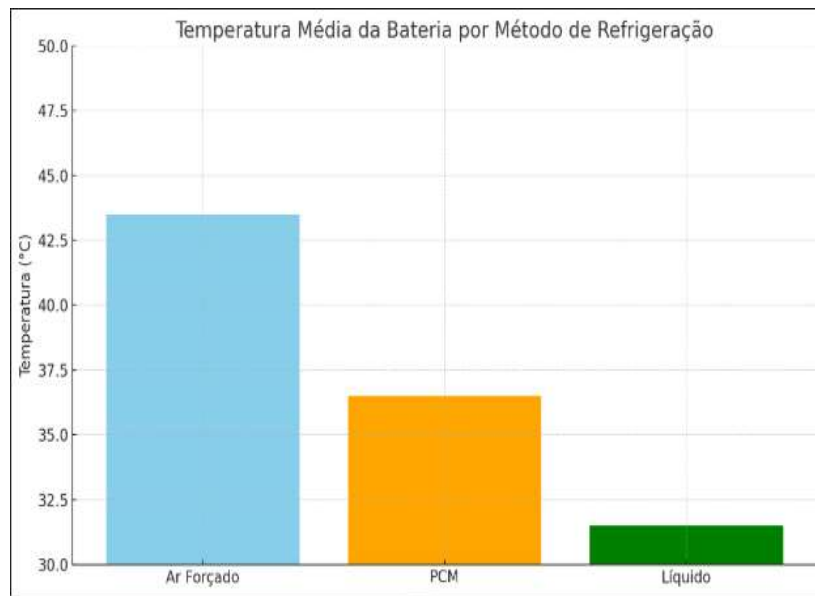


Gráfico 3: Temperatura Média da Bateria por Método de Refrigeração

O Gráfico 3 apresenta a temperatura média da bateria obtida por cada método de refrigeração. Observa-se que o sistema de refrigeração líquida apresentou o menor valor médio ($\approx 29^{\circ}\text{C}$), indicando elevada eficiência na remoção de calor. O sistema com PCM manteve a temperatura em torno de 35°C , desempenho intermediário, enquanto o ar forçado resultou na maior temperatura média ($\approx 43^{\circ}\text{C}$), o que pode comprometer a eficiência e a vida útil das células.

Esses resultados evidenciam que, embora o ar forçado seja mais simples e de consumo energético intermédio, o seu desempenho térmico é inferior ao dos outros métodos.

6. Conclusões e Recomendações

6.1. Conclusões

Através da modelação e simulação de sistemas de refrigeração de baterias em veículos eléctricos utilizando o CFD no *Ansys*, foi possível avaliar de forma detalhada a eficiência térmica de diferentes configurações e compreender o seu impacto no desempenho global do sistema.

A modelação de múltiplas arquitecturas de refrigeração, incluindo soluções por líquido, ar forçado e materiais de mudança de fase (PCM), permitiu identificar as vantagens e limitações de cada método em termos de uniformidade térmica, capacidade de dissipação de calor e complexidade construtiva. Os resultados obtidos mostram que sistemas de refrigeração líquida, quando correctamente dimensionados, apresentam maior eficiência na remoção de calor e melhor controle da variação de temperatura entre as células da bateria, comparativamente a soluções de refrigeração por ar e PCM.

A análise dos efeitos da temperatura evidenciou que a operação das baterias fora da faixa térmica ideal compromete significativamente a eficiência energética e acelera processos de degradação, reduzindo a vida útil do sistema. Observou-se que manter temperaturas uniformes e dentro dos limites recomendados pelo fabricante é essencial para preservar a capacidade e a segurança do *pack* de baterias.

Foram identificados e comparados os principais métodos de refrigeração utilizados na indústria automotiva, confirmando que as tendências actuais apontam para o uso de sistemas híbridos e soluções integradas com o HVAC do veículo, de forma a otimizar a gestão térmica tanto em condições normais como durante carregamentos rápidos.

A comparação dos resultados obtidos, em termos de distribuição de temperatura e eficiência térmica, demonstrou que a escolha do sistema de refrigeração deve considerar não apenas a capacidade de remoção de calor, mas também factores como consumo energético, peso adicional, custo de implementação e facilidade de manutenção. As simulações CFD mostraram-se uma ferramenta fundamental para antecipar o comportamento térmico, reduzir custos de prototipagem e apoiar a tomada de decisão no desenvolvimento de sistemas de gestão térmica para veículos eléctricos.

Com base nesses resultados, conclui-se que o sistema de refrigeração líquida é o mais adequado para aplicações que exigem maior controlo térmico e estabilidade operacional, especialmente em climas quentes como o de Moçambique. O uso de PCM, por sua vez, pode

ser considerado como uma solução complementar ou alternativa para cenários de menor exigência térmica ou onde a simplicidade de construção seja desejável.

6.2. Recomendações

Trabalhos futuros devem investir em modelações que acoplem os fenómenos eléctricos, térmicos e mecânicos num modelo multiphysics detalhado, considerando o calor gerado por efeitos de Joule, reacções electroquímicas e envelhecimento das células, assim como a condução, convecção e radiação no conjunto. É relevante incluir a influência da compressão mecânica nos contactos térmicos e a variação das propriedades devido ao envelhecimento. Simulações 3D com conjugate heat transfer e propriedades anisotrópicas, associadas a modelos porosos para canais micro-estruturados, podem fornecer previsões mais realistas e apoiar decisões de projecto.

Futuros estudos podem explorar e comparar diferentes arquitecturas de gestão térmica para baterias, como refrigeração líquida directa ou indirecta, ventilação forçada por ar, sistemas de refrigeração dieléctrica e soluções híbridas com materiais de mudança de fase (PCM) combinados com heat pipes ou vapor chambers. Cada configuração deve ser optimizada para reduzir a variação de temperatura entre células, minimizar perdas de carga e manter o consumo energético auxiliar em níveis baixos. A integração com sistemas HVAC para pré-condicionamento e suporte a carregamentos rápidos é uma área promissora para reduzir o impacto térmico em cenários extremos.

Recomenda-se a aplicação de métodos de optimização multiobjectivo, como algoritmos genéticos (NSGA-II), *Bayesian optimization e machine learning*, é promissora para encontrar soluções equilibradas entre temperatura máxima, uniformidade térmica, queda de pressão, massa e custo. Modelos substitutos (surrogates) baseados em *design of experiments e machine learning* podem acelerar a avaliação de cenários. Além disso, estratégias de controlo preditivo como MPC (Model Predictive Control) e aprendizagem por reforço (RL) permitem ajustar dinamicamente os sistemas a diferentes perfis de condução e carregamento, garantindo eficiência e segurança.

Trabalhos futuros devem considerar condições de operação críticas, como carregamentos rápidos em taxas de 2C a 4C, climas quentes e poeirentos, e perfis de condução que combinam acelerações fortes e tráfego intermitente. Nesses casos, é importante testar soluções que mantenham a temperatura dentro de limites seguros, minimizando ao mesmo tempo o impacto no consumo de energia. Ensaaios de “pior caso” podem servir como referência

para definir margens de segurança térmica e avaliar o desempenho de diferentes estratégias de refrigeração.

Outra linha de investigação promissora envolve o estudo de materiais de interface térmica (TIMs) e a sua influência no desempenho do sistema de refrigeração. Comparações entre pastas térmicas, almofadas grafitadas e materiais de mudança de fase encapsulados devem considerar propriedades como condutividade térmica, estabilidade a ciclos repetidos e resistência à degradação. Ensaio de compatibilidade química e mecânica com líquidos refrigerantes e nanofluidos também são importantes para garantir durabilidade e desempenho a longo prazo.

Investigações futuras devem abordar a prevenção e mitigação da *thermal runaway*, um fenómeno crítico que pode levar à falha catastrófica das baterias. Estratégias como barreiras térmicas, sistemas de ventilação direccionada, sensores de detecção precoce e algoritmos de monitorização de gases ou pressão são áreas-chave. Ensaio controlados, que induzam falhas em células “de sacrifício”, podem ajudar a avaliar a eficácia das medidas de contenção e a desenvolver protocolos de segurança mais robustos.

Para que as simulações sejam confiáveis, é essencial validar os resultados com dados experimentais obtidos em bancadas de teste específicas para módulos de baterias. Estas bancadas devem permitir a medição precisa de temperaturas, fluxos térmicos, pressões e caudais, utilizando sensores calibrados e câmaras térmicas. Ensaio com diferentes perfis de carga e descarga, replicando condições reais de operação, ajudam a verificar a correlação entre modelos numéricos e comportamento físico, garantindo maior confiança nas previsões.

A investigação futura pode também focar-se na integração do sistema de gestão térmica com os restantes subsistemas do veículo, incluindo o sistema de tracção e o de climatização. A utilização de co-simulações que considerem todo o ciclo de energia do veículo permitirá otimizar o consumo energético global e avaliar o impacto da gestão térmica na autonomia e no conforto dos ocupantes. Avaliações do custo total de operação e da pegada ambiental, ao longo do ciclo de vida, podem apoiar decisões de engenharia e *marketing*.

7. Referências Bibliográficas

- [1] C. V. a. B. Scrosati, “Modern Batteries,” Elsevier, 1997.
- [2] X. C, W. S, T. V. T e Z. C, An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles, IPEC, 2012, p. 230–235.
- [3] B. G. J e K. Y, “Challenges for rechargeable Li batteries,” em *Chemistry of Materials*, vol. 22, 2010, pp. 587-603.
- [4] G. E. O. 2. International Energy Agency, “Beyond one million electric cars,” em *Clear Energy Ministerial*, 2016.
- [5] B. McKinsey & Company, “An Integrated Perspective on the Future of Mobility,” 2016.
- [6] M. B. T, G. S e F. . F. T, “A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries,” *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 158, nº 3, pp. 1-25, 2011.
- [7] A. A. Pesaran, “Battery thermal models for hybrid vehicle simulations,” *Journal of Power Sources*, vol. 110, nº 2, p. 377–382, Agosto 2002.
- [8] D. C e O. . B. J, “Handbook of Battery Materials,” Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2011.
- [9] J. R. V. FOGAÇA, “Brasil Escola,” Pilhas e baterias secundárias, [Online]. Available: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/pilhas-baterias-secundarias.htm..> [Acedido em 8 May 2025].
- [10] A. H. M, M. H. M, M. A e A. A, “Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, p. 771–789, Mar 2017.
- [11] “Battery University,” Cadex Electronics, 21 Oct 2021. [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>. [Acedido em 15 May 2025].
- [12] S. B e G. J, “Lithium batteries: Status, prospects and future,” *Journal of Power Sources*, vol. 195, nº 9, p. 2419–2430, May 2010.
- [13] D. S, “Electric Vehicle Battery Systems,” Newnes, Burlington, MA, EUA, 2001.
- [14] Standvirtual, “Diário Automoveis,” Standvirtual, 11 Set 2023. [Online]. Available: <https://www.standvirtual.com>. [Acedido em 08 May 2025].
- [15] B. G. J e S. P. K, “The Li-ion rechargeable battery,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 135, nº 4, p. 1167–1176, Jan 2013.
- [16] A.-E. Vehicles, “U.S. Department of Energy,” Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2021. [Online]. Available: <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric.html>.
- [17] A. D, “Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs,” Artech House, Boston, 2010.
- [18] G. E. O. 2. International Energy Agency, “International Energy Agency,” Global EV Outlook 2023, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. [Acedido em 23 04 2025].
- [19] M. G. T, “Battery energy storage system for vehicle-to-grid applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 514, 2021.

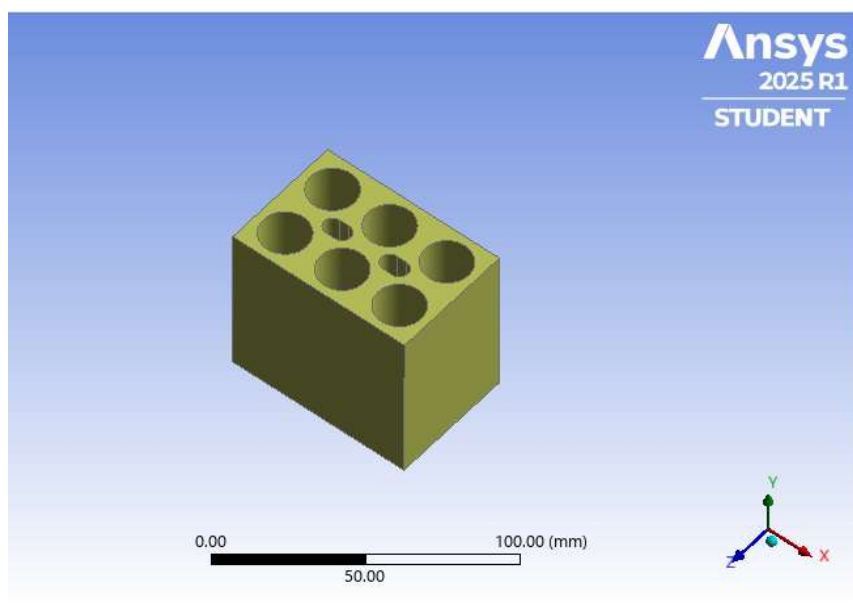
- [20] A. H. M, M. H. M, H. A, Y. Y e J. K. P, “State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications,” vol. 68, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, pp. 11504-11530.
- [21] J. V. e. al, “Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 147, nº 1–2, p. 269–281, 2005.
- [22] L. D e B. R. T, “Linden's Handbook of Batteries,” em *Handbook of Batteries*, 4th ed., New York, McGraw-Hill, 2010.
- [23] A. P. A, “Battery thermal models for hybrid vehicle simulations,” *Journal of Power Sources*, vol. 110, nº 2, pp. 377-382, 2001.
- [24] Z. G, X. S, W. Y e Z. X, “Thermal management of lithium-ion batteries with different cooling strategies,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, nº 1-2, pp. 281-291, 2014.
- [25] B. G. J e K. Y, “Challenges for rechargeable Li batteries,” em *Chemistry of Materials*, vol. 22, 2010, pp. 587-603.
- [26] Electropaedia, “Lithium Battery Failures,” Electropaedia, 2017. [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/chemistries.htm>. [Acedido em 09 04 2025].
- [27] J. J, B. L e D. Y, “A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures,” em *Applied Energy*, vol. 164, 2016, pp. 99-114.
- [28] R. Matthe, L. Turner e H. Mettlach, “VOLTEC Battery System for Electric Vehicle with Extended Range,” *SAE International Journal of Engines*, vol. 4, nº 1, pp. 1944-1962, 2011.
- [29] L. Guangming, O. Minggao , . L. Languang, L. Jianqiu e H. Xuebing , “Analysis of the heat generation of lithium-ion battery,” *Thermal Analysis and Calorimetry*, p. 1002, May 2014.
- [30] A. A. Pesaran, “Battery thermal models for hybrid vehicle simulations,” *Journal of power sources*, vol. 110, nº 2, p. 377–382, 2002.
- [31] Z. R, G. J, L. J e Z. Y, “A review of thermal performance improving methods of lithium-ion battery: Electrode modification and thermal management system,” em *Energy Storage Materials*, vol. 34, 2021, pp. 101-123.
- [32] S. M e M. M, “Thermal modeling of lithium-ion batteries for electric vehicle applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 268, pp. 322-335, 2014.
- [33] N. T. C, “Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos a bateria,” Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [34] C. C e L. J, “Testing and modelling of a variable speed scroll compressor,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 469-478, 2009.
- [35] M. Viegas, Gerenciamento de energia utilizando recozimento simulado em um sistema de potência com veículos elétricos, Belém: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.
- [36] Z. L. e. al, “A Compact Hybrid Battery Thermal Management System for Enhanced Cooling,” 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2412.00999>. [Acedido em 29 04 2025].
- [37] Y. W. e. al, “Optimal battery thermal management for electric vehicles with battery degradation minimization,” 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2308.03056>. [Acedido em 29 04 2025].

- [38] K. Y, “Supervised-learning-based Optimal Thermal Management in an Electric Vehicle,” 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1912.11200>. [Acedido em 30 04 2025].
- [39] S. J, “Artificial Intelligence for Battery Thermal Management,” em *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, 2022, pp. 1245-1258.
- [40] D. A. J. J, “Governing Equations of Fluid Dynamics,” Auburn University, 24 Oct 2012. [Online]. Available: <https://eng.auburn.edu/~tplacek/courses/fluidsreview-1.pdf>. [Acedido em 07 05 2025].
- [41] M. Carello et al, “CFD Simulation and Modelling of a Battery Thermal Management System: Comparison between Indirect and Immersion Cooling,” 2023. [Online]. [Acedido em 08 May 2025].
- [42] ANSYS Inc., “ANSYS Fluent Theory Guide,” , , Release 2023 R1, , USA, ., Canonsburg, PA, 2023.
- [43] K. V. H e M. W, “The Finite Volume Method,” em *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed., P. Education, Ed., Harlow, 2007.
- [44] “Thermal management for lithium-ion battery pack with liquid cooling,” em *Energy Reports*, vol. 6, 2020, p. 125–133.
- [45] E. L. B e B. S. D, “The numerical computation of turbulent flows,” em *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, 1974, p. 269–289.
- [46] L. X, H. J e W. Z, “Thermal performance of liquid cooling for battery thermal management with mini-channel cold plate,” em *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, 2019, p. 184–192.
- [47] J. S, L. . P. N e K. M. S, “Thermal management strategies for electric vehicle battery systems,” *Journal of Energy Storage*, vol. 33, nº 102087, 2021.
- [48] H. K. J e H. C. Y, “Thermal analysis of air-cooled battery system for electric vehicle,” em *Applied Thermal Engineering*, vol. 178, 2020, p. 115570.
- [49] R. S. M e A. A. A, “Comparative analysis of air and liquid battery cooling for EVs,” em *Energy Conversion and Management*, vol. 240, 2021.
- [50] F. S, A. S. S, H. M e S. A, “A review on the application of phase change materials in battery thermal management systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111468, 2021.
- [51] ANSYS Inc, “ANSYS Fluent Theory Guide,” 2025 R1, Canonsburg, PA, 2025.
- [52] K. M, A. M e D. I, “Thermal management of Li-ion battery pack with phase change material for electric vehicles,” *International Journal of Energy Research*, vol. 47, nº 5, p. 1694–1708, 2023.
- [53] F. S, E. N. H e U. B, “A review on the application of phase change materials in battery thermal management systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 150, 2021.
- [54] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza e H. Mehling, “Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, nº 3, pp. 251-283, 2003.

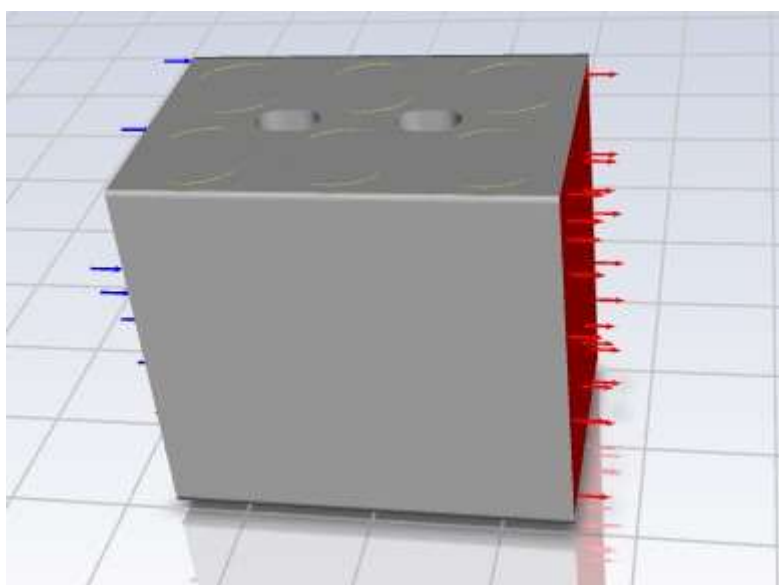
ANEXOS

ANEXO A

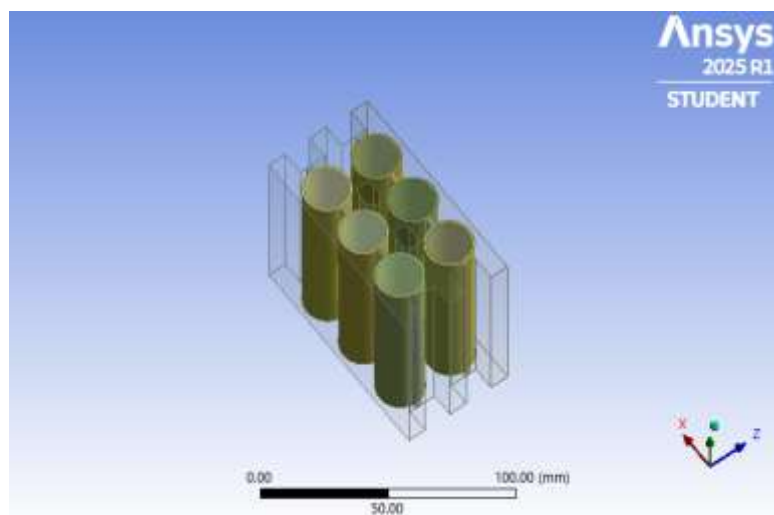
Geometrias Utilizadas nas Simulações



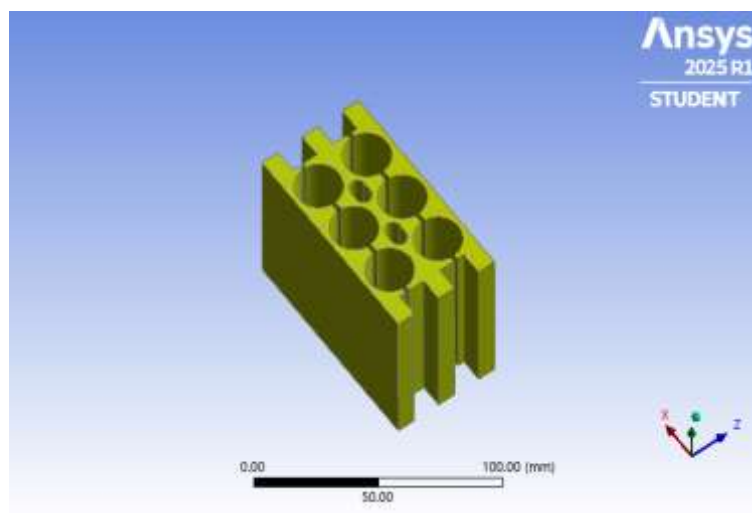
Anexo A.1 – Geometria do sistema de refrigeração a Ar (Adaptado pelo Autor)



Anexo A.2 – Canal rectangular do sistema de refrigeração a ar



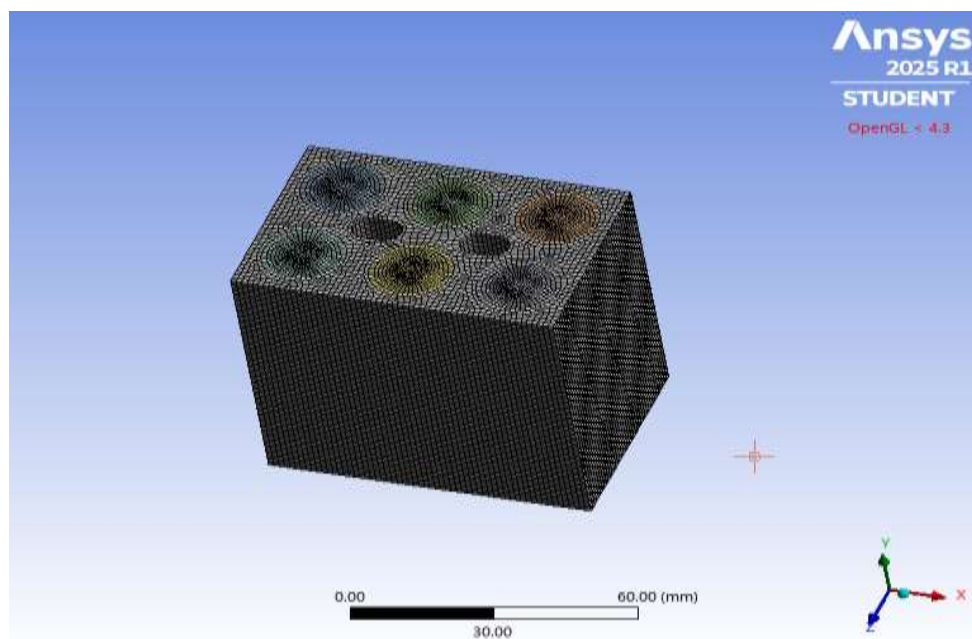
Anexo A.3 – Canal com *casing* das células



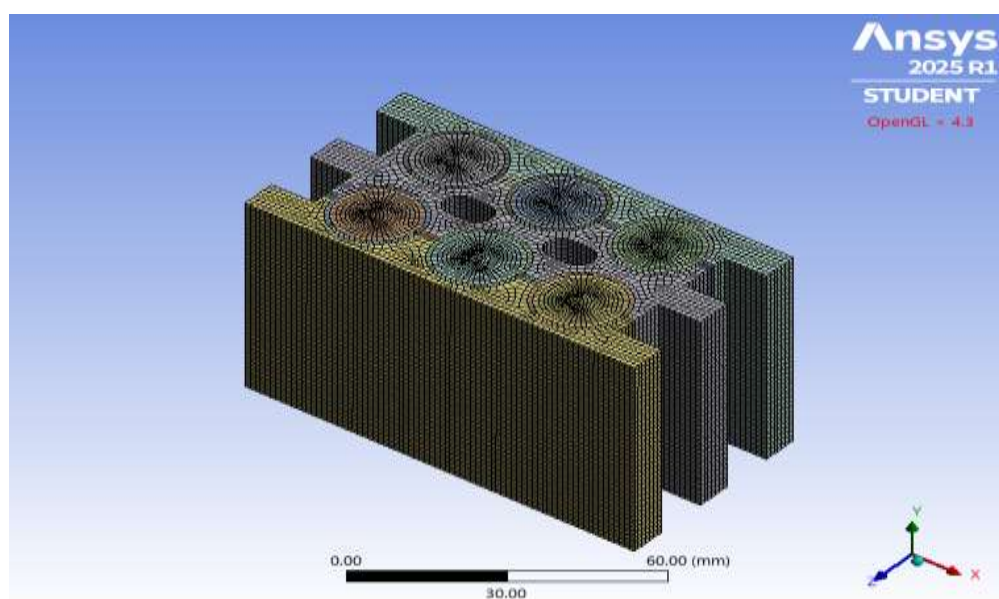
Anexo A.4 - Canal rectangular por onde passa o fluído (água)

ANEXO B

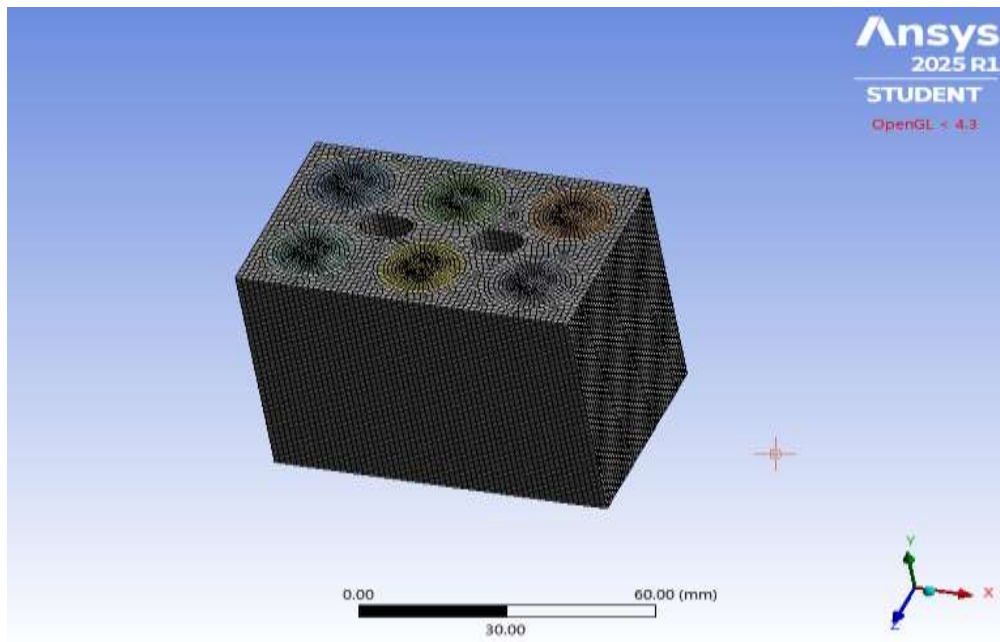
Malha Gerada no *Software Ansys Fluent*



Anexo B.1 - Malha Computacional



Anexo B.2 - Malha hexaédrica estruturada



Anexo B.3 - Malha Computacional PCM

ANEXO C

GRÁFICOS DE CONVERGÊNCIA

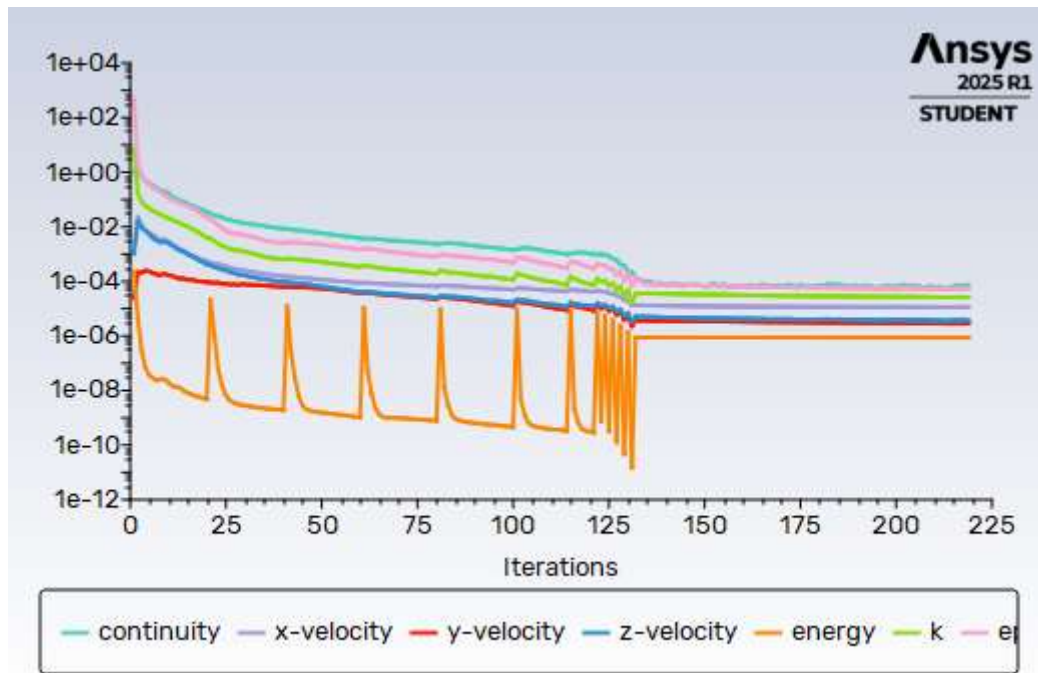


Figura C.1 – Resíduos para o escoamento a Ar

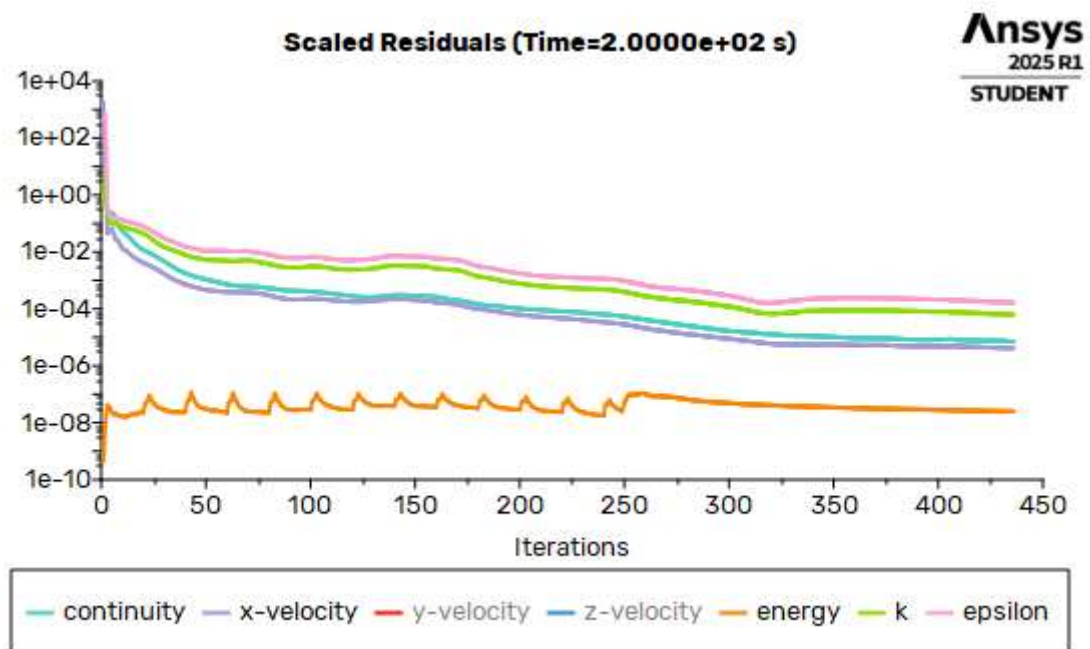


Figura C.2 – Resíduos para o escoamento a Água

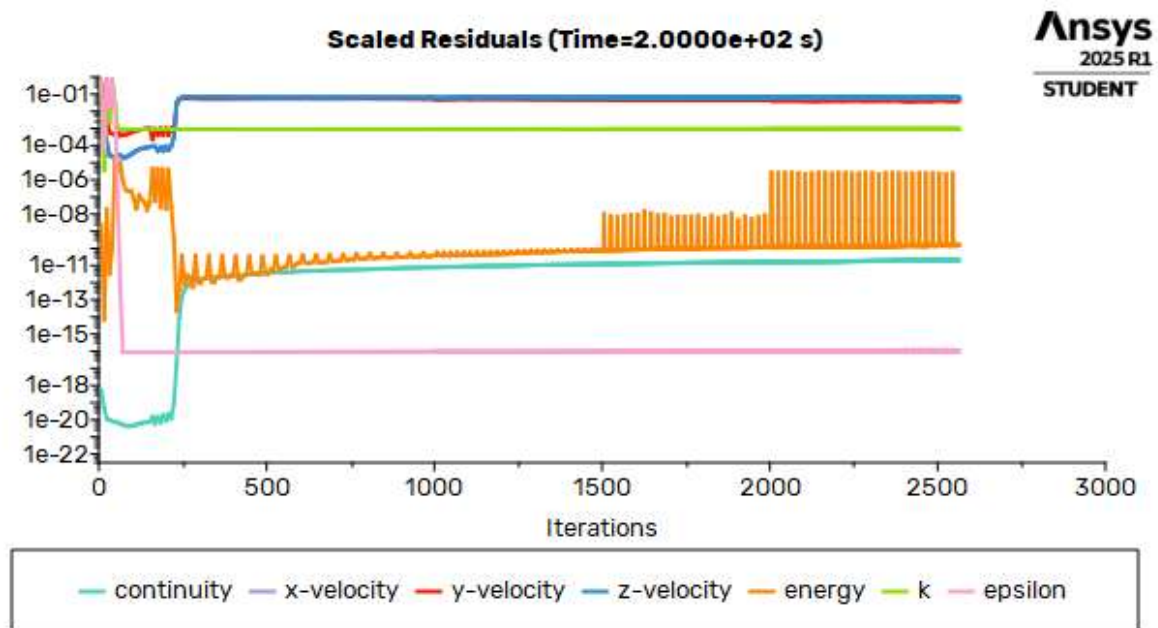


Figura C.3 – Resíduos para o escoamento a PCM